

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Анализ характеристик ШАЛ по данным
установки "Адрон" ТШВНС

Научный руководитель _____ С. С. Хохлов

Научный консультант _____ Е. А. Южакова

Студент _____ К. А. Воробьева

Алматы 2026

Содержание

1	Введение	2
2	Широкие атмосферные ливни	2
2.1	Основные параметры ШАЛ	2
3	Функция пространственного распределения	3
4	Эксперимент "Адрон"	5
5	Обработка данных, восстановленных ФИАН	7
5.1	Данные для анализа	7
5.2	Методика обработки данных и построения спектров	8
5.3	Результаты	8
5.4	ФПР полученная по данным восстановленных ФИАН	13
6	Методика восстановления параметров ШАЛ	15
6.1	Нахождение первых приближений параметров ШАЛ	15
6.2	Аппроксимация ФПР	16
7	Заключение	20
	Список литературы	20

1 Введение

Цель работы

Цель данной работы - получить функцию пространственного распределения (ФПР) широких атмосферных ливней на основе данных, полученных с помощью установки «Адрон» на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС), независимо реконструировать параметры широких атмосферных ливней и сравнить полученные результаты с версией реконструкции ФИАН.

Задачи работы

Найти подходящую функцию пространственного распределения частиц ШАЛ для описания данных сцинтилляционной части установки адрон . Провести независимую реконструкцию основных параметров широких атмосферных ливней с использованием ФПР Нишимуры - Каматы - Грейзена.

На основе восстановленных данных провести комплексный анализ основных характеристик ШАЛ, включающий: распределение ливней по координатам оси и возрасту; спектр мощности ливня; пространственное распределение заряженных частиц ШАЛ.

2 Широкие атмосферные ливни

2.1 Основные параметры ШАЛ

Основными характеристиками широкого атмосферного ливня являются зенитный и азимутальный углы падения первичной частицы θ и ϕ , координаты пересечения оси ливня с плоскостью наблюдения (x, y) , мощность ливня N , а также возраст ливня s . Зенитный угол θ определяет наклон траектории падения частицы относительно вертикали, а азимутальный угол ϕ указывает её направление в горизонтальной плоскости. Ось ливня определяется как продолжение вектора импульса первичной частицы в направлении распространения каскада. Её пересечение с уровнем наблюдения реконструируется по пространственному распределению плотности частиц, регистрируемых детекторами.

Энергия первичной частицы E_0 играет ключевую роль в развитии ливня; с её увеличением возрастает число вторичных частиц, а сам ливень проникает глубже в атмосферу. Мощность ливня N представляет собой общее число заряженных частиц на определённой стадии формирования каскада. Часто в качестве оценки мощности используют число электронов N_e , составляющих

основную долю заряженных частиц в хорошо развитом ливне. Мощность ливня зависит от энергии первичной частицы E_0 , высоты первого взаимодействия h_1 , уровня наблюдения, а также углов падения θ и ϕ .

Возраст ливня s — это безразмерный параметр, отражающий стадию развития каскада. Значения $s < 1$ соответствуют молодым ливням, которые ещё не достигли максимума. При $s = 1$ ливень находится в стадии максимального развития, а при $s > 1$ — начинает затухать. Ещё одним важным параметром является глубина максимального развития X_{\max} , измеряемая в $[\text{г}/\text{см}^2]$, которая указывает глубину атмосферы, на которой достигается наибольшее число частиц. Чем выше энергия первичной частицы, тем глубже развивается ливень, и тем меньше значение X_{\max} . Связанной величиной является высота максимального развития h_{\max} , выражаемая в $[\text{см}]$, $[\text{м}]$ или $[\text{км}]$ от уровня моря. Она определяется через атмосферную глубину X по барометрической формуле для стандартной изотермической экспоненциальной атмосферы:

$$X(h) = X(h = 0) \exp^{h/h_s} \quad (1)$$

где h_s — масштабная высота атмосферы. Таким образом, характеристики ШАЛ тесно связаны между собой и зависят от параметров первичной частицы и условий её взаимодействия с атмосферой.[1]

3 Функция пространственного распределения

Направление оси ливня, а следовательно, и первичных космических лучей, определяется путем измерения времени прибытия фронта ливня в плоскость детекторов. Направление ливня является нормалью к реконструированному, слегка искривленному фронту ливня. Чтобы определить положение оси ливня и число частиц, измеряются плотности частиц и подбирается соответствующая функция поперечного распределения. Число частиц рассчитывается путем интегрирования измеренного поперечного распределения:

$$N = 2\pi \int_0^{\infty} \rho(r) r dr \quad (2)$$

где r -расстояние до оси ливня.

Чтобы избежать вычисления сложных выражений, описывающих продольное развитие электромагнитного каскада и вычисления его параметров, таких как местоположение максимума ливня, t_{\max} или X_{\max} и $N_{e,\max}$ или

размера ливня как функции первичной энергии E_0 и атмосферной толщины t (или X), $N_e(E_0, t)$, для различных приближений, Дж. Нишимура и К. Камата[2] предложили функцию пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ, которую можно использовать для вычисления размера ливня в любой точке атмосферы. Функция пространственного распределения Нишимуры–Каматы–Грейзена, была получена с помощью теории электромагнитных каскадов. Данная функция определяет поперечное распределение плотности заряженных частиц в зависимости от расстояния. Затем К. Грейзен аппроксимировал эту функцию для сцинтилляционных детекторов[3], которая имеет вид:

$$\rho(r, S, N_e) = \left(\frac{N_e}{r_M^2} \right) \left(\frac{r}{r_M} \right)^{S_N - 4.5} \frac{\Gamma(4.5 - S_N)}{2\pi\Gamma(S_N)\Gamma(4.5 - 2S_N)}, \quad (3)$$

где S_N :

$$S_N = \frac{3}{\left(1 + \left[2 \ln \left(\frac{E_0}{E_{\text{крит}}} \right) / t \right] \right)},$$

и t :

$$t = \int_z^\infty \frac{\rho(z) dz}{\chi_o}.$$

В вышеизложенных формулах: E – критическая энергия в воздухе (для электронов $E = 80$), χ_o – радиационная длина для воздуха, S_N – параметр возраста НКГ, t – длина трека частицы в радиационных длинах, $\rho(z)$ – плотность атмосферы на глубине z , и r_M – радиус Мольера.

