



Анализ характеристик ШАЛ по данным ливневой части установки “Адрон” ТШНВС

Научный руководитель: О. А. Каликулов

Научный соруководитель: С. С. Хохлов

Научный консультант: Е. А. Южакова

Студент: К. А. Воробьева

Группа: Б22-ФЧ

08.06.2026

Цели и задачи

Цель

Выполнить независимую реконструкцию параметров широких атмосферных ливней по данным установки «Адрон» и сравнить полученные результаты с реконструкцией ФИАН.

Задачи

- Изучить физические процессы развития ШАЛ и методы восстановления их параметров.
- Реконструировать основные параметры ливней по данным ливневой части установки «Адрон» (ТШВНС).
- Построить:
 - спектр N_e
 - спектр возраста ливня
 - распределение по координатам осей ШАЛ
- Сравнить результаты различных методов реконструкции с литературными данными.

Ливневая часть установки “Адрон”

114 детекторов в 37 пунктах

1 – Сцинтилляционные детекторы: 34(40) – 4 группы по 3 сц. – 1 м²; Сцинтилляционные детекторы: 55 м – 8 групп по 3 сц. – 0.25 м²

2 – Сцинтилляционные детекторы: 16 м – 6 групп по 3 сц. – 0.25 м²; Сцинтилляционные детекторы: 20 м – 4 группы по 2 сц. – 1 м²

3 – Сцинтилляционные детекторы: 11 групп по 3 сц. – 0.25 м²

4 – Сцинтилляционные детекторы: 4 группы 3 сц. – 1 м²

5 – Сцинтилляционные детекторы ПЕМА нейтронного монитора: 5 групп – 0.25 м²

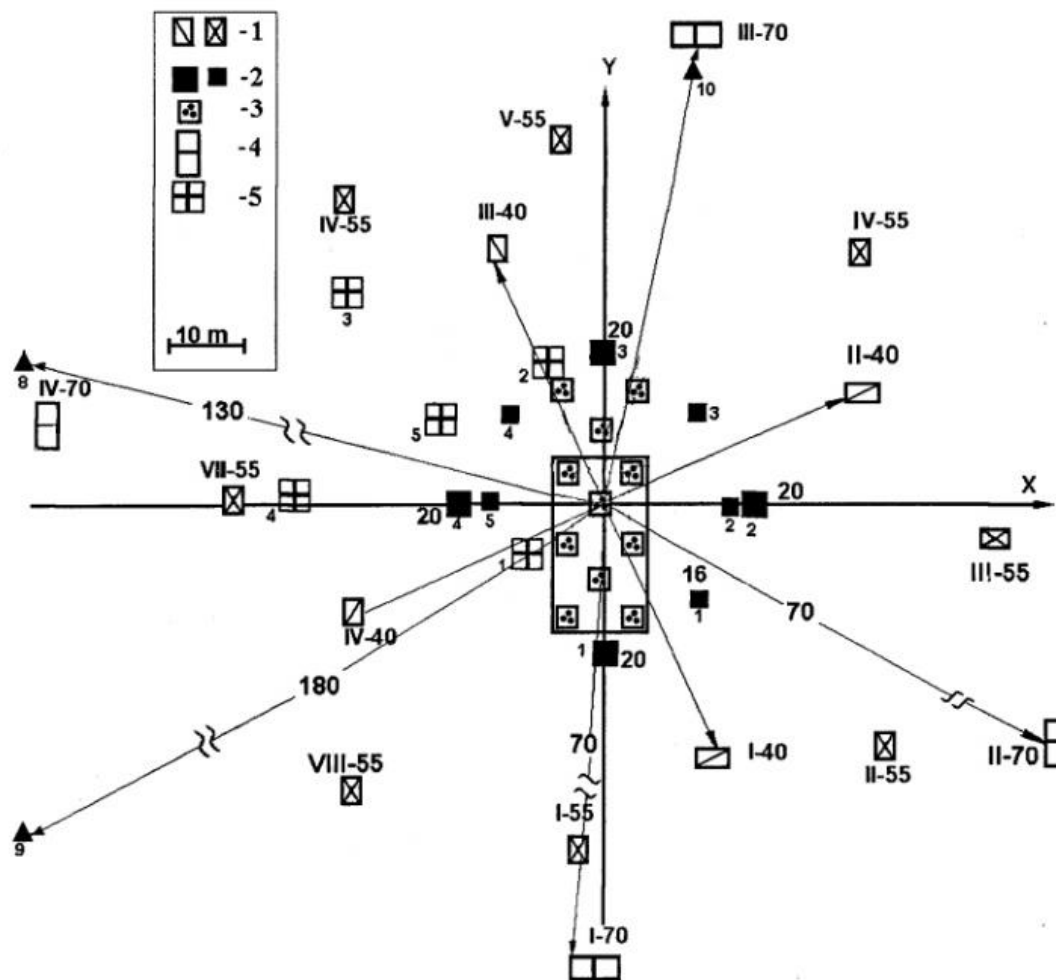
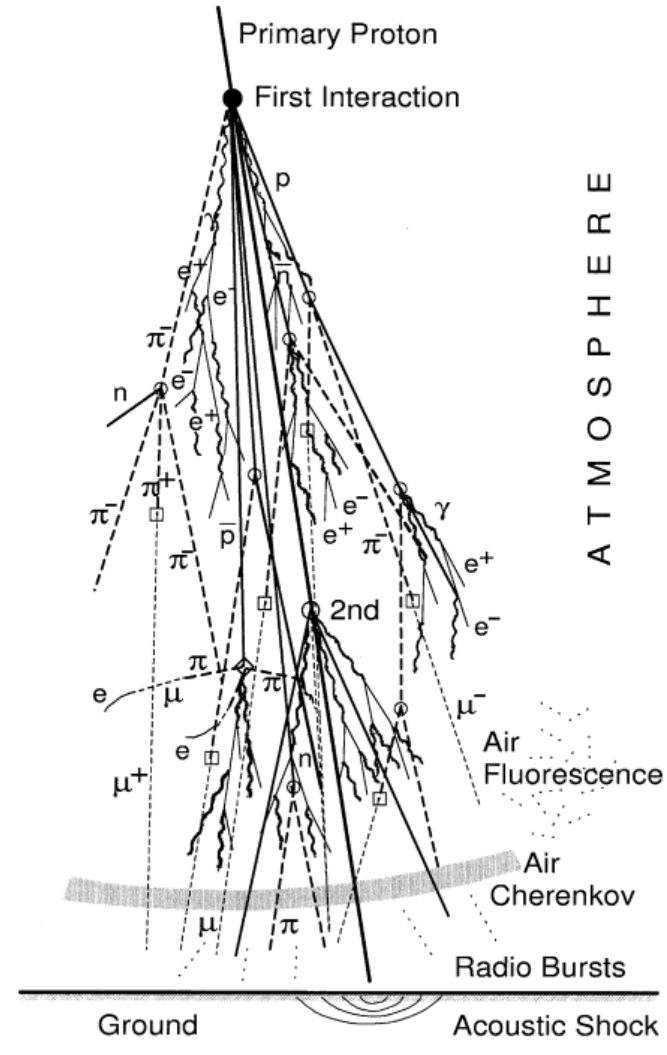


