





T.X. Садыков<sup>1</sup> , X.K. Махмет<sup>1,2\*</sup> , O.A. Новолодская<sup>1</sup> ,  
V.V. Пискаль<sup>3</sup> , A.X. Аргынова<sup>1</sup> , K.A. Аргынова<sup>1</sup> ,  
A.M. Алменова<sup>1</sup> , V.V. Жуков<sup>3</sup> , V.I. Осенмук<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Satbayev University, Физико-технический институт, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Тянь-Шаньская высокогорная научная станция, г. Алматы, Казахстан

\*e-mail: [hansh2210@gmail.com](mailto:hansh2210@gmail.com)

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ НА ВЫСОТЕ ГОР

В физике высоких энергий одним из основных направлений являются широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Этот феномен в настоящее время остается малоизученным: ученым неизвестна природа их возникновения, механизмы формирования в высших слоях атмосферы и другие. В данной статье были описаны главные характеристики атмосферных ливней и их основные свойства. Основой исследований ШАЛ послужили многочисленные эксперименты, проведенные на комплексной установке «Адрон-55». Ливни были записаны и обработаны методом ионизационного калориметра, суть которого состоит в том, чтобы измерять энергию ШАЛ суммарной ионизацией частиц. Данный калориметр с поглотителями из железа и свинца обеспечивает высокую точность измерений, экспериментальная ошибка которых составляет всего 10%. Обработка экспериментальных данных осуществлялась программой, разработанной на языке C++. Эксперименты показали, что самые распространенные частицы в ливнях – электронно-фотонная и адронная компоненты, доля которых составляет 95–98% частиц в стволе ливня. Программой было обработано 8717 ливней за время равное 485 часов. Анализ энергетического диапазона зарегистрированных ливней подтверждает теорию их галактического происхождения. Также вычисление основных параметров дает возможность проводить дальнейшие исследования ШАЛ в более развернутом виде.

**Ключевые слова:** космические лучи, широкие атмосферные ливни, физика высоких энергий, ионизационный калориметр, ионизация.

T.Kh. Sadykov<sup>1</sup>, Kh.K. Makhmet<sup>1,2\*</sup>, O.A. Novolodskaya<sup>1</sup>, V.V. Piskal<sup>3</sup>,  
A.Kh. Argynova<sup>1</sup>, K.A. Argynova<sup>1</sup>, A.M. Almenova<sup>1</sup>, V.V. Zhukov<sup>3</sup>, V.I. Osenmuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Tien-Shan high mountain scientific station, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: [hansh2210@gmail.com](mailto:hansh2210@gmail.com)

## Main parameters of extensive air showers at mountain altitudes

In high-energy physics, one of the key areas of research is the study of extensive air showers (EAS). This phenomenon remains insufficiently understood; scientists still lack comprehensive knowledge about the nature of their origin and the mechanisms responsible for their formation in the upper layers of the atmosphere. In this paper, the main characteristics and properties of air showers are described in detail. Numerous experiments conducted at the Hadron-55 complex form the foundation of EAS research. The showers were recorded and analyzed using the ionization calorimeter method, which measures the energy of EAS by detecting the total ionization produced by particles. This calorimeter, equipped with iron and lead absorbers, ensures high measurement accuracy, with an experimental error of only 10%. The experimental data were processed using a program developed in C++. The experiments revealed that the most common particles in the showers are electron-photon and hadronic components, which account for 95-98% of the particles in the shower core. A total of 8717 showers were processed by the program over a period of 485

hours. An analysis of the energy range of the registered showers supports the theory of their galactic origin. Additionally, calculating the primary parameters allows for further, more detailed studies of EAS.

**Key words:** cosmic rays, extensive air showers, high energy physics, ionization calorimeter, ionization

Т.Х. Садыков<sup>1</sup>, Х.Қ. Махмет<sup>1,2\*</sup>, О.А. Новолодская<sup>1</sup>, В.В. Пискаль<sup>3</sup>,  
Ә.Х. Арғынова<sup>1</sup>, К.А. Арғынова<sup>1</sup>, А.М. Әлменова<sup>1</sup>, В.В. Жуков<sup>3</sup>, В.И. Осенмұқ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Satbayev University, Физика-техникалық институты, Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

