

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Филиал федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» в городе Алматы (АФ НИЯУ МИФИ)

УДК 524.1

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ
ДИАПАЗОНЕ (1-100) ПЭВ ПО ДАННЫМ ТЯНЬ-ШАНСКОЙ
ЛИВНЕВОЙ УСТАНОВКИ**

Научный руководитель _____ Н.О. Садуев
PhD.

Научный консультант _____ Н.О. Ережеп

Студент _____ В.Д. Филиппов

Москва 2026

Содержание

Введение	2
Широкие атмосферные ливни	2
Тянь-Шанская Высокогорная Научная Станция	4
1 Цели и задачи	5
2 Описание экспериментальной установки	6
2.1 Экспериментальная установка	6
2.2 Сцинтилляционный счётчик	7
2.3 Электронно-оптический модуль	9
3 Отбор и обработка событий ШАЛ	10
3.1 Исходные данные	10
3.2 Алгоритм отбора событий	11
3.3 Восстановление времени прихода частиц к детекторам	14
4 Методика реконструкции направления прихода ШАЛ	17
5 Угловые распределения ШАЛ	21
5.1 Восстановление направления прихода ШАЛ	21
5.2 Построение угловых распределений ШАЛ	23
6 Анализ полученных распределений	25
Использованная литература	28

ВВЕДЕНИЕ

Широкие атмосферные ливни

Космические лучи представляют собой поток высокоэнергетичных стабильных частиц и ядер, поступающих в атмосферу Земли из глубин космического пространства. При взаимодействии с веществом атмосферы они инициируют образование вторичных частиц, которые, в свою очередь, продолжают взаимодействовать с окружающей средой и подвергаются распадам.

В результате развивается каскадный процесс, характеризующийся быстрым ростом числа вторичных частиц. Такие каскадные процессы принято называть широкими атмосферными ливнями (ШАЛ).

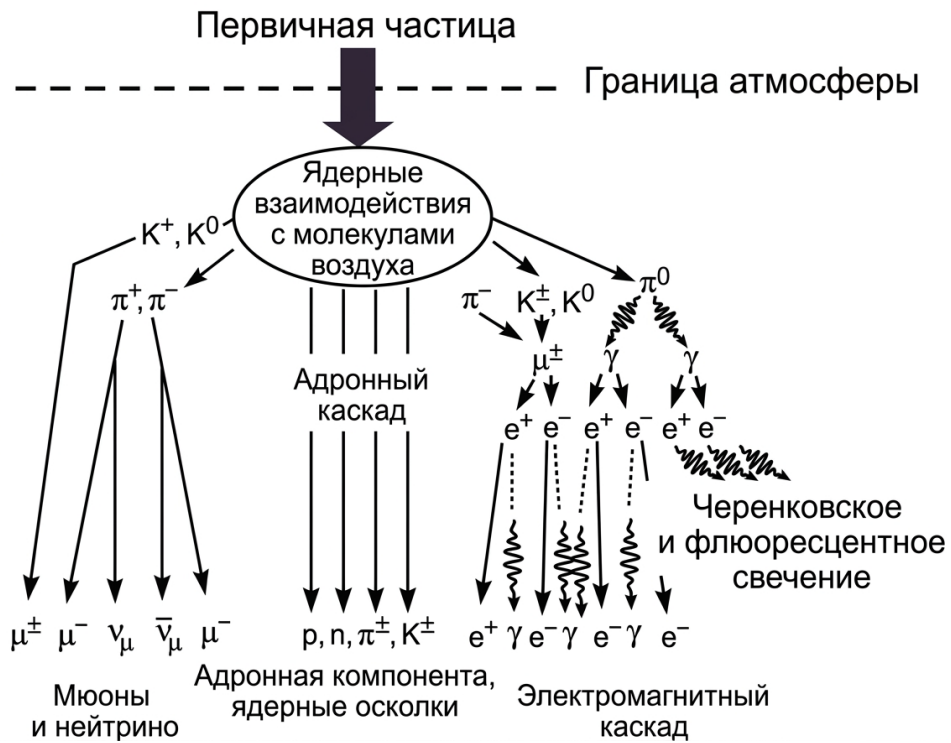


Рисунок 1 — Каскадный процесс взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой – рождение вторичной компоненты космических лучей (так называемые “широкие атмосферные ливни”) [1].

Фронт широкого атмосферного ливня в первом приближении может рассматриваться как плоская поверхность, состоящая из частиц, движущихся через атмосферу со скоростями близкими к скорости света. Если ливень падает под углом к вертикали, то детекторы частиц, расположенный в горизонтальной плоскости, будут срабатывать не одновременно, а с задержкой, зависящей от угла падения оси ливня. Измерение временных задержек позволяет определить угол прихода ливня. За ось ливня принимается направление движения первичной космической частицы (рисунок 2).