Рис. 1: Схема ливневой части установки “Адрон”

Широкие атмосферные ливни (ШАЛ)



Основные параметры ШАЛ:

- Азимутальный и зенитный углы падения первичной частицы θ , ϕ
- Координаты пересечения ствола ливня с плоскостью наблюдения (x, y)
- Энергия первичной частицы E_0
- Мощность ливня N —это количество частиц на определённом этапе формирования каскада частиц в атмосфере
- Возраст S — безразмерный параметр, количественно отражающий, насколько ливень развит в момент наблюдения

Рис. 2: Упрощенная схема продольного и поперечного развития обширного ливня в атмосфере, показывающая обычно обнаруживаемые компоненты.

Плотность частиц в детекторах

Детекторы: 74 сцинтилляционных детектора в 24 группах

Плотность частиц в детекторах:

$$\rho = \frac{1}{s} \exp \frac{M - 1}{10}$$

S-площадь детектора

M - код амплитуды импульса от детектора

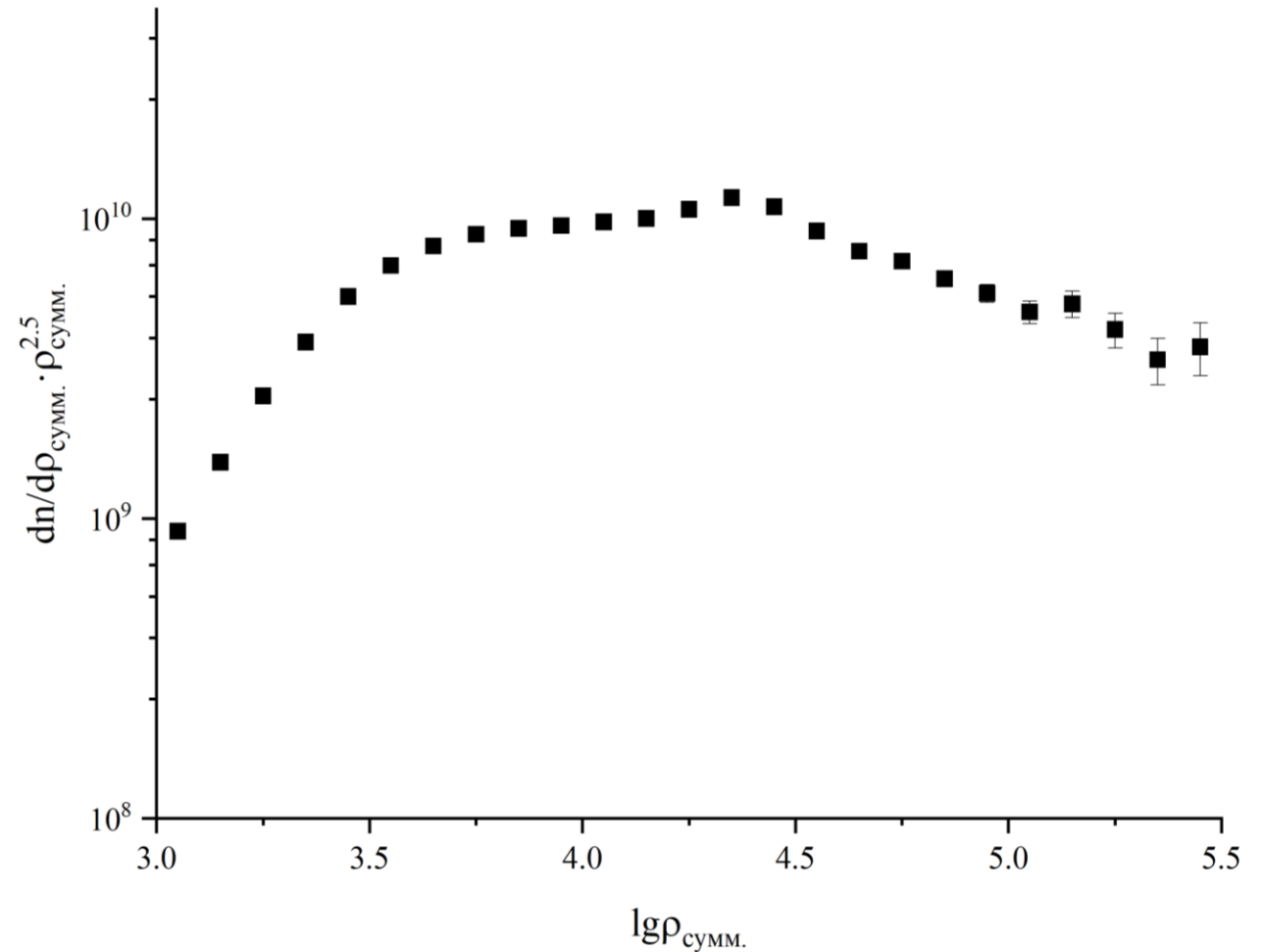


Рис. 3: Спектр плотности заряженных ШАЛ

Функция пространственного распределения (ФПР) Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ)

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

Классическая НКГ

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

Модифицированная НКГ

S - возраст ливня

N_e - мощность

r - расстояние до оси ливня

r_M - радиус Мольера, для данной высоты $r_M=120$ м

где $m = 0.78 - 0.21S$

Независимая реконструкция

Основные параметры ШАЛ найдены нелинейным методом наименьших квадратов для которого необходимо задать первые приближения

Первое приближение координат осей ливня:

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

Первое приближение мощности:

$$N_e = \frac{\rho_{\text{max}} \cdot r_M^2}{B}$$

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

Первое приближение возраста:

$S = 0.7$, среднее значение, полученное при обработке данных ФИАНа

Результаты восстановления



Всего: 360 000 событий.