<sup>3</sup>Тянь-Шань биік таулы ғылыми станциясы, Алматы қ., Қазақстан

\*e-mail: hansh2210@gmail.com

## Таулардың биіктігіндегі кең атмосфералық нәсерлердің негізгі сипаттамалары

Жоғары энергетикалық физикада негізгі бағыттардың бірі кең атмосфералық нәсер (КАН) болып табылады. Бұл құбылыс қазіргі уақытта жеткілікті деңгейде зерттелмеген: ғалымдар олардың пайда болу табиғатын, атмосфераның жоғарғы қабаттарында қалыптасу механизмдерін және тағы басқа аспектілерін толық зерттемеген. Бұл мақалада ауа нәсерлердің негізгі сипаттамалары және олардың негізгі қасиеттері сипатталған. Зерттеудің негізі болып "Адрон-55" кешенді қондырғысында КАН-ді жүргізілген көптеген эксперименттер болды. Нәсерлер иондаушы калориметр әдісімен тіркеліп, өңделді. Атмосфералық нәсерлер бөлшектердің жалпы иондалуы арқылы КАН-дің энергиясын өлшейтін ионданушы калориметр әдісімен тіркеліп, өңделді. Бұл калориметр темір мен қорғасын сіңіргіштерімен жабдықталған, ол жоғары өлшеу дәлдігін қамтамасыз етеді, ал эксперименттік қателік небәрі 10%-ды құрайды. Эксперименттік деректер C++ тілінде әзірленген бағдарламамен өңделді. Эксперименттер көрсеткендей, нәсерлердегі ең көп таралған бөлшектер — электронды-фотондық және адрондық компоненттер, олардың үлесі нәсер өзегіндегі бөлшектердің 95-98%-ын құрайды. Бағдарлама 485 сағат ішінде 8717 нәсерді өңдеді. Тіркелген нәсерлердің энергетикалық диапазонын талдау олардың галактикалық табиғаты теориясын растайды. Сонымен қатар, негізгі параметрлерді есептеу кең атмосфералық нәсерлерді одан әрі тереңірек зерттеуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** ғарыштық сәулелер, кең атмосфералық нәсер, жоғары энергетикалық физика, иондану калориметрі, иондану.

## Введение

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ) образуются в результате взаимодействия первичной космической частицы с атмосферой Земли. Космические лучи представляют собой стабильные частицы и атомные ядра, зародившиеся и ускоренные до высоких энергий в отдаленных уголках Вселенной. Хотя до уровня наблюдений доходят только отдаленные потомки первичной частицы (за исключением высокоэнергетических мюонов, возникающих на начальных этапах каскада), некоторые свойства первичного взаимодействия все же можно проследить через цепочку последующих взаимодействий.

В основе представления о широком атмосферном ливне (ШАЛ) лежит модель ядерного каскада. Принято считать, что широкий атмосферный ливень — это гигантский электрон-ядерный поток частиц, в котором достигают полного расцвета все элементарные частицы, содержащиеся в пределах атмосферы при

умеренных энергиях, и характерные для ШАЛ: электрон-фотонная, адронная и мюонная компоненты, излучение Вавилова-Черенкова, радиоизлучение и др. Фотоны и электроны самые распространённые частицы в ливне — их доля от полного числа частиц составляет примерно 95–98% в центральной части и 80% на расстоянии 200–250 м от центра ливня. Поэтому самым простым и надежным методом исследования атмосферных ливней долгое время считалась регистрация их электронно-фотонной компоненты.

Широкие атмосферные ливни состоят из трех основных компонентов: *электронно-фотонной, мюонной и ядерно-активной*. Для измерения потока энергии электронно-фотонной компоненты используются специальные детекторы, размещенные в различных точках комплексной установки. Было замечено, что широкий атмосферный ливень постоянно обновляется за счет подпитки ядерными компонентами высокой энергии в его стволе, и в глубине атмосферы электронно-фотонная компо-

нента (ЭФК) находится в равновесии с высокоэнергетическими ядерно-активными частицами.

Таким образом, ШАЛ предоставляют уникальную возможность исследовать характеристики взаимодействия частиц сверхвысоких энергий с атомными ядрами.

### Материалы и методы

Для изучения основных свойств и параметров ШАЛ необходимо использовать комплексные установки. Наблюдения за ливнями осуществляются с помощью Тянь-Шаньской высокогорной установки под названием «Адрон-55», находящаяся на высоте 3340 м над уровнем моря, недалеко от г. Алматы. На рисунке 1 представлена схема ионизационного калориметра. «Адрон-55» включает в себя 2-х-ярусный

координатный ионизационный калориметр площадью 55 м<sup>2</sup> с общей толщиной поглотителя 1200 г/см<sup>2</sup> и центральную ливневую установку из 30 сцинтилляционных детекторов площадью около 320 м<sup>2</sup> и 8 периферийных сцинтилляционных счетчиков на расстоянии до 100 м. На рис.1 показан схематический план установки Адрон-55, состоящая из центральной и периферийной частей.

Ионизационный калориметр используется для изучения характеристик взаимодействий адронов в стволах широких атмосферных ливней (ШАЛ). Калориметр состоит из двух частей: верхней, называемой гамма-блок, и нижней, называемой адронный блок. Эти части расположены вертикально на расстоянии 2,2 м друг от друга для проведения экспериментов по поиску чармированных частиц.

