

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. Воробьёва

Москва 2025

Содержание

1	Основные параметры ШАЛ	2
2	Функция пространственного распределения	3
3	Эксперимент "Адрон"	4
4	Обработка данных	7
4.1	Данные для анализа	7
4.2	Методика обработки данных и построения спектров	7
5	Результаты	7
6	Заключение	12
	Список литературы	12

Цель работы

Изучение методики обработки экспериментальных данных установки «Адрон» на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС), применяемых Лабораторией космических лучей ФИАН, и последующий анализ основных параметров широких атмосферных ливней (ШАЛ), восстановленных по этим данным.

Задачи работы

Изучить методику обработки экспериментальных данных с установки «Адрон» (ТШВНС), применяемую Лабораторией космических лучей ФИАН.

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

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 макси-

мального развития, а при $s > 1$ — начинает затухать. Ещё одним важным параметром является глубина максимального развития X_{\max} , измеряемая в $[\text{г/см}^2]$, 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]

2 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. 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.

3 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 развит 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 содержал также 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.1

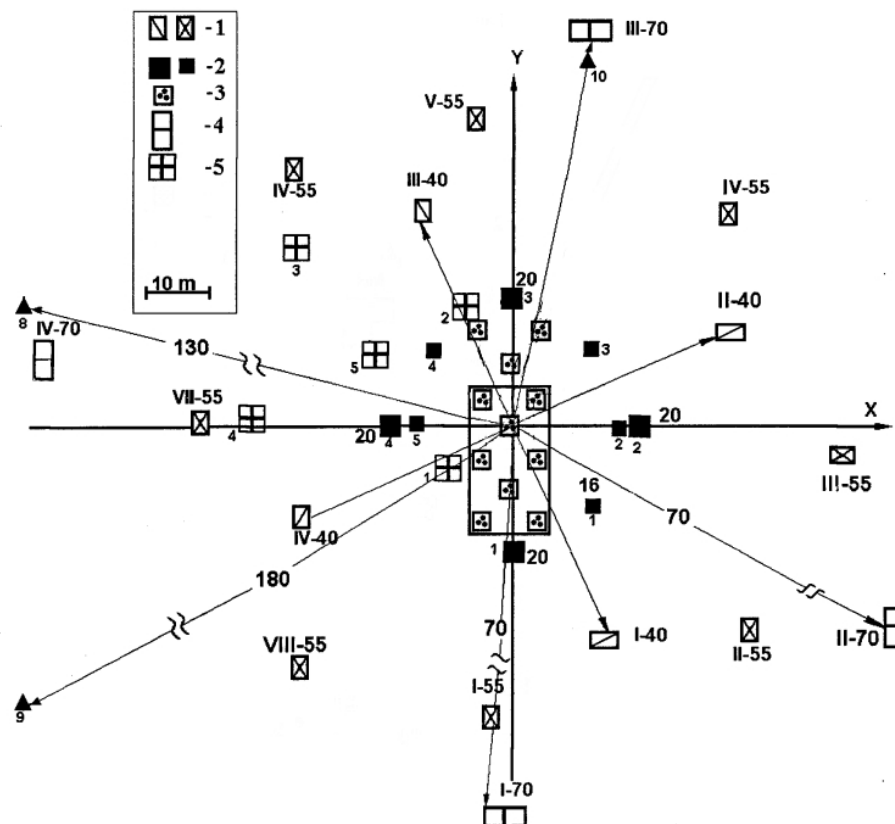


Рис. 1: Схема ливневой части установки "Адрон"

1 – Сцинтилляционные детекторы: 34(40) – 4 группы по 3 сц – 1²;

Сцинтилляционные детекторы: 55 м – 8 групп по 3 сц – 0.25²;

2 – Сцинтилляционные детекторы: 16 м – 6 групп по 3 сц – 0.25²;

Сцинтилляционные детекторы: 20 м – 4 группы по 2 сц – 1²;

3 – Сцинтилляционные детекторы: 11 групп по 3 сц – 0.25²;

4 – Сцинтилляционные детекторы: 4 группы 3 сц – 1²;

5 – Сцинтилляционные детекторы ПЕМА нейтронного монитора: 5 групп – 0.25²;

Таким образом, установка «Адрон» представляла собой уникальный пример комплексного эксперимента, объединяющего методы регистрации ШАЛ и изучения ядерных взаимодействий на высоких энергиях с возможностью пространственно-энергетического анализа структуры каскадов непосредственно в стволе ливня.

4 Обработка данных

4.1 Данные для анализа

В данной работе обрабатывались данные с синцилляционных детекторов, полученные входе 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 [4].

