

УДК 551.521.64

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МЕТОДОМ ГИБРИДНОГО ИОНИЗАЦИОННОГО КАЛОРИМЕТРА**

¹⁾ Садыков Т.Х., ¹⁾ Аргынова А.Х., ¹⁾ Аргынова К.А., ¹⁾ Бейсенова А.Д., ¹⁾ Застрожнова Н.Н.,
^{1,2)} Искаков Б.А., ³⁾ Пискаль В.В., ³⁾ Рябов В.А., ⁴⁾ Садыков Ж.Т., ²⁾ Тастанова К.,
^{1,2)} Таутаев Е.М., ²⁾ Хабаргельдина М.

¹⁾ *Сатпаев Университет, ТОО «Физико-технический институт», Алматы, Казахстан*

²⁾ *Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

³⁾ *Физический институт академии наук России им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия*

⁴⁾ *Рыбинский авиационно-технический университет, Рыбинск, Россия*

В настоящее время в космических лучах при энергиях выше 10^{15} эВ наблюдается определенное число явлений в основном в области ствола (центра) широкого атмосферного ливня (ШАЛ), не укладывающихся в рамки традиционных представлений о ядерно-каскадном процессе в атмосфере. Если учесть, что область ствола радиусом до 10 метров на расстоянии 20–30 км от точки первого взаимодействия частицы, породившей ШАЛ, относится к практически недоступной на ускорителях области псевдобыстрот, то исследование центральной части ШАЛ является хорошим дополнением к ускорительным экспериментам. Возможно также, что в потоке космических лучей при энергии выше 10^{15} эВ могут присутствовать необычные частицы, которые являются первопричиной наблюдаемых аномальных явлений в экспериментах с космическим излучением и которые из-за своих свойств не наблюдаются в экспериментах на ускорителях. Комплексная установка «АДРОН-55» расположена на высоте 3340 метров над уровнем моря и входит в состав единой системы регистрации частиц космического излучения на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции. Установка «АДРОН-55» нацелена на решение ряда астрофизических и ядерно-физических задач: исследовании взаимодействий высокоэнергичных адронов в центральной части стволов ШАЛ, поиск источников космических лучей высоких энергий.

ВВЕДЕНИЕ

Физика космических лучей решает вопросы, связанные с происхождением и распространением космических лучей за пределами атмосферы. К ним относятся: изучение энергетического спектра и ядерного состава космических частиц, взаимодействие космических частиц с веществом атмосферы. Понимание энергетических флуктуаций в узком переднем конусе ШАЛ является одной из наиболее важных проблем физики космических лучей. Адронная и мюонная компоненты имеют важное значение для определения характера и степени воздействия КЛ на протекание многих глобальных процессов в атмосфере земли в силу мощных ионизирующих и радиационных эффектов, которые эти компоненты создают, проникая вглубь тропосферы и даже литосферы Земли.

Поиск и изучение энергетических и геометрических корреляций в узком переднем конусе множественных процессов является актуальной задачей современной физики высоких энергий. Первые необычные результаты в этом направлении были получены в исследованиях космических лучей в стратосферных и высокогорных экспериментах предыдущего поколения [1]. Прежде всего, следует отметить обнаружение двух эффектов, изучение которых продолжается до настоящего времени. Первое – это геометрическая прямолинейная выстроенность наиболее энергичных групп вторичных частиц [2] и второе – очень сильные флуктуации в распределениях энергии между адронной и электромагнитной компонен-

тами рожденных частиц [3]. В настоящее время структурные особенности явления выстроенности групп вторичных частиц в космических лучах изучаются на основе различных подходов к анализу струйных процессов в коллайдерных взаимодействиях при высоких энергиях [2, 4].

**ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ УСТАНОВКИ
«АДРОН-55»**

Комплексная установка «АДРОН-55» состоит из двухъярусного координатного ионизационного калориметра площадью 55 м^2 с общей толщиной поглотителя 1200 г/см^2 , а также центральной ливневой установки из 30 сцинтилляционных детекторов, расположенных в лабораторном корпусе, и периферийных сцинтилляционных детекторов вне здания на расстояниях 40 и 100 метров от центра ионизационного калориметра, рисунок 1.

