

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШАЛ ПО ДАННЫМ
ЛИВНЕВОЙ ЧАСТИ УСТАНОВКИ «АДРОН»**

Студент _____ К. А. Воробьева

Научный руководитель,
PhD. _____ О. А. Каликулов

Научный соруководитель,
к.ф.-м.н., доц. _____ С. С. Хохлов

Научный консультант _____ Е. А. Южакова

Москва 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ШАЛ ПО ДАННЫМ
ЛИВНЕВОЙ ЧАСТИ УСТАНОВКИ «АДРОН»**

Студент _____ К. А. Воробьева

Научный руководитель,
PhD. _____ О. А. Каликулов

Научный соруководитель,
к.ф.-м.н., доц. _____ С. С. Хохлов

Научный консультант _____ Е. А. Южакова

Рецензент,
к.ф.-м.н., доц. _____ И. О. Фамилия

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 3 |
| 1 Космические лучи и широкие атмосферные ливни | 5 |
| 2 Эксперимент «Адрон» | 10 |
| 3 Анализ параметров ШАЛ, реконструированных по методике ФИАН | 13 |
| 3.1 Данные для анализа | 13 |
| 3.2 Результаты ФИАН | 15 |
| 4 Независимая реконструкция основных параметров ШАЛ | 23 |
| 4.1 Первое приближение параметров ШАЛ | 23 |
| 4.2 Критерии отбора надёжно восстановленных событий | 24 |
| 4.3 Результаты независимой реконструкции | 25 |
| 4.4 Спектр мощности ШАЛ и проявление колена | 31 |
| Заключение | 35 |
| Список использованных источников | 37 |

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в области исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ); однако в данной сфере остается множество нерешенных проблем. Одной из таких проблем остаётся происхождение «колена» в спектре первичного космического излучения. Важнейшим источником информации о свойствах первичных космических лучей являются данные наземных установок по регистрации широких атмосферных ливней.

Во второй половине прошлого века на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС) в высокогорных условиях, благоприятных для регистрации ШАЛ, проводились эксперименты по исследованию широких атмосферных ливней. В результате был накоплен значительный объём экспериментальных данных, часть которых была обработана с использованием методов реконструкции, доступных на момент проведения эксперимента.

Развитие вычислительных методов и доступность архивных данных позволяют выполнить повторную обработку событий с использованием современных программных средств и сравнить результаты с ранее выполненной реконструкцией ФИАН. Целью работы является анализ параметров ШАЛ, ранее реконструированных по методике ФИАН, и выполнение независимой реконструкции координат оси, мощности и возраста ливней по данным ливневой части установки «Адрон» ТШВНС.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить физические процессы развития ШАЛ и методы восстановления их параметров.
2. Проанализировать распределения параметров ШАЛ, реконструированных лабораторией космических лучей ФИАН.
3. Разработать программу для независимой реконструкции основных

параметров широких атмосферных ливней на основе экспериментальных данных установки «Адрон».

4. Сравнить результаты независимой реконструкции с параметрами, полученными по методике ФИАН, и с опубликованными данными по спектрам мощности ШАЛ.

Таким образом, повторная реконструкция данных, полученных с установки «Адрон», является актуальной задачей, позволяющей уточнить характеристики широких атмосферных ливней, проверить корректность ранее полученных результатов и сравнить методы восстановления параметров ШАЛ.

1. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ

Космические лучи (КЛ) были открыты в 1912 году Виктором Гессом в ходе серии полетов на воздушных шарах на высоту более 5000 м, во время которых он с помощью электрометров измерял интенсивность ионизирующего излучения на разных высотах [1]. Первоначально считалось, что КЛ являются высокоэнергетичным γ -излучением, однако в конце 1920-х годов исследования широтного эффекта и влияния магнитного поля Земли показали, что первичные КЛ содержат заряженные частицы. Основную долю первичных космических лучей составляют полностью ионизованные ядра атомов: примерно 90% приходится на протоны, около 9% — на ядра гелия, а оставшаяся часть — на более тяжёлые ядра, а также небольшую примесь электронов, позитронов и антипротонов. Большинство частиц космических лучей имеют релятивистские энергии. Вопрос о происхождении космических лучей до сих пор остается открытым, однако считается, что большая часть регистрируемых в окрестностях Земли КЛ имеет галактическое происхождение, то есть приходит из-за пределов Солнечной системы, но из области нашей Галактики.

В 1938 году Пьер Оже открыл явление «широких атмосферных ливней» [2], измеряя совпадения откликов счетчиков Гейгера на горных высотах, а позже и на уровне моря в Париже. Было выяснено, что частицы первичного космического излучения высокой энергии попадая в атмосферу, инициируют каскад вторичных частиц, часть которых может достигать уровня наблюдения. На основе своих наблюдений Пьер Оже пришел к выводу, что в КЛ обнаруживаются первичные частицы с энергией до 10^{15} эВ. По современным оценкам, вертикальный ливень от первичной частицы с энергией порядка 10^{15} эВ может содержать на уровне моря до $\sim 10^6$ вторичных частиц, в основном фотонов и электронов, а также некоторое

количество мюонов и адронов, рассеивающихся на площади около гектара [3].

Основная часть всех широких атмосферных ливней порождается чрезвычайно энергичными первичными адронами космических лучей ($E > 10^{13}$ эВ или > 10 ТэВ). Поток этих частиц в первом приближении близок к изотропному. При попадании в атмосферу первичные адроны взаимодействуют с ядрами атомов воздуха и образуют вторичные частицы. ШАЛ, вызванный космическими лучами, имеет три компоненты: электромагнитную, мюонную и адронную. Ливень состоит из ядра высокоэнергетичных адронов, которое постоянно подпитывает электромагнитную часть ливня, главным образом фотонами от распада нейтральных пионов π^0 и эта-мезонов η . Каждый высокоэнергетичный фотон генерирует свой электромагнитный подкаскад, сопровождаемый процессами рождения электрон-позитронных пар и тормозного излучения. Нуклоны и другие высокоэнергетичные адроны дополнительно развивают адронную часть каскада. Низкоэнергетические заряженные пионы π^\pm и каоны K^\pm распадаются, формируя мюонную компоненту ШАЛ[4].

Прохождение каскадного ливня через атмосферу сопровождается черенковским излучением воздуха, флуоресценцией воздуха и радиоизлучением. Таким образом, одна частица первичного космического излучения высокой энергии может создать гигантский каскад частиц и фотонов, который распространяется через атмосферу практически со скоростью света и может достичь уровня моря.

Степень продольного и поперечного развития зависит главным образом от энергии первичной частицы E_0 . Широкие атмосферные ливни с низкой энергией достигают максимального развития высоко в атмосфере и медленно затухают с увеличением атмосферной глубины, в то время как ливни с чрезвычайно высокой энергией могут достигать максимального развития вблизи уровня моря. По мере прохождения атмосферы электромагнитная и адронная компоненты интенсивно поглощаются и размножаются, тогда как мюоны, обладая высокой проникающей способностью, могут достигать уровня земли и проникать под землю[5].

Общее количество частиц, образующихся в результате ШАЛ на определенном уровне в атмосфере, называется мощностью ливня, N . Мощность

ливня в основном зависит от энергии E_0 , угла падения θ , и высоты первичного взаимодействия h_1 . Обычно N включает только заряженные частицы; гамма-кванты и нейтрино в этом контексте не учитываются, поскольку их обнаружение затруднено обычными приборами для регистрации ливней. В данной работе общее число заряженных частиц будет обозначаться N_e .

Ось ливня определяется как продолжение вектора начального импульса первичной частицы в направлении распространения каскада. Направление падения, т.е. зенитный θ и азимутальный ϕ углы падения первичной частицы, могут быть определены из измерений времени прибытия фронта частиц ливня в плоскость наблюдения.

Состав частиц в ливне и их соответствующие энергетические спектры зависят от ряда факторов, прежде всего от стадии развития каскада, называемой возрастом ливня s . Так называемые молодые ливни ($s < 1$) — это те, которые еще не достигли максимального развития на определенном уровне наблюдения, старые ливни ($s > 1$) — это те, которые уже прошли свой максимум. В максимуме ливня $s = 1$, а когда $s = 2$, ливень затухает до одной частицы.

Следующей важной характеристикой ШАЛ является глубина максимального развития X_{max} , которая измеряется в $[\text{г}/\text{см}^2]$. Данный параметр указывает атмосферную глубину, на которой число частиц в ливне достигает максимального значения. Связанной величиной является высота максимального развития h_{max} , выражаемая в $[\text{см}]$, $[\text{м}]$ или $[\text{км}]$ от уровня моря. С ростом энергии первичной частицы максимум развития в среднем смещается на большие атмосферные глубины, то есть X_{max} увеличивается. При этом соответствующая геометрическая высота h_{max} над уровнем моря уменьшается.

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 распре-

ления:

$$N = 2\pi \int_0^{\infty} \rho(r) r dr \quad (1.1)$$

где r -расстояние до оси ливня.

Для практического восстановления параметров ШАЛ вместо полного моделирования продольного развития каскада часто используют аналитические функции пространственного распределения частиц на уровне наблюдения. Дж. Нишимура и К. Камата [6] предложили функцию пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ, которую можно использовать для вычисления размера ливня в любой точке атмосферы.