Классическая НКГ

Восстановлено: 353 684 событий

Надежно восстановлено: 341 663 событий

Модифицированная НКГ

Восстановлено: 352 067 событий

Надежно восстановлено: 340 835 событий

Надежное восстановление ФИАН: 345 217 событий

Критерии отбора событий: Зенитный угол: $\theta \leq 30^\circ$

Восстановленные спектры мощности

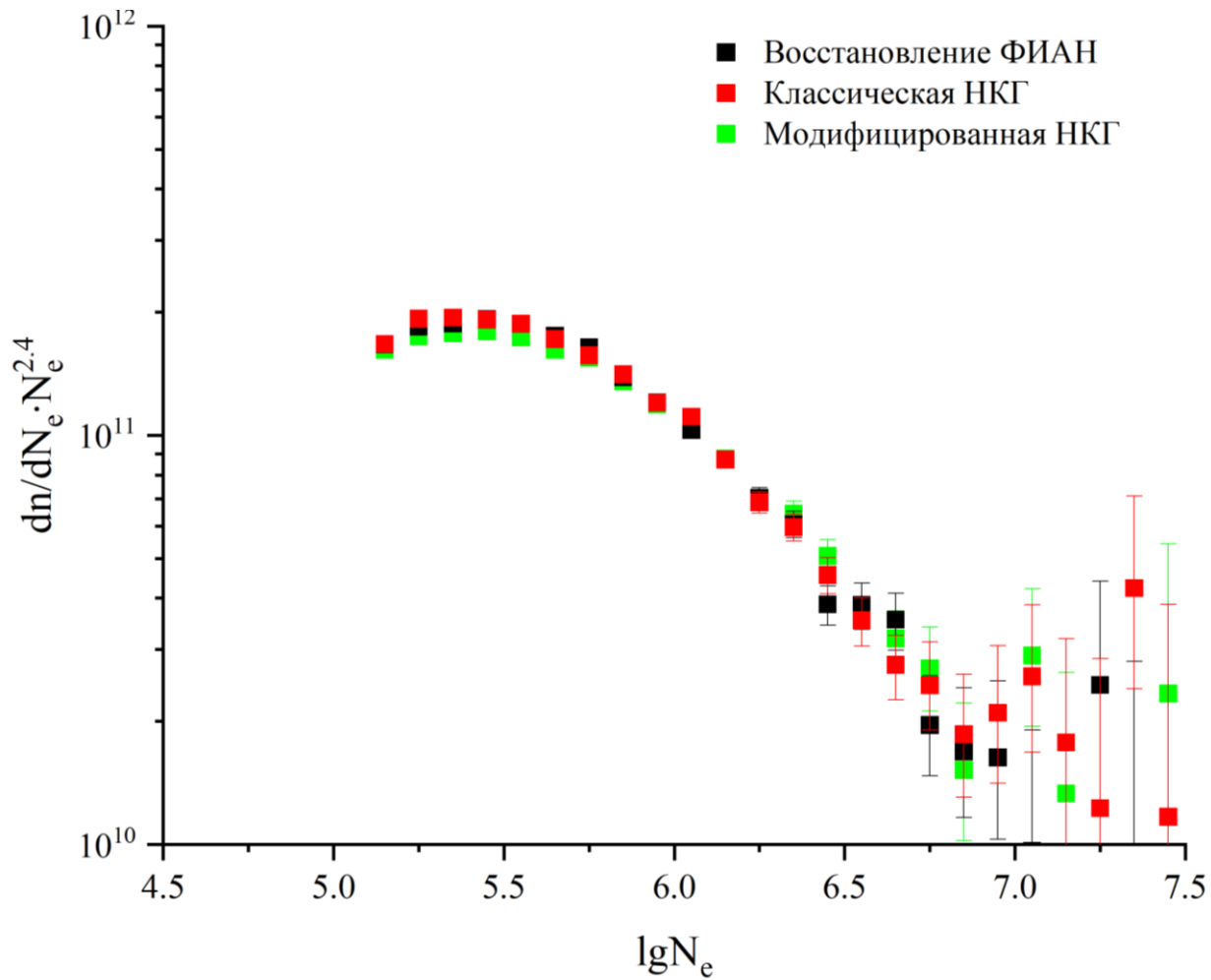