Калориметр состоит из двух блоков-ярусов, разнесенных на 2,2 метра, рисунок 2-а. Верхний ярус, называемый гамма-блок, содержит 2 слоя ионизационных камер, расположенных во взаимно-перпендикулярных направлениях и слоя поглотителя из свинца толщиной 22 см. На гамма-блоке и вокруг него установлено 30 сцинтилляционных детекторов. Гамма-блок содержит 100 ионизационных камер в первом ряду и 138 камер во втором, разделенными свинцом общей толщиной 26 см или 310 г/см^2 . Этот блок служит для измерения энергии нейтральной и заряженной компонент космического излучения, а также определения траектории частиц.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МЕТОДОМ ГИБРИДНОГО ИОНИЗАЦИОННОГО КАЛОРИМЕТРА**

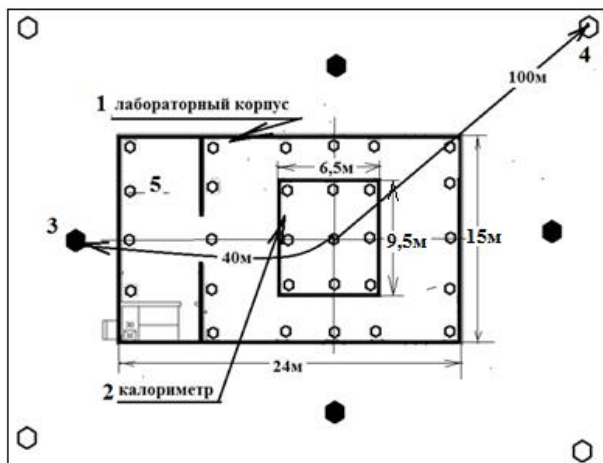


Рисунок 1. Схема расположения комплексной установки «АДРОН-55»: 1 – лабораторный корпус площадью 360 м²; 2 – ионизационный калориметр площадью 55 м²; 3, 4 – восемь Сц-детекторов, каждый площадью 1 м², расположенных вне лабораторного корпуса; 5 – 30 Сц-детекторов, каждый площадью 0,25 м², расположенных внутри лабораторного корпуса

Нижний ярус, называемый адронный блок, содержит 8 рядов ионизационных камер по 144 камеры в каждом ряду и расположенных во взаимно-перпендикулярных направлениях. В адронном блоке установлены модули с нейтронными и гейгеровскими счетчиками. Этот блок служит для измерения энер-

гии различных компонент космического излучения и определения траектории движения частиц.

Основные технические данные комплексной установки состоят из следующих характеристик: площадь ионизационного калориметра 55 м²; количество рядов с ионизационными детекторами 8; общее число измерительных камер составляет 1140; динамический диапазон измерения ионизации в камерах калориметра 3·10⁵; точность измерения энергии ШАЛ ~10%; временное разрешение задержек в сцинтилляционных детекторах 2-4 наносекунды; эффективная площадь регистрации комплексной установки «АДРОН-55» 31000 м²; точность измерения траектории ствола ШАЛ 0,2 град.; общая потребляемая электрическая мощность 3 кВт.

На рисунке 2-а представлен поперечный разрез калориметра. На рисунке 2-б показано взаимно-перпендикулярное расположение рядов ионизационных камер калориметра и нумерация камер в каждом ряду. Нечетные ряды 1, 3, 5, 7, разбиты на секции, обозначенные «left», «right» и «middle». Наименование секции left, right, middle, front, back выбраны относительно входной двери в зал гамма-блока на втором этаже.

Четные ряды 2, 4, 6, 8 также разбиты на секции, обозначенные «front» и «back».

В таблице 1 показано расположение каналов по секциям и рядам. Общее число каналов равно 1140.