Функция пространственного распределения Нишимуры–Каматы 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 [7], которая имеет вид:

$$\rho(r, S, N_e) = \left(\frac{N_e}{r_M^2} \right) \left(\frac{r}{r_M} \right)^{S_N-2} \left(1 + \frac{r}{r_M} \right)^{S_N-4.5} \frac{\Gamma(4.5 - S_N)}{2\pi\Gamma(S_N)\Gamma(4.5 - 2S_N)}. \quad (1.2)$$

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 :

$$t = \int_z^{\infty} \frac{\rho_{\text{атм}}(z') dz'}{\chi_0}$$

В вышеизложенных формулах: $E_{\text{крит}}$ – критическая энергия в воздухе (для электронов $E_{\text{крит}} = 80$ МэВ), χ_0 – радиационная длина для воздуха, S_N – параметр возраста НКГ, t – атмосферная глубина, выраженная в радиационных длинах, $\rho_{\text{атм}}(z)$ – плотность атмосферы на глубине z , и r_M – радиус Мольера.

Однако классическая ФПР НКГ описывает только электромагнитную компоненту ливня, поэтому теоретическая функция может плохо описывать экспериментальные данные. Многие авторы добавляют эмпириче-

ские модификации ФПР НКГ, которые позволяют лучше описывать экспериментальные распределения, отличающиеся от чисто электромагнитной каскадной модели. Так наиболее распространенным вариантом модифицированной ФПР НКГ является следующая функция:

$$\rho_{mod}(r, S, N_e) = (m \cdot r_M) \cdot \rho_e^{NKG} \left(\frac{r}{m} \right) \quad (1.3)$$

где $m = 0.78 - 0.21S$.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ «АДРОН»

Эксперимент «Адрон» [8] [9] проводился на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции на протяжении шести лет — с 1985 по 1991 год. Проектом руководил С.И. Никольский, разработавший комплексный метод изучения ШАЛ. Ключевой особенностью эксперимента было сочетание метода широких атмосферных ливней (ШАЛ) и метода рентгеноэмульсионных камер (РЭК).

Установка состояла из большого ионизационного калориметра (БИК) площадью 44 м^2 , задача которого заключалась в исследовании стволов ливней, ливневой системы для регистрации заряженных частиц с пороговыми энергиями в несколько ГэВ, а также группы детекторов для регистрации черенковского излучения. Калориметр состоял из рентген-эмульсионной камеры с движущимися плёнками, которые использовались для регистрации высокоэнергичных каскадов в стволах ШАЛ. Особенностью данной установки является её высота: ТШВНС расположена на высоте 3340 метров над уровнем моря (690 г/см^2), что позволяет детектировать ливни на ранней стадии их развития.

Основной задачей эксперимента было изучение характеристик ядерных взаимодействий на основе параметров ШАЛ. Для решения этой задачи анализировались события, зарегистрированные одновременно ливневой частью установки и РЭК. Объединение событий проводилось с помощью сравнения проекций зенитного угла в плоскостях XZ и YZ и местоположений центров тяжести событий в РЭК с осью ШАЛ в толчковой установке (ТУ) [10].

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.

Система сцинтилляционных детекторов, в свою очередь, включала в себя центральный «ковер» из 17 пунктов. Каждый из пунктов состоял из 3 сцинтилляционных детекторов, размеров $0.5 \times 0.5 \times 0.05 \text{ м}^3$. В центре установки находился детектор размером $1 \times 1 \times 0.1 \text{ м}^3$. Помимо этого установка включала в себя 4 пункта по 2 детектора, размером $1 \times 1 \times 0.1 \text{ м}^3$, на расстоянии 20 м от центра. 8 пунктов из 3 детекторов, размером $1 \times 1 \times 0.05 \text{ м}^3$, на расстояниях около 40 и 70 м. В итоге общая площадь регистрации составляла 0.015 км^2 . Схема ливневой части установки представлена на рис.2.1. Управление экспериментом осуществлялось в автоматизированном режиме с помощью ЭВМ, а данные с детекторов записывались на магнитную ленту с использованием специализированной системы регистрации.

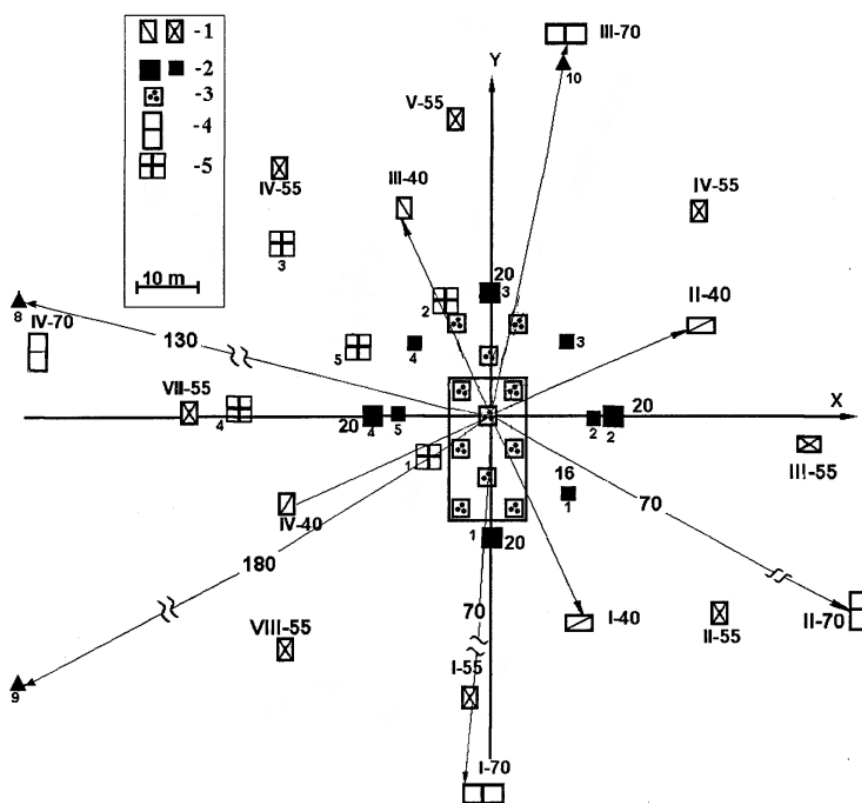


Рисунок 2.1 — Схема ливневой части установки "Адрон".

Условные обозначения к рис. 2.1:

- 1— Сцинтилляционные детекторы: 34(40) – 4 группы по 3 сц – 1 м^2 ;
- 2— Сцинтилляционные детекторы: 55 м – 8 групп по 3 сц – 0.25 м^2 ;
- 3— Сцинтилляционные детекторы: 16 м – 6 групп по 3 сц – 0.25 м^2 ;

- 4– Сцинтилляционные детекторы: 20 м – 4 группы по 2 сц – 1 м²;
- 5– Сцинтилляционные детекторы: 11 групп по 3 сц – 0.25 м²;
- 6– Сцинтилляционные детекторы: 4 группы по 3 сц – 1 м²;
- 7– Сцинтилляционные детекторы ПЕМА нейтронного монитора: 5 групп – 0.25 м².

Таким образом, установка «Адрон» являлась одним из примеров комплексного подхода, объединяющего методы регистрации ШАЛ и изучения ядерных взаимодействий на высоких энергиях с возможностью пространственно-энергетического анализа структуры каскадов непосредственно в стволе ливня.

3. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ, РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ ПО МЕТОДИКЕ ФИАН

3.1 ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА

В данной работе проводилась обработка данных, полученных сцинтилляционными детекторами в ходе первой серии измерений 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 архивной части кадра содержатся параметры ливней, ранее восстановленные лабораторией космических лучей Физического института им. П.Н. Лебедева РАН с использованием программы SPASE[11]. Для определения возраста ливня использовался метод максимального правдоподобия, координаты оси вычислялись минимизацией специального функционала, а мощность ливня определялась по формуле[12]:

$$N_e = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i^{\text{exp}}}{\sigma_i} r_m^{2s-4.5}}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i^{s-2} (r_i + r_m)^{s-4.5}}{\sigma_i} C(s)} \quad (3.1)$$

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

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

где ρ_i^{exp} — средняя плотность частиц в пункте, n_i — число детекторов в пункте, ρ_k — плотность частиц в k -м детекторе.

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n_i} \left(\frac{\sigma_k}{S_k}\right)^2}}{n_i}$$

усредненная ошибка измерения в i -м пункте, S_k -площади детекторов, и

$$\sigma_k = \sqrt{n_k} + 0.015n_k$$

Направление оси ШАЛ в эксперименте «Адрон» определялось с помощью подсистемы «Хронотрон»[13]. Данная подсистема состояла из 4 сцинтилляционных детекторов и временной электроники. Детекторы были разбиты на пары 1-3, 2-4; в каждой паре измерялась задержка между срабатываниями первого и второго детекторов. В первичном банке данных хранилась информация о задержках срабатывания, преобразованных в код $N_1 N_2$. Шаг квантования времен задержки $T_0 = 8$ нс. Углы определяются по формулам:

$$\theta = \arcsin \frac{c \cdot T_0}{L} \sqrt{(N_1 - 16)^2 + (N_2 - 16)^2} \quad (3.2)$$

$$\phi = D - \arctan\left(\frac{N_1 - 16}{N_2 - 16}\right) \quad (3.3)$$

где: L - расстояние между пунктами хронотрона $L = 40$ м и c - скорость света, а коэффициент D определяется в зависимости от знаков N_1 и N_2 .