Однако, классическая ФПР НКГ присывает только электромагнитную компоненту ливня, поэтому теоритическая функция может плохо описывать экспериментальные данные. Многие авторы добавляют изменения в ФПР НКГ, которые учитывают присутствие адронной компоненты. Так наиболее распространенным вариантом модифицированной ФПР НКГ является следующая функция:

$$\rho_{mod}(r, S, N_e) = (m \cdot r_M) \cdot \rho_e^{NKG} \left(\frac{r}{m} \right) \quad (6)$$

где $m = 0.78 - 0.21S$

4 Эксперимент "Адрон"

Эксперимент «Адрон» проводился на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС) в течение шести лет — с 1985 по 1991 год. Под руководством С.И. Никольского на Тянь-Шане был разработан комплексный метод исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ). Экспериментальная установка включала в себя ливневую систему для регистрации электронов и мюонов с пороговыми энергиями в несколько ГэВ, большой ионизационный калориметр площадью 44 м² для исследования стволов ливней, а также систему детекторов для регистрации черенковского излучения. Калориметр также содержал рентген-эмульсионную камеру (РЭК) с движущимися плёнками, часть материала которой фиксировала высокоэнергичные каскады в стволах ШАЛ. Особенностью данной установки является ее высота: ТШВНС расположена на высоте 3340 метров на уровне наблюдения, что позволяет детектировать ливни на ранней стадии их развития.

Ключевым этапом развития метода стало создание комбинированной установки РЭК-ШАЛ, объединившей преимущества высокогорной регистрации с возможностями детального изучения каскадов. Такое объединение рентген-эмульсионной камеры с электронной ливневой системой позволило перейти к более глубокому исследованию ядерных взаимодействий при энергиях первичных частиц выше 1 ПэВ, где обычные ионизационные калориметры уже не обеспечивают требуемого пространственного разрешения и статистики.

Основной задачей эксперимента было изучение характеристик ядерных взаимодействий на основе параметров ШАЛ. Поскольку каскадное развитие в атмосфере сопровождается многократными взаимодействиями, прямое исследование элементарных актов затруднено. Однако отбор ливней, в которых формируются гамма-адронные семейства, зарегистрированные в РЭК, позволяет выделить события с эффективной высотой генерации семейств порядка 3–4 км над уровнем установки. Благодаря этому появляется возможность непосредственно анализировать энергетические и пространственные характеристики наиболее энергичных частиц в стволах ливня.

Центральная часть установки «Адрон» включала рентген-эмульсионную камеру и четыре ряда ионизационных камер, образующих так называемую толчковую установку (ТУ). Ливневая часть состояла из системы сцинтилляционных детекторов (СЦ), мюонного и наземных годоскопов на основе счетчиков Гейгера–Мюллера, а также пунктов регистрации черенковского излучения. Управление экспериментом осуществлялось в автоматизированном режиме с помощью ЭВМ, а данные с детекторов записывались на магнитную ленту с использованием специализированной системы регистрации. Схема ливневой части установки представлена на рис.10

5 Обработка данных, восстановленных ФИАН

5.1 Данные для анализа

В данной работе обрабатывались данные с синцилляционных детекторов, полученные в ходе эксперимента «Адрон», проходившего в 1985-1987 гг. на ТШВНС. Работа проводилась с первичным банком экспериментальных данных, который представляет собой бинарный файл с подробным описанием событий. Каждый кадр содержит: служебную информацию, информацию с установки и архив. В архиве содержится информация о восстановленных параметрах ливня, подробная информация о восстановлении содержится в [3]. Лаборатория космических лучей Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, первое приближение параметров ШАЛ проводилось с использованием программы SPASE[3], для определения возраста ливня использовался метод максимального правдоподобия, а мощность ливня определялась по формуле:

$$N_e = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i^{\text{exp}}}{\sigma_i} r_m^{2s-4.5}}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i^{s-2} (r_i + r_m)^{s-4.5}}{\sigma_i} C(s)} \quad (7)$$

$$C(s) = \frac{\Gamma(4.5 - S_N)}{2\pi\Gamma(S_N)\Gamma(4.5 - 2S_N)}$$

$$\rho_i^{\text{exp}} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^n \rho_k$$

Направление оси ШАЛ в эксперименте "Адрон" определялось с помощью подсистемы "Хронотрон". Данная подсистема состояла из 4 синцилляционных детекторов и временной электроники. Детекторы были разбиты на пары 1-2, 3-4; в каждой паре измерялась задержка между срабатываниями первого и второго детекторов. В результате происходило измерение задержки фронта ливня вдоль координат x и y .

Для работы с первичным банком экспериментальных данных была написана программа для его прочтения на языке Python. Программа построчно читала каждую строку файла и записывала информацию о каждом событии в отдельный файл. Последующая работа проводилась с прочитанными данными. Количество успешно восстановленных и прочитанных событий из первичного банка данных составило 560000. Основными критериями для отбора событий являлись следующие факторы: зенитный угол $\theta \leq 30^\circ$, возраст $s \geq 0.41$. Дополнительно проводился отбор по координатам.

5.2 Методика обработки данных и построения спектров

Для обработки результатов эксперимента и построения спектров была разработана программа на языке Python, предназначенная для выборки и обработки параметров широких атмосферных ливней из выходных файлов, полученных в ходе прочтения первичного банка экспериментальных данных. Программа для построения спектров осуществляла фильтрацию данных, группировку событий по интервалам (диапазоны углов) и подсчет числа ливней в каждом диапазоне. Программа для построения ФПР включала в себя фильтрацию данных, расчет параметров ливня.

Построение графиков и дальнейший анализ спектров проводились с использованием программного пакета Origin, который обеспечил удобную визуализацию зависимостей.