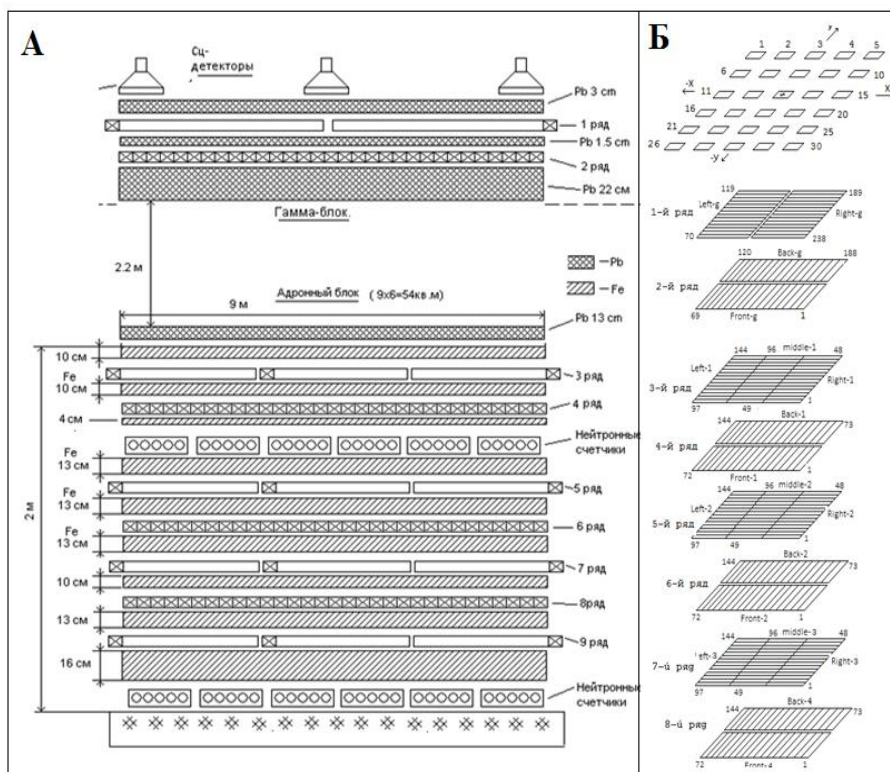


Рисунок 2. Схема ионизационного калориметра «АДРОН-55»: А – поперечный разрез калориметра. Б – расположение рядов ионизационных камер и сцинтилляционных детекторов

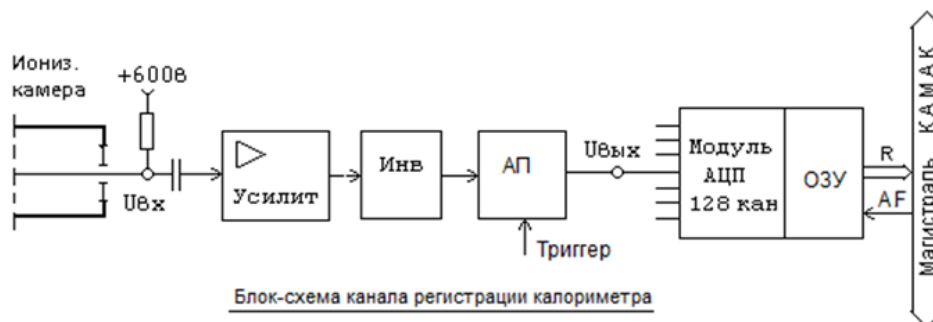


Рисунок 3. Блок-схема канала регистрации калориметра

Таблица 1. Расположение каналов по секциям и рядам

Ряд	front	back	left	middle	right	Всего
1	-	-	51-100	-	50-1	100
2	1-69	138-70	-	-	-	138
3	-	-	1-48	49-96	97-144	144
4	1-72	73-144	-	-	-	144
5	-	-	1-48	49-96	97-144	144
6	1-72	73-144	-	-	-	144
7	-	-	1-48	49-96	97-144	144
8	1-72	72-144	-	-	-	144
Всего						1102

БЛОК-СХЕМА СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рисунке 3 показана блок-схема отдельного канала регистрации ионизационного калориметра, который состоит из следующих звеньев: логарифмический усилитель (ЛУ); инвертор (Инв); аналоговая память (АП); аналого-цифровой преобразователь (АЦП); буферная память (ОЗУ).