Рис. 4: Спектр мощности ШАЛ, восстановленный разными методами

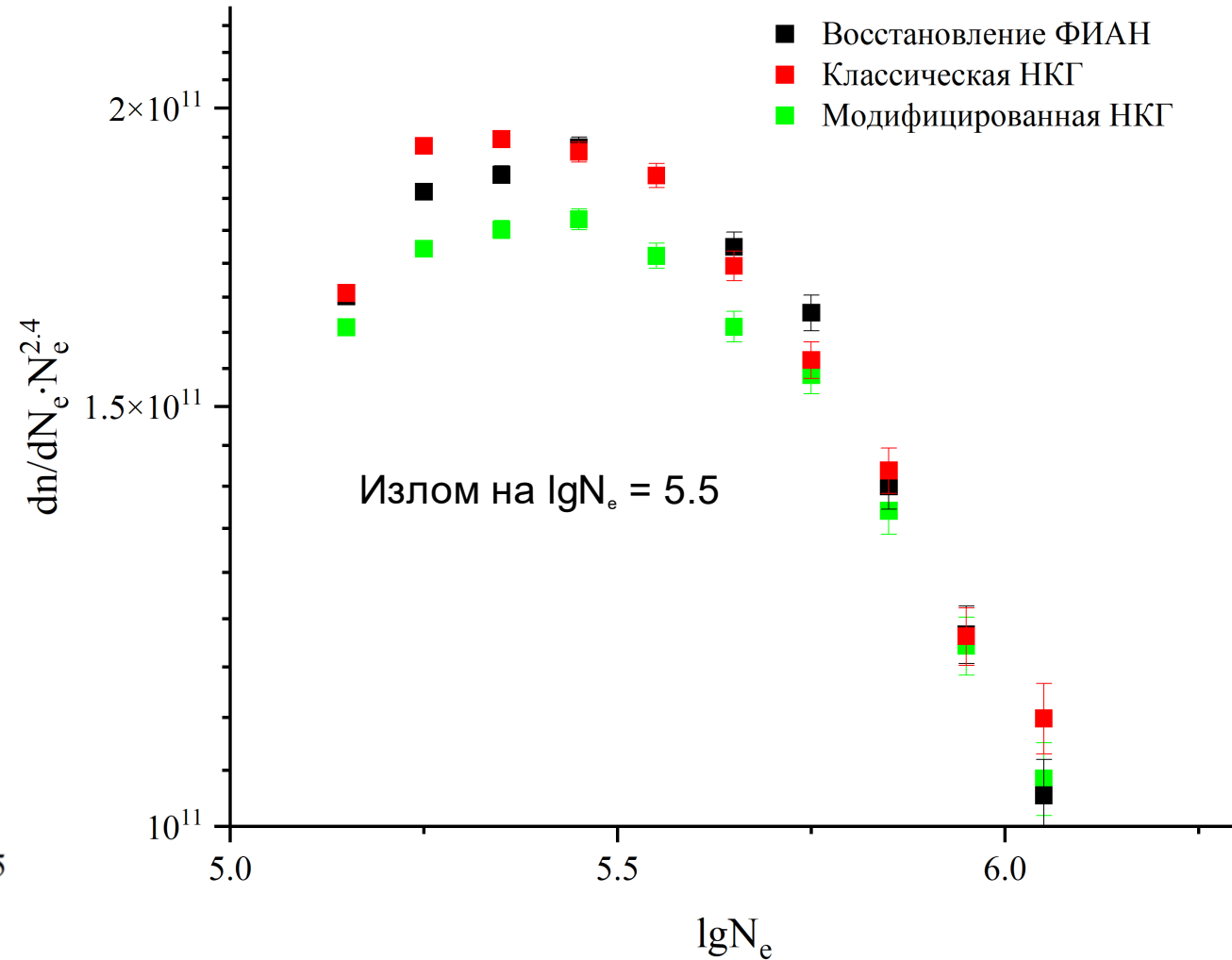


Рис. 5: Спектр восстановленной мощности ШАЛ, в большем масштабе

Колено в спектре мощности ШАЛ

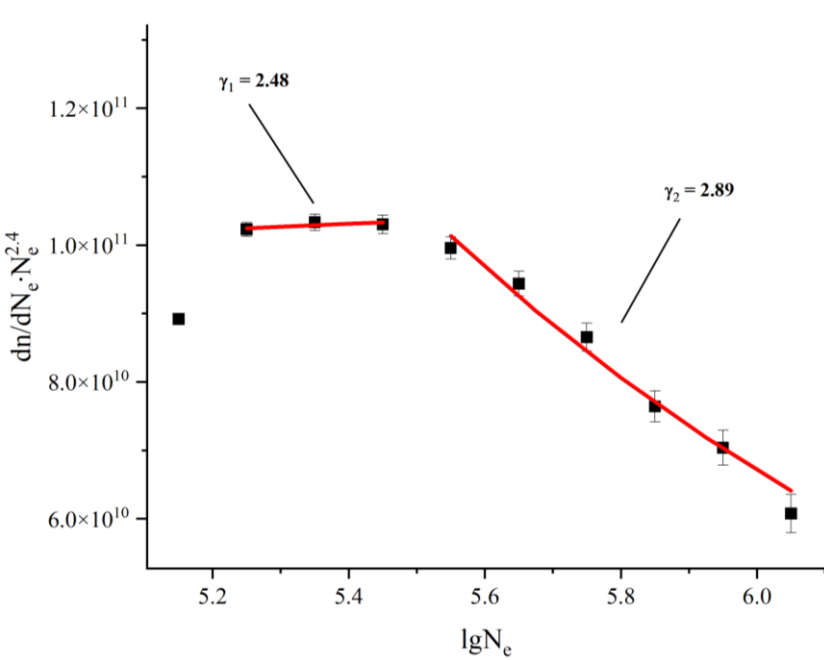


Рис. 6: Колено в спектре мощности, восстановленным ФИАН

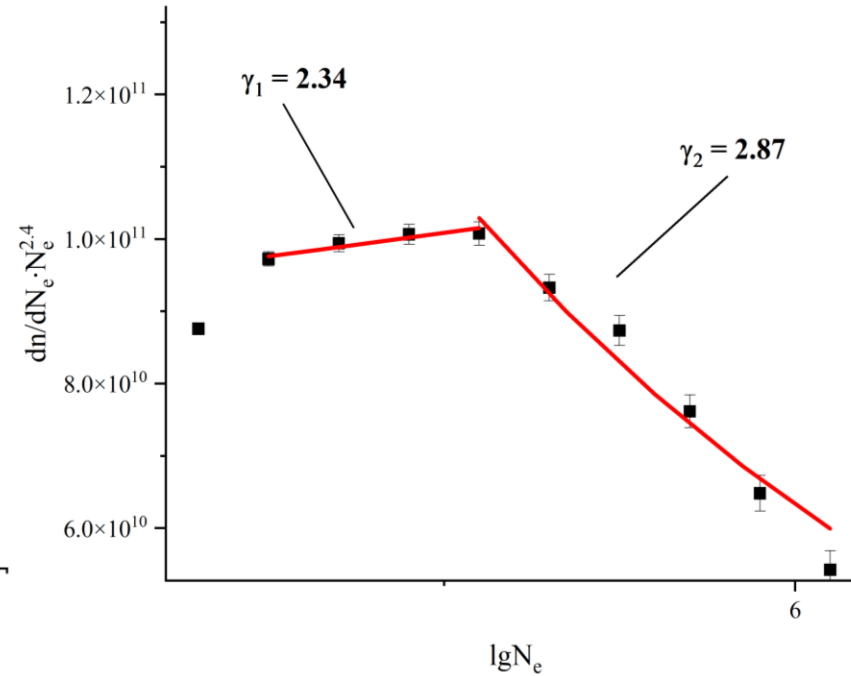


Рис. 7: Колено в спектре мощности, восстановленном классической НКГ.

