

Угловое распределение направлений прихода космических лучей в энергетическом диапазоне (1-100)ПэВ по данным Тянь-Шанской ливневой установки

Филиппов Владимир

Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (Алматинский филиал)

Май 2026

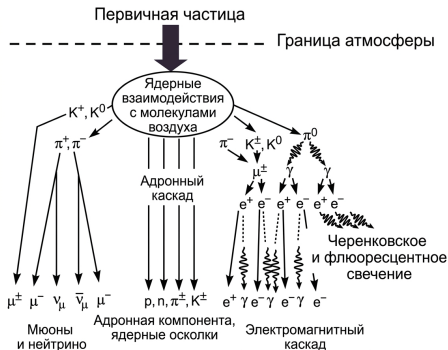


Научный руководитель: PhD. Садуев Н. О.

Научный консультант: Ережеп Н. О.

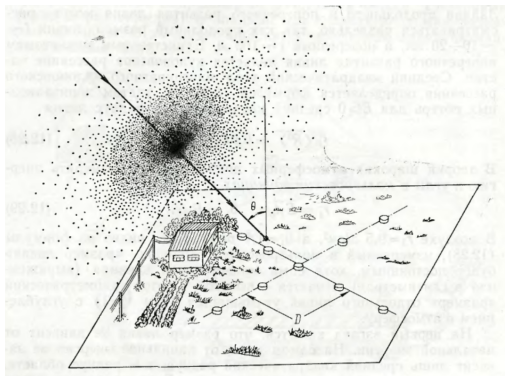
- 1 Описание экспериментальной установки
- 2 Цели и задачи
- 3 Обработка исходных данных
 - Выделение событий ШАЛ
 - Фитирование осциллограмм и реконструкция времени прибытия
- 4 Реконструкция направлений ШАЛ
 - Методика реконструкции
- 5 Угловые распределения ШАЛ
 - Построение угловых распределений ШАЛ
 - Анализ угловых распределений ШАЛ
 - Проверка алгоритма восстановления направлений ШАЛ
- 6 Заключение

Введение: широкие атмосферные ливни



Космические лучи – поток высокоэнергетичных стабильных частиц и ядер, поступающих в атмосферу Земли из глубин космического пространства.

Введение: широкие атмосферные ливни и ТШВНС



Ливень падает под углом к вертикальной оси → фронт достигает детекторов не одновременно. По временным задержкам можно реконструировать направление прихода ШАЛ.



ТШВНС расположена в 50 км от Алматы;
3340 м над уровнем моря;
 43.02° N, 76.57° E

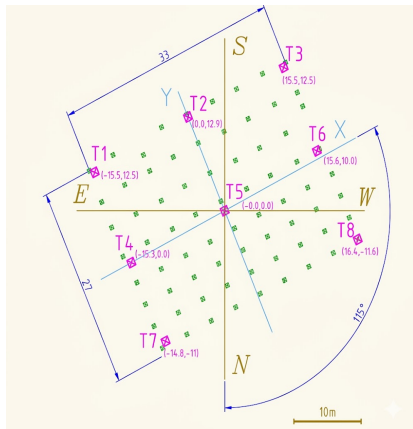
Описание экспериментальной установки

Сцинтилляционный детектор состоит из сцинтилляционного счётчика и электронно-оптического модуля.

Счётчик: 50 пластин $200 \times 200 \times 5$ мм, суммарно $1000 \times 1000 \times 10$ мм.

Спектрорасмещающее волокно передаёт световые вспышки к фотоприёмнику.

Электронно-оптический модуль: ФЭУ-115М и регистрирующая электроника.