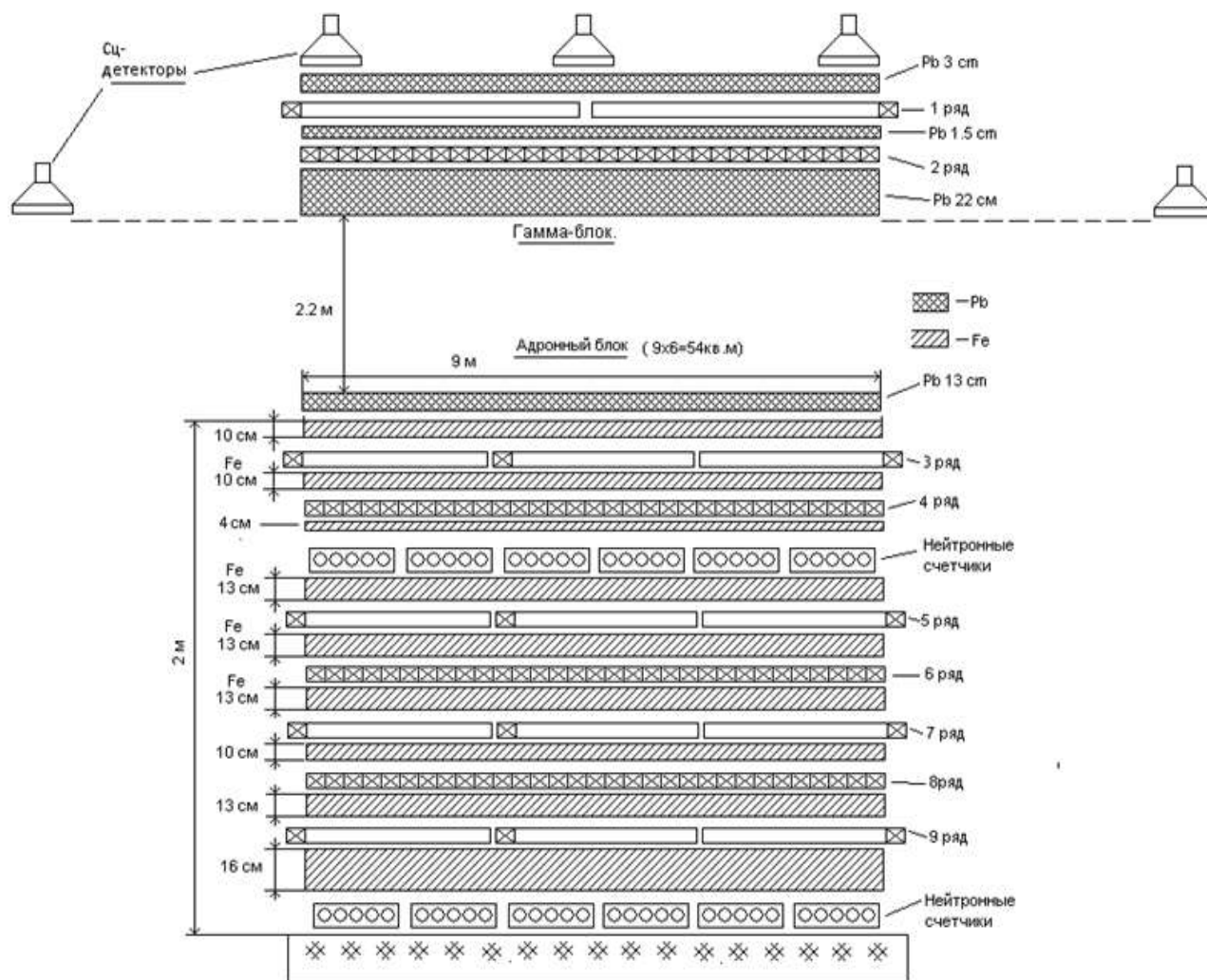


Рисунок 1 – Общий вид установки Адрон 55. Поперечный разрез калориметра

Гамма-блок включает два ряда ионизационных камер: 100 камер в первом ряду и 138

камер во втором, разделенных свинцовым экраном толщиной 26 см или 310 г/см<sup>2</sup>.

Адронный блок состоит из железного поглотителя с полостями, в которых установлены ионизационные камеры. Этот блок предназначен для измерения энергии компонентов космического излучения и определения траекторий частиц, что позволяет более детально изучать характеристики взаимодействий частиц космического излучения. Адронный блок содержит 4 ряда ионизационных камер, по 144 камеры в каждом ряду, расположенных взаимно-перпендикулярно с поглотителем из железа между рядами [23]. Ошибка в определении энергии взаимодействия в ионизационном калориметре толщиной 1100 г/см<sup>2</sup> и шести уровней наблюдения составляет менее 10%.

