

Фильтрация ложных максимумов ШАЛ с помощью нейросетевых методов в эксперименте СФЕРА-3

*Энтина Е.Л., Подгрудков Д.А., Бонвеч Е.А., Галкин В.И.,
Зива М.Д., Иванов В.А. Колодкин Т.А., Овчаренко Н.О.,
Роганова Т.М., Черкесова О.В., Чернов Д.В.*

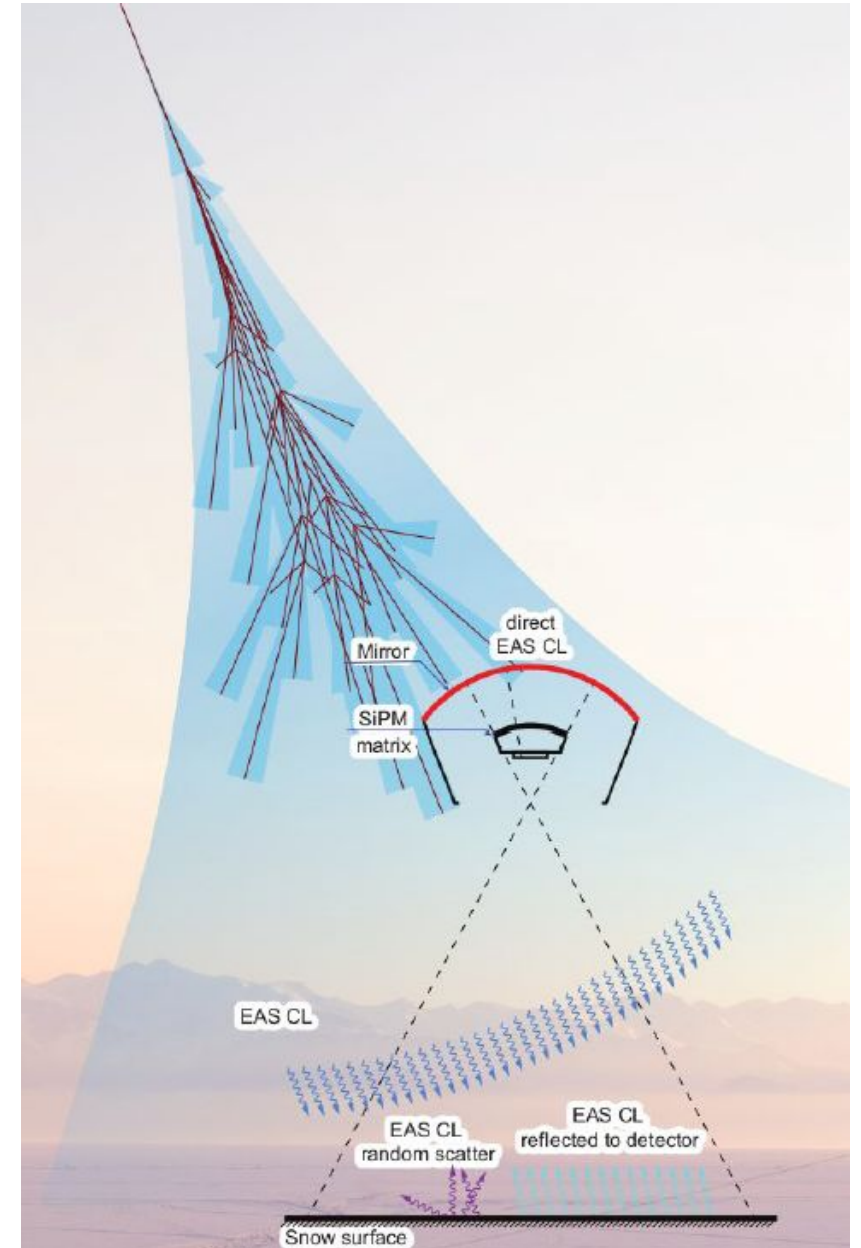
НИИЯФ МГУ, 2025



Эксперимент Сфера-3

СФЕРА-3 регистрирует отражённый от снежной поверхности ИВЧ ШАЛ для изучения космических лучей в диапазоне энергий 1–1000 ПэВ. Когда ось ливня проходит вне поля зрения телескопа, возникают максимумы яркости, не соответствующие истинному положению оси ливня.