5.3 Результаты

На рисунке 2 представлена зависимость количества событий от косинуса зенитного угла. Отбор производился по параметру $S > 0.4$, итоговое количество событий составило 410096 событий. По данному графику видно, что на установку в основном приходили вертикальные ливни. Распределение событий в зависимости от азимутального угла приведено на рис.3. Помимо условия отбора по возрасту, для этого распределения было применено условие $\theta < 30^\circ$, после отбора, количество событий составило 256905. Источники КЛ полностью изотропны, следовательно должно ожидать равномерное распределение. Однако, распределение имеет не полностью равномерный характер, в области 7×10^3 события распределены равномерно. Распределение имеет резкие локальные аномалии, 3 выброса и 5 минимумов, расположенные примерно каждые 100° и 70° , соответственно. Направление прихода ливней измерялось по времени задержки прихода ШАЛ. Измерения времен ведутся дискретными интервалами $\Delta\tau = 8$ нсек в диапазоне $t = 0 - 248$ нсек. Работе [4] было показано что, наличие дискретного интервала измерения $\Delta\tau$ искажает истинное распределение углов прихода ливня θ , ϕ и является причиной зависимости формы этих распределений от интервала разбиения гистограммы.

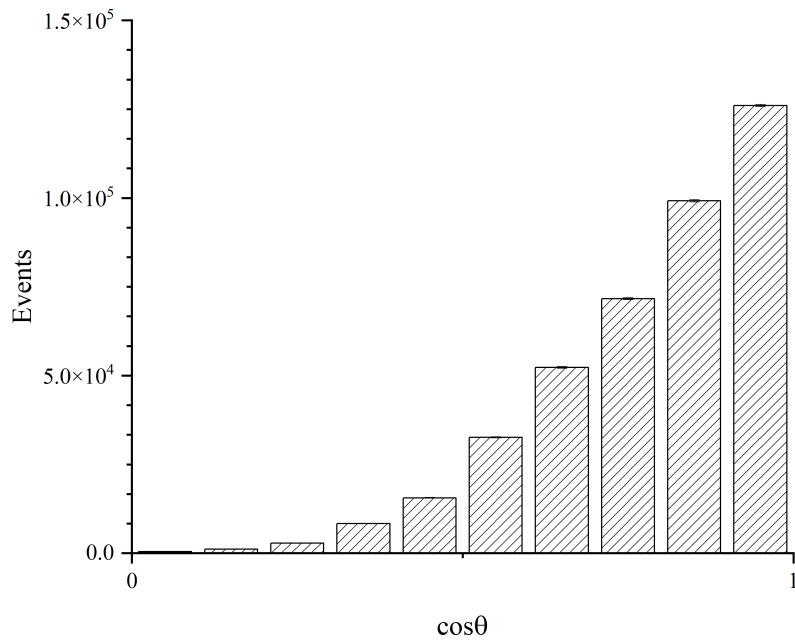


Рис. 2: Распределение событий по косинусу зенитного угла.

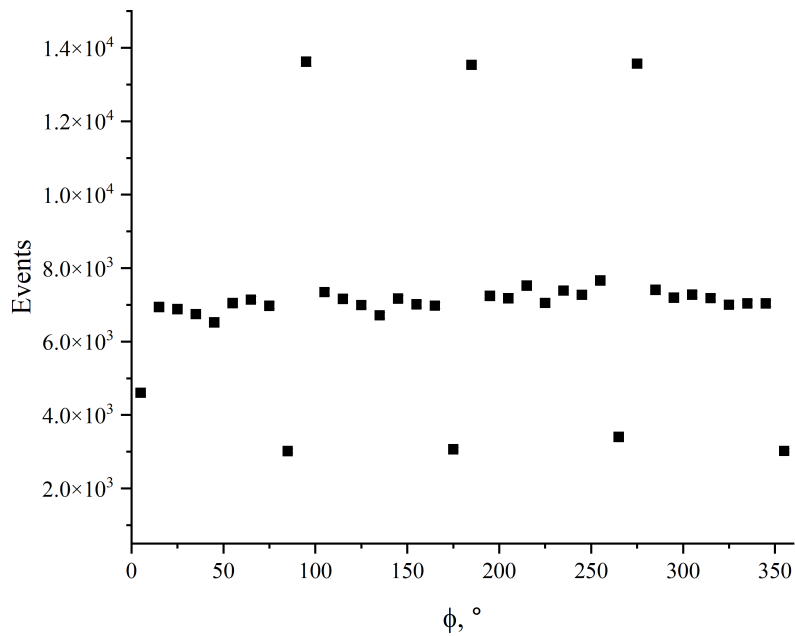


Рис. 3: Распределение событий по азимутальному углу.

На рис.4 показано распределение ливней по возрасту. Для данного распределения были применены такие же условия отбора как и для азимуталь-

ного угла, количество событий 269486. Средний возраст ливня $\langle S \rangle = 0.7$ означает, что на установку приходили в основном молодые ливни; это, в свою очередь, связано с тем, что установка находится высоко в горах.

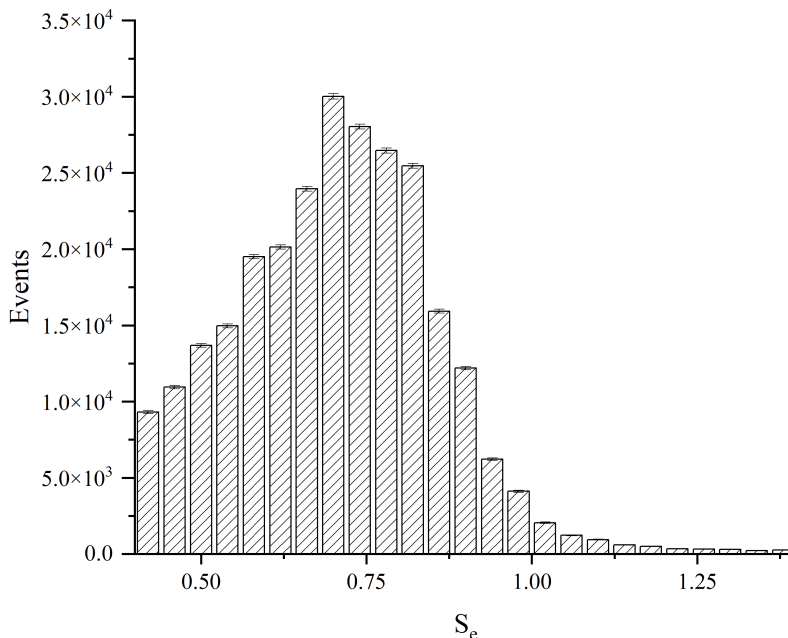


Рис. 4: Распределение событий по возрасту ливня.