Для работы с первичным банком экспериментальных данных была написана программа для его прочтения на языке Python. Программа последовательно считывала записи бинарного файла и извлекала информацию о каждом событии. Последующая работа проводилась с прочитанными данными. Количество прочитанных событий из первичного банка данных составило 560000. Далее был выполнен отбор по флагу надёжности реконструкции: оставлялись события, для которых все основные параметры были восстановлены успешно. Основными критериями для отбора событий являлись следующие факторы: зенитный угол $\theta \leq 30^\circ$, возраст $s \geq 0.4$,

после чего в финальную обработку вошло 360 247 событий.

3.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ФИАН

Зенитные и азимутальные углы были восстановлены по формулам 3.2 и 3.3. На рисунке 3.1 представлена зависимость количества событий от косинуса зенитного угла. Отбор производился по параметру $s > 0.4$, итоговое количество событий составило 410096. По данному графику видно, что распределение имеет максимум в области больших значений $\cos\theta$, что связано с большей эффективностью регистрации вблизи вертикальных направлений.

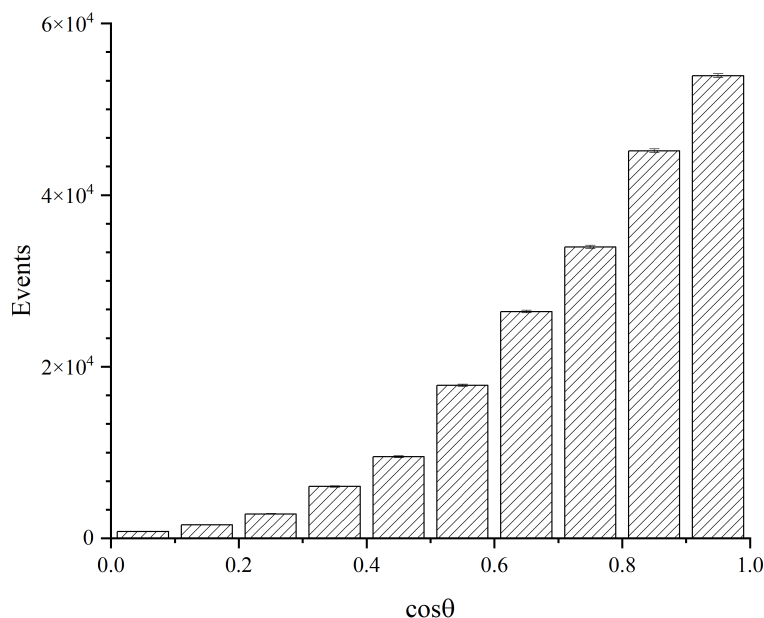


Рисунок 3.1 — Распределение событий по косинусу зенитного угла.

Распределение событий в зависимости от азимутального угла приведено на рис. 3.2. Помимо условия отбора по возрасту, для этого распределения было применено условие $\theta < 30^\circ$; после отбора количество событий составило 239 577. При близкой к изотропной направленности потока КЛ распределение событий по азимутальному углу должно быть близким к равномерному. Однако распределение не имеет полностью равномерного характера. Большая часть бинов находится на уровне около 6×10^3 событий, однако на этом фоне наблюдаются локальные пики и провалы — 4 вы-

броса и 4 минимума, расположенные примерно каждые 90° . Направление прихода ливней измерялось по времени задержки прихода ШАЛ. Измерения времени ведутся дискретными интервалами $\Delta\tau = 8$ нсек в диапазоне $t = 0\text{--}248$ нсек. В работе [14] 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.

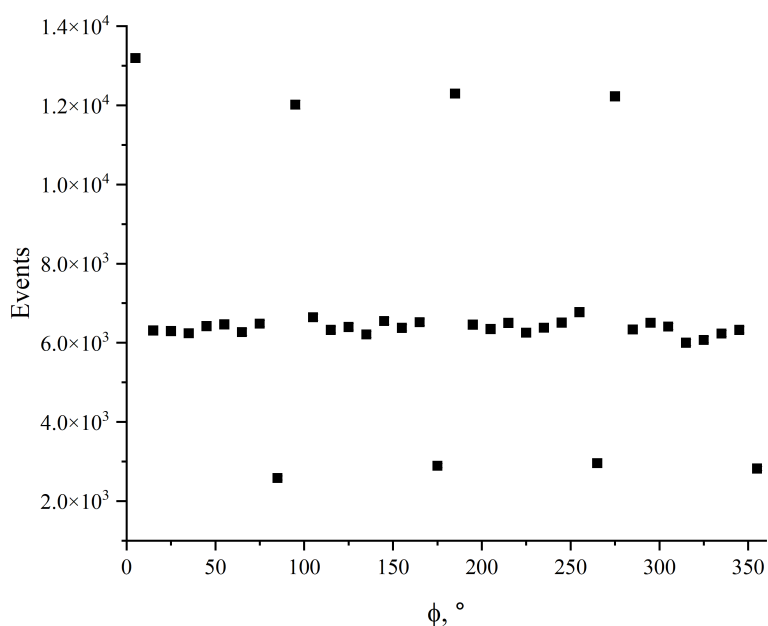


Рисунок 3.2 — Распределение событий по азимутальному углу.

На рис.3.3 показано распределение ливней по возрасту. Для данного распределения были применены такие же условия отбора, как и для азимутального угла. 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.

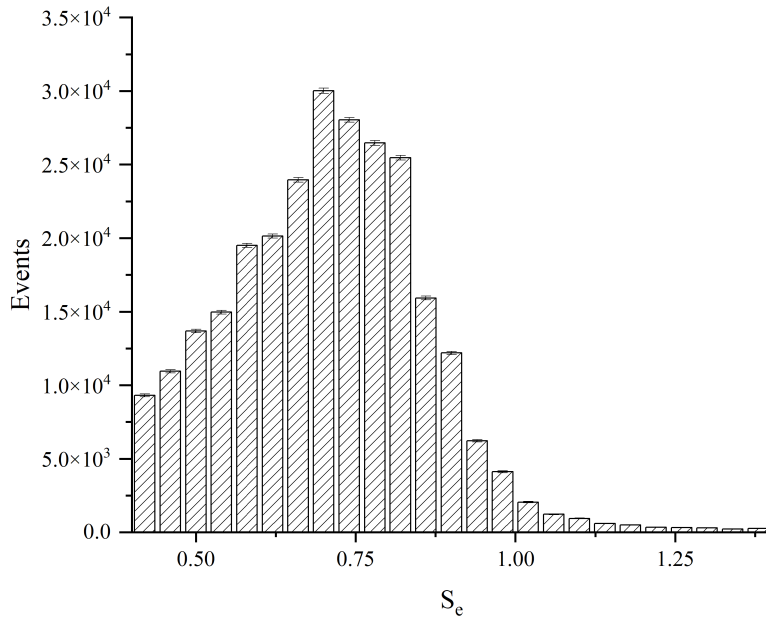


Рисунок 3.3 — Распределение событий по возрасту ливня.

На рис.3.4 представлено распределение по координатам осей ливня. В распределение попадают ливни, максимальное расстояние которых от восстановленной 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.

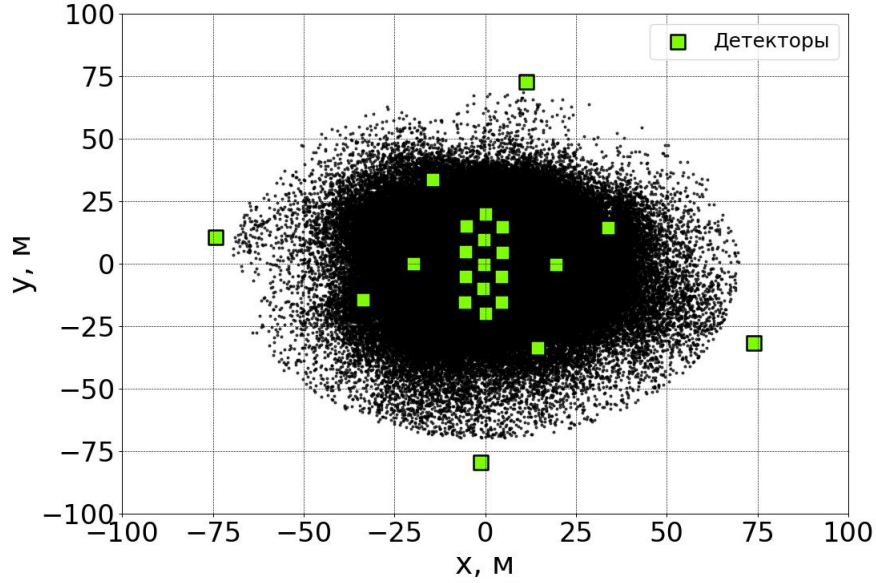


Рисунок 3.4 — Распределение координат осей ШАЛ.

На рисунке 3.5 приведены спектры мощности. Для отбора событий были применены вышеперечисленные условия по возрасту и азимутальному углу ШАЛ. Спектры были домножены на $N_e^{2.4}$, чтобы визуально выровнять спектр и лучше видеть его особенности.

Обработка включала калибровку сцинтилляционных детекторов и контроль их работоспособности. Сцинтилляционные детекторы были изготовлены из полистироловых сцинтилляторов на основе Р-терфенила, толщиной 5 см, поэтому в них, помимо электронов, могли регистрироваться и гамма-кванты. Во избежание ошибки показания сцинтилляционных детекторов калибровались при помощи годоскопа Гейгеровских счетчиков. Полученная калибровка сводится к уменьшению N_e в 1.17 раза [12]. В области значения $\lg N_e \approx 5.6$ можно наблюдать изменение наклона, что указывает на присутствие колена в спектре мощности. Для проверки устойчивости наблюдаемой особенности был дополнительно построен спектр по суммарной плотности частиц, зарегистрированных детекторами установки рис.3.6. Полученное распределение показывает отчетливое изменение наклона спектра в области $\lg \rho_{\text{сумм.}} \approx 4.5$, указывающее на излом и согласующееся с существованием «колена» в спектре первичных космических лучей.