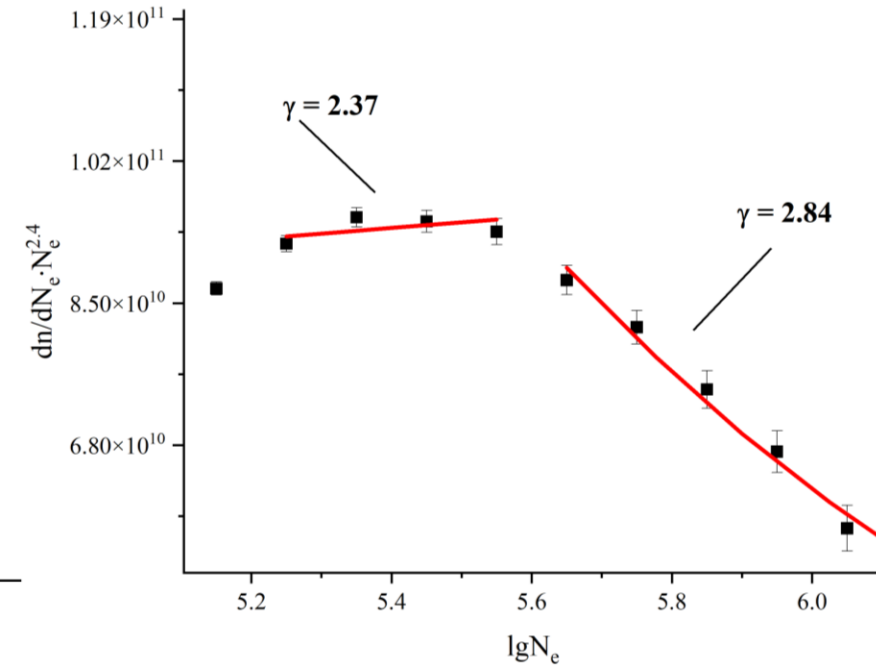


Рис. 8: Колено в спектре мощности, восстановленном модифицированной НКГ.

Сравнение результатов с другими экспериментами

$x, [\text{Г/см}^2]$	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-АНИ	2.71	3.14	0.43
820	EAS-TOP	2.56	2.99	0.43
920	Akeno	2.48	2.83	0.35
1020	KASCADE	2.43	2.88	0.45

Заключение

Итоги работы:

- **Разработана программа реконструкции основных параметров для данных с установки "Адрон" на языке python.**
- **Выполнено восстановление основных параметров ШАЛ с использованием классической и модифицированной ФПР НКГ.**
- **В спектре восстановленной мощности виден излом на значении $IgN_e = 5.5$ для всех вариантов реконструкций, а также определён рабочий диапазон установки «Адрон»: $IgN_e \approx 5-7$.**
- **Полученные значения наклонов и величина излома $\Delta\gamma$ согласуются с результатами других экспериментов.**



**Спасибо за
внимание!**

08.06.26

Восстановление координат осей ШАЛ

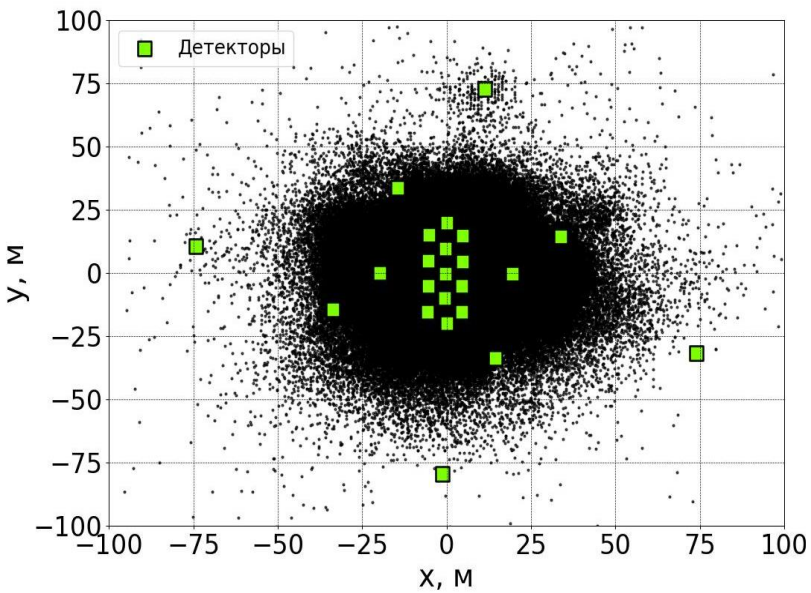


Рис. 9: Координаты осей ШАЛ, восстановленные классической НКГ.