Были построены графики мощности ШАЛ; на рис.5 показан спектр мощности, для отбора событий были применены вышеперечисленные условия по возрасту и азимутальному углу ШАЛ. На спектре можно наблюдать особенность в виде разрыва спектра на значении $\lg N_e \approx 5.8$. Природа этого разрыва непонятна; особенность, по видимому, связанная с несчетностью определения координат осей ШАЛ. Поэтому было принято решение построить дополнительный спектр в пределах толчковой установки и рентген эмульсионной камеры. В центре установки "Адрон" находилась толчковая установка (ТУ), которая представляла собой четыре ряда ионизационных камер, расположенных на площади рентген эмульсионной камеры (РЭК). РЭК позволяла находить угол прихода частиц, индивидуальную энергию каждой частицы, если она выше 2 ТэВ и имеет пространственное разрешение 100 мкм. ТУ лежала в пределах $-5 < x < 5$ и $-10 < y < 10$, относительно центра установки. На этой площади, соответственно, оси прихода ливней определялись с точностью 100 мкм. Ниже на рис.10 показаны графики в двух разных масштабах, оси ливней которых лежат в пределах ТУ. При уменьшении масштаба на рис.5 в области значения $\lg N_e \approx 6.7$ можно наблюдать изменение наклона,

что может указывать на присутствие колена в спектре мощности.

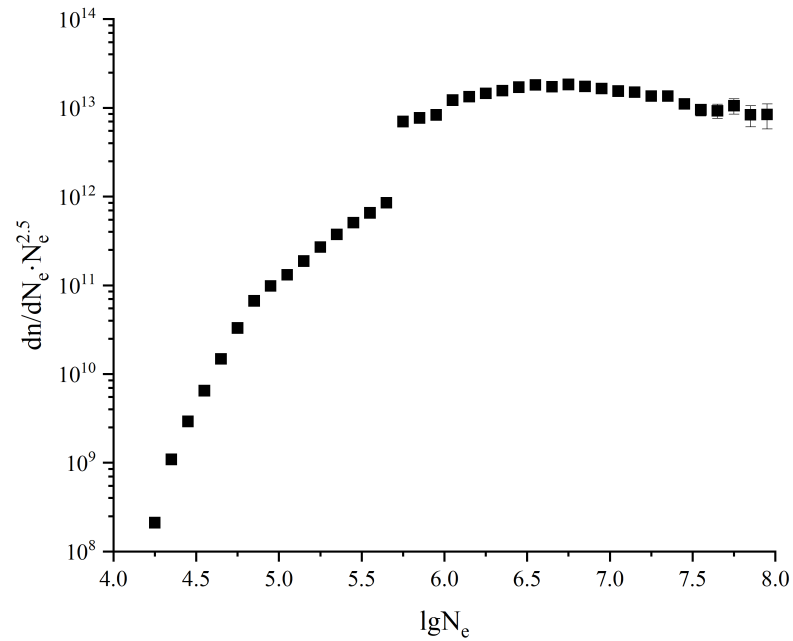


Рис. 5: Спектр мощности ШАЛ.

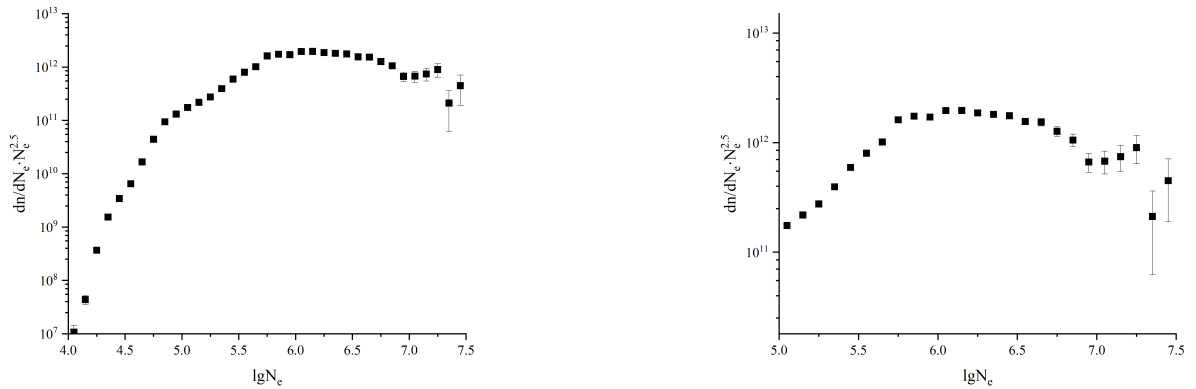


Рис. 6: Спектры мощности ливня, координаты осей находятся в пределах ТУ (слева-меньший масштаб, справа-большой).

В распределении мощности ливня наблюдается изменение поведения спектра, указывающее на возможное наличие "изгиба". Для подтверждения этой особенности был построен спектр мощности широких атмосферных ливней, используемый плотность частиц, зарегистрированную детекторами, в качестве оценки мощности рис.8.