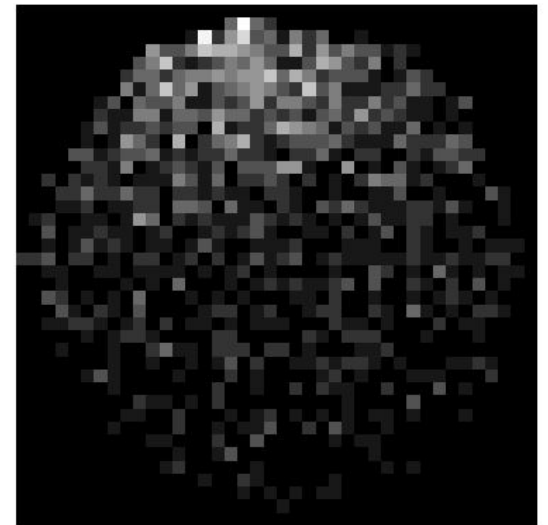
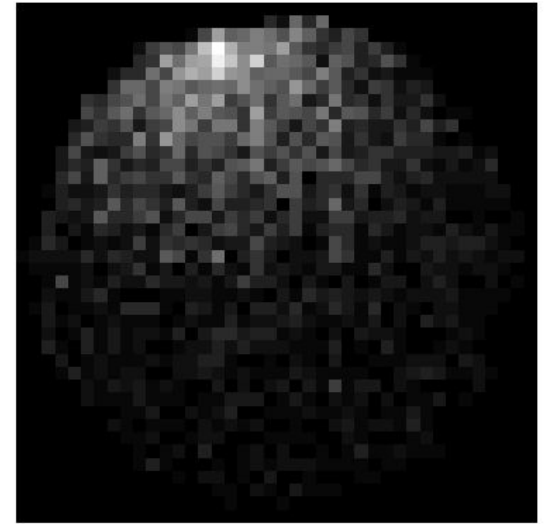
Поле зрения телескопа 20° . Для высоты полета 500 м ось события ШАЛ, падающая дальше $H \cdot \tan(20) = 180$ м от оси телескопа, не наблюдается напрямую.



Восстановление параметров первичной частицы

Методы восстановления параметров ШАЛ используют аппроксимацию ФПР, чувствительны к максимуму яркости. Но при большом смещении от оси максимум яркости не соответствует истинному положению оси ливня. Это приводит к систематическим ошибкам восстановления параметров.

⇒ Нужна фильтрация образов, отделяющий ложные максимумы от истинных. При этом метод не должен зависеть от энергии, массы и угла прихода первичной частицы.



Данные

Моделирование событий ШАЛ опирается на использование методов Монте-Карло (CORSIKA).

Учет прохождения фотонов через оптическую схему проектируемого телескопа реализован в GEANT4.

Моделируются события:

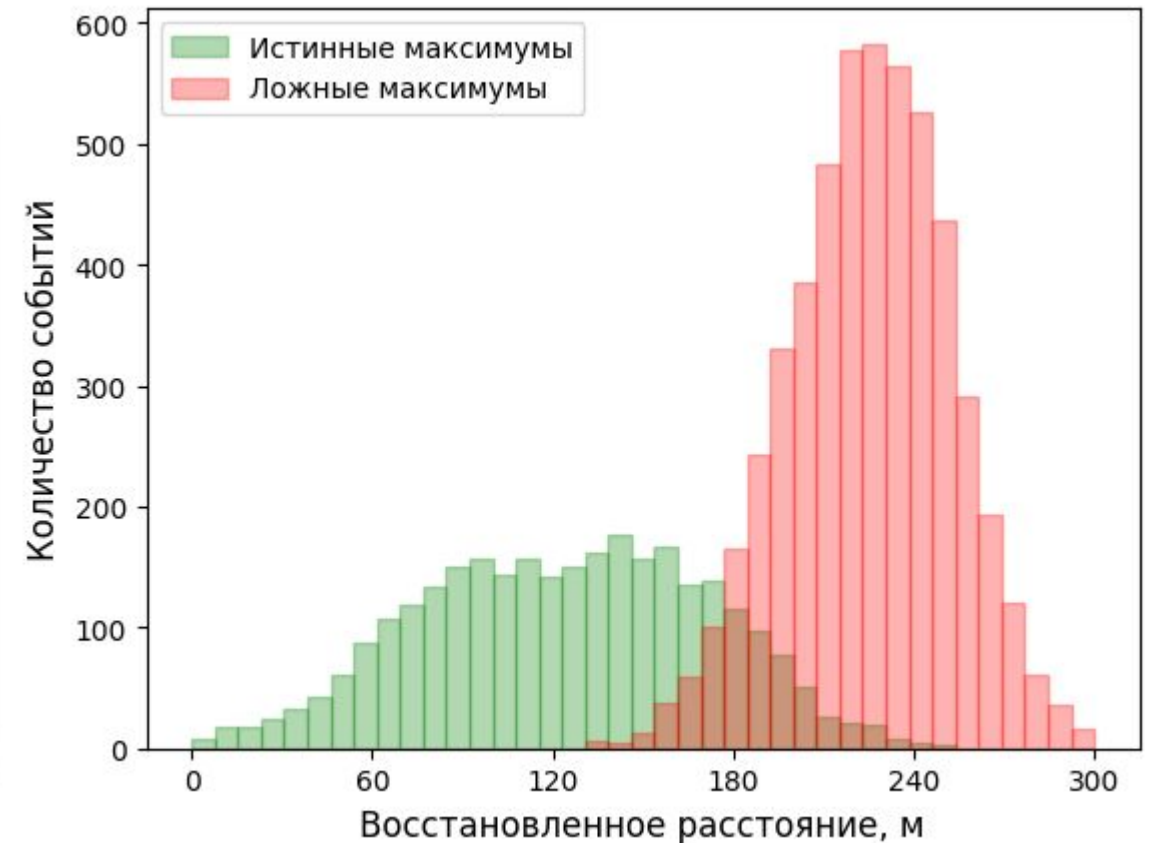
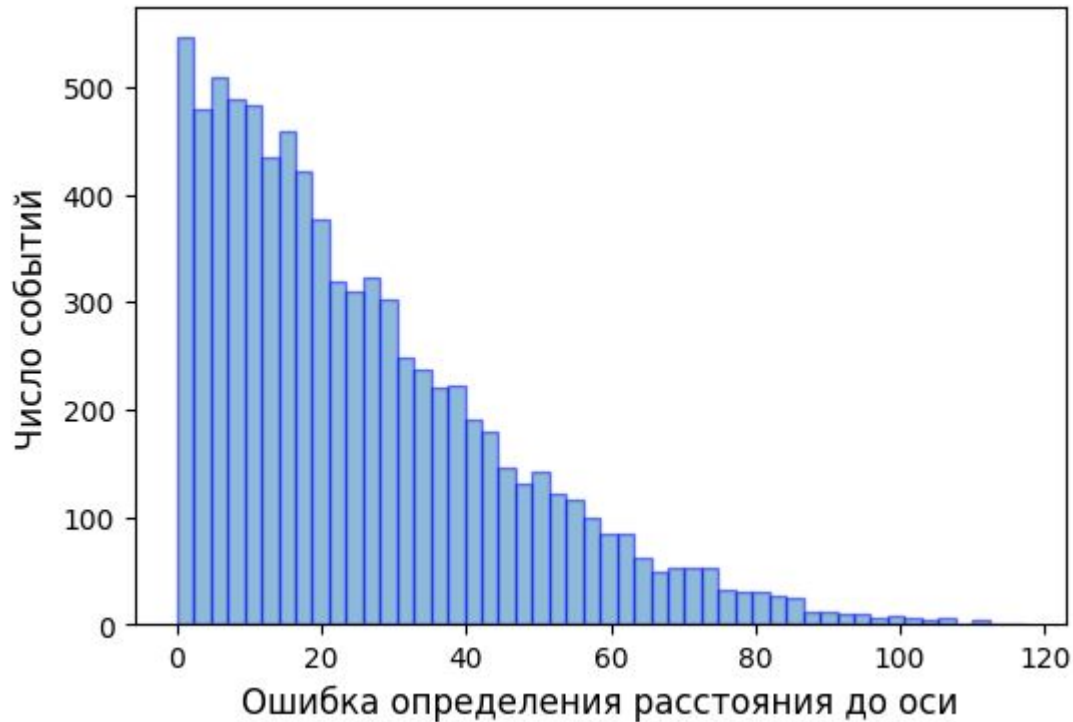
- Энергия: 5, 10, 30 ПэВ;
- Тип первичной частицы: p, N, Fe;
- Углы входа первичной частицы: 15°, 20°, 25°;
- Расстояния оси ливня на снегу от проекции оптической оси телескопа: 0-300 м;
- высота детектора: 500 м.