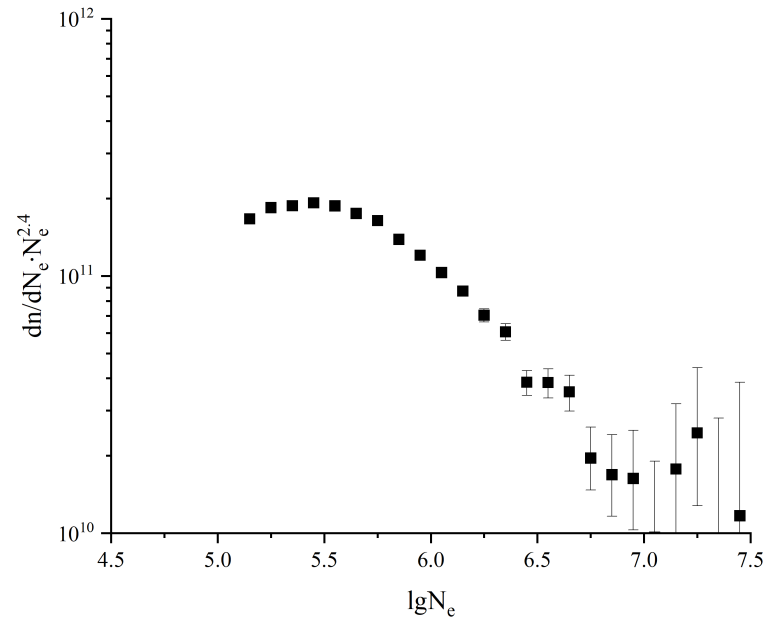


Рисунок 3.5 — Спектр мощности ШАЛ.

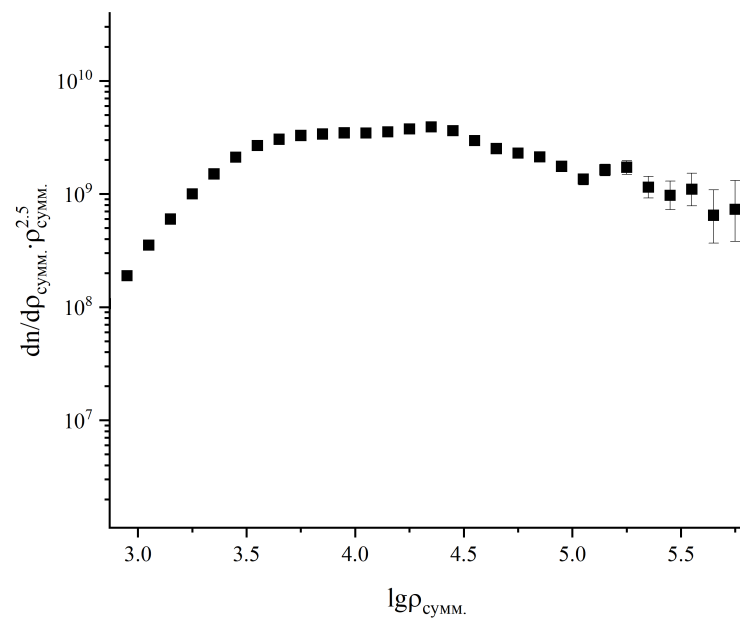


Рисунок 3.6 — Спектр мощности ШАЛ, построенный по плотности частиц, зарегистрированных детекторами установки.

На рисунке 3.7 показан спектр мощности, разбитый на диапазоны по зенитному углу. По этому спектру можно заметить, что количество ливней возрастает с уменьшением зенитных углов. Это связано с тем, что ливни с большими зенитными углами проходят более длинный путь в атмосфере,

в результате чего электронная составляющая поглощается сильнее, и регистрируемое количество частиц уменьшается. у всех спектров наблюдается одинаковая форма, в области значений $\lg N_e \approx 5.6$ наблюдается изменение наклона спектра, что, как и на спектре 3.5, указывает на колено в спектре мощности.

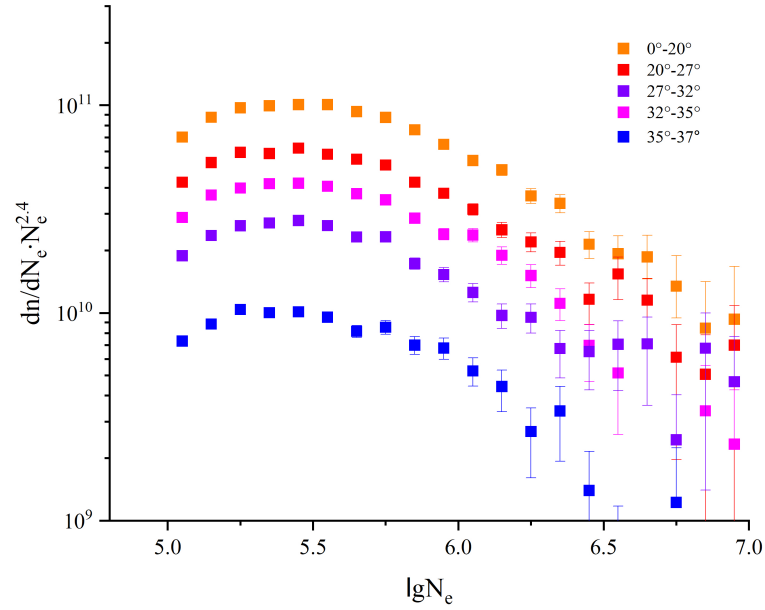


Рисунок 3.7 — Спектр мощности ШАЛ, разбитый по диапазонам зенитных углов.

Следующим этапом в обработке данных с детекторов является построение функции пространственного распределения заряженных частиц ШАЛ. Для построения экспериментальной ФПР в качестве координат оси ШАЛ использовались значения, восстановленные лабораторией космических лучей ФИАН. Плотность частиц в детекторах была рассчитана по формуле [15]:

$$\rho = \frac{1}{s_{det}} \exp \frac{M - 1}{10} \quad (3.4)$$

где s_{det} -площадь сцинтилляционного детектора, M -код амплитуды импульса от детектора ($M = 1-127$).

После построения пространственного распределения зависимость плотности заряженных частиц от расстояния до оси ливня была проведена аппроксимация экспериментальных результатов ФПР НКГ и модифицированной ФПР НКГ. С помощью библиотеки для языка программирования

Python – SciPy, которая используется для выполнения инженерных и научных вычислений, была использована функция `scipy.optimize.curve_fit` [16], применяющая нелинейный метод наименьших квадратов при поиске параметров. Результаты аппроксимации функции пространственного распределения частиц ШАЛ для разных диапазонов мощностей приведены на рис.3.8, параметры аппроксимации приведены в таб.1.

| $\lg N_e$ | ρ_{NKG} | | $\rho_{\text{NKG}}^{\text{mod.}}$ | |
|-----------|---------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| | 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 3.1 — Параметры, полученные в ходе аппроксимации экспериментальных данных теоретическими ФПР.

На рис.3.8 можно заметить, что при уменьшении мощности ливней ФПР становится менее гладкой. Это объясняется тем, что в области ниже энергетического порога эффективность регистрации и реконструкции ливней снижается. Помимо этого, аппроксимация теоретическими функциями систематически завышает значение плотности частиц на больших расстояниях. Это объясняется тем, что функции НКГ были получены без учета мюонной компоненты, которая преобладает на больших расстояниях.

Результаты аппроксимации по параметрам мощности и возраста ШАЛ показывают, что более мощные ливни лучше описываются модифицированной ФПР НКГ, а менее мощные — классической ФПР НКГ. Вблизи оси ливня ($R = 0 - 20\text{м}$) обе функции ведут себя примерно одинаково. Классическая ФПР НКГ систематически завышает плотность на больших расстояниях, давая более пологий спад. Модифицированная ФПР НКГ, в свою очередь, лучше воспроизводит быстрый спад экспериментальных 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 отличие от модифицированной.

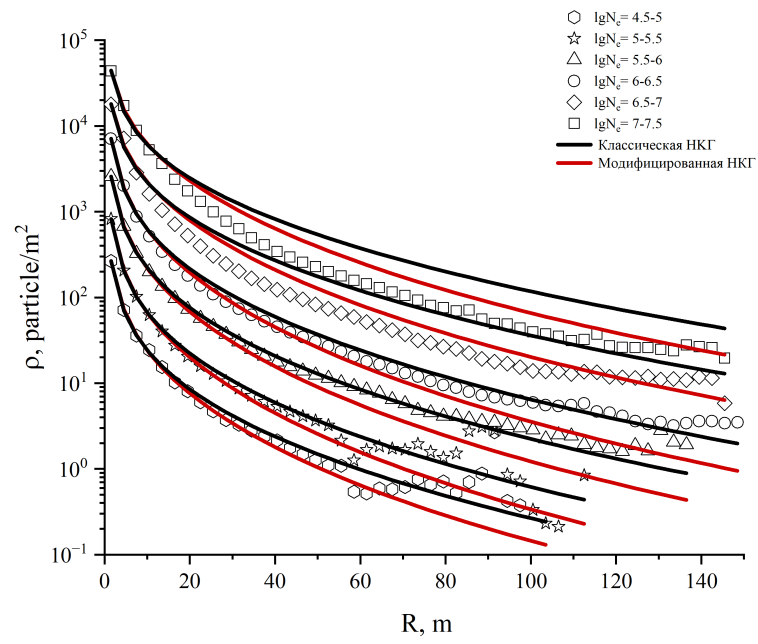


Рисунок 3.8 — Пространственное распределение заряженных частиц ШАЛ в разных диапазонах мощностей ливней.

4. НЕЗАВИСИМАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

В данной работе была проведена независимая реконструкция основных параметров ШАЛ на основе экспериментальных данных, полученных в ходе эксперимента "Адрон". В эксперименте заряженные частицы регистрировались с помощью ливневой части установки, плотность частиц в детекторах определялась по формуле 3.4. При восстановлении были использованы углы, вычисленные по формулам 3.2, 3.3. Основными параметрами, определяемыми в ходе восстановления, являлись: координаты оси ливня (x , y), мощность заряженных частиц N_e и возраст ливня S .

4.1 ПЕРВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШАЛ

В качестве первого приближения возраста ливня S было выбрано среднее значение возраста ливня на данной высоте. Оно было определено из распределения рис.3.3 и составило $\langle s \rangle = 0.7$.

Положение оси ШАЛ на уровне установки соответствует области максимальной плотности частиц. Поэтому для выбора начального приближения координат оси можно использовать распределение плотностей в детекторах. 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 первого приближения оси широкого атмосферного ливня. Оценка координат осей ШАЛ в первом приближении определялась положением центра тяжести события. Таким образом, для системы, состоящей из n детекторов, центр тяжести событий определяется

по формулам:

$$x_{c, \text{восс.}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \quad y_{c, \text{восс.}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \quad (4.1)$$

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

$$N_e = \frac{\rho_{max} \cdot r_M^2}{B} \quad (4.2)$$

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

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

где r_M - радиус Мольера, для данной высоты (690 г/см^2), 120 м.

4.2 КРИТЕРИИ ОТБОРА НАДЁЖНО ВОССТАНОВЛЕННЫХ СОБЫТИЙ

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 3.4, за исключением того, что помимо s и N_e свободными параметрами являются координаты оси ливня x и y . Для обеспечения устойчивой процедуры аппроксимации и исключения физически нереалистичных решений при восстановлении параметров ШАЛ были введены ограничения на область изменения искомых параметров. Для координат оси были заданы границы: $-300\text{м} < x < 300\text{м}$ и $-300\text{м} < y < 300\text{м}$. Границы для возраста $0 < s < 2$. Ограничение на мощность $\lg N_{e,0} - 2 < \lg N_e < \lg N_{e,0} + 2$, где $\lg N_{e,0}$ — мощность в первом приближении, вычисленная по формуле 4.2.

Было аппроксимировано 360 000 событий. В результате аппрокси-

мации удалось восстановить 353 684 ливней классической НКГ и 352 067 событий модифицированной НКГ.

Для оценки надёжности восстановления параметров ШАЛ был введён критерий качества аппроксимации. При достижении параметром предельного значения, событие нельзя считать корректно восстановленным, так как это является признаком некорректной или неустойчивой сходимости алгоритма минимизации. В качестве этого критерия использовалось условие отсутствия выхода на границу допустимого изменения параметров. События для которых выполнялось:

$$p_i = p_i^{\min} \quad \text{или} \quad p_i = p_i^{\max}$$

где p_i - восстанавливаемый параметр, исключались из дальнейшего анализа.

В итоге, после отбора по критерию надёжности количество восстановленных событий для классической НКГ составило 341 663 и 340 835 для модифицированной.

4.3 РЕЗУЛЬТАТЫ НЕЗАВИСИМОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

На рисунке 4.1 представлены распределения координат осей ШАЛ. Распределение 4.1a получено в ходе аппроксимации данных классической функцией НКГ, а распределение 4.1б получено в результате аппроксимации параметров модифицированной ФПР НКГ. По этим графикам можно сделать вывод, что тип ФПР НКГ не дает существенного различия в распределении координат восстановленных осей. В общей сложности, наибольшая плотность событий расположена в центральной области установки, где плотность детекторов выше. Если сравнивать полученные графики с распределением осей, восстановленными ФИАН рис.4.1в, можно заметить, что независимые распределения обладают более значительной неоднородностью и покрывают большую площадь установки. Более широкое распределение координат осей в независимой реконструкции может быть связано с менее жёсткими ограничениями на положение оси. Однако для

оценки качества таких событий требуется дополнительный анализ ошибок реконструкции.

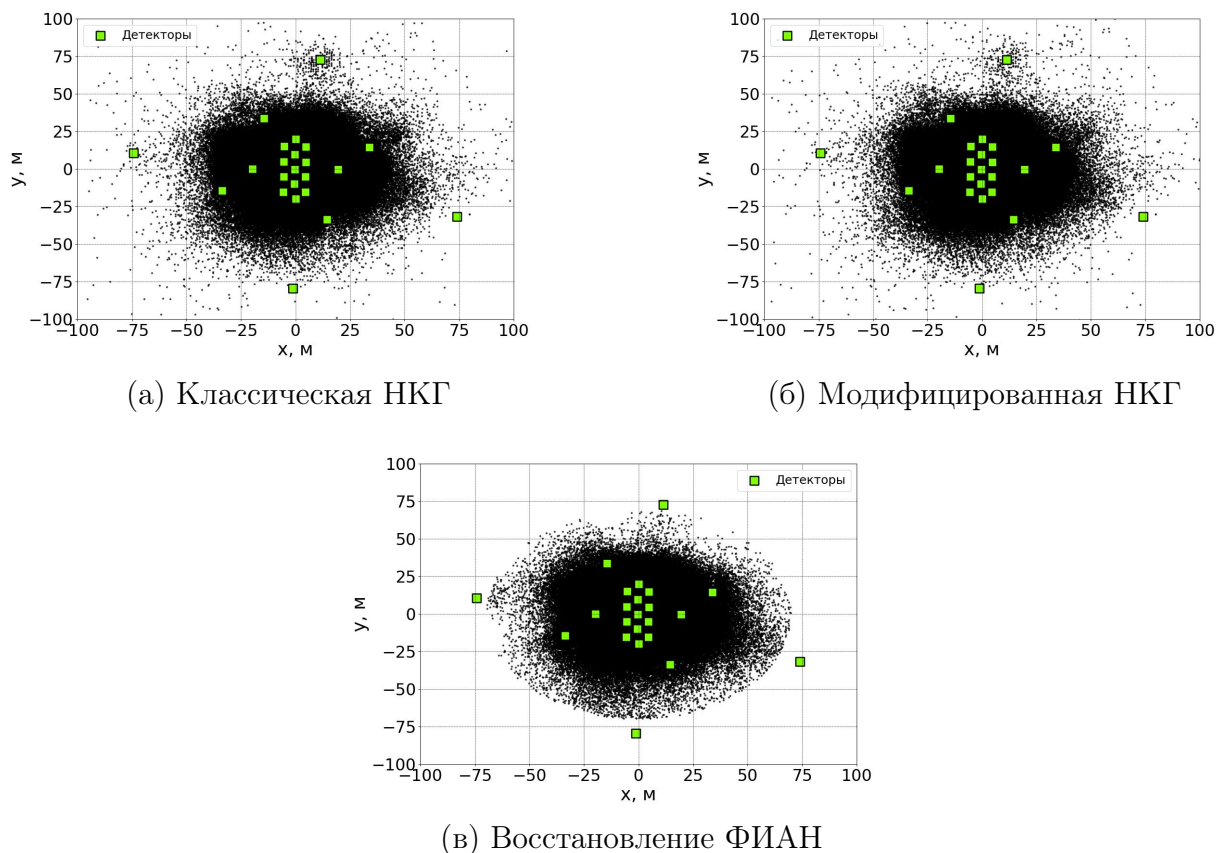
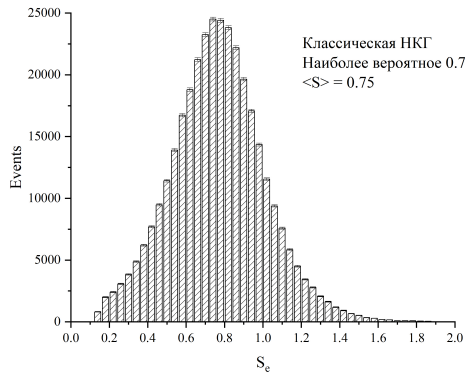


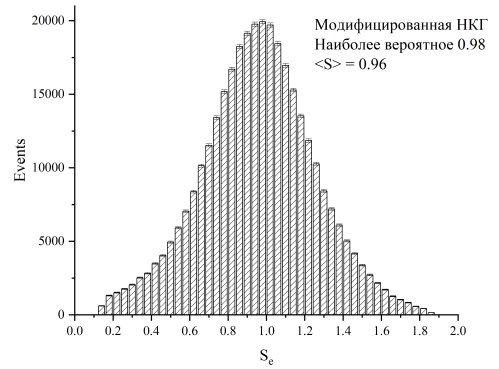
Рисунок 4.1 — Распределение координат осей ливня.