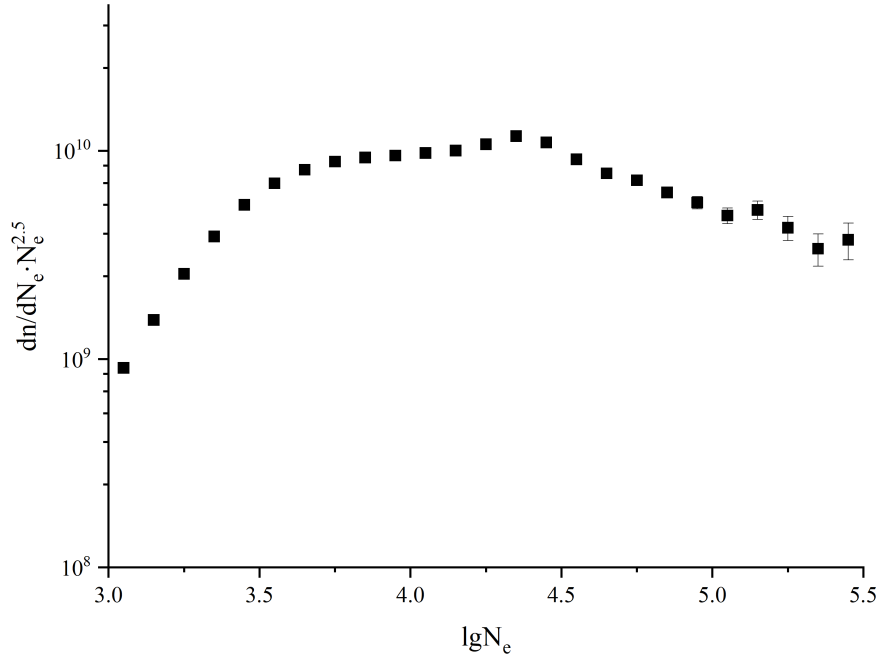


Рис. 7: Спектр мощности ШАЛ, построенный по плотности частиц, зарегистрированных детекторами установки.

Полученное распределение показывает отчетливое изменение наклона спектра в области $\lg N_e \approx 4.5$, указывающее на излом и согласующееся с существованием "колена" в спектре первичных космических лучей.

На рис.8 представлено распределение по координатам осей ливня. В распределение попадают ливни расстояние которых от оси до центральной группы детекторов $R \approx 70$ м. Это связано с тем, что при восстановлении данных ливни с расстоянием R от центра установки до оси, превышающие 70 м, не использовались в анализе. Помимо этого, на рисунке можно выделить кольцо $50 \text{ м} < R < 70 \text{ м}$; падение плотности ливней в этой области связано с методикой восстановления параметров ливня.

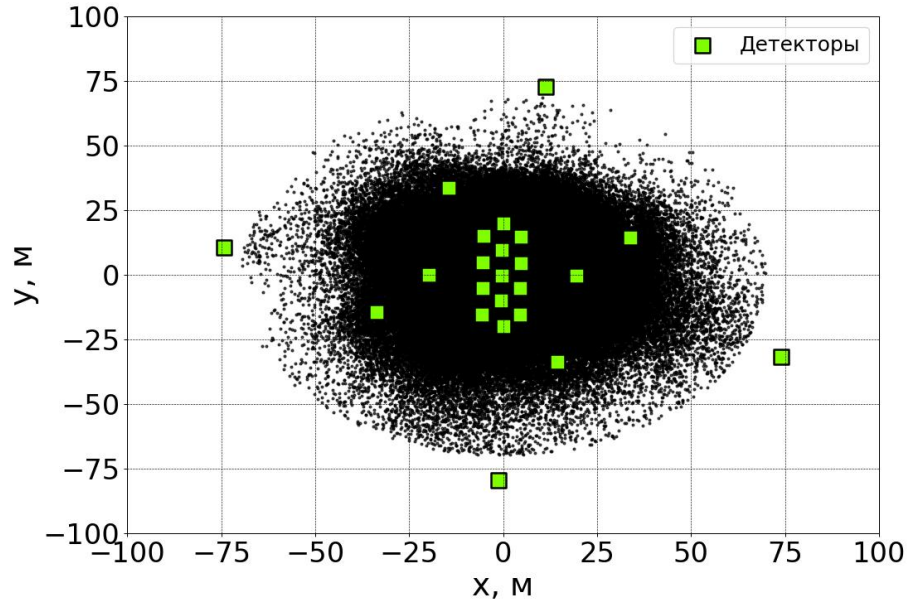


Рис. 8: Распределение координат осей ШАЛ.

5.4 ФПР полученная по данным восстановленных ФИАН

Следующим этапом в обработке данных с детекторов является построение функции пространственного распределения (ФПР) заряженных частиц ШАЛ. Направление оси ливня, а следовательно, и первичных космических лучей, определяется путем измерения времени прибытия фронта ливня в плоскость детекторов. Направление ливня является нормалью к реконструированному, слегка искривленному фронту ливня. Чтобы определить положение оси ливня и число частиц, измеряются плотности частиц и подбирается соответствующая ФПР.

Для построения экспериментальной ФПР в качестве оси ливня были взяты координаты, восстановленные лабораторией космических лучей Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, процесс восстановления описан в работе [5]. Плотность частиц в детекторе была рассчитана по формуле 8.

$$\rho = \frac{1}{s} \exp \frac{M - 1}{10} \quad (8)$$

где s -площадь сцинтилляционного детектора, M -код амплитуды импульса от детектора ($M = 1-127$).

После построения пространственного распределения зависимости плотности заряженных частиц от оси ливня была проведена аппроксимация экс-

периментальных результатов ФРП НКГ и модифицированной ФРП НКГ. С помощью библиотеки для языка программирования Python – SciPy, которая используется для выполнения инженерных и научных вычислений, была использована функция `scipy.optimize.curve_fit`, применяющая нелинейный метод наименьших квадратов при поиске параметров. Результаты аппроксимации функции пространственного распределения частиц ШАЛ для разных диапазонов мощностей приведены на рис.9, параметры аппроксимации приведены в таб.1.