Функциональное назначение и взаимодействие звеньев происходит следующим образом:

1. Сигнал с нити ионизационной камеры подается на логарифмический усилитель, который позволяет автоматически изменять коэффициент усиления: для малых сигналов около 5 мВ, усиление составляет $K=100$, для больших сигналов свыше 5 В коэффициент равен $K=0,2$. Это позволило получить широкий динамический диапазон для входных сигналов свыше $D=3 \cdot 10^3$ без насыщения усилителя. Таким образом АЦП, имеющий диапазон $D=4 \cdot 10^4$, позволяет измерять сигналы в диапазоне $D=3 \cdot 10^5$. Обратное восстановление кода в сигнал в мВ выполняется программно.

2. Инвертор (Инв) позволяет отрицательный сигнал с выхода усилителя преобразовать в положительный для подачи его на вход ячейки аналоговой памяти, выполненной на микросхеме СМР04 и работающей только с положительными входными импульсами. Ячейка аналоговой памяти (АП), выполненная на

микросхеме СМР-04, позволяет короткие сигналы от ионизационных камер, равные 10–20 мкс удлинять до 1 минуты или, другими словами, импульсный сигнал преобразуется в потенциал, поскольку цикл преобразования длится более 500 мкс.

3. Потенциальный сигнал с выхода аналоговой памяти поступает на АЦП (микросхема AD7888), на который также подаются 16 тактовых импульсов схемы управления. Из них: первые 4 такта – служебные, а 12 тактов: с 5-го по 16-й сопровождают биты последовательного 12-ти разрядного кода на выходе микросхемы, причем старшими разрядами вперед. Импульсы последовательного кода далее поступают на вход буферной памяти (микросхема 537PУ8) и запоминаются в ней в формате последовательного кода.

4. Модуль АЦП-128 содержит 16 микросхем АЦП типа AD7888 по 8 каналов в каждой микросхеме. Общее число каналов равно $16 \cdot 8 = 128$ каналов. Полное число тактовых импульсов равно $16 \cdot 16 = 256$ тактов. Полное время цикла записи равно $T = 256 \cdot 2 = 512$ мкс. Временная диаграмма цикла записи показана на рисунке 4.

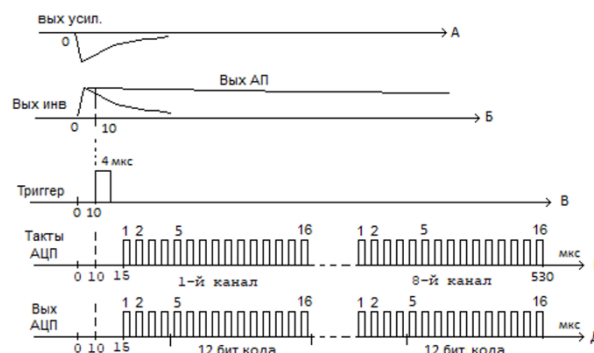


Рисунок 4. Временная диаграмма цикла записи АЦП

УСИЛИТЕЛЬ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ КАЛОРИМЕТРА

Усилитель ионизационной камеры установлен непосредственно в торцах ионизационных камер. Там же смонтирована схема подачи высокого напряжения, равного +600 В и установлен разделительный конденсатор, через который сигнал с нити камеры снимается и подается на усилитель.

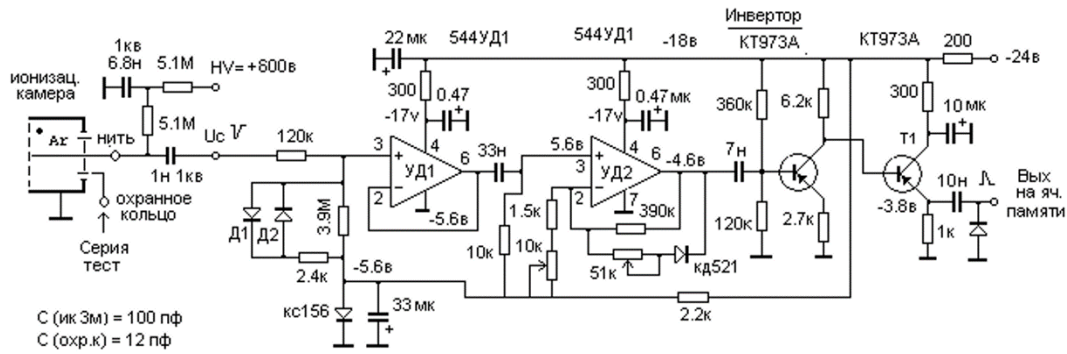


Рисунок 5. Электрическая схема квази-логарифмического усилителя ионизационной камеры