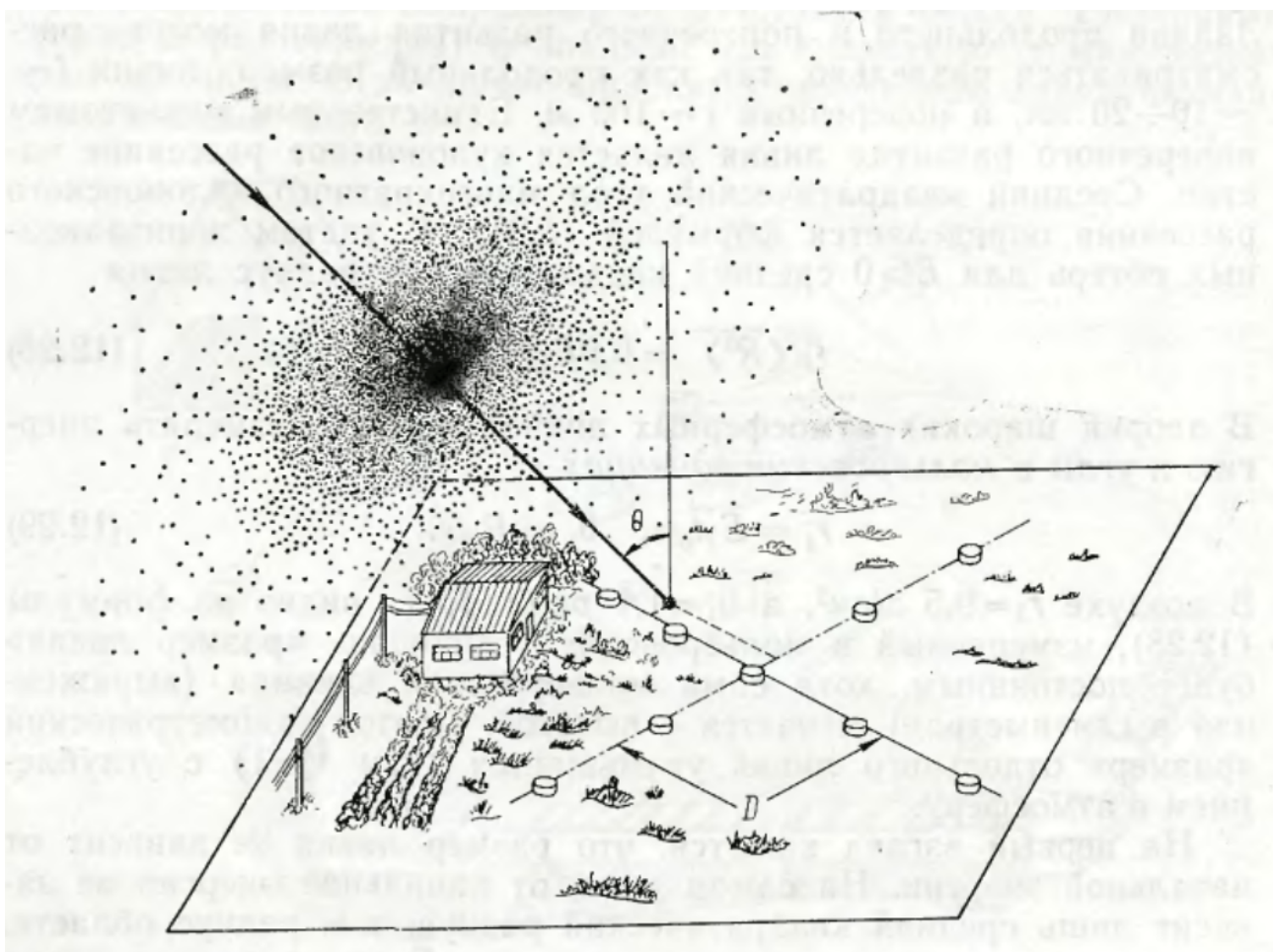


Рисунок 2 — Диск, образованный частицами широкого атмосферного ливня, приближается к детекторам D под углом θ [2].

Тянь-Шанская Высокогорная Научная Станция

Одним из комплексов по наблюдению ШАЛ служит Тянь-Шанская Высокогорная Научная Станция, расположенная в 50-ти километрах от Алматы в горах Заилийского Алатау на северной широте 43.02° и восточной долготы 76.57° , на высоте 3340 метров н.у.м. В настоящий момент на Тянь-Шанской научной станции используются детекторы электронов, мюонов, годоскопические счётчики и другие установки (см. рисунок 3).

Филиал «Тянь-Шанская высокогорная научная станция» Физического института им. П.Н. Лебедева РАН создан в соответствии с Распоряжением Совета Министров СССР от 9 января 1958 года за № 28-13 сс как «Тянь-Шанская высокогорная научная станция ФИАН» и позднее преобразован в Филиал ФИАН.

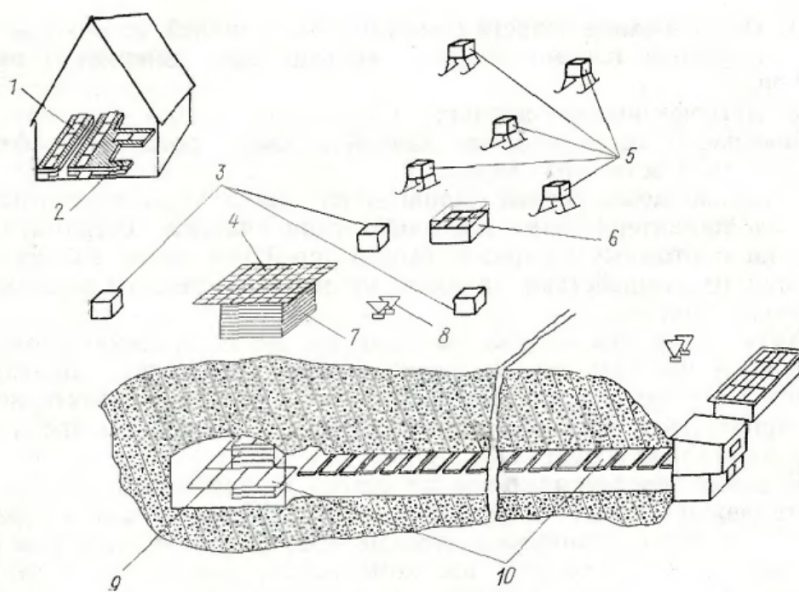


Рисунок 3 — Комплексная установка для исследования широких атмосферных ливней на Тянь-Шане: 1 - детектор электронов (45 м^2); 2 - детектор мюонов (45 м^2); 3 - детектор времени прихода частиц ливня; 4 - сцинтилляционные счетчики (64 м^2); 5 - Детекторы положения ствола ливня; 6 - годоскопические счетчики; 7 - ионизационный калориметр; 8 - воздушные черенковские счетчики; 9 - подземный калориметр; 10 - подземный детектор мюонов [2].

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель текущей научной работы:

- Анализ осциллограмм аналогового выходного сигнала детекторов частиц и отождествление в них импульсных сигналов от сцинтилляций, вызванных прохождением частиц фронта ШАЛ. Определение направляющих углов оси ШАЛ по временным задержкам ливневого фронта путем аппроксимации многомерного функционала. Построение двумерного распределения направлений прихода вызвавших ШАЛ частиц космических лучей и его анализ на основе разработанного для этой цели в ФИАН дифференциального метода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Разработать методику и необходимое программное обеспечение для анализа осциллограмм выходного сигнала, полученных от работающих с высоким временным разрешением (порядка единиц наносекунд) и синхронизированных единым триггерным сигналом сцинтилляционных детекторов заряженных частиц, а также для автоматического расчета временных задержек между приходом частиц фронта ШАЛ в ряд пространственно распределенных пунктов;
- Разработать методику определения направляющих (зенитного и азимутального) углов оси ШАЛ по определенным на предыдущем этапе временным задержкам и реализовать ее в соответствующих программах;
- Используя результаты предыдущего этапа, построить распределения зарегистрированных ШАЛ по зенитному и азимутальному углам и использовать построенные распределения для проверки корректности работы всех используемых при анализе ливневых данных алгоритмов;

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

2.1 Экспериментальная установка

Установка представляет собой совокупность восьми сцинтилляционных детекторов (рисунок 4), описанных в пунктах 2.2-2.3. Данные с каждого из детекторов приходят на отдельный канал аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и обрабатываются параллельно с временным разрешением порядка наносекунд.