### Определение основных параметров ШАЛ

В ходе экспериментов были выявлены следующие параметры ливня: число электронов  $N_e$ , энергия  $E$ , координаты оси ливня  $X$ ,  $Y$ , зенитный  $\theta$  и азимутальный  $\varphi$  углы.

#### Нахождение углов ствола ливня.

Углы  $\theta$  и  $\varphi$  определяются по разности времени прихода фронта ШАЛ. На рис. 2 отображена схема местоположения 2-х групп сц-детекторов по 4 детектора в каждой группе,

расположенных по окружности радиуса 40 м и радиуса 100 м соответственно.

Вычисление прихода оси ливня осуществляется по относительной задержке импульсов в двух парах сцинтилляторов, расположенных на расстоянии 40 м друг от друга в 2 соседних домиках, размещенных во взаимно перпендикулярных направлениях. Точность измерения зенитного угла  $\sim 5^\circ$ .

#### Определение числа частиц в ионизационном калориметре.

Сигнал с нити ионизационной камеры подается на логарифмический усилитель, который позволяет автоматически изменять коэффициент усиления: для малых сигналов около 5 мV усиление составляет  $K=100$ , для больших сигналов свыше 5 в –  $K=0.2$ . Это позволило получить широкий динамический диапазон для входных сигналов свыше  $D=3 \cdot 10^5$  без насыщения усилителя. На рисунке 2 проиллюстрировано схематическое изображение канала регистрации калориметра. Таким образом, АЦП с диапазоном  $D=4095$  или  $4 \cdot 10^3$ , позволяет измерять сигналы в диапазоне  $D=3 \cdot 10^5$ . Обратное восстановление кода в сигнал в мV выполняется программно.

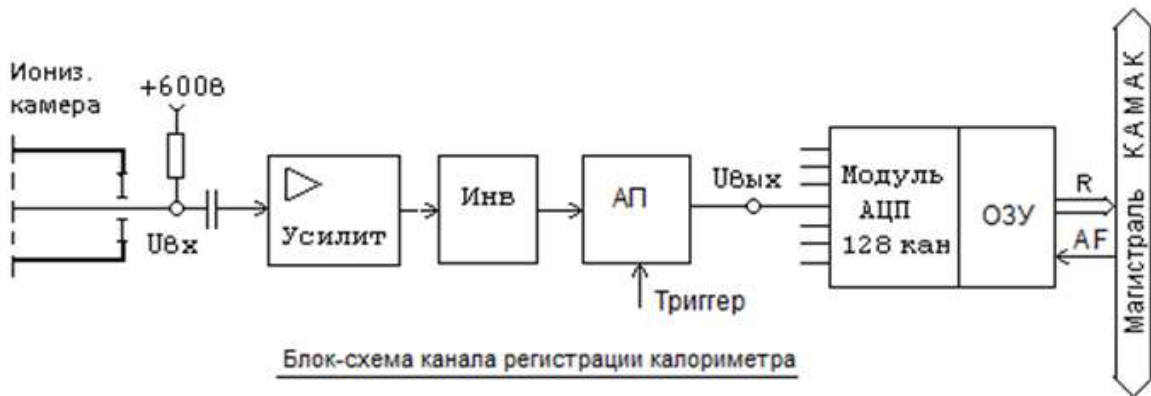


Рисунок 2 – Блок-схема канала регистрации калориметра

Сигнал на вход усилителя  $U_{вх}$  поступает с нити ионизационной камеры. Следовательно, сигнал на выходе усилителя  $U_e(вых)$  с коэффициентом усиления  $K=100$  от одного электрона равен:

$$U_e(вых) = U_{вх} \cdot K = U_{вх} \cdot 100 = 390 \text{ мкВ} = 0.39 \text{ мВ} \quad (1)$$

откуда ионизация равна:

$$n_e = \frac{U_{вх}}{U_e} \quad (2)$$

Ионизация  $n_e$  есть число частиц, зарегистрированное в ряду калориметра. Значит полное число электронов в ливне будет равно:

$$N_e = \sum_{i=1}^8 n_e \quad (3)$$

Энергия ШАЛ, выделившаяся в калориметре

Энергия электронно-ядерной лавины  $E$  является суммой трех типов энергии: энергии, выделившейся в железном поглотителе, энергии

электронно-фотонного каскада, образовавшегося в свинцовом поглотителе калориметра, и корректировки на энергию, ушедшую за пределы калориметра и не зарегистрированную из-за конечной толщины поглотителя.

$$E = E_{pb} + E_{Fe} + E_{\text{попр}} \quad (4)$$

Энергия  $E_{pb}$  определялась как число частиц в пике электронно-фотонного каскада, при этом вводился коэффициент 1.7 для измеряемого числа частиц ионизационной камерой, который необходим при учетывании переходного эффекта на границе свинец-медь (толщина стенки ионизационной камеры равна 3 мм). Точность определения энергии ЭФК по числу частиц в максимуме его развития составляет 30%.