Усилитель имеет 2 каскада, собранных на операционных усилителях типа 544УД1. Логарифмическое преобразование входного сигнала происходит за счет диодов Д1 и Д2 на входе усилителя и диода КД521 в цепи обратной связи второго каскада усиления. Это позволило получить динамический диапазон для входных сигналов свыше $D=3 \cdot 10^5$ (рисунок 5).

ЛИВНЕВАЯ УСТАНОВКА

Центральный сцинтилляционный ковер расположен на втором этаже лабораторного корпуса. Часть его установлена на гамма-блоке калориметра (см. в верхней части рисунка 2-б). Его задачей является: измерение плотности потока электронно-фотонной компоненты ШАЛ (функция пространственного распределения); получение триггера запуска установки по приходу ШАЛ в круге, радиуса 12 м;

Сцинтилляционный ковер содержит 30 сцинтилляционных детекторов, установленных внутри здания на уровне верхнего ряда ионизационных камер калориметра с шагом 3 м. На рисунке 6 показана конструкция сцинтилляционного детектора ливневой подсистемы установки «АДРОН-55».

На рисунке 7 приведена электрическая схема усилителя сигналов фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) с динамическим диапазоном более 10^5 . Это достигается применением схемы усилителя с тремя поддиапазонами, каждый из которых имеет диапазон 10^2 . Малые сигналы снимаются с выхода (вых1), где усиление максимальное за счет операционного усилителя УД2.