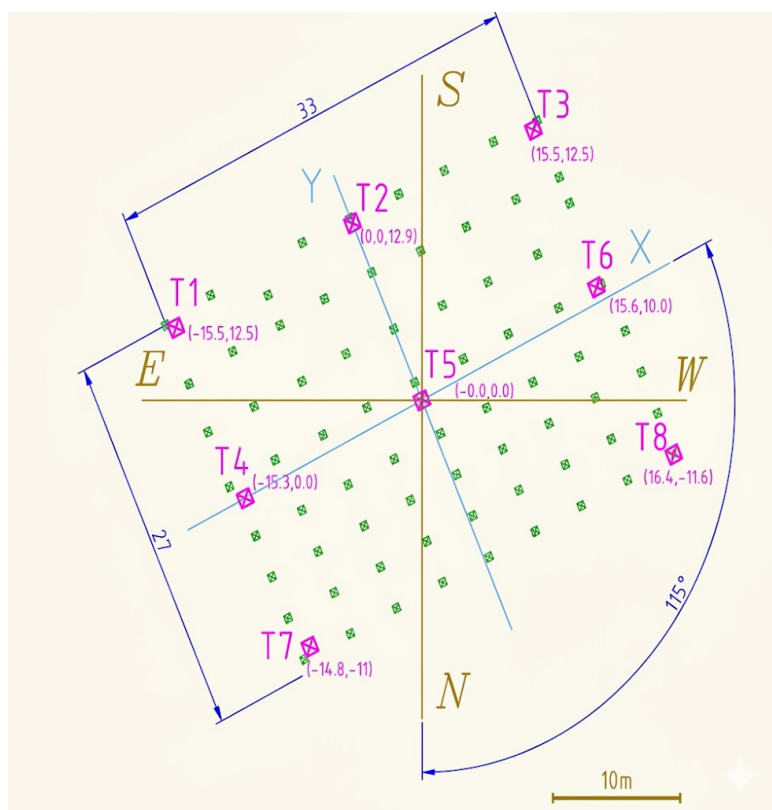


Рисунок 4 — Геометрия и пространственная ориентация установки

2.2 Сцинтилляционный счётчик

Регистрирующая часть сцинтилляционного счётчика имеет размеры $1000 \times 1000 \times 10$ мм и собрана из 50-ти сцинтилляционных пластин с размерами $200 \times 200 \times 5$ мм в виде двухслойной матрицы 5×5 элементов, вес каждой пластины 207 г. В каждой пластине имеются 4 паза длиной 200 мм, шириной 1,3 мм и глубиной 2,2 мм (рисунок 5).

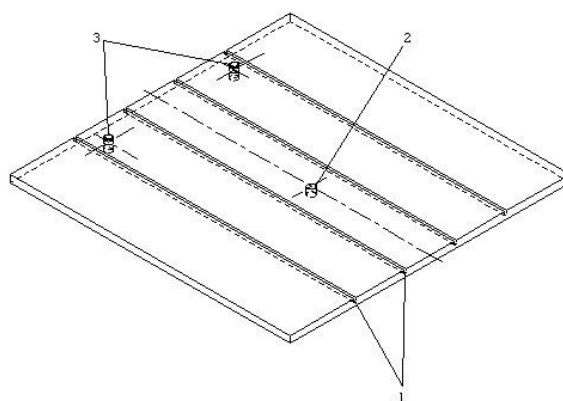


Рисунок 5 — Сцинтилляционная пластина. 1 – пазы для спектросмещающих оптических волокон, 2 – крепежное отверстие, 3 – направляющие "пины".

Сцинтилляционные пластины размещены на основании из ДВП толщиной 4 мм в два слоя и неподвижно закреплены таким образом, чтобы пазы располагались в одну линию, образуя в результате в каждом слое пластин 20 пазов длиной 1000 мм. В пазы вставляются спектросмещающие оптические волокна, предназначенные для передачи на фотоприемник оптического излучения, возникающего в сцинтилляционных пластинах при прохождении через счетчик заряженных частиц. Свободные концы волокон собраны в жгут и вклеены в специальную втулку, закрепленную на общем с пластинами основании.

Сборка сцинтилляционных пластин и спектросмещающих оптических волокон накрывается сверху листом из ДВП толщиной 4 мм с отверстиями для крепежа, и помещается в металлический кожух. Кожух изготавливается из оцинкованной стали толщиной 0,5 мм, и состоит из двух частей, каждая из которых является крышкой с отогнутыми под углом 90 градусов бортиками высотой 20 мм. При сборке кожух герметизируется. Детали сцинтилляционного счётчика фиксируются между собой с помощью 25 винтов-саморезов, которые вкручиваются в пластмассовые вставки, расположенные в нижней части счётчика. Габаритные размеры счётчика без выступающих деталей: 1212×1042×22 мм.

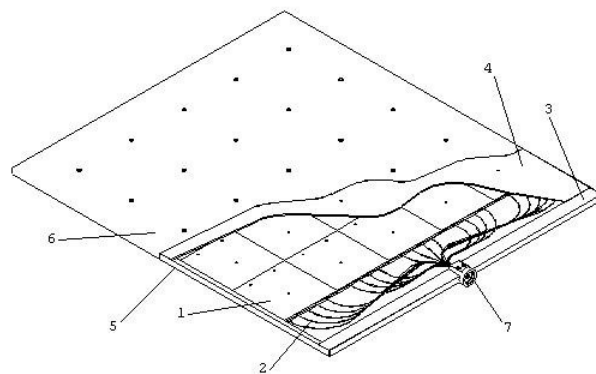


Рисунок 6 — Конструкция сцинтилляционного счётчика. 1 - сцинтилляционная пластина, 2 - спектросмещающее волокно, 3 - основание, 4 - крышка, 5 - кожух (нижняя часть), 6 - кожух (верхняя часть), 7 - переходник для крепления электроннооптического модуля.

2.3 Электронно-оптический модуль

Для установки на сцинтиляционный счётчик фотоприемника и электроники разработан специальный опто-электронный блок, который пристыковывается к втулке с вклеенными спектросмещающими волокнами и крепится на корпусе счетчика с помощью винтов-саморезов (рисунок 7).

Электроннооптический модуль состоит из ФЭУ-115М и регистрирующей электроники.

Фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-115М является электровакуумным прибором. ФЭУ-115М состоит из фоточувствительного катода и 12 динодов (ускоряющих пластин), и предназначен для преобразования световой вспышки от прохождения заряженной частицы через сцинтиллятор в электрический сигнал.

Фотоэлектроны, выбитые из фотокатода под воздействием света, фокусируются на 1-й умножительный электрод (динод) и выбивают из него вторичные электроны, причем число электронов, покидающих первый динод в несколько раз больше числа фотоэлектронов. Все они направляются на второй динод, где также выбивают вторичные электроны и т.д., от динода к диноду. При прохождении всей системы динодов поток электронов возрастает в $10^5 \div 10^7$ раз и попадает на анод - собирающий электрод ФЭУ. Для обеспечения нормальной работы ФЭУ соответствующие напряжения на диноды и анод задаются с помощью умножителя напряжения.