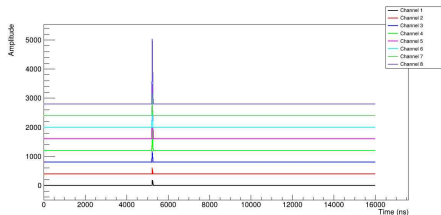
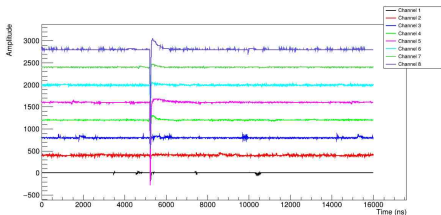
Координаты и размеры указаны в метрах

Цель работы: Анализ осциллограмм аналогового выходного сигнала детекторов частиц; определение направляющих углов оси ШАЛ по временным задержкам ливневого фронта; построение двумерного распределения направлений прихода вызвавших ШАЛ частиц космических лучей.

Для достижения цели поставлены задачи:

- Разработать методику и необходимое программное обеспечение для анализа осциллограмм выходного сигнала;
- Разработать методику определения направляющих (зенитного и азимутального) углов оси ШАЛ;
- Используя результаты предыдущего этапа, построить распределения зарегистрированных ШАЛ по зенитному и азимутальному углам.

Исходные и обработанные осциллограммы

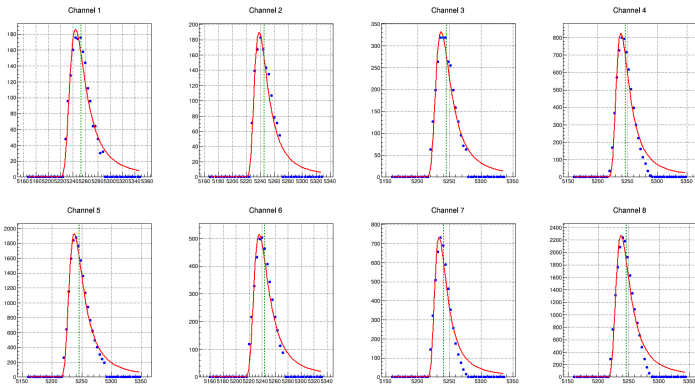


Осциллограммы до и после отбора полезных сигналов

Алгоритм отбора полезных событий проводится в пять этапов:

- 1 Подавление положительных сигналов и инвертирование осциллограмм.
- 2 Определение триггера $trigger = 0.2 \cdot Amplitude_{max}$ и расчёт статистических параметров (среднего значения и СКО) на предтриггерном участке.
- 3 Определение уровня отсеечения $threshold = mean + 3 \cdot \sigma + 0.05 \cdot Amplitude_{max}$ и подавление сигналов, значения которых ниже уровня отсеечения.
- 4 Фильтрация по длительности: если сигнал длится менее пяти дискретных точек в одном канале — он подавляется.
- 5 Межканальная фильтрация: если в некоторый момент времени сигнал присутствует менее чем в трёх каналах — он подавляется.

Фитирование осциллограмм функцией Ландау



Фитирование осциллограмм функцией Ландау для всех каналов

Распределение Ландау

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

Время прибытия фронта ливня к детектору
– время накопление полуплощади под
графиком

Плоская модель фронта ШАЛ

В данной работе фронт ШАЛ в первом приближении рассматривается как плоскость.

Уравнение фронта:

$$kx + ly + mz + d = 0, \quad k^2 + l^2 + m^2 = 1$$

Связь между положением фронта и временем срабатывания детектора:

$$kx_i + ly_i + mz_i + d = ct_i$$

Переход к относительным временам (референсный детектор 5):

$$kx_i + ly_i = \delta_i, \quad \delta_i = c(t_i - t_5)$$

Вектор нормали фронта:

$$\vec{n} = (k, l, m)$$

Реконструкция направления ШАЛ

Параметры плоскости находятся методом наименьших квадратов:

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

Получаем систему:

$$k \sum x_i^2 + l \sum x_i y_i = \sum x_i \delta_i$$

$$k \sum x_i y_i + l \sum y_i^2 = \sum y_i \delta_i$$

Решение системы находим методом Крамера:

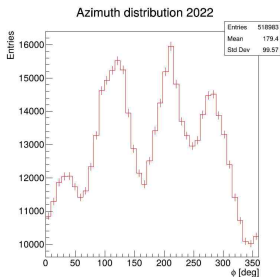
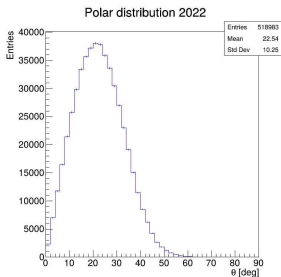
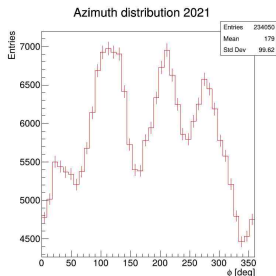
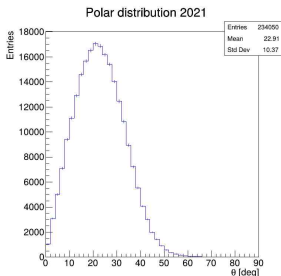
$$k = \frac{\Delta_k}{\Delta}, \quad l = \frac{\Delta_l}{\Delta}, \quad m = \sqrt{1 - k^2 - l^2}$$

Углы прихода ШАЛ:

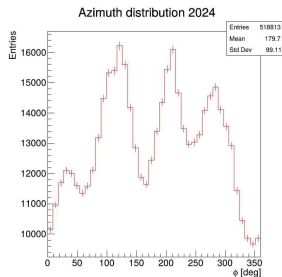
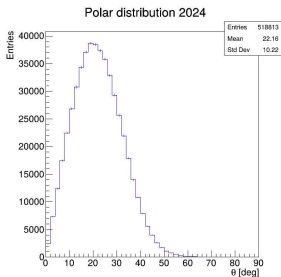
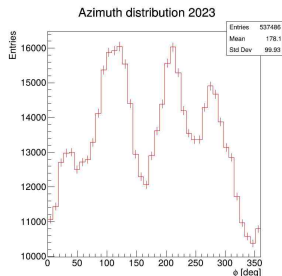
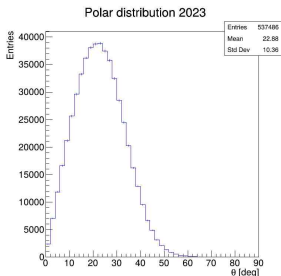
$$\varphi = \arctan\left(\frac{l}{k}\right), \quad \theta = \arccos(m)$$

По результатам реконструкции построены распределения направлений за 2021–2024 гг.

Угловые распределения ШАЛ (2021–2022)



Угловые распределения ШАЛ (2023–2024)



- Распределения за 2021–2024 гг. имеют устойчивую форму гистограмм.
- Общий вид распределений сохраняется от года к году, что указывает на стабильность работы установки и воспроизводимость регистрации событий.
- Во всех периодах наблюдается анизотропия по азимутальному углу.
- Характер анизотропии одинаков для всех лет, что указывает на её систематический характер.
- Наиболее вероятная причина — систематическая ошибка, связанная с калибровкой геометрии установки.

Сгенерированы ШАЛ с помощью пакета CORSIKA с заданными параметрами ($E = 10^{15}$ эВ, первичная частица ядро ^{56}Fe), а затем реконструированы с помощью описанного алгоритма.

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%

- Разработан алгоритм цифровой обработки осциллограмм с выделением событий ШАЛ на основе данных АЦП установки.
- Создан метод реконструкции времени прихода фронта ШАЛ, позволяющий восстанавливать пространственно-временную структуру события и определять направление прихода ливня.
- На основе данных 2021–2024 гг. построены угловые распределения и выполнен их первичный анализ.

- Дальнейшее развитие работы включает:
 - уточнение геометрии и калибровки установки;
 - оптимизацию алгоритмов реконструкции;
 - сравнение с результатами экспериментов Арагац и Карлсруэ;
 - проекцию направлений на небесную сферу (экваториальная / галактическая системы координат);
 - анализ анизотропии и поиск возможных источников первичных космических лучей.