На рис.4.2а представлено распределение событий по возрасту ливня, полученного 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 $\langle s \rangle = 0.77$, а наиболее вероятный $s = 0.75$. Рисунок 4.2б иллюстрирует распределение событий по возрасту ливня, полученный в ходе аппроксимации данных модифицированной функцией пространственного распределения НКГ. Средний возраст в данном варианте распределений $\langle s \rangle = 0.96$, а наиболее вероятный $s = 0.98$. Распределение возраста, полученное при независимой реконструкции, имеет более пологую форму по сравнению с распределением ФИАН. 4.2в Это может быть связано как с отличием метода аппроксимации, так и с отсутствием дополнительных критериев отбора событий. Полученные значения $s < 1$ согласуются с ожиданием, что на высокогорном уровне наблюдения значи-

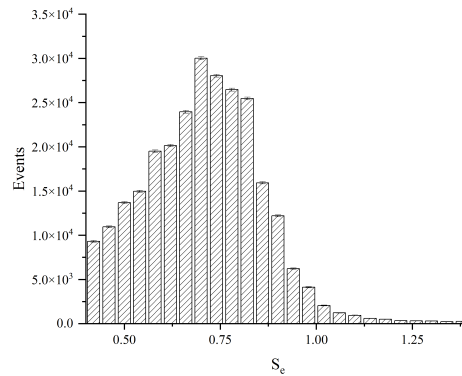
тельная часть зарегистрированных ливней является молодой.



(а) Классическая НКГ



(б) Модифицированная НКГ



(в) Восстановление ФИАН

Рисунок 4.2 — Распределение событий по возрасту ливня.

Рисунок 4.3 иллюстрирует распределение событий по мощности ливня. Для того чтобы сравнить методы реконструкции, события были отобраны по зенитному углу $\theta < 30^\circ$. 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. На всех спектрах наблюдается излом в области $\lg N_e \approx 5.5$. Совпадение положения этой особенности для разных вариантов реконструкции указывает на качественную устойчивость результата относительно выбора ФПР и метода восстановления параметров ШАЛ. Следует отметить, что при больших значениях $\lg N_e$ статистические погрешности возрастают, что обусловлено уменьшением числа зарегистрированных событий с высокой энергией. Несмотря на это, общая форма спектров и их угловая зависимость сохраняются для обоих методов обработки.

На рисунке 4.4 показан спектр мощности событий в большем масшта-

бе. Можно заметить, что в диапазоне значений мощности $\lg N_e \approx 5 - 5.5$ ливней классическая функция НКГ даёт несколько более высокие значения интенсивности событий по сравнению с восстановлением ФИАН, тогда как модифицированная НКГ приводит к несколько меньшим значениям спектра, также можно заметить, что в этой области спектр классической НКГ имеет более пологий вид. Различия в поведении спектров уменьшаются в $\lg N_e > 5.8$, полученные спектры становятся согласованными в пределах статистических погрешностей.

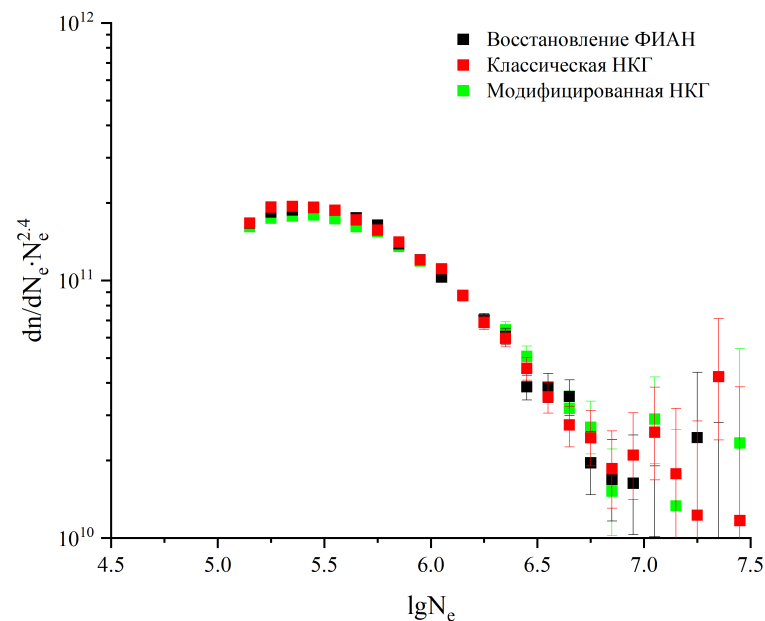


Рисунок 4.3 — Спектр мощности ШАЛ, полученный разными методами реконструкции.

Рисунок 4.5 демонстрирует спектры мощности широких атмосферных ливней для различных диапазонов зенитных углов. Закрашенными маркерами показаны результаты, полученные с использованием классической НКГ, а незакрашенными — модифицированной НКГ.

Для всех угловых интервалов наблюдается схожая форма спектров. Как и для спектров на рисунке 3.7 наблюдается систематическое снижение интенсивности спектра при увеличении зенитного угла.

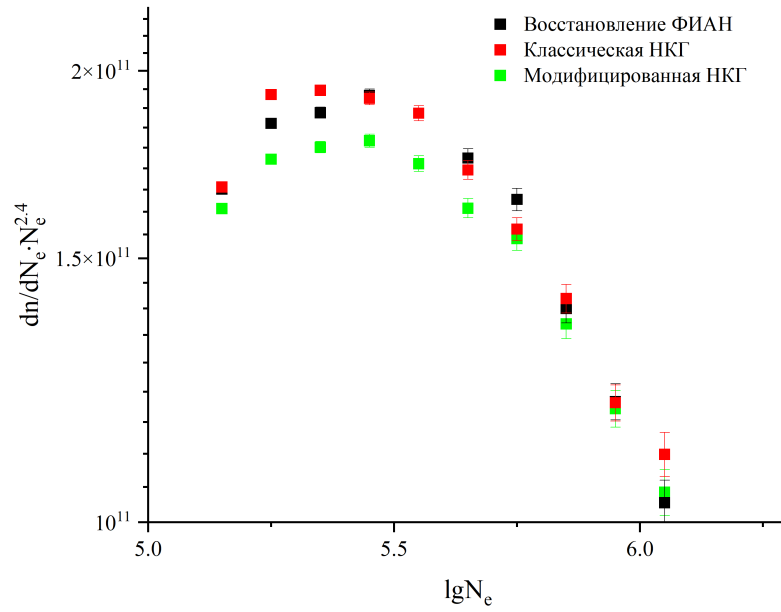


Рисунок 4.4 — Спектр мощности событий ливня в большом масштабе.

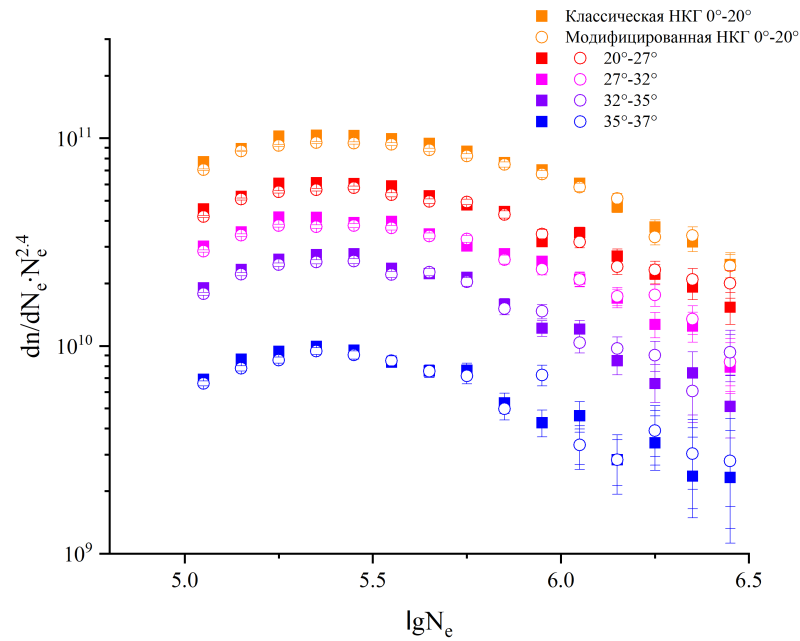
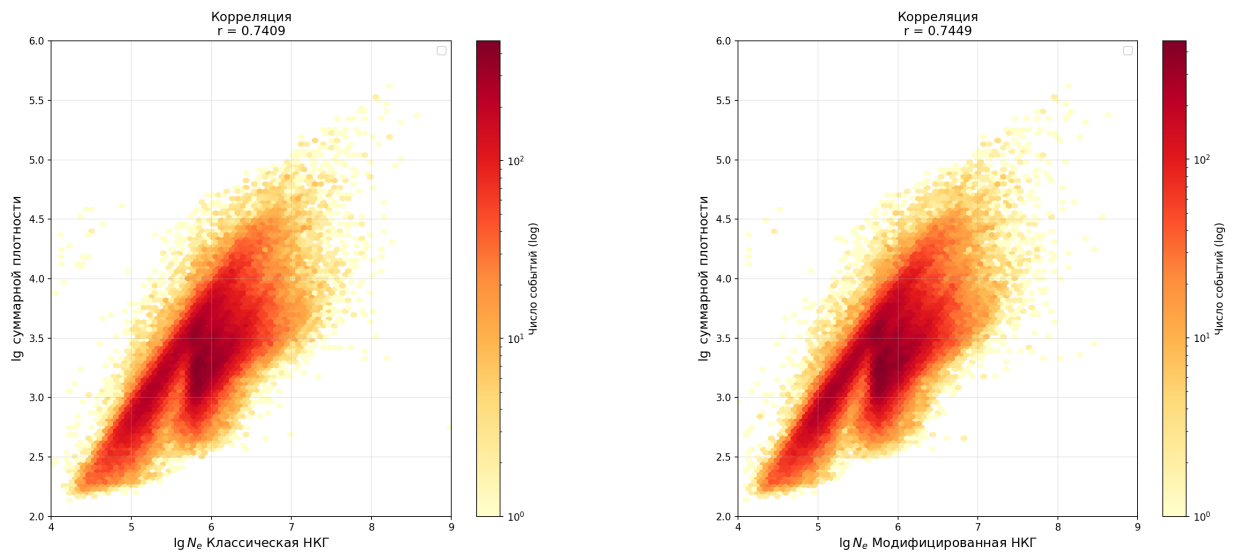


Рисунок 4.5 — Спектр мощности ШАЛ, для разных диапазонов зенитных углов. ■ - классическая НКГ, ○ - модифицированная НКГ.