Рисунок 7 — Сцинтиляционный детектор в сборе

3. ОТБОР И ОБРАБОТКА СОБЫТИЙ ШАЛ

3.1 Исходные данные

Обработка и анализ экспериментальных данных в рамках данной работы выполнялись с использованием программной среды ROOT CERN. Все алгоритмы цифровой обработки сигналов реализованы в виде скриптов на языке C++ с использованием встроенных библиотек ROOT.

Данные с АЦП сохраняются в формате SQL. В рамках настоящей работы этап конвертации данных из SQL в формат ROOT CERN опущен; в качестве исходных данных используются предварительно подготовленные файлы формата ROOT CERN.

В работе анализируются экспериментальные данные, полученные установкой в период 2021–2024 годов.

Файл формата ROOT CERN содержит структуру типа TTree, включающую следующие ветви:

- **nint (Int)** — число отсчётов, зарегистрированных для одного канала;
- **chans (vector<short>)** — вектор, содержащий последовательную запись данных с восьми каналов АЦП (каждый канал соответствует отдельному сцинтилляционному детектору). Размер вектора **chans** равен $nint \cdot 8$;
- **timescale (Double)** — временное разрешение АЦП, составляющее в данной работе 4 нс;
- **datep (Int)** — дата регистрации события в формате YYYY-MM-DD;
- **timeut (Double)** — время, прошедшее с начала суток по всемирному координированному времени.

Число записей в дереве определяется количеством зарегистрированных событий и может варьироваться. Пример осциллограмм сигналов, зарегистрированных АЦП для одного события, представлен на рисунке 8. Для удобства визуализации сигналы различных каналов смещены относительно друг друга по оси OY .

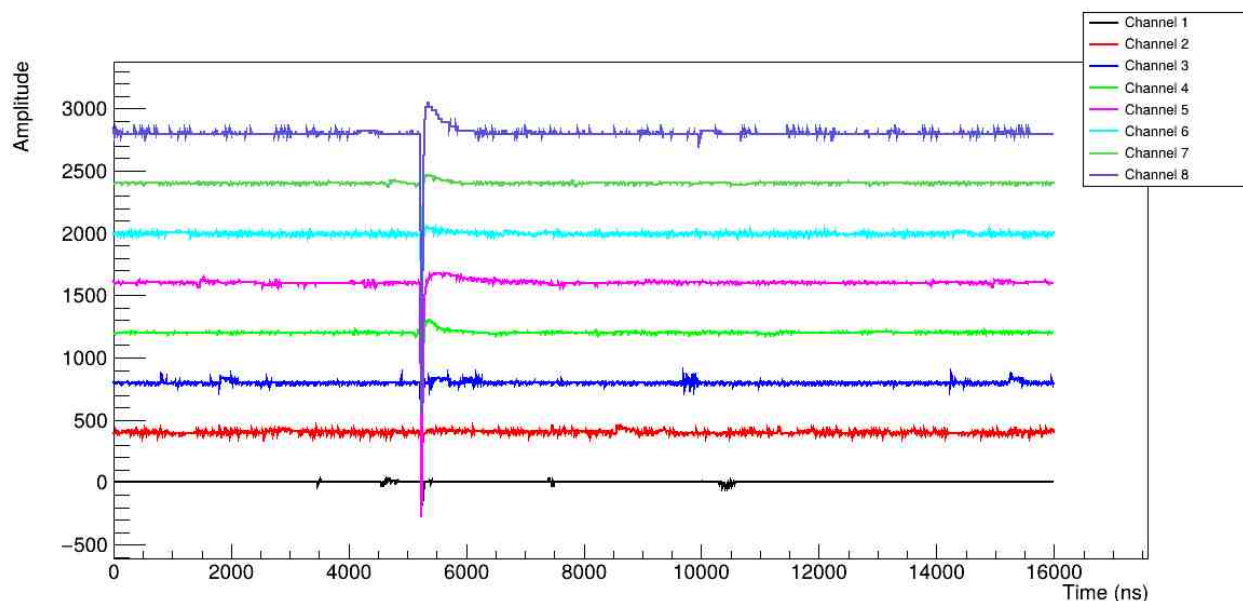


Рисунок 8 — Осциллограммы сигналов, зарегистрированных АЦП

3.2 Алгоритм отбора событий

Исходные данные, помимо сигналов, обусловленных прохождением частиц широкого атмосферного ливня (ШАЛ), содержат значительное количество фоновых событий, а также шумовые вклады фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и АЦП. В результате полезные сигналы представляют собой редкие импульсы, распределённые на фоне шумовой компоненты.

Из рисунка 8 видно, что полезные сигналы соответствуют отрицательным импульсам.

В качестве этапа первичной обработки выполняется предварительное преобразование сигнала: положительная полярность подавляется, а отрицательная инвертируется. В результате сигнал приводится к однополярному виду.

Данная процедура представляет собой операцию выпрямления сигнала (rectification) и используется для упрощения последующего анализа [3].

После первичной обработки для каждого канала определяется максимальное значение сигнала $pulse_{max}$, на основе которого задаётся эмпирически подобранный порог триггера:

$$trigger = 0.2 \cdot pulse_{max}.$$

Для подавления шумовой компоненты и фоновых событий применяется статистический анализ предтриггерного участка сигнала, основанный на оценке среднего значения и стандартного отклонения [4]. Предтриггерный участок, определяемый условием $pulse < trigger$, считается свободным от вклада полезного события и используется для оценки параметров шумовой компоненты: среднего значения $mean$ и стандартного отклонения σ .

Далее вводится уровень отсеечения:

$$threshold = 3\sigma + mean + 0.05 \cdot pulse_{max},$$

где σ — оценка стандартного отклонения шумовой компоненты на предтриггерном интервале, $mean$ — среднее значение импульса на предтриггерном участке. Добавочный член, пропорциональный $pulse_{max}$, введён эмпирически для учёта вариации амплитуды полезных импульсов.

Все значения сигнала, удовлетворяющие условию $pulse < threshold$, подавляются, что соответствует пороговой фильтрации по уровню отсеечения $threshold$.

Далее выполняется фильтрация сигналов по длительности: импульсы, продолжительность которых в одном канале составляет менее пяти дискретных отсчётов, исключаются из дальнейшего рассмотрения.

На заключительном этапе производится сравнение сигналов между каналами. Если в некоторый дискретный момент времени импульс наблюдается менее чем в трёх каналах одновременно, такой сигнал подавляется.