Для работы с первичным банком экспериментальных данных была написана программа на языке Python для его прочтения. 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. Данные события отбирались, на основе следующих факторов: зенитный угол $\theta \leq 30^\circ$, возраст $s \geq 0.4$, помимо этого отбирались только успешно восстановленные события. После отбора по вышеперечисленным условиям, в итоговой анализ вошло 360000 событий.

4.2 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 входе прочтения первичного банка экспериментальных данных. Программа для построения спектров осуществляла фильтрацию данных, группировку событий по интервалам (диапазоны углов) и подсчёт 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 Результаты

На рисунке 2 представлена зависимость количества событий от косинуса зенитного угла. По данному графику видно, что на установку в основ-

ном приходили вертикальные ливни. Распределение событий в зависимости от азимутального угла приведено на рис.3. Данное распределение имеет равномерный характер, что указывает на то, что ливни на установку приходили равномерно. На рис.4 показано распределение ливней по возрасту. 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. Были построены графики мощности ШАЛ; ниже на рис.7 показаны графики в двух разных масштабах. На значении мощности $\lg N_e \approx 5.8$ присутствует разрыв графика. Природа этого разрыва непонятна; вероятнее всего, она связана со способом записи первичного банка данных. При уменьшении масштаба на рис.7 в области значения $\lg N_e \approx 6.7$ можно наблюдать изменение наклона, что может указывать на присутствие колена в спектре мощности.

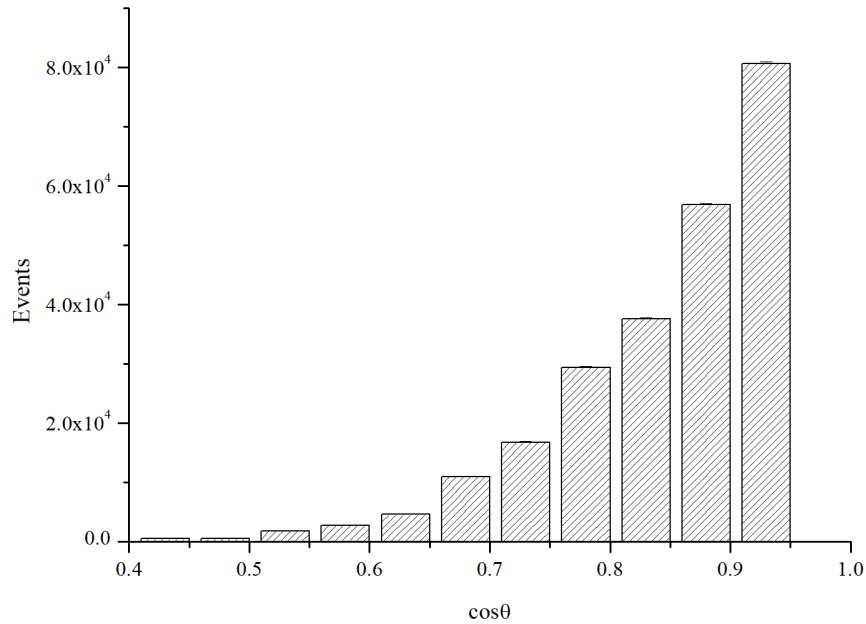


Рис. 2: Распределение событий по косинусу зенитного угла.

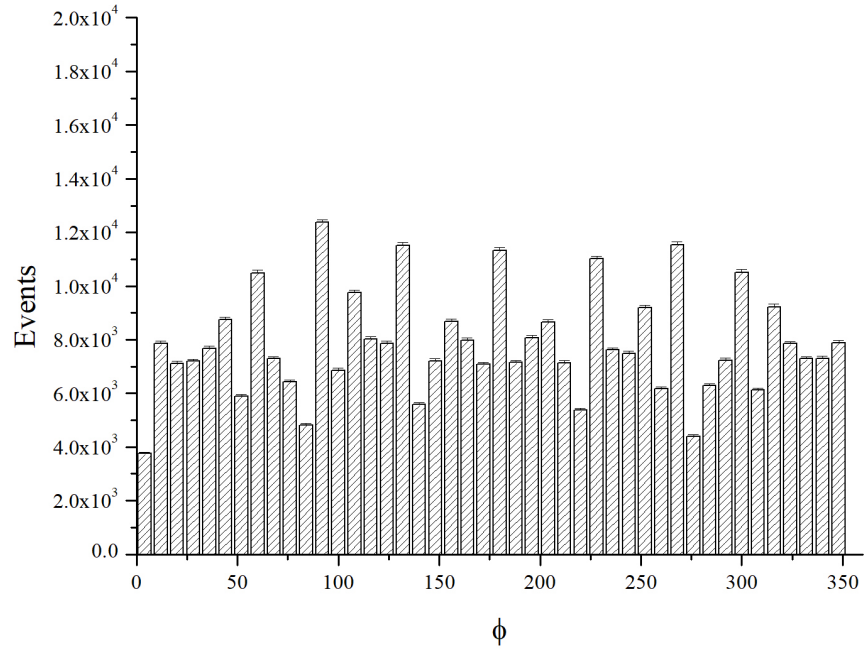


Рис. 3: Распределение событий по азимутальному углу.