Для моделирования событий ШАЛ были задействованы мощности Суперкомпьютера Ломоносов-2 в рамках проекта 6788 «Разработка автоматизированного метода оптимизации модели телескопа СФЕРА».



Метод 1: Регрессия расстояния свёрточной нейросетью

- Вход: распределение яркости ЧС ШАЛ на мозаике;
- Выход: предсказанное расстояние между осью ШАЛ и осью телескопа;
- Целевая функция — MSE.

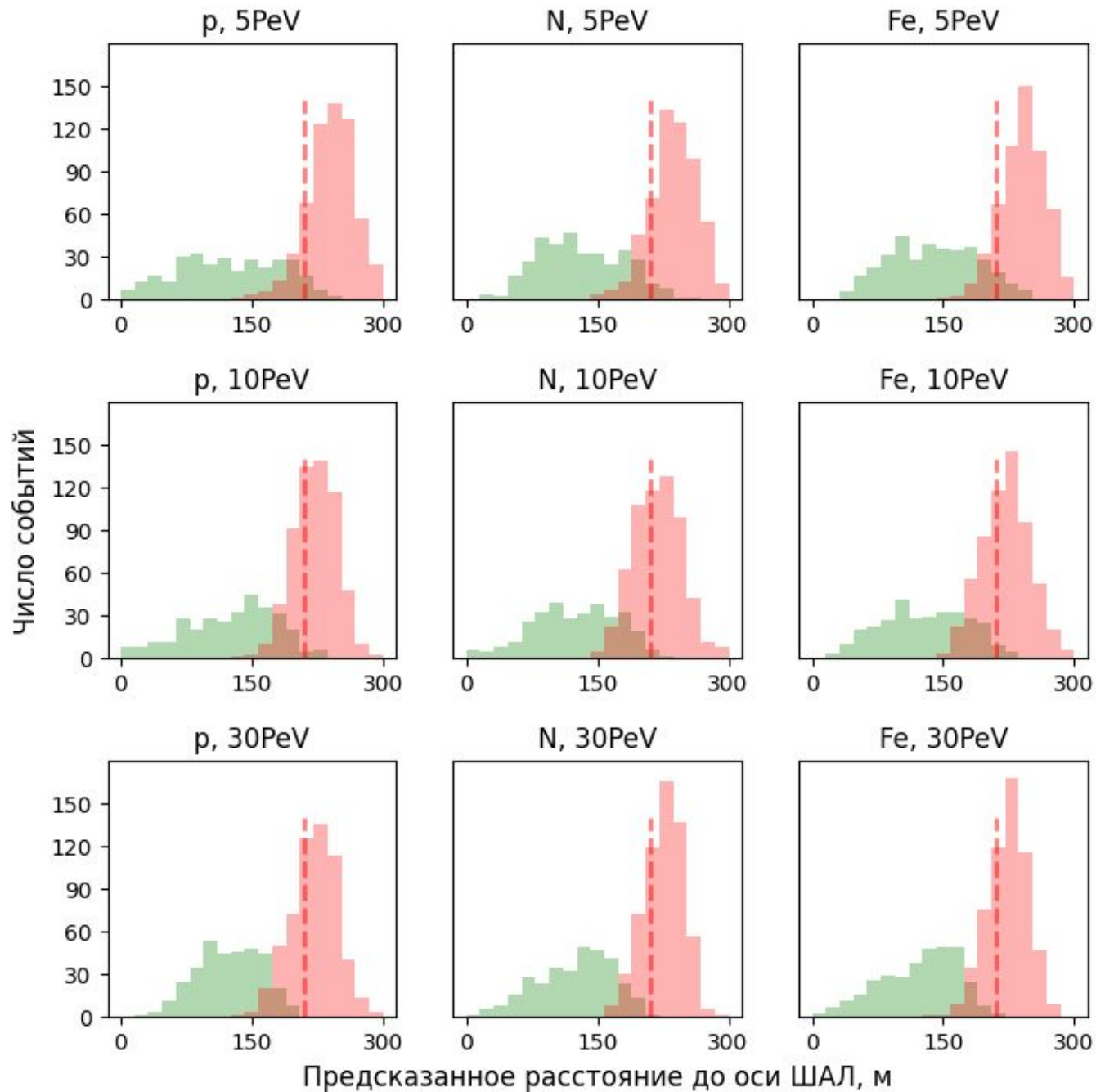


Метод 1: Анализ ошибок

Для порога 210м:

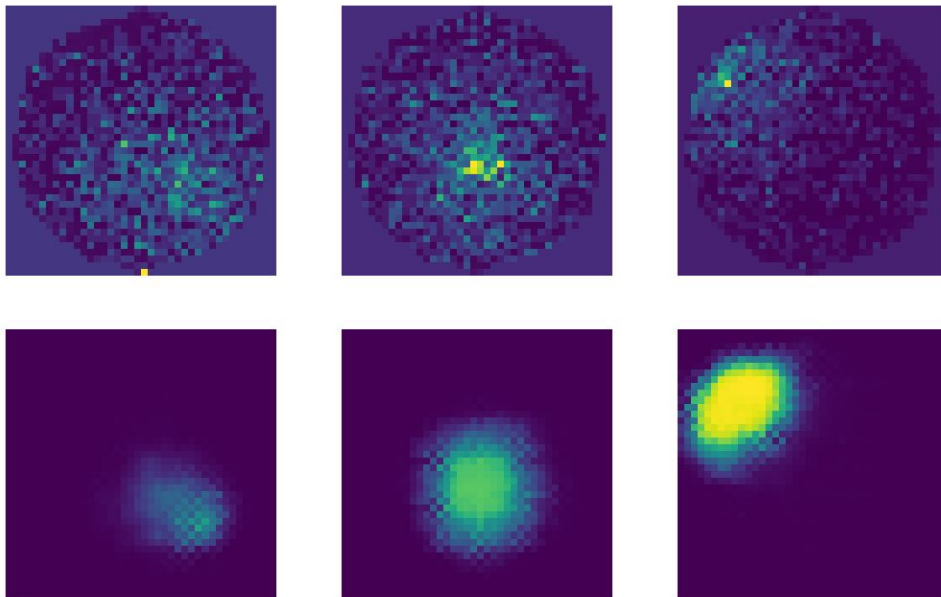
Recall	
истинные максимумы	97,7%
ложные максимумы	71,9%

Ошибка слабо зависит от энергии и не зависит от массы.