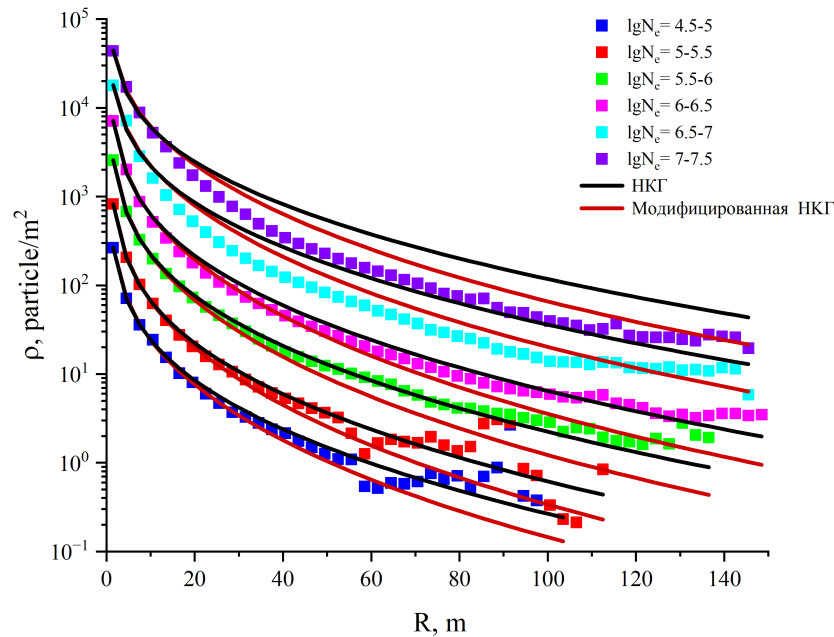


Рис. 9: Пространственное распределение частиц ШАЛ в разных диапазонах мощностей ливней

На рис.9 можно заметить, что при увеличении мощности ливней ФРП становится менее гладкой. Это объясняется тем, что количество событий в ливнях с низкой мощностью меньше. Помимо этого, экспериментальные данные показывают, что с увеличением мощности плотность частиц возрастает на всех расстояниях.

Результаты аппроксимации показывают, что более мощные ливни лучше описываются модифицированной ФРП НКГ, а менее мощные ливни – классической ФРП НКГ. Вблизи оси ливня ($R = 0 - 20$ м) обе функции ведут себя примерно одинаково. Классическая ФРП НКГ систематически завышает плотность на больших расстояниях, давая более пологий спад, модифицированная ФРП НКГ, в свою очередь, лучше воспроизводит быстрый спад эксперименталь-

$\lg N_e$	ρ_{NKG}		$\rho_{NKG}^{mod.}$	
	S	$\lg N_e$	S	$\lg N_e$
4.5 - 5	0.87	4.91	0.95	4.81
5 - 5.5	0.81	5.33	0.88	5.23
5.5 - 6	0.84	5.86	0.91	5.76
6 - 6.5	0.85	6.31	0.93	6.22
6.5 - 7	1.01	6.95	1.11	6.83
7 - 7.5	1.07	7.43	1.18	7.30

Таблица 1: Параметры полученные в ходе аппроксимации экспериментальных данных теоритическими ФПР.

ных данных при больших мощностях. Из таб.1 видно, что классическая ФПР НКГ дает меньшие значения параметра возраста ливня S и большие значения полного числа частиц N_e , в отличии от модифицированной.

6 Методика восстановления параметров ШАЛ

В данном работе была проведена независимая реконструкция параметров параметров ШАЛ на основе экспериментальных данных, полученных в ходе эксперимента "Адрон". В эксперименте заряженные частицы регистрировались с помощью ливневой части установки, состоящей из сцинтиляционных детекторов, а их плотность частиц в детекторах определялась по формуле (11). Основными параметрами, определяемыми в ходе восстановления являлись: координаты оси ливня (x, y), мощность заряженных частиц N_e и возраст ливня S.

6.1 Нахождение первых приближений параметров ШАЛ

В качестве первого приближения возраста ливня S, было выбрано среднее значение возраста ливня на данной высоте. Оно было определено из распределения рис.4 и составило $\langle S \rangle = 0.7$.

Ось ШАЛ характеризует направление прихода каскада, которое определяется наибольшей плотностью частиц. Частицы с более высокой энергией рассеиваются под меньшими углами, поэтому они располагаются ближе к центру оси ливня и, соответственно, вносят больше энергии в сцинтилляторы установки. В результате координаты детектора с максимальной плотностью частиц в событии могут быть использованы для определения положения оси широкого атмосферного ливня. Оценка координат осей ШАЛ в первом при-

ближении определялась положением центра тяжести события. Таким образом, для системы, состоящей из n детекторов, центр тяжести событий определяется по формулам:

$$x_{c, \text{восс.}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad y_{c, \text{восс.}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (9)$$

Первое приближение мощности заряженных частиц ливня, при среднем возрасте $S = 0.7$ определяется из функции НКГ (3), как:

$$N_e = \frac{\rho_{max} \cdot r_M^2}{B} \quad (10)$$

где ρ_{max} максимально зарегистрированная плотность частиц в детекторе, а B из формулы (3):

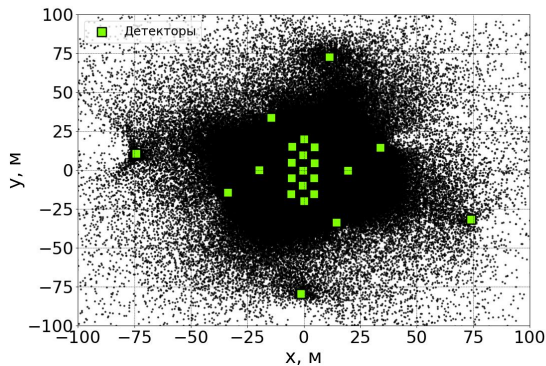
$$B = \left(\frac{r}{r_M}\right)^{S_N-2} \left(1 + \frac{r}{r_M}\right)^{S_N-4.5} \frac{\Gamma(4.5 - S_N)}{2\pi\Gamma(4.5 - 2S_N)}$$