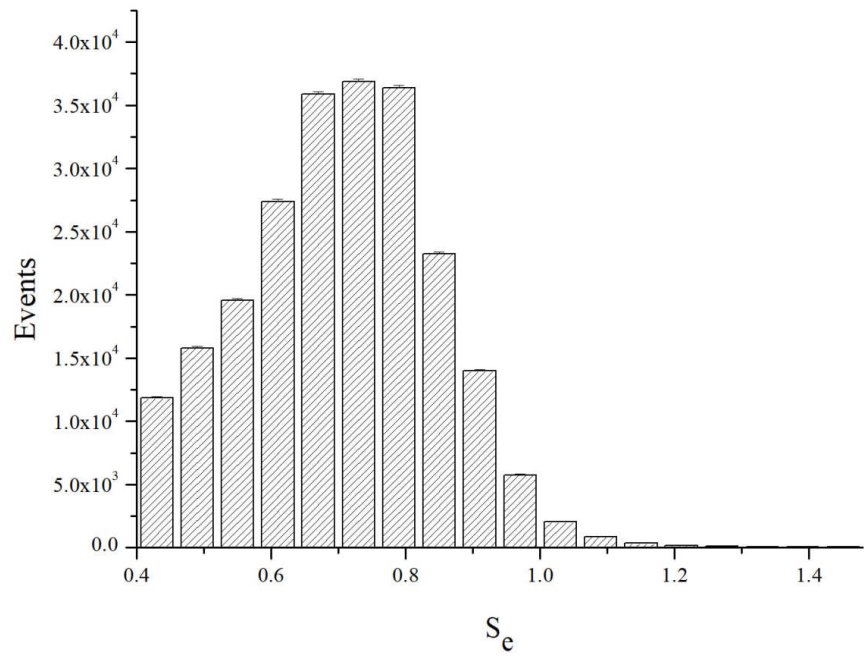


Рис. 4: Распределение событий по возрасту ливня.

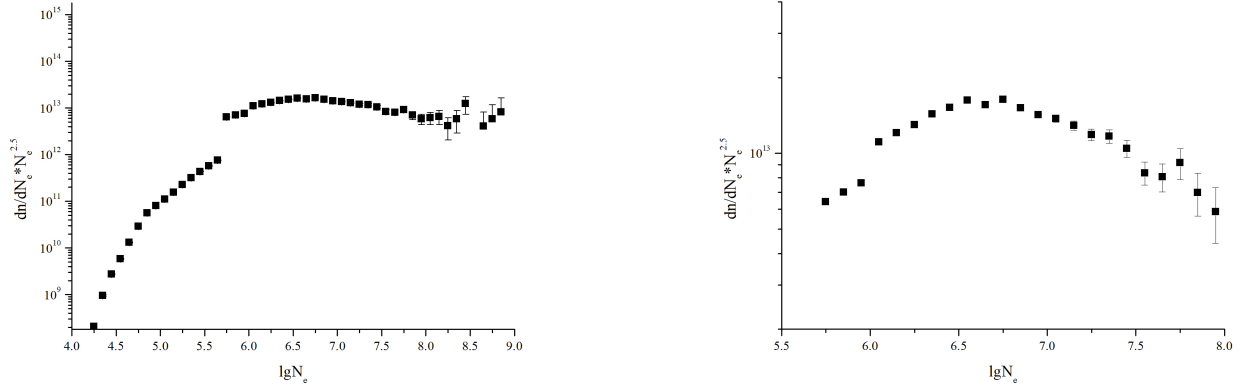


Рис. 5: Спектры мощности ливня (слева-меньший масштаб, справа-большой).

На рис.1 представлено распределение по координатам осей ливней. 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 ливня превышающие 70м, не использовались в анализе. Помимо этого, на рисунке можно выделить кольцо $50\text{м} < R < 70\text{м}$, падение плотности ливней в этой области по сравнению с центральной областью-требуется дальнейшего изучения методики восстановления параметров ливня. На рис.?? показана функция пространственного распределения частиц ШАЛ для разных диапазонов мощностей. Можно заметить, что при увеличении мощности ливней средняя плотность частиц ШАЛ на разных расстояниях от оси также увеличивается. Пики для мощностей $\lg N_e \geq 6$ на 50 и 70 метрах и "провалы" на 60 м для мощностей $\lg N_e \leq 5.5$ могут иметь ту же природу что и кольцо на распределении осей ШАЛ по координатам, что также требует дальнейшего изучения.