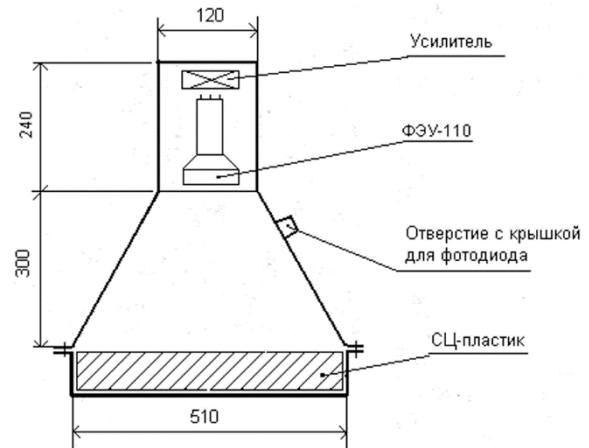


Рисунок 6. Конструкция сцинтилляционного детектора

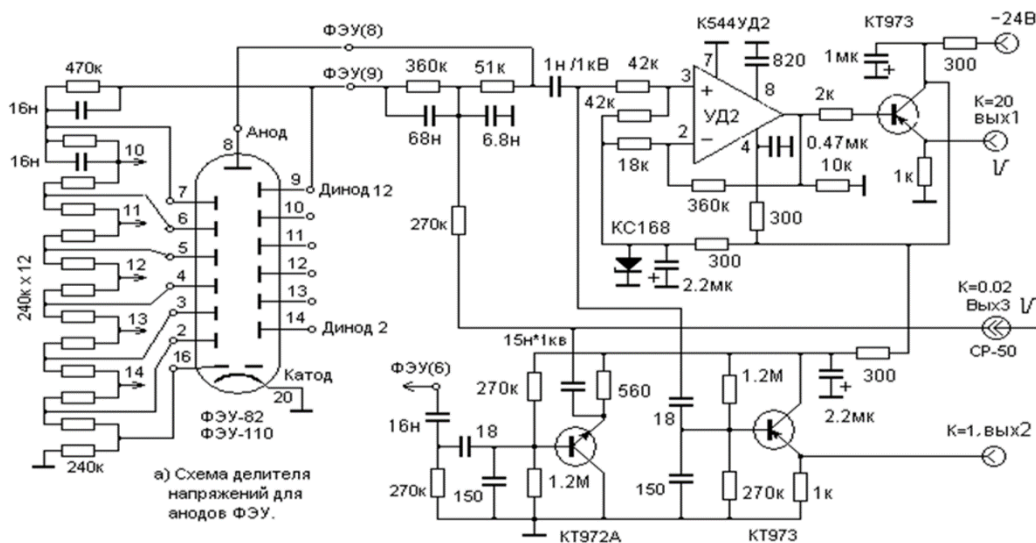


Рисунок 7. Схема усилителя сцинтилляционного детектора

Средние сигналы снимаются с анода ФЭУ и емкостного делителя (вых2), где коэффициент передачи сигнала составляет 0,1. Сигналы старшего поддиапазона снимаются с выхода (вых3) или 9-го диода, на котором уровень сигнала на 2 порядка меньше. Приведенный к аноду, коэффициент передачи равен 0,01.

Выводы

Комплексная установка «АДРОН-55» является уникальным сооружением, расположенным на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции на высоте 3340 метров над уровнем моря.

Для 4 скинтилляторов, расположенных на расстоянии 100 метров от центра установки, используется четырехканальный осциллограф «Тетроникс» с временным разрешением 4 наносекунды.

К настоящему времени зарегистрировано более 120000 событий с энергией выше 10^{15} эВ. Большой накопленный статистический материал позволил нам наряду со стандартной обработкой, т.е. изучением

энергетических спектров, коэффициентов неупругости, ядерных пробегов взаимодействия и т.д., проводить индивидуальный анализ зарегистрированных взаимодействий путем сопоставления прохождения лавин из уровня в уровень начиная из гамма-блока, первый уровень в уровни адронного блока. Такой подход к изучению ядерных взаимодействий существенно отличается от принятого в ускорительных работах инклюзивного способа, где фиксируются все взаимодействия и выделяется лишь одна реакция. В последние годы тщательное исследование отдельных событий – эвентуальный подход получил широкое распространение в космических лучах в связи с уникальностью необычных свойств анализируемых взаимодействий.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке проекта № BR05236291 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. К.М. Мукашев, Т.Х. Садыков /Физика, астрофизика космических лучей и аномальные эффекты в адронных взаимодействиях/ Монография ISBN 978-601-232-538-6, Алматы 2011.
2. The CMS Collaboration* Observation of Long-Range, Near-Side Angular Correlations in Proton-Proton Collisions at the LHC / arXiv:1009.4122v1 [hep-ex] 21 Sep 2010.
3. L. T. Baradzei et al. [Pamir Collaboration], Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 50N11, 46 (1986) [Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 50, 2125 (1986)]; MGU-89-67-144 (1989); Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 55N4, 24 (1991) [Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 55, 650 (1991)]; Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 57, 612 (1993) [Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz. 57N4, 40 (1993)].
4. Argynova A.Kli., Kochelev N.I., Rvochkina T.N., Loktionov A.A., Sadykov T.Kh., Zastrozhnova N.N., Tautayev Y.M., Toknioldin S.Zli. // Proton and light ion interactions in cosmic ray experiment "stratosphere" in die comparison with the recent collider results. // The 34th International Cosmic Ray Conference. The Hague. The Netherlands. – 2015. – Vol. 236. <https://pos.sissa.it/236/244>.

ГИБРИД ИОНИЗАЦИЯЛЫҚ КАЛОРИМЕТЕР ӘДІСІМЕН ҒАРЫШ СӘУЛЕЛЕРІНІҢ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІН ЗЕРТТЕУ

¹⁾ Т.Х. Садыков, ¹⁾ А.Х. Аргынова, ¹⁾ К.А. Аргынова, ¹⁾ А.Д. Бейсенова, ¹⁾ Н.Н. Застрожнава,
^{1,2)} Искаков Б.А., ³⁾ В.В. Пискаль, ³⁾ В.А. Рябов, ⁴⁾ Ж.Т. Садыков, ²⁾ К. Тастанова,
^{1,2)} Е.М. Таутаев, ²⁾ М. Хабаргельдина