#### Вычисление координат оси ливня

При нахождении координат оси ливня были учтены следующие предположения:

- около оси ливня плотность потока частиц максимальная;
- ливень имеет аксиальную симметрию, иными словами плотность потока ливневых частиц зависит только от расстояния до оси ливня и не зависит от азимутального угла.

Для определения одной координаты оси  $X$  используется ковер сцинтилляционных детекторов, содержащий 5 рядов по 6 счетчиков в каждом. Два крайних счетчика в каждом ряду исключаются из расчетов. Счетчики в ряду расположены вдоль оси, перпендикулярной искомой координате. Затем определяется ряд с наибольшей плотностью потока частиц:

$$\rho_{j \max} = \sum_{i=1}^6 \rho_{ij} / 4 \quad (5)$$

где  $j$  – номер ряда,  $i$  – номер сцинтиллятора в ряду. Величина координаты  $X$  оси ливня определяется методом центра тяжести:

$$X = \frac{\sum_{j=j \max-1}^{j \max+1} \rho_j x_j}{\sum_{j=j \max-1}^{j \max+1} \rho_j}, \quad (6)$$

где  $x_j$  – координата  $j$ -ого ряда относительно центра установки. Если найденная этим методом координата оси ливня лежит в пределах 3.5 м ( $|X| < 3.5$  м), то координата оси  $X$  считается найденной правильно. Аналогичным образом находится и координата  $Y$  оси ливня.

## Результаты и обсуждение

Регистрация широких атмосферных ливней проводилась с 2019 года. В банк данных было записано 8717 ливней с  $N_e > 6.4 \cdot 10^4$ , оси которых лежат в круге радиусом 18 м, зарегистрированных за время 485 часов. На рисунке 3 отображена гистограмма распределения ионизации во всех рядах калориметра, а зеленая линия показывает траекторию струи ливня через всю установку в проекциях  $X$  и  $Y$ .

При осмотре событий из вторичного банка было обнаружено, что 90% ядерного состава ливней – легкие электроны и фотоны, которые поглощаются свинцом уже в первых 3 слоях калориметра. Тяжелые частицы, проходящие через все слои калориметра достаточно редки. Прослеживается такая статистика: пик частоты событий обнаружено с числом электронов от  $N_e = 1.9 \cdot 10^5$  до  $5.2 \cdot 10^5$ . Более детально о первичном анализе данных с ТШНВС изложено в работе [3].

На рисунке 3 показан паспорт ливня, зарегистрированный 1 января 2021 года. Как видно из рисунка это “молодой” ливень с числом частиц  $N_e \sim 5.6 \cdot 10^5$  и энергией равной 25 ТэВ. Зелеными линиями отображена траектория оси ливня в двух проекциях: в четной и нечетной. Поскольку координаты оси ливня почти совпадают с координатами центра установки, то его ось на находится почти посередине сцинтилляционного ковра. Это довольно распространенный тип ливней, зарегистрированных установкой.

## Заключение

Широкие атмосферные ливни являются интересным феноменом в физике высоких энергий. Поскольку ШАЛ были открыты относительно недавно, то предоставляют широкий полигон для исследований. В данной статье были изложены их основные параметры и методы их нахождения. Определение этих параметров позволяет сделать первичный анализ о поведении и свойствах ливней и являются фундаментом для дальнейших исследований.

## Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта (грант №АР19679396) при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан.