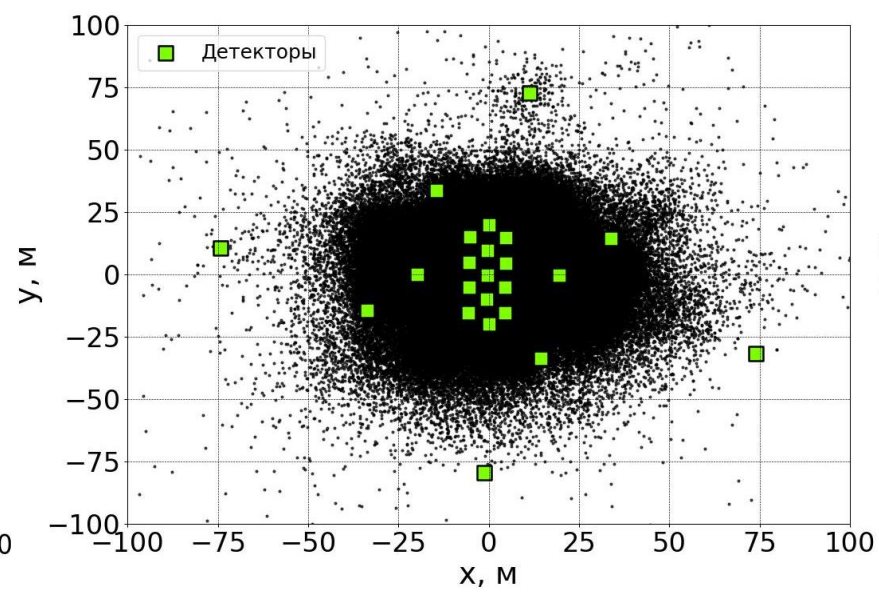


Рис. 10: Координаты осей ШАЛ, восстановленные модифицированной НКГ.

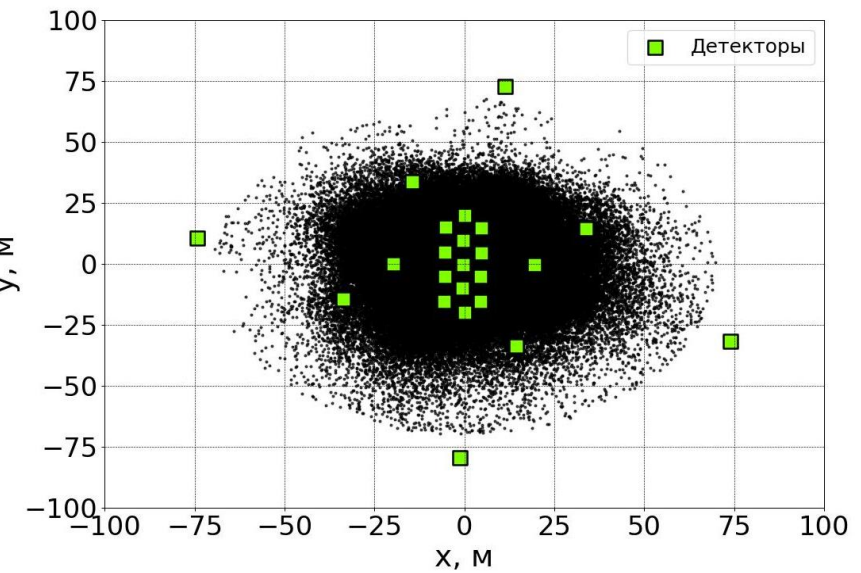


Рис. 11: Координаты осей ШАЛ, восстановленные ФИАН.