6.2 Аппроксимация ФПР

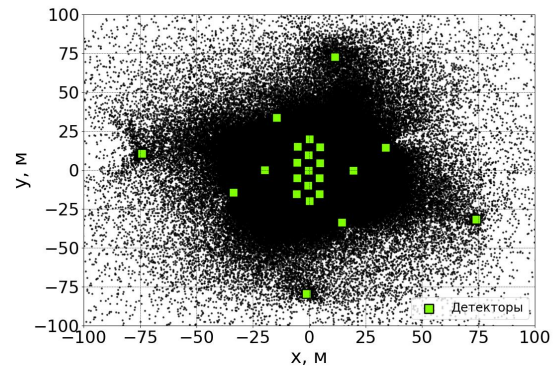
Восстановление параметров ШАЛ в данной работе основано на анализе пространственного распределения плотности вторичных частиц. Первым этапом восстановления является определение параметров в первом приближении для дальнейшей аппроксимации экспериментальной ФПР. Процесс аппроксимации аналогичен процессу, описанному в 5.4, за исключением того, что помимо S и N_e , свободными параметрами являются координаты оси ливня x и y .

На рисунке 10 представлено распределение координат осей ШАЛ. Распределение 10a получено в ходе аппроксимации данных классической функцией НКГ, а распределение 10b получено в результате аппроксимации параметров модифицированной ФПР НКГ. По этим графикам можно сделать вывод, что тип ФПР НКГ не дает существенного различия в восстановленных параметрах. Однако, можно заметить, что координаты, восстановленные модифицированной ФПР НКГ имеют более высокую концентрацию на периферии. В общей сложности, наибольшая плотность событий расположена в центральной области установки, в которой плотность детекторов наибольшая. Что соответствует предложению о том, что события восстанавливаются лучше в областях с наибольшим количеством детекторов. Если сравнивать полученные графики с распределением осей, восстановленными ФИАН рис.8, можно заметить, что независимые распределения обладают большей анизотропией и

покрывают большую площадь установки. Это связано с тем, что при восстановлении событий метод ФИАН использует жесткие ограничения на отбор событий, в отличие от нелинейного метода наименьших квадратов, используемого в этой работе. Жесткие условия отбора также влияют на количество восстановленных событий. Так, общее число зарегистрированных событий за 2 года работы установки составило - 560 000. Метод обработки ФИАН позволил восстановить 360 000 событий, тогда как, независимая обработка позволила восстановить 547 000 и 544 000 для классической и модифицированной функции НКГ, соответственно.



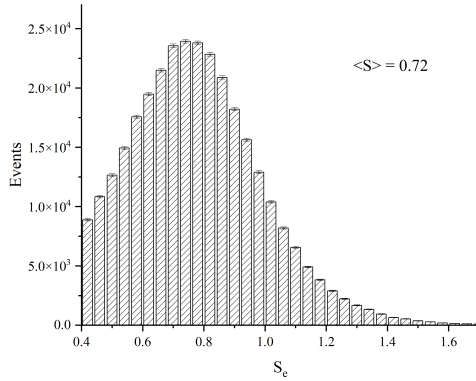
(a) Классическая НКГ



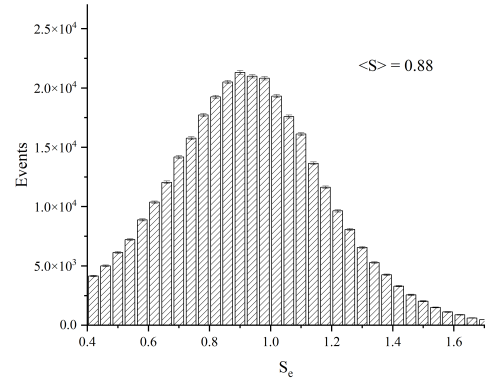
(b) Модифицированная НКГ

Рис. 10: Распределение координат осей ливня.

На рис.11а представлено распределение событий по возрасту ливня, полученной при аппроксимации данных классической ФПР НКГ. Распределение имеет более равномерный характер, в отличие от восстановления ФИАН. Средний возраст ливней, восстановленных с использованием классической ФПР НКГ, оказался несколько больше, $\langle S \rangle = 0.72$ нежели в варианте реконструкции ФИАН $\langle S \rangle = 0.7$. Рисунок 11b иллюстрирует спектр возраста, полученный аппроксимацией данных модифицированной функцией пространственного распределения НКГ. Средний возраст в данном варианте распределений смещается еще сильнее $\langle S \rangle = 0.88$. Так как установка находится высоко в горах и на нее в основном падают молодые ливни $\langle S \rangle < 1$, можно сделать вывод, что как классическая, так и модифицированная функции НКГ, корректно описывают ливни, приходящие на установку "Адрон".



(a) Классическая НКГ



(b) Модифицированная НКГ

Рис. 11: Распределение событий по возрасту ливня.

Рисунок рис.12 иллюстрирует распределение событий по мощности ливня. Для того чтобы сравнить методы реконструкции, были отобраны одинаковые события, так как во всех обработках использовались одинаковые углы прихода ливня, восстановленные с помощью системы "Хронотрон" отбор проводился по зенитному и азимутальному углам. На графике видно, что больших отличий в использовании разных типов ФПР НКГ не наблюдается. Оба варианта хорошо совпадают со спектром мощностей, полученным по данным, восстановленным ФИАН. Однако метод, использовавший классическую ФПР НКГ, лучше соответствует спектру мощностей, реконструированному ФИАН в диапазоне $\lg N_e = 6 - 6.57$. Особенность спектра ФИАН в виде разрыва спектра на значении $\lg N_e \approx 5.8$, не наблюдается на независимых восстановлениях. На рисунке 13 показан спектр мощности событий в меньшем масштабе. На этом спектре видно, что данные, восстановленные ФИАН, имеют излом в области $\lg N_e \approx 6.7$. Можно заметить, что спектры построенные, с использованием независимой реконструкции также имеют указание на "колени". Ввиду того, что рис.10 не имеет разрыва спектра в пределах точной области восстановления осей, можно сделать вывод о том, что вариант реконструкции событий ФИАН хуже восстанавливает параметр мощности ШАЛ на больших расстояниях, в отличие от метода реконструкции, использованного в этой работе.