На рисунке 4.6 представлены двумерные гистограммы, иллюстрирующие корреляцию между логарифмом мощности $\lg N_e$ и логарифмом суммарной плотности частиц. Цветовая шкала в логарифмическом масштабе отражает число событий в каждом бине.

Коэффициент корреляции Пирсона составляет $r = 0.7409$ и $r = 0.7449$ для классической и модифицированной НКГ соответственно. Наличие положительной корреляции ожидаемо, поскольку величина N_e восстанавливается на основе пространственного распределения плотностей частиц. Данная зависимость соответствует ожиданиям: регистрируемая суммарная плотность частиц определяется полным числом вторичных частиц в ливне и, следовательно, должна возрастать с ростом мощности.

Заметный разброс значений по оси ординат при фиксированном $\lg N_e$ объясняется зависимостью суммарной зарегистрированной плотности от положения оси ливня относительно детекторов установки. Метод восстановления параметров ливня, в свою очередь, явно учитывает зависимость от расстояния.

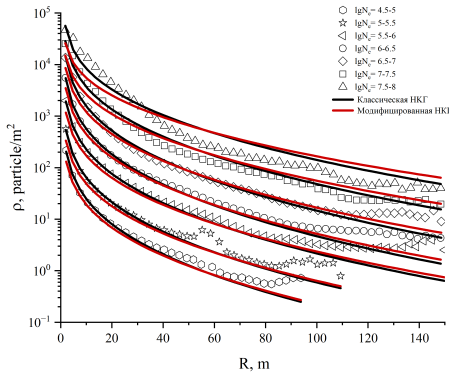


(а) получено по данным, восстановлению классической НКГ

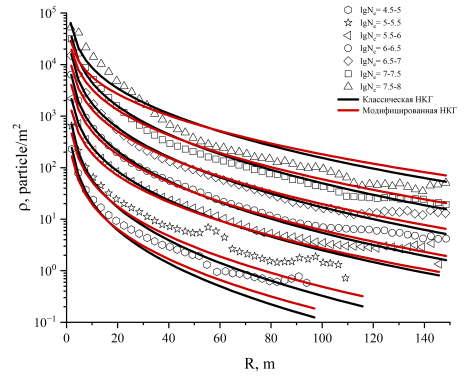
(б) получено по данным, восстановлению модифицированной НКГ

Рисунок 4.6 — Корреляция суммарной плотности частиц с мощностью широкого атмосферного ливня.

На графиках 4.7, представлена ФПР заряженных частиц широких атмосферных ливней, построенная по экспериментальным данным плотностей, и расстояниям, восстановленным с использованием 2 типов НКГ. Данные результаты аппроксимированы классической НКГ (чёрные линии) и модифицированной (красные линии) для различных интервалов мощности ливня $\lg N_e$.



(а) получено по данным, восстановлению классической НКГ



(б) получено по данным, восстановлению модифицированной НКГ

Рисунок 4.7 — Функции пространственного распределения заряженных частиц ШАЛ, для разных диапазонов мощностей.

С увеличением размера $\lg N_e$ ливня плотность частиц возрастает во всех диапазонах мощностей. Сравнение ФПР, построенных по результатам двух вариантов реконструкции, показывает, что выбор функции влияет не только на значения параметров N_e и s , но и на форму восстановленного пространственного распределения.

В диапазонах малых мощностей данные, восстановленные классической НКГ 4.7а, лучше описываются аппроксимационными кривыми, в отличие от данных, восстановленных модифицированной НКГ 4.7б.

4.4 СПЕКТР МОЩНОСТИ ШАЛ И ПРОЯВЛЕНИЕ КОЛЕНА

С середины 1940-х годов началось создание больших массивов детекторов для измерения ШАЛ. Большинство экспериментов требовали детекторов с большой площадью и кратковременным разрешением. Ранние детекторы включали счетчики Гейгера-Мюллера, а прогресс в разработке фотоумножителей привел к применению сцинтилляционных счетчиков и недавно появившихся черенковских детекторов.

В 1958 году Г.В. Куликов и Г.Б. Христиансен измерили интегральный спектр мощности ШАЛ, используя массив годоскопических счетчиков [17]. Они заметили излом в спектре в области 6×10^6 частиц. В дальнейшем, с развитием методов восстановления параметров ливней, был постро-

ен энергетический спектр первичных космических лучей по энергии E_0 , в котором обнаруженный излом соответствовал энергии порядка нескольких ПэВ. Было установлено, что энергетический спектр космических лучей подчиняется степенному закону $dN/dE \propto E^{-\gamma}$ в широком диапазоне энергий. Структура излома рассматривается как проявление «колена» в энергетическом спектре первичных космических лучей. Загадка происхождения излома так и не решена, дебаты о происхождении этой структуры ведутся до сих пор [18].

Вид спектра полного числа заряженных частиц ШАЛ значительно зависит от методики восстановления параметров ливней. На форму спектра мощности могут влиять особенности установки и ее конфигурация, отличие порогов детекторов регистрации частиц, а также учет барометрического и геомагнитных эффектов. Сложный и комплексный процесс реконструкции параметров ШАЛ может существенно влиять на положение излома спектра ШАЛ и его зависимости от глубины в атмосфере. Помимо положения излома, в разных экспериментах наблюдаются различия в степени резкости излома. В работе [19] для спектров на уровне моря показано, что в зависимости от метода определения N_e положение излома может меняться в пределах $0.3 - 1 \times 10^6$. Данное обстоятельство затрудняет сравнение результатов разных экспериментов, поэтому в дальнейшем, сравнение с разными экспериментами в первую очередь будет проводиться по значению разности наклонов спектра $\gamma_2 - \gamma_1$, где γ_1 - наклон спектра до излома, а γ_2 - значение наклона после излома.

Для определения показателей наклона области спектра до и после излома были выполнены аппроксимации прямой линией в дважды логарифмическом масштабе. Полученные значения показателей наклона представлены в таблице 4.1.

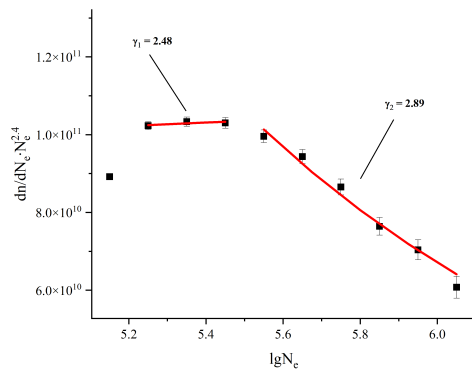
Значения наклона спектра до и после колена хорошо согласуются между собой и находятся в диапазоне (2.34-2.38). После колена наблюдаются несколько большие различия, однако оба метода дают близкие значения. Это свидетельствует о том, что выбор функции пространственного распределения не оказывает значительного влияния на форму спектра.

Полученные значения показателей наклона спектра находятся в согласии с результатами, полученными для экспериментов на ТШВНС. Так,

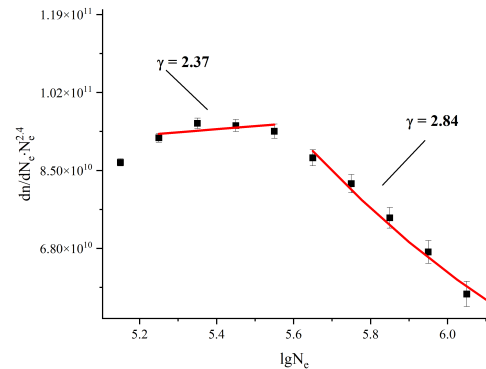
в работе по эксперименту «Адрон» [20] разность степенных показателей составила $\Delta\gamma = 0.4$. Более ранние результаты, представленные в работе [21], составили: $\gamma_1 = 2.55 \pm 0.06$, $\gamma_2 = 2.82 \pm 0.04$ и соответственно $\Delta\gamma = 0.27$.

Таблица 4.1 — Наклоны спектров, полученные разными методами восстановления.

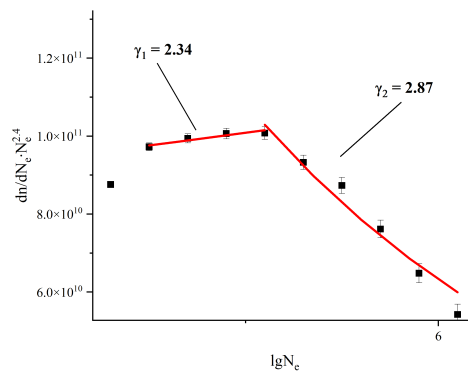
| Тип восстановления | γ_1 | γ_2 | $\Delta\gamma$ | точки до излома $\lg N_e$ | точки после излома $\lg N_e$ |
|--------------------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------------|------------------------------|
| Клас. НКГ | 2.3817 ± 0.0166 | 2.798 ± 0.0317 | 0.42 | 5.25-5.45 | 5.55-6.05 |
| Мод. НКГ | 2.3688 ± 0.0357 | 2.8374 ± 0.0321 | 0.47 | 5.25-5.55 | 5.65-6.15 |
| ФИАН | 2.3427 ± 0.0143 | 2.8702 ± 0.0516 | 0.53 | 5.25-5.55 | 5.55-6.05 |



(а) получено по данным, восстановления классической НКГ



(б) получено по данным, восстановления модифицированной НКГ



(в) получено по данным, восстановления ФИАН

Рисунок 4.8 — Спектр мощности частиц ШАЛ.