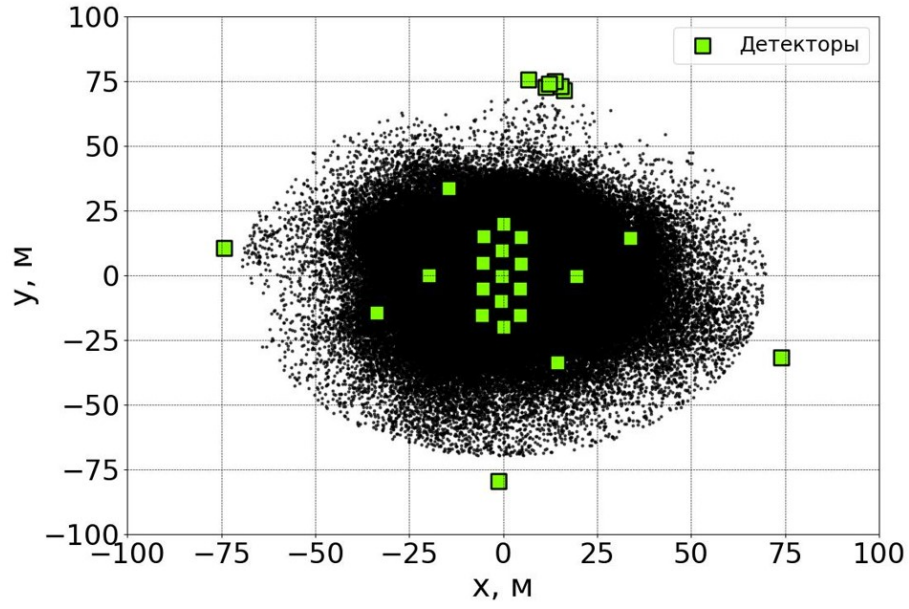


Рис. 6: Распределение координат осей ШАЛ.

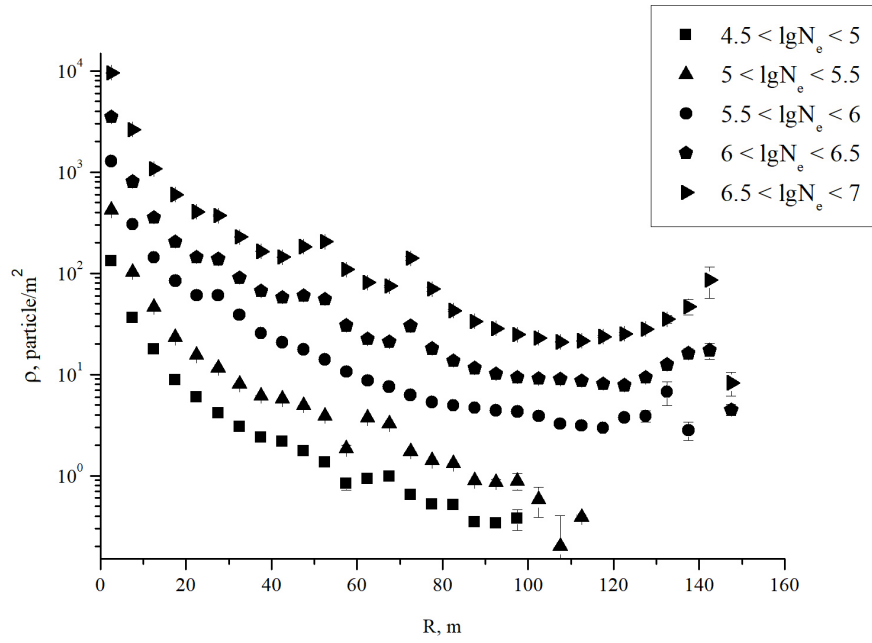


Рис. 7: Пространственное распределение частиц ШАЛ в разных диапазонах мощностей ливней

6 Заключение

В ходе данной работы была изучена методика восстановления основных параметров ШАЛ, предложенная Лабораторией космических лучей ФИАН. Построены спектры мощности ШАЛ, в котором при значении $\lg N_e \approx 6.7$ имеется указание на излом, распределения по углам, координатам и возрасту ШАЛ (среднее значение возраста ливней подающих на установку составляет $\langle S \rangle = 0.7$). Построено пространственное распределение частиц в ливне для разных диапазонов мощностей. Ливневая часть установки Адрон позволяет изучать пространственные распределения частиц на расстояниях 0-150м до оси ливня.

В ходе выполнения работы были получены необходимые знания и практические навыки, позволяющие в будущем проводить дальнейший анализ данных и восстанавливать параметры по результатам эксперимента "Адрон" на ТШВНС.

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] *Асейкин В.С. , Никольская Н.М., Павлюченко В.П., Универсальный алгоритм оценки основных параметров ШАЛ, Препринт ФИАН N31, 1987, стр . 3-33.*