Порог по длительности (5 отсчётов), а также требование регистрации сигнала не менее чем в трёх каналах выбраны эмпирически на основе анализа экспериментальных данных и направлены на подавление случайных шумовых флуктуаций.

В результате описанной обработки сохраняются преимущественно импульсы, соответствующие полезным событиям.

Предложенный метод также устойчиво работает в случае отсутствия полезных событий: после выполнения всех этапов обработки сигнал полностью подавляется.

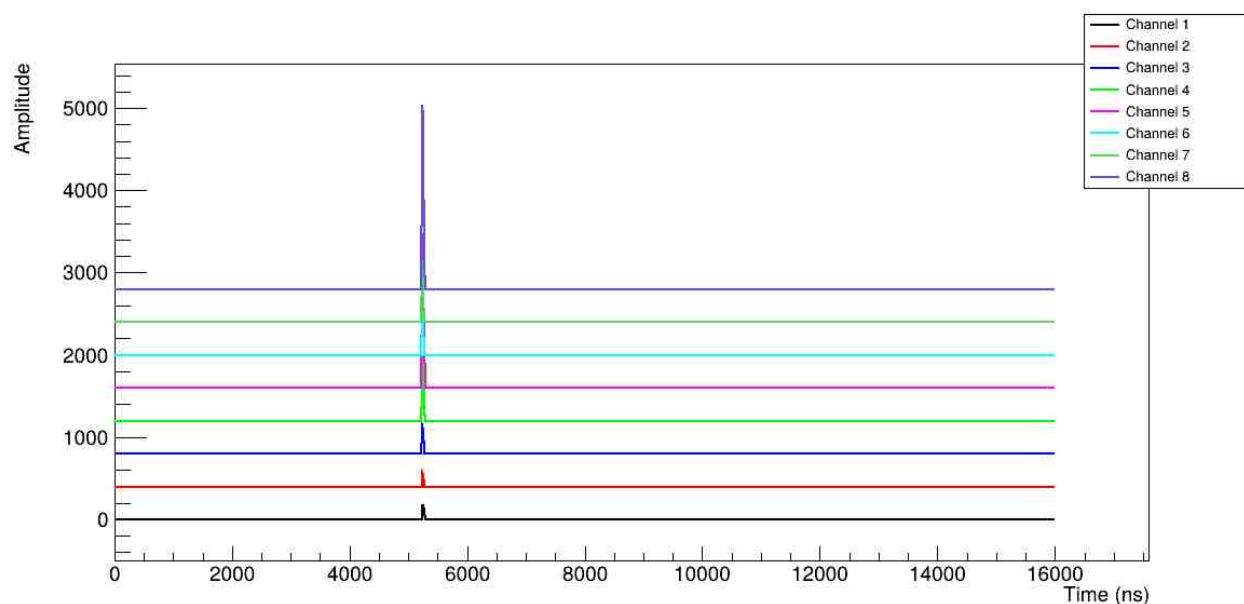


Рисунок 9 — Осциллограммы после обработки

3.3 Восстановление времени прихода частиц к детекторам

Оставшиеся сигналы представляют собой узкие одиночные пики с выраженной асимметрией: наблюдается положительная асимметрия, проявляющаяся в более протяжённом правом хвосте распределения по сравнению с левым.

Для аппроксимации формы таких импульсов используется распределение Ландау (рисунок 10), впервые введённое для описания флуктуаций энерговыделения заряженных частиц при прохождении через тонкие слои вещества [5].

Распределение Ландау не выражается в элементарных функциях и задаётся через интегральное представление:

$$L(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-t \ln t - xt} \sin(\pi t) dt$$

В практических вычислениях, в том числе в рамках среды ROOT, используется численная реализация данного распределения.

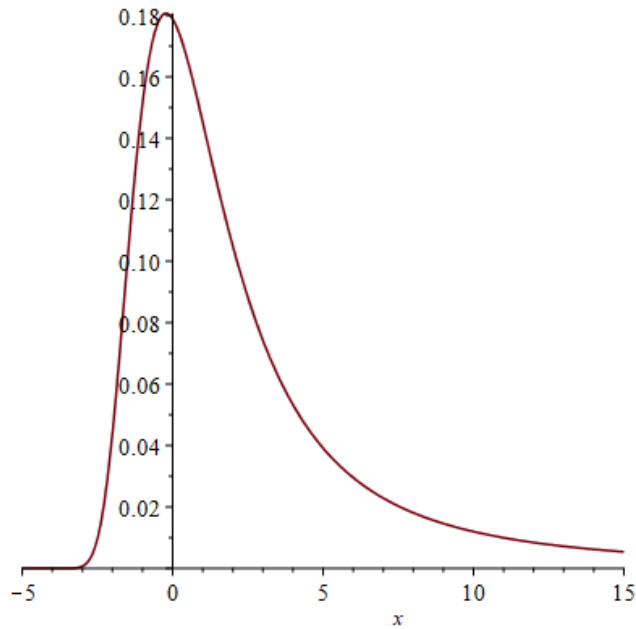


Рисунок 10 — Плотность вероятности распределения Ландау

В ROOT распределение Ландау реализовано через класс TF1 с идентификатором "landau". В общем виде используемая модель имеет форму:

$$f(x) = A \cdot \text{Landau}(x; \text{MPV}, \sigma),$$

где:

- A — нормировочный коэффициент, определяющий амплитуду распределения;
- MPV (*Most Probable Value*) — наиболее вероятное значение, соответствующее положению максимума распределения;
- σ — параметр масштаба, определяющий характерную ширину распределения.

Фитирование сигналов выполняется в среде ROOT методом минимизации функции χ^2 (метод взвешенных наименьших квадратов). Для получения наилучшего результата используются начальные приближения параметров:

- амплитуда A оценивается как максимальное значение сигнала;
- параметр MPV задаётся положением максимума импульса на временной шкале;
- параметр σ выбирается порядка ширины сигнала (порядка нескольких дискретных отсчётов).

После получения параметрической аппроксимации сигнала вычисляется интеграл под кривой на выбранном временном интервале (рисунок 11). Затем определяется момент времени, соответствующий накоплению половины полной площади сигнала.

В данной работе медианное время накопления сигнала используется в качестве оценки времени прихода фронта ШАЛ к детектору.