Полученные спектры возраста, использовавшие классическую и модифицированную ФПР НКГ, соотнесаются со спектром, построенным по данным ФИАН и согласуются с тем, что на установку должны приходить молодые ливни. Как и спектр мощности восстановленной классической ФПР НКГ, показывающий наличие излома в спектре. Позволяют сделать вывод, что классическая и модифицированные функции НКГ одинаково хорошо описывают широкие

атмосферные ливни, регистрируемые установкой "Адрон" .

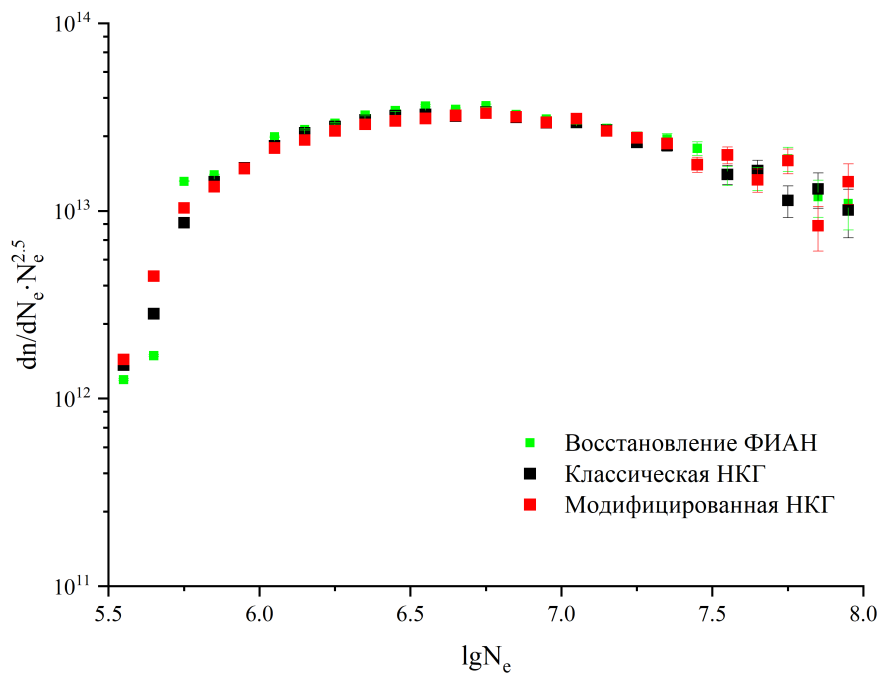


Рис. 12: Спектр мощности событий ливня

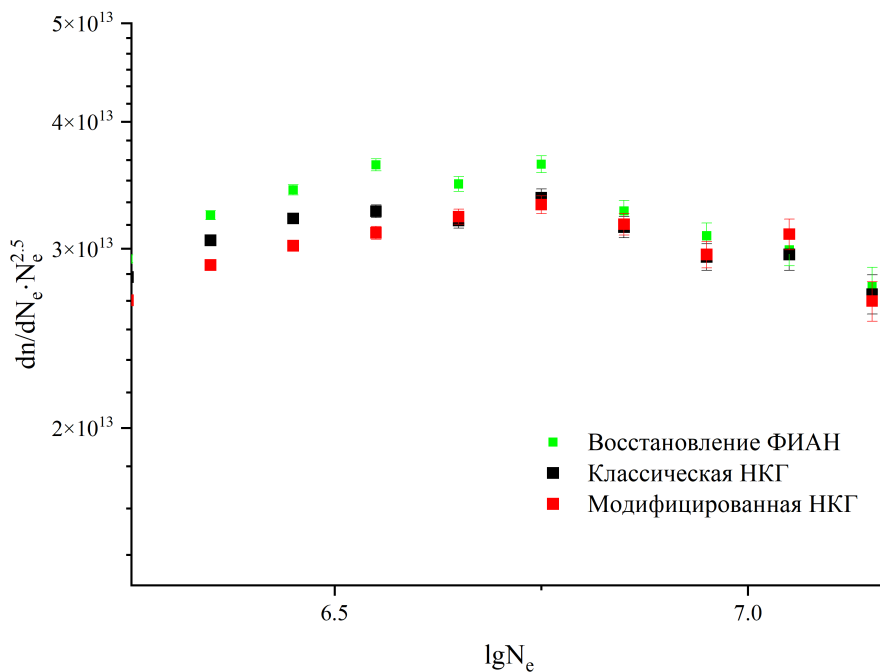


Рис. 13: Спектр мощности событий ливня в меньшем масштабе.

7 Заключение

В ходе проделанной работы была проведена реконструкция параметров широких атмосферных ливней нелинейным методом наименьших квадратов. В ходе которой были получены следующие параметры ливней: координаты осей x и y , мощность ливня N_e и возраст S . Затем по восстановленным параметрам были построены распределения и спектры, на основе которых был сделан вывод, классическая и модифицированная функции пространственного распределения НКГ корректно описывают ливни, приходящие на установку "Адрон" .

Список литературы

- [1] *Grieder P. K. F. Extensive air showers: high energy phenomena and astrophysical aspects-a tutorial, reference manual and data book. – 2010.*
- [2] *K. Kamata, J. Nishimura, The Lateral and the Angular Structure Functions of Electron Showers, Prog. of Theor. Phys. Suppl, vol. 6, pp. 93 – 155, 1958.*
- [3] *K. Greisen, Progress in Cosmic Ray Physics, Ed. by J.G. Wilson, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, vol. 3, 1956.*
- [4] *Баркалов К.В., Ставрев П.В., Нестерова Н.М., Киров И.Н., Анализ зенитных и азимутальных распределений ШАЛ с энергией свыше 0.5 ПэВ, полученных на Тянь-Шаньской установке. Препринт ФИАН N19, 1988, Москва.*
- [5] *Асейкин В.С., Никольская Н.М., Павлюченко В.П., Универсальный алгоритм оценки основных параметров ШАЛ, Препринт ФИАН N31, 1987, стр. 3-33.1987.*