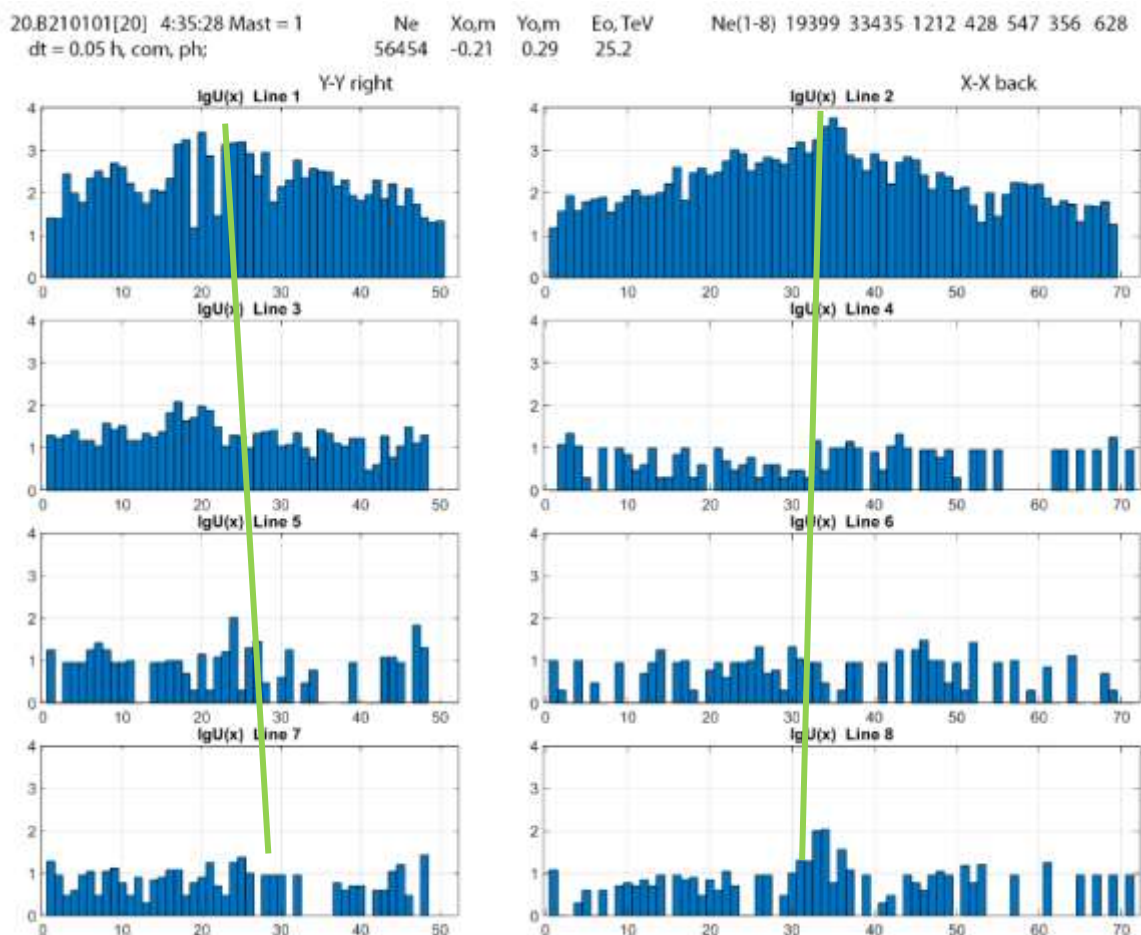


Рисунок 3 – Паспорт ливня с адронной компонентой

### Литература

- 1 Pryga, J.S., Stanek, W., Woźniak, et al. Analysis of the Capability of Detection of Extensive Air Showers by Simple Scintillator Detectors // *Universe* – 2022 – Vol. 8. – P.425.
- 2 Shaulov S.B., P.F. Beyl et al. Investigation of EAS cores // *EPJ Web Conf.* 145, ISVHECRI 2016 – XIX International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (26 June 2017), 17001.
- 3 Fabjan, C.W., Fournier, D. Calorimetry // In: Fabjan, C., Schopper, H. (eds) *Particle Physics Reference Library*. Springer, Cham. – 2020 – P. 201–280.
- 4 Kadhom F. Fadhela; b, & Al-Rubaiee, et. al. Reconstruction of Air-Shower Parameters through Lateral Distribution Function of Ultra-High Energy Particles // *Acta physica polonica* – 2021– Vol. 140 – P. 344-349.
- 5 Mukhamedshin, R., Sadykov, T., Serikkanov, A., 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.* – 2023 – Vol. 13 – P.2507.
- 6 Sadykov, T., Mukhamedshin R., Galkin V., et al. First Results of Studying EAS Cores Using a High-Mountain Ionization Calorimeter // *Particles* – 2024 – Vol. 7(1) – P. 40-51.
- 7 Stenkin, Y.V. Overview on EAS Neutrons: Recording and Simulations // *Phys. Atom. Nuclei* – 2023 – Vol. 86 – P. 1090–1094.
- 8 García-León, M. Scintillation Detectors. In: *Detecting Environmental Radioactivity // Graduate Texts in Physics*. Springer, Cham. – 2022 – P. 299–337.
- 9 Cates, Joshua; Choong, Woon-Seng; Brubaker, Erik. Scintillation and Cherenkov Photon Counting Detectors with Analog Silicon Photomultipliers for TOF-PET // *TechRxiv. Preprint* – 2023 – 25 p.
- 10 Giuseppe Di Sciascio. The full coverage approach to the detection of Extensive Air Showers // *21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions.* – 2023 – *SciPost Phys. Proc.* 13, 019.
- 11 Cao, Z., Aharonian, F.A., An, Q. et al. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12  $\gamma$ -ray Galactic sources // *Nature* – 2021 – Vol. 594 – P. 33–36.
- 12 Христиансен Г.Б.. Космические лучи сверхвысоких энергий. – М.: Атомиздат, 1975. – с. 117–118.