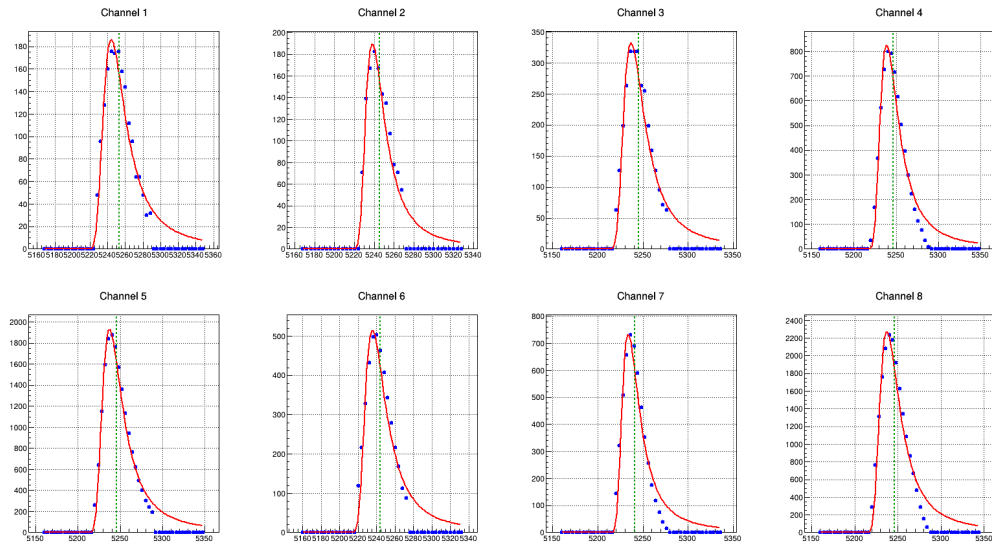


Рисунок 11 — Фитирование импульсов событий ШАЛ

Далее формируется выходной файл формата TTree, содержащий следующие ветви:

- **datep (Int)** — дата события;
- **timeout (Double)** — время события в секундах от начала суток по всемирному координированному времени;
- **reco_times (vector<Double>)** — массив восстановленных времён прихода частиц в детекторы; при отсутствии сигнала записывается значение (-1) .

4. МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ШАЛ

В данной работе реконструкция направлений прихода широких атмосферных ливней, характеризуемых полярным углом θ и азимутальным углом φ , выполняется на основе относительных времён срабатывания детекторов [6]. В используемом приближении фронт ШАЛ аппроксимируется плоскостью. В реальных условиях фронт ШАЛ обладает конечной кривизной, однако при характерных размерах рассматриваемой экспериментальной установки использование плоской модели фронта является достаточным приближением.

Геометрическая модель

Фронт ШАЛ описывается уравнением плоскости [7]:

$$kx + ly + mz + d = 0, \quad (1)$$

где (k, l, m) — компоненты нормированного вектора нормали:

$$k^2 + l^2 + m^2 = 1. \quad (2)$$

В рамках плоской модели фронта вводится связь между положением фронта и временем срабатывания детектора:

$$kx_i + ly_i + mz_i + d = ct_i, \quad (3)$$

где t_i — время срабатывания i -го детектора, c — скорость света в вакууме. Величина ct_i задаёт положение фронта вдоль нормали в момент времени t_i .

Переход к относительным временам

Для перехода от абсолютных времён к относительным определяется реперный детектор. За реперный принимается детектор 5 с координатами $(x_5, y_5) = (0, 0)$. Для реперного детектора:

$$kx_5 + ly_5 + mz_5 + d = mz_5 = ct_5. \quad (4)$$

Вычитая уравнение референсного детектора из общего уравнения, получаем:

$$kx_i + ly_i + m(z_i - z_5) = c(t_i - t_5). \quad (5)$$

Так как все детекторы экспериментальной установки расположены в горизонтальной плоскости:

$$z_i - z_5 = 0, \quad (6)$$

и уравнение упрощается до:

$$kx_i + ly_i = \delta_i, \quad (7)$$

где

$$\delta_i = c(t_i - t_5). \quad (8)$$

Величина δ_i интерпретируется как эффективная пространственная задержка фронта, восстановленная по временам срабатывания детекторов.

Метод наименьших квадратов

Коэффициенты k и l находятся методом наименьших квадратов. Коэффициент m восстанавливается из условия нормировки. Ищем минимум функционала:

$$L = \sum_{i=1}^8 [\delta_i - kx_i - ly_i]^2 \quad (9)$$

Получаем систему уравнений для коэффициентов:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial l} = 0 \\ m = \sqrt{1 - k^2 - l^2} \end{cases} \quad (10)$$

Выбирается положительное значение m , соответствующее направлению прихода ШАЛ сверху.

Вычисляя частные производные и преобразуя систему уравнений, получаем:

$$\begin{cases} k \sum_{i=1}^8 x_i^2 + l \sum_{i=1}^8 x_i y_i = \sum_{i=1}^8 x_i \delta_i, \\ k \sum_{i=1}^8 x_i y_i + l \sum_{i=1}^8 y_i^2 = \sum_{i=1}^8 y_i \delta_i. \end{cases} \quad (11)$$

Решение данной системы может быть найдено методом Крамера [7]:

Решение системы методом Крамера

Определитель матрицы системы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^8 x_i^2 & \sum_{i=1}^8 x_i y_i \\ \sum_{i=1}^8 x_i y_i & \sum_{i=1}^8 y_i^2 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Определитель для нахождения коэффициентов k и l :

$$\Delta_k = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^8 x_i \delta_i & \sum_{i=1}^8 x_i y_i \\ \sum_{i=1}^8 y_i \delta_i & \sum_{i=1}^8 y_i^2 \end{vmatrix}, \quad \Delta_l = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^8 x_i^2 & \sum_{i=1}^8 x_i \delta_i \\ \sum_{i=1}^8 x_i y_i & \sum_{i=1}^8 y_i \delta_i \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Коэффициенты определяются следующим образом:

$$k = \frac{\Delta_k}{\Delta}, \quad l = \frac{\Delta_l}{\Delta}, \quad m = \sqrt{1 - k^2 - l^2}. \quad (14)$$

Азимутальный и зенитный углы направления прихода ШАЛ выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{l}{k}\right) \\ \theta = \arccos(m) \end{cases} \quad (15)$$

5. УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШАЛ

5.1 Восстановление направления прихода ШАЛ

Поскольку в зарегистрированных событиях возможны случаи, когда срабатывают не все восемь детекторов, это необходимо учитывать при вычислении коэффициентов и определителей соответствующей системы уравнений. С этой целью вводится параметр n_{get} , обозначающий число сработавших детекторов. При вычислении сумм учитываются только те детекторы, в которых зарегистрирован сигнал.

Использование только сработавших детекторов позволяет учитывать реальную геометрию события и избегать искажения результатов, связанного с отсутствием сигналов в отдельных каналах.

Минимальное число сработавших детекторов должно обеспечивать переопределённость системы уравнений для параметров k, l . В данной работе реконструкция выполняется при $n_{get} \geq 3$, что обеспечивает устойчивое решение методом наименьших квадратов.