Восстановление возраста ШАЛ

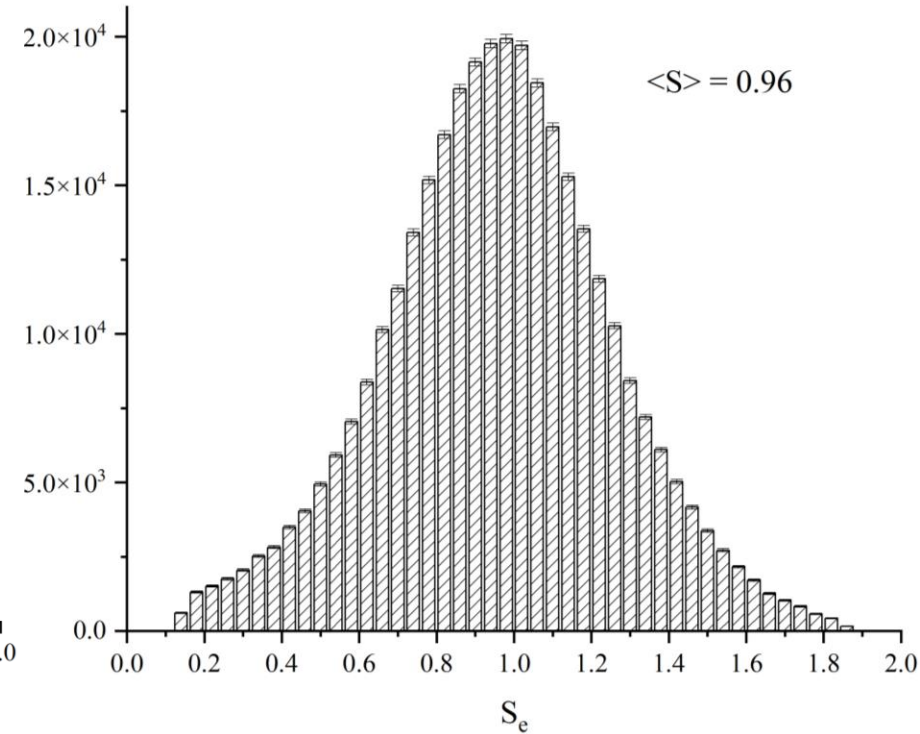
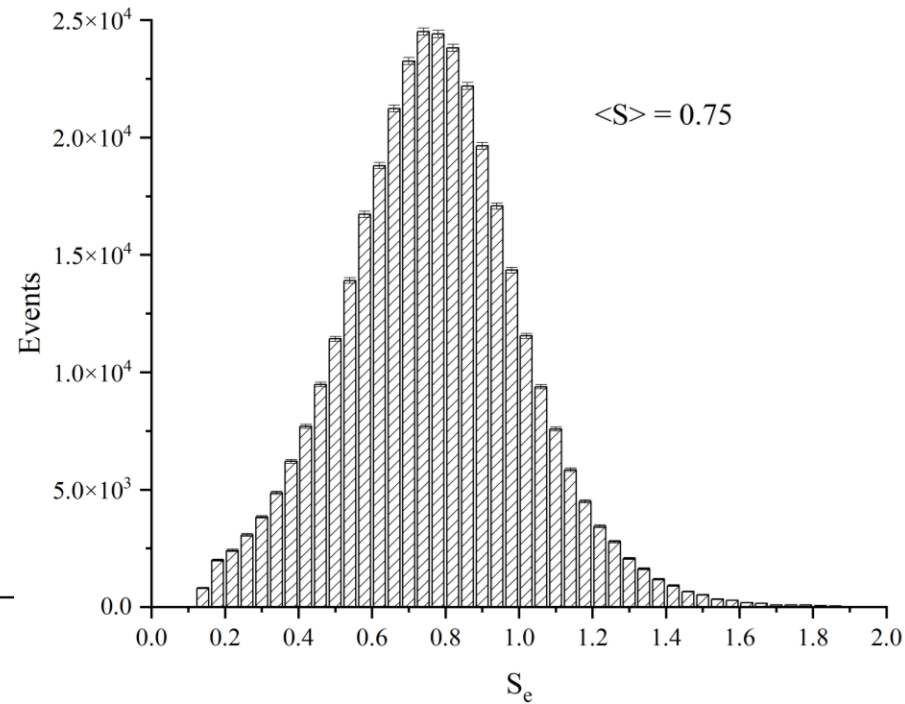
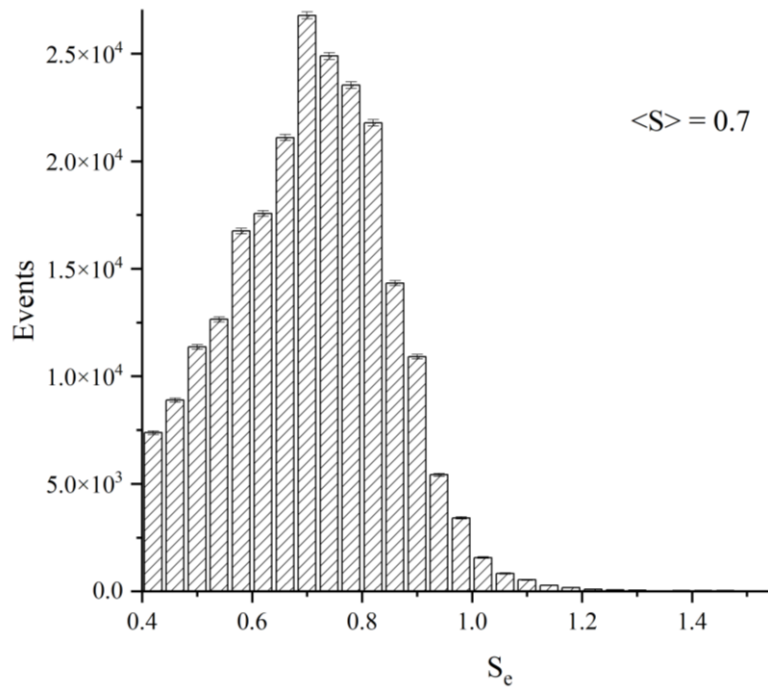


Рис. 12: Распределение событий по возрасту ливня (вариант ФИАН)

Рис. 13: Распределение событий по возрасту ливня, восстановленные классической НКГ.

Рис. 14: Распределение событий по возрасту ливня, восстановленные модифицированной НКГ.