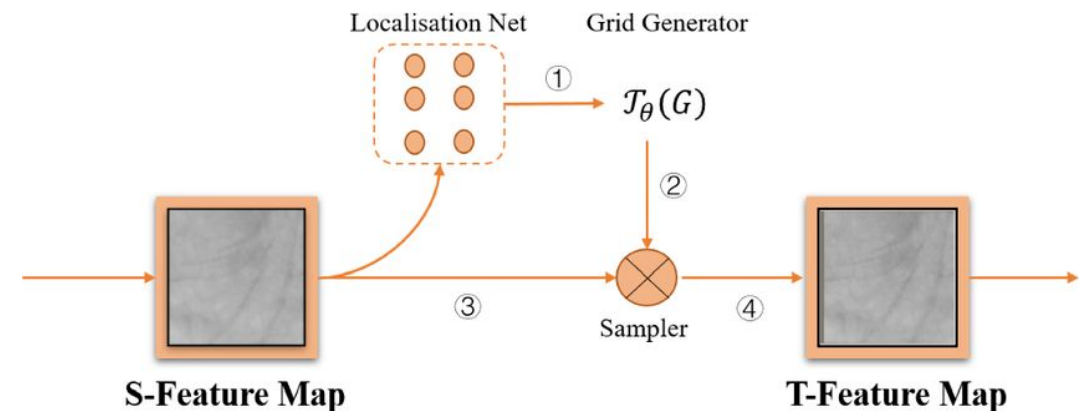
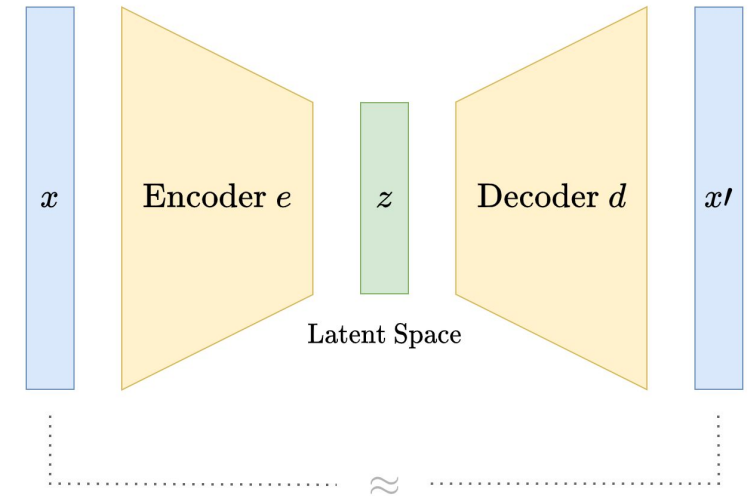


Метод 2: Ошибка реконструкции автоэнкодера

- минимизация ошибки для истинных изображений + максимизация $0.1 \times$ ошибка для ложных (на обучении).
- Ошибка реконструкции используется как признак.
- Spatial Transformer Network (STN) для использования симметрии истинных изображений.