Для повышения точности реконструкции в работе вводится дополнительное условие: в случае, если в ходе события реперный пятый детектор не срабатывает, такое событие исключается из дальнейшего анализа.

Для автоматизированной реконструкции параметров ШАЛ была разработана программа на языке C++ с использованием библиотек пакета ROOT. Алгоритм реконструкции основан на решении вышеизложенной СЛАУ относительно параметров k, l и нахождении коэффициента m , описывающих фронт ливня, с последующим восстановлением зенитного и азимутального углов прихода ШАЛ.

С целью проверки работоспособности разработанного алгоритма был использован программный пакет CORSIKA[8], позволяющий моделировать широкие атмосферные ливни с заранее заданными параметрами. Генерация ШАЛ проводилась для условий, соответствующих географическому расположению ТШВНС, включая высоту над уровнем моря, значения восточной долготы и северной широты, а также параметры магнитного поля Земли для данной местности.

В качестве первичных космических лучей были выбраны ядра ^{56}Fe с энергией $E = 10^{15}$ эВ.

Были сгенерированы четыре широких атмосферных ливня с различными значениями зенитного угла и азимутального угла, принадлежащими различным четвертям азимутальной плоскости. После генерации параметры каждого ливня были восстановлены с использованием разработанного алгоритма. Результаты реконструкции представлены в таблице 1.

Истинный θ	Реконструированный θ	Относительная погрешность ε_θ	Истинный φ	Реконструированный φ	Относительная погрешность ε_φ
31	32.6432	5.30%	87	87.1259	0.145%
53	56.1147	5.88%	145	142.38	1.81%
7	7.0568	0.81%	232	-127.374 (232.626)	0.27%
23	23.0279	0.12%	343	-17.1802 (342.8198)	0.05%

Таблица 1 — Результаты реконструкции углов прихода ШАЛ

5.2 Построение угловых распределений ШАЛ

В настоящей работе построены угловые распределения направлений прихода широких атмосферных ливней по данным, полученным установкой в период 2021–2024 годов. С целью построения угловых распределений была написана соответствующая программа на языке C++ с использованием библиотек пакета ROOT.

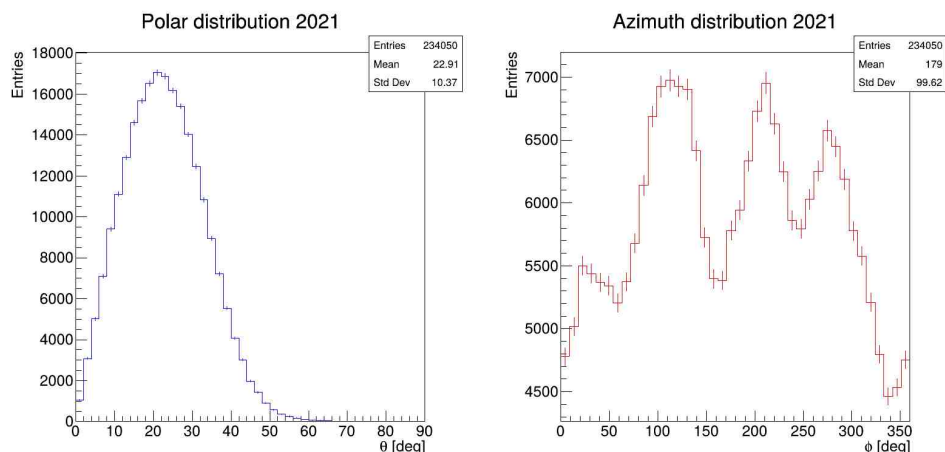


Рисунок 12 — Распределение ШАЛ зарегистрированных в 2021м году по полярному и азимутальному углам

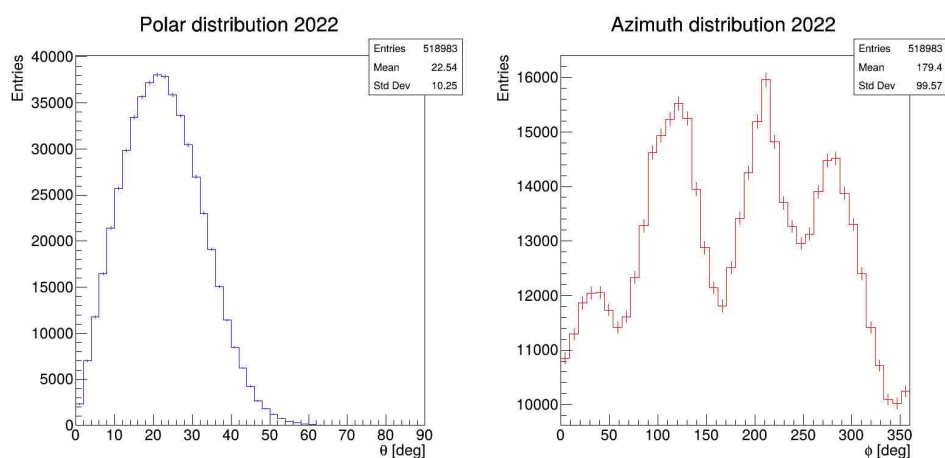


Рисунок 13 — Распределение ШАЛ зарегистрированных в 2022м году по полярному и азимутальному углам

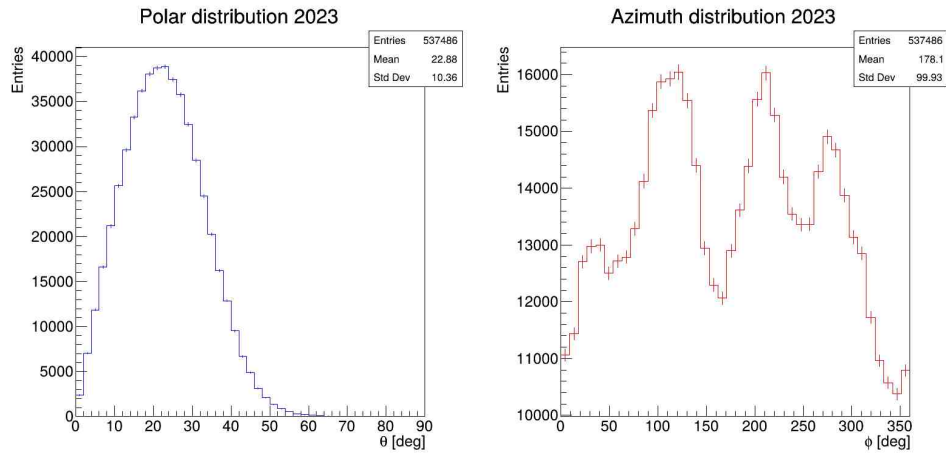


Рисунок 14 — Распределение ШАЛ зарегистрированных в 2023м году по полярному и азимутальному углам