- 13 Грейзен К. Физика космических лучей – Москва, 1958 – Т. 3. – С.7.
- 14 В.С. Асейкин, И.Н. Киров, Н.М. Нестерова, Н.М. Никольская, С. И. Никольский и др. // Характеристики электронно-фотонной компоненты широких атмосферных ливней на высоте 3330 м над уровнем моря // Препринт № 142, ФИАН, Москва, 1976.
- 15 Адамов Д.С., Баркалов К.В., Вильданов Н.Г. и др. Пространственно-энергетические характеристики электронно-фотонной и адронной компонент шал с  $Ne = 5.105 \text{ — } 107$  на уровне гор. // Препринт № 187, ФИАН, Москва, 1989.
- 16 Moore E., Gendre B., Orange N. B., Panther F. H., Constraints on the ultra-high energy cosmic ray output of gamma-ray bursts // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* – 2024. – Vol.530 (1). – P.555-559.
- 17 Hao-Ning He, B. Theodore Zhang et. al. A Detectable Ultra-high-energy Cosmic-Ray Outburst from GRB 221009A // *Astrophys.J.* – 2024. – Vol. 963 (2). – P.109.
- 18 Григоров Н. Л., Рапопорт И. Д., Шестоперов В. Я. // Частицы высоких энергий в космических лучах: монография. - Москва: Наука, 1973. – С.15–17.
- 19 Асейкин В.С., Никольская Н.М., Павлюченко В.П. и др. // Универсальный алгоритм оценки основных параметров ШАЛ. Препринт № 31, ФИАН, Москва, 1987.
- 20 Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: учеб. пособие для вузов. – Москва: Логос, 2007. – 397 с.
- 21 Ziegler J.F. Terrestrial cosmic rays // *IBM Journal of Research and Development.* – 1996. – Vol. 40. – P.19-39.
- 22 Stanev T. Cosmic Rays and Extensive Air Showers. Elastic and Diffractive Scattering // *Proceedings, 13th International Conference, Blois Workshop, CERN, Geneva, Switzerland, (June 29-July 3, 2009).*
- 23 Пискаль В.В., Жуков В.В. Комплексная установка «Адрон-55» для исследования характеристик взаимодействия частиц сверхвысоких энергий в космических лучах. Техническое описание, 2017. – С.5.
- 24 Sommers P. Extensive air showers and measurement techniques // *Comptes Rendus Physique.* – 2005. – Vol.5. Iss.4 – P. 463-472.
- 25 Voronin D., et al. Calibration system of EAS Cherenkov arrays using commercial drone helicopter. 37th International Cosmic Ray Conference — ICRC 2021 (Berlin, 12–23 July, 2021).

#### References

- 1 J.S. Pryga, W. Stanek, Wo'zniak, et al. *Universe*, **8**, 425 (2022).
- 2 S.B. Shaulov, P.F. Beyl, et al., *EPJ Web Conf.* 145, 17001 (2017).
- 3 C.W. Fabjan, D. Fournier, in *Particle Physics Reference Library*, eds. C. Fabjan and H. Schopper (Springer, Cham, 2020), p. 201–280.
- 4 F.F. Kadhom, Al-Rubaiee et al., *Acta Phys. Pol.* 140, 344-349 (2021).
- 5 R. Mukhamedshin, T. Sadykov, A. Serikkanov et al., *Appl. Sci.* 13, 2507 (2023).
- 6 T. Sadykov, R. Mukhamedshin, V. Galkin et al., *Particles* 7, 40-51 (2024).
- 7 Y.V. Stenkin, *Phys. Atom. Nuclei* 86, 1090–1094 (2023).
- 8 M. García-León, in *Detecting Environmental Radioactivity, Graduate Texts in Physics* (Springer, Cham, 2022), p. 299–337.
- 9 J. Cates, W.S. Choong, E. Brubaker, *TechRxiv. Preprint* (2023), 25 p.
- 10 G. Di Sciascio, *SciPost Phys. Proc.* 13, 019 (2023).
- 11 Z. Cao, F.A. Aharonian, Q. An et al., *Nature* 594, 33–36 (2021).
- 12 G.B. Khristiansen, *Kosmicheskie Luchi Sverkhvysokikh Energii* (Atomizdat, Moscow, 1975), p. 117–118. (in Russ).
- 13 K. Greisen, *Fizika Kosmicheskikh Luchey* (Moscow, 1958), Vol. 3, p. 7. (in Russ).
- 14 V.S. Aseikin, I.N. Kirov, N.M. Nesterova, N.M. Nikolskaya, S.I. Nikolsky et al., *Preprint No. 142, FIAN, Moscow* (1976). (in Russ).
- 15 D.S. Adamov, K.V. Barkalov, N.G. Vildanov et al., *Preprint No. 187, FIAN, Moscow* (1989). (in Russ).
- 16 E. Moore, B. Gendre, N.B. Orange, F.H. Panther, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 530, 555-559 (2024).
- 17 H.-N. He, B. Theodore Zhang et al., *Astrophys. J.* 963, 109 (2024).
- 18 N.L. Grigorov, I.D. Rapoport, V.Ya. Shestoperov, *Chastitsy Vysokikh Energii v Kosmicheskikh Luchey* (Nauka, Moscow, 1973), pp. 15–17. (in Russ).
- 19 V.S. Aseikin, N.M. Nikolskaya, V.P. Pavlyuchenko et al., *Preprint No. 31, FIAN, Moscow* (1987). (in Russ).
- 20 V.S. Murzin, *Astrofizika Kosmicheskikh Luchey* (Logos, Moscow, 2007), 397 p. (in Russ).
- 21 J.F. Ziegler, *IBM J. Res. Dev.* 40, 19-39 (1996).
- 22 T. Stanev, *Proceedings of the 13th International Conference, CERN, Geneva, Switzerland, June 29-July 3, 2009.*
- 23 V.V. Piskal, V.V. Zhukov, *Kompleksnaya Ustanovka "Adron-55" dlya Issledovaniya Kharakteristik Vzaimodeistviya Chastits Sverkhvysokikh Energii v Kosmicheskikh Luchey, Tekhnicheskoe Opisanie* (2017), p. 5. (in Russ).
- 24 P. Sommers, *Comptes Rendus Physique* 5(4), 463-472 (2005).
- 25 D. Voronin et al., 37th International Cosmic Ray Conference — ICRC 2021, Berlin, July 12–23, 2021.