Помимо проверки с другими результатами, полученными для ТШВНС, в таблице 4.2 также представлены результаты других экспериментов. Во всех рассмотренных экспериментах: Адрон, МАКЕТ-АНИ, EAS-ТОР, Акепо и KASCADE разности показателей наклона дифференциального спектра

мощности имеют близкие значения. Из этого следует, что полученные в настоящей работе значения показателей наклона спектра находятся в согласии с приведёнными литературными данными, что подтверждает корректность выполненной реконструкции и устойчивость наблюдаемого излома спектра широких атмосферных ливней.

Таблица 4.2 — Значения наклона дифференциального спектра мощности ШАЛ от глубины в атмосфере. γ_1 и γ_2 - значения наклона спектра ШАЛ до и после излома.

| x , [г/см ²] | Эксперимент | γ_1 | γ_2 | $\gamma_2 - \gamma_1$ |
|----------------------------|------------------|------------|------------|-----------------------|
| 690 | Адрон, клас. НКГ | 2.38 | 2.79 | 0.41 |
| 690 | Адрон, мод. НКГ | 2.37 | 2.84 | 0.47 |
| 690 | Адрон, ФИАН | 2.34 | 2.87 | 0.53 |
| 695 | МАКЕТ-ANI [22] | 2.71 | 3.14 | 0.43 |
| 820 | EAS-TOP [23] | 2.56 | 2.99 | 0.43 |
| 920 | Akeno [24] | 2.48 | 2.83 | 0.35 |
| 1020 | KASCADE [25] | 2.43 | 2.88 | 0.45 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы были исследованы основные параметры широких атмосферных ливней по данным установки «Адрон» Тянь-Шаньской высокогорной научной станции. Был проведен анализ данных, реконструированных лабораторией КЛ ФИАН. Для восстановления основных параметров ливней была реализована процедура независимой реконструкции с помощью аппроксимации экспериментальных данных классической и модифицированной функциями Нишимуры–Каматы–Грейзена.

В процессе работы были разработаны программы для чтения первичного банка экспериментальных данных, восстановления основных параметров ШАЛ методом нелинейной аппроксимации экспериментальных данных и обработки данных. Для повышения надёжности реконструкции были введены критерии отбора событий и ограничения на область изменения восстанавливаемых параметров.

На основе восстановленных параметров были построены функции пространственного распределения заряженных частиц для различных диапазонов мощностей ливней 3.8, 4.7. Показано, что в центральной области ливня обе функции дают близкое описание экспериментальных ФПР. На больших расстояниях от оси наблюдаются систематические расхождения, причём модифицированная ФПР НКГ в ряде диапазонов мощностей $\lg N_e = 4.5 - 6.5$ лучше воспроизводит спад плотности частиц, где возрастает вклад мюонной компоненты широких атмосферных ливней.

По восстановленным данным были построены спектры мощности ШАЛ для различных диапазонов зенитных углов. Показано, что с увеличением зенитного угла наблюдается уменьшение интенсивности спектра 3.7, 4.5. Также был найден рабочий диапазон по мощностям для установки «Адрон», который составляет $\lg N_e \approx 5 - 7$.

В спектре мощности ШАЛ наблюдается изменение наклона в области $\lg N_e \approx 5.5$, которое интерпретируется как проявление колена. Была вы-

полнена аппроксимация в области до и после колена. Получены значения показателей наклона спектра, характеризующие его поведение до и после излома $\gamma_1 = 2.38 \pm 0.02$, $\gamma_2 = 2.79 \pm 0.03$ для классической и $\gamma_1 = 2.37 \pm 0.04$, $\gamma_2 = 2.84 \pm 0.03$. Разность наклонов составляет $\Delta\gamma \approx 0.4 - 0.5$, что свидетельствует о наличии выраженного колена в спектре.

Проведено сравнение полученных результатов с данными других экспериментов (МАКЕТ-АНИ, EAS-ТОР, Аkeno, KASCADE). Достоверность полученных результатов подтверждается: устойчивостью полученных наклонов к выбору функции пространственного распределения, а также соответствием величины $\Delta\gamma$ со значениям, приводимым в литературе как для установки «Адрон», так и для других экспериментов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Hess V. F.* Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. — 1912.
2. Extensive cosmic-ray showers / P. Auger [и др.] // Reviews of modern physics. — 1939. — Т. 11, № 3/4. — С. 288.
3. *Kampert K.-H.* Cosmic rays and particle physics // Acta Physica Hungarica Series A, Heavy Ion Physics. — 2001. — Т. 14, № 1. — С. 203—215.
4. *Gaisser T. K., Engel R., Resconi E.* Cosmic rays and particle physics. — Cambridge University Press, 2016.
5. *Grieder P. K.* Extensive air showers: high energy phenomena and astrophysical aspects—a tutorial, reference manual and data book. — 2010.
6. *Kamata K., Nishimura J.* The lateral and the angular structure functions of electron showers // Progress of Theoretical Physics Supplement. — 1958. — Т. 6. — С. 93—155.
7. *Greisen K.* The Extensive Air Showers // Progress in Cosmic Ray Physics. Т. 3 / под ред. J. G. Wilson. — Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1956. — С. 1—141.
8. *Шаулов С. Б.* Эксперимент «Адрон» // Вопросы атомной науки и техники. — 1986. — Т. 3, № 29. — С. 72. — (Серия: Техника физического эксперимента).
9. Установка «Адрон» для исследования первичного космического излучения и характеристик ядерных взаимодействий в атмосфере методами ШАЛ, РЭК и черенковского излучения / С. Ф. Абдрашитов [и др.] // Известия АН СССР. Серия физическая. — 1986. — Т. 50, № 11. — С. 2203—2207.

10. *Shaulov S. B.* Statistical Criteria for the Combination Events in EХС and EAS (Exp. “Hadron”) : Preprint / P. N. Lebedev Physical Institute (FIAN). — 1987. — С. 3—12. — № 245.
11. *Асейкин В. С., Никольская Н. М., Павлюченко В. П.* Универсальный алгоритм оценки основных параметров ШАЛ : Препринт / Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН). — Москва, 1987. — С. 3—33. — № 31.
12. *Шаулов С. Б.* Исследование состава космических лучей в области энергий 0.1–10 ПэВ комбинированным методом регистрации ШАЛ и гамма-семейств : Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук / Шаулов С. Б. — Москва : Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН), 1999.
13. Ю. Н. Вавилов, И. Н. Довженко, Н. М. Нестерова [и др.] // Труды ФИАН. — 1964. — Т. 26. — С. 17—117. — и др.
14. Анализ зенитных и азимутальных распределений ШАЛ с энергией свыше 0.5 ПэВ, полученных на Тянь-Шаньской установке : Препринт / К. В. Баркалов [и др.] ; Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН). — Москва, 1988. — № 19.
15. Препринт / В. С. Асейкин, И. Н. Киров, Н. М. Нестерова [и др.] ; Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН). — Москва, 1976. — № 142.
16. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python / P. Virtanen [и др.] // Nature Methods. — 2020. — Т. 17. — С. 261—272.
17. *Куликов Г., Христиансен Г.* О спектре широких атмосферных ливней по числу частиц // ЖЭТФ. — 1958. — Т. 35, 3 (9). — С. 635.
18. *Blümer J., Engel R., Hörandel J. R.* Cosmic rays from the knee to the highest energies // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2009. — Т. 63, № 2. — С. 293—338.
19. Новый анализ данных установки МГУ о спектре ШАЛ по числу частиц / В. Атрашкевич [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 1991. — Т. 55, № 4. — С. 678—681.

20. Исследование электронной и мюонной компонент ШАЛ в событиях с высокоэнергичными гамма-квантами и адронами : Препринт / В. В. Арабкин, К. В. Баркалов, Н. Г. Вильданов [и др.] ; Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАИ). — 1997. — С. 1—16. — № 4.
21. Lateral and Energy Characteristics of Electromagnetic and Hadron Components of EAS with $N_e = 5 \times 10^5 - 10^7$ at the Mountain Level / S. Adamov [и др.] // Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference. Volume 9 (HE Sessions), p. 77. Т. 9. — 1990. — С. 77.
22. Study of extensive air showers and primary energy spectra by МАКЕТ-АНИ detector on mountain Aragats / A. Chilingarian [и др.] // Astroparticle Physics. — 2007. — Т. 28, № 1. — С. 58—71.
23. The EAS size spectrum and the cosmic ray energy spectrum in the region 1015–1016 eV / M. Aglietta [и др.] // Astroparticle Physics. — 1999. — Т. 10, № 1. — С. 1—9.
24. Energy spectrum of primary cosmic rays above 1017.0 eV determined from extensive air shower experiments at Akeno / M. Nagano [и др.] // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 1992. — Т. 18, № 2. — С. 423—442.
25. *Kampert K.-H.* Recent results from the KASCADE air shower experiment // arXiv preprint astro-ph/9902113. — 1999.