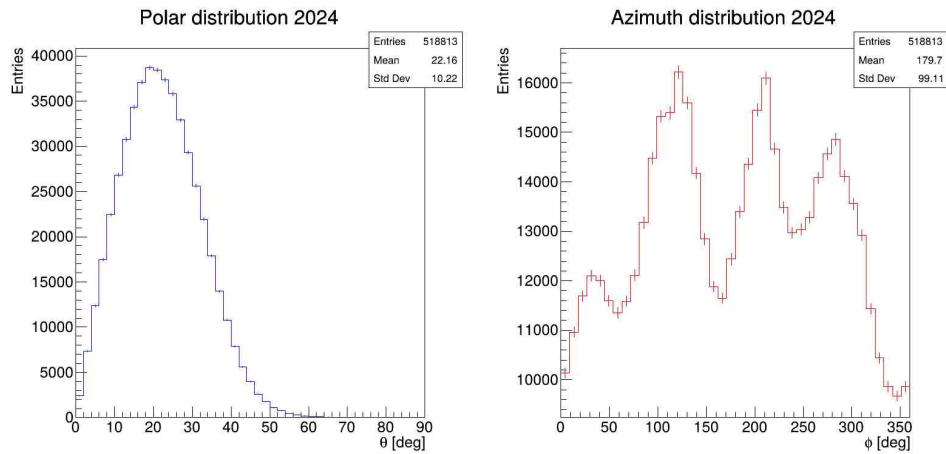


Рисунок 15 — Распределение ШАЛ зарегистрированных в 2024м году по полярному и азимутальному углам

6. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Анализ распределений по зенитному углу для экспериментальных данных 2021–2024 годов показывает устойчивую воспроизводимость формы гистограмм. Во всех рассмотренных выборках наблюдается выраженный максимум распределения значений θ в области 20° – 30° . При этом форма распределений сохраняется для различных периодов наблюдений. Полученный характер распределений качественно соответствует ожидаемому уменьшению интенсивности ШАЛ с ростом зенитного угла.

Сохранение общей формы распределений для различных периодов наблюдений указывает на стабильность работы экспериментальной установки и воспроизводимость условий регистрации событий.

В распределениях по азимутальному углу наблюдается существенная неоднородность. Поскольку реконструкция направлений прихода ШАЛ основана на анализе временных задержек между пространственно разнесёнными детекторами, точность восстановления угловых координат существенно зависит от корректности геометрической модели установки.

В рамках данной работы точные пространственные координаты детекторов отсутствовали, вследствие чего реконструкция азимутального угла сопровождается значительными систематическими неопределённостями. В связи с этим детальная физическая интерпретация наблюдаемой азимутальной анизотропии как свойства потока первичных космических лучей в данной работе не проводилась.

Дополнительный вклад в наблюдаемые искажения могут вносить ограниченное число детекторов и использование приближения плоского фронта ШАЛ при реконструкции направлений прихода.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют высокую чувствительность процедуры реконструкции к параметрам экспериментальной установки. Для дальнейшего повышения точности восстановления направлений прихода ШАЛ необходимы геометрическая и временная калибровка системы регистрации, а также уточнение пространственной конфигурации детекторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были разработаны и реализованы алгоритмы цифровой обработки осциллограмм, регистрируемых аналого-цифровым преобразователем экспериментальной установки. На основе экспериментальных данных построена процедура выделения полезных событий, соответствующих регистрации частиц широких атмосферных ливней, а также выполнена фильтрация фоновых и шумовых сигналов.

Разработан алгоритм восстановления времён прихода фронта ШАЛ к детекторам установки, позволяющий реконструировать пространственно-временную структуру зарегистрированных событий и определять направления прихода ливней.

В используемом приближении фронт ШАЛ аппроксимировался плоскостью, а восстановление направления прихода выполнялось методом наименьших квадратов на основе относительных времён срабатывания детекторов.

С использованием экспериментальных данных за период 2021–2024 годов были построены угловые распределения направлений прихода ШАЛ. Анализ распределений по зенитному углу показал наличие устойчивой формы, сохраняющейся для различных выборок данных. В распределениях по азимутальному углу наблюдаются выраженные систематические отклонения от ожидаемого изотропного характера, повторяющиеся для всех рассматриваемых периодов наблюдений.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии значительных систематических ошибок в процедуре реконструкции направлений прихода ШАЛ. Наиболее вероятной причиной наблюдаемых искажений является неточность геометрической конфигурации ливневой установки, приводящая к систематическим смещениям при восстановлении направлений прихода ливней.

В рамках данной работы основной задачей являлась разработка и тестирование алгоритмов цифровой обработки сигналов и реконструкции направлений прихода ШАЛ. В ходе выполнения работы были освоены методы цифровой обработки экспериментальных данных, а также практические подходы к реконструкции направлений прихода широких атмосферных ливней на основе временной информации от детекторов установки.

Дальнейшее развитие работы должно быть направлено на проведение геометрической и временной калибровки установки, уточнение пространственного расположения детекторов и повышение точности восстановления параметров ШАЛ. После уменьшения систематических искажений следующим этапом исследования может стать сравнение полученных результатов с аналогичными данными экспериментов на Арагаце и в Карлсруэ, а также привязка восстановленных направлений прихода ШАЛ к небесной сфере и последующий анализ возможных источников первичных космических лучей.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Панасюк М. И.* Странники Вселенной или эхо Большого взрыва. — Фрязино : Век 2, 2005. — С. 266. — ISBN 5-85099-160-3.
2. *Мурзин В. С.* Введение в физику космических лучей. — 1979.
3. *Sklar В.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — 2-е изд. — Москва : Издательский дом "Вильямс", 2007. — ISBN 978-5-8459-0497-3. — Перевод с английского издания Prentice Hall PTR, 2001.
4. *Гмурман В.* Теория вероятностей и математическая статистика 12-е изд. Учебник для вузов. — ЛитРес, 2020.
5. *Landau L. D.* On the Energy Loss of Fast Particles by Ionization // Journal of Physics (USSR). — 1944. — Т. 8. — С. 201–205.
6. *Прокопенко Н. Н.* Мультисекторный сцинтилляционный детектор для установок ШАЛ : дис. . . . канд. / Прокопенко Николай Николаевич. — Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2020. — Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Специальность 01.04.23 — физика высоких энергий. Научный руководитель: Петрухин А. А.
7. *Ильин В. А., Ким Г. Д.* Линейная алгебра и аналитическая геометрия // М.: Изд-во Моск. ун-та. — 1998.
8. *Heck D., Pierog T.* Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide, Version 7.7100 / Karlsruhe Institute of Technology (KIT). — Karlsruhe, Germany, 2019. — Available from the CORSIKA documentation page: <https://www.iap.kit.edu/corsika/>.