General Autoencoder Architecture

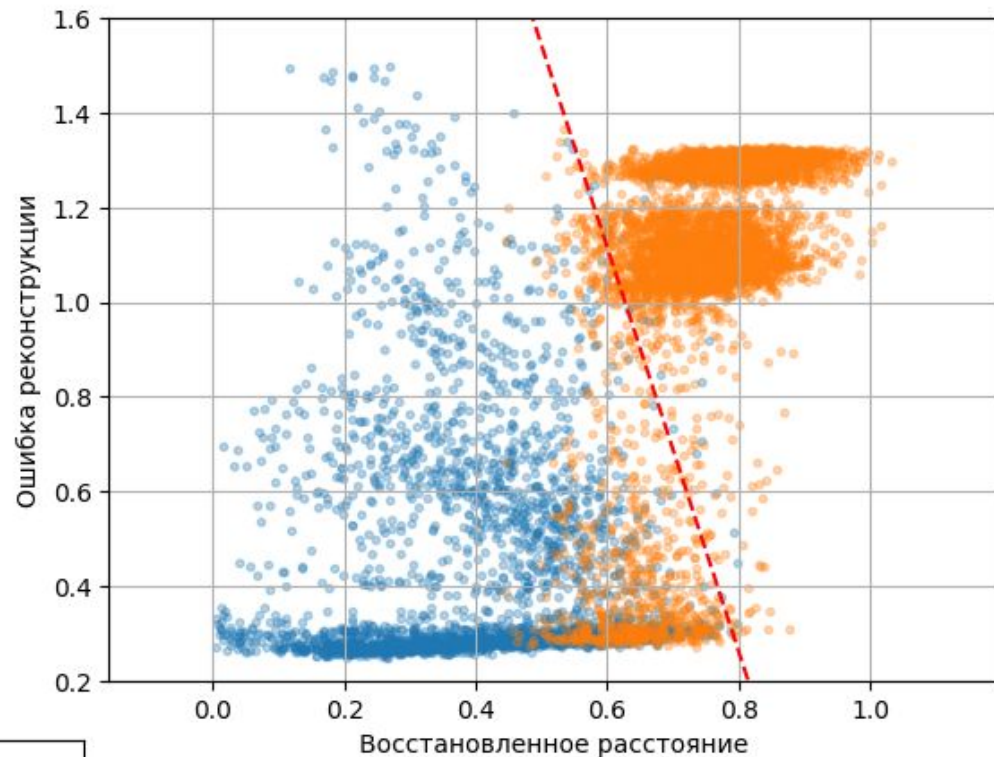
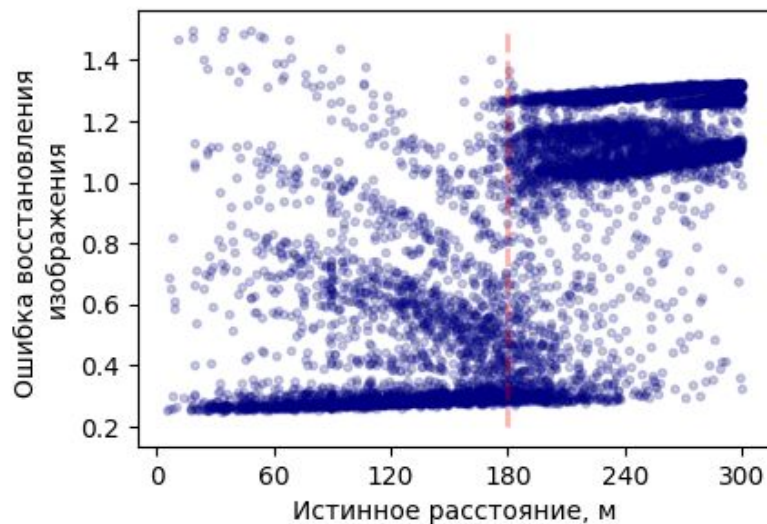
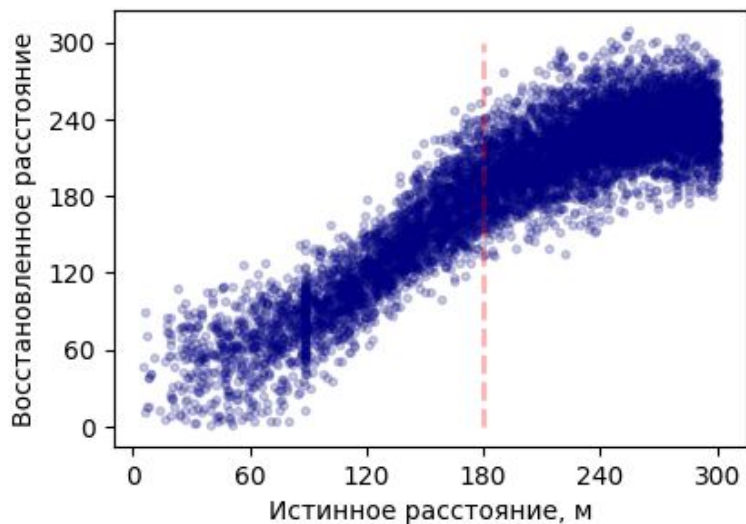


Совмещение признаков

Учёт двух признаков позволяет повысить точность классификации.