**История статьи:**

Поступила – 06.04.2024

Поступила в доработанном виде – 05.07.2024

Принята – 08.09.2024

**Article history:**

Received 6 April 2024

Received in revised form 5 July 2024

Accepted 8 September 2024

**Информация об авторах:**

1. **Т.Х. Садыков** – д.ф.-м.н., профессор, ВИС, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [turlan43@mail.ru](mailto:turlan43@mail.ru).

2. **Х.М. Махмет** – PhD студент (автор корреспонденции), МНС, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [hansh2210@gmail.com](mailto:hansh2210@gmail.com).

3. **О.А. Новолодская** – к.ф.-м.н., СИС, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [novololga@yandex.ru](mailto:novololga@yandex.ru).

4. **В.В. Пискаль** – ИС, Тянь-Шаньская высокогорная научная станция, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [slava.piscal@mail.ru](mailto:slava.piscal@mail.ru).

5. **А.Х. Аргынова** – СИС, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [argali7@mail.ru](mailto:argali7@mail.ru).

6. **К.А. Аргынова** – МНС, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [kora.argynova@gmail.com](mailto:kora.argynova@gmail.com).

7. **А.М. Алменова** – Satbayev University, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [aidana\\_alm@mail.ru](mailto:aidana_alm@mail.ru).

8. **В.В. Жуков** – к.ф.-м.н., Тянь-Шаньская высокогорная научная станция, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [cosmo-base@mail.ru](mailto:cosmo-base@mail.ru).

9. **В.И. Осенмук** – ведущий инженер, Тянь-Шаньская высокогорная научная станция, Казахстан, г. Алматы, e-mail: [Almaty\\_vova@mail.ru](mailto:Almaty_vova@mail.ru).

**Information about authors:**

1. **T.Kh. Sadykov** – Dr. of Phys. and Math. Sc., Prof., Lead Researcher, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty, e-mail: [turlan43@mail.ru](mailto:turlan43@mail.ru).

2. **Kh.M. Makhmet** – PhD student (corresponding author), Junior researcher, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty, e-mail: [hansh2210@gmail.com](mailto:hansh2210@gmail.com).

3. **O.A. Novolodskaya** – Cand. Phys. Math. Sci., Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty, e-mail: [novololga@yandex.ru](mailto:novololga@yandex.ru).

4. **V.V. Piscal** – Researcher, Tien-Shan high mountain scientific station, Kazakhstan, Almaty, e-mail: [slava.piscal@mail.ru](mailto:slava.piscal@mail.ru).

5. **A.Kh. Argynova** – Senior researcher, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty, e-mail: [argali7@mail.ru](mailto:argali7@mail.ru).

6. **K.A. Argynova** – Junior researcher, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty, e-mail: [kora.argynova@gmail.com](mailto:kora.argynova@gmail.com).

7. **A.M. Alменова** – Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Almaty, Kazakhstan e-mail: [aidana\\_alm@mail.ru](mailto:aidana_alm@mail.ru).

8. **V.V. Zhulov** – Cand. Phys. Math. Sci., Tien-Shan high mountain scientific station, Almaty, Kazakhstan, e-mail: [cosmo-base@mail.ru](mailto:cosmo-base@mail.ru).

9. **V.I. Osenmuk** – Lead engineer, Tien-Shan high mountain scientific station, Almaty, Kazakhstan, e-mail: [Almaty\\_vova@mail.ru](mailto:Almaty_vova@mail.ru).