¹⁾ Сәтбаев Университеті, ТОО «Физика-техникалық институт», Алматы, Қазақстан

²⁾ Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

³⁾ П.Н. Лебедева атындағы Ресей ғылым академиясының физикалық институты, Мәскеу, Ресей

⁴⁾ Рыбинск авиациялық және техникалық университеті, Рыбинск, Ресей

Қазіргі уақытта ғарыштық сәулелерде 10^{15} эВ-тан жоғары энергияларда белгілі бір құбылыстар көбінесе атмосферадағы ядролық каскадты процестің дәстүрлі тұжырымдамасына сай келмейтін кең әуедегі нөсер магистральдық аймағында байқалады. Егер КӨН құрастырған бөлшектердің бірінші өзара әрекеттесу нүктесінен 20–30 км қашықтықта 10 метрге дейінгі радиусы бар магистральдық аймақ үдеткішке қол жеткізе алмайтын псевдостерстік аймағына жататын болса, онда КӨН орталық бөлігін зерттеу үдеткіш эксперименттеріне жақсы қосымша болып табылады. Космостық сәулелену эксперименттеріндегі байқалған ауытқушылық құбылыстарының негізгі себебі болып табылатын және олардың қасиеттеріне байланысты үдеткіш эксперименттерінде байқалмайтын 10^{15} эВ-тан жоғары энергиялардағы ғарыштық сәулелер ағынында ерекше бөлшектер болуы мүмкін. «АДРОН-55» кешенді қондырғысы теңіз деңгейінен 3340 метр биіктікте орналасқан және Тянь-Шань биік ғылыми станциясында ғарыш сәулелерінің бөлшектерін тіркеудің бірыңғай жүйесіне кіреді. «АДРОН-55» қондырғысы бірнеше астрофизикалық және ядролық физиканың проблемаларын шешуге бағытталған: жоғары энергиялық адрондардың КӨН-ның орталық бөлігінде өзара әрекеттесуін зерттеу, жоғары энергиялық ғарыш сәулелерінің көздерін іздеу.

**STUDY OF THE INTERACTION OF PARTICLES OF SPACE RADIATION
BY THE HYBRID IONIZATION CALORIMETER METHOD**

¹⁾ T.Kh. Sadykov, ¹⁾ A.Kh. Arginova, ¹⁾ K.A. Argynov, ¹⁾ A.D. Beisenova, ¹⁾ N.N. Zastrozhnova,
^{1,2)} B.A. Iskakov, ³⁾ V.V. Piscal, ³⁾ V.A. Ryabov, ⁴⁾ Zh.T. Sadykov, ²⁾ K. Tastanova,
^{1,2)} Y.M. Taytaev, ²⁾ M. Khabargeldina

¹⁾ *Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

³⁾ *P.N. Lebedeva Physical Institute of the Academy of Sciences of Russia, Moscow, Russia*

⁴⁾ *Rybinsk Aviation and Technical University, Rybinsk, Russia*

At present, in cosmic rays at energies above 10^{15} eV, a certain number of phenomena are observed mainly in the trunk (center) region of a wide air shower (EAS) that do not fit into the traditional concepts of the nuclear cascade process in the atmosphere. If we consider that the trunk region with a radius of up to 10 meters at a distance of 20–30 km from the point of the first interaction of a particle that produced an EAS, belongs to the pseudo-fastness region that is inaccessible on accelerators, then the study of the central part of EAS is a good addition to accelerator experiments. It is also possible that unusual particles can be present in the cosmic-ray flux at energies above 10^{15} eV, which are the primary cause of the observed anomalous phenomena in experiments with cosmic radiation and which, due to their properties, are not observed in accelerator experiments. The complex installation “ADRON-55” is located at an altitude of 3340 meters above sea level and is part of the unified system of registration of particles of cosmic radiation at the Tian-Shan high-altitude scientific station. The “ADRON-55” facility is aimed at solving a number of astrophysical and nuclear physics problems: the study of interactions of high-energy hadrons in the central part of EAS trunks, the search for sources of high-energy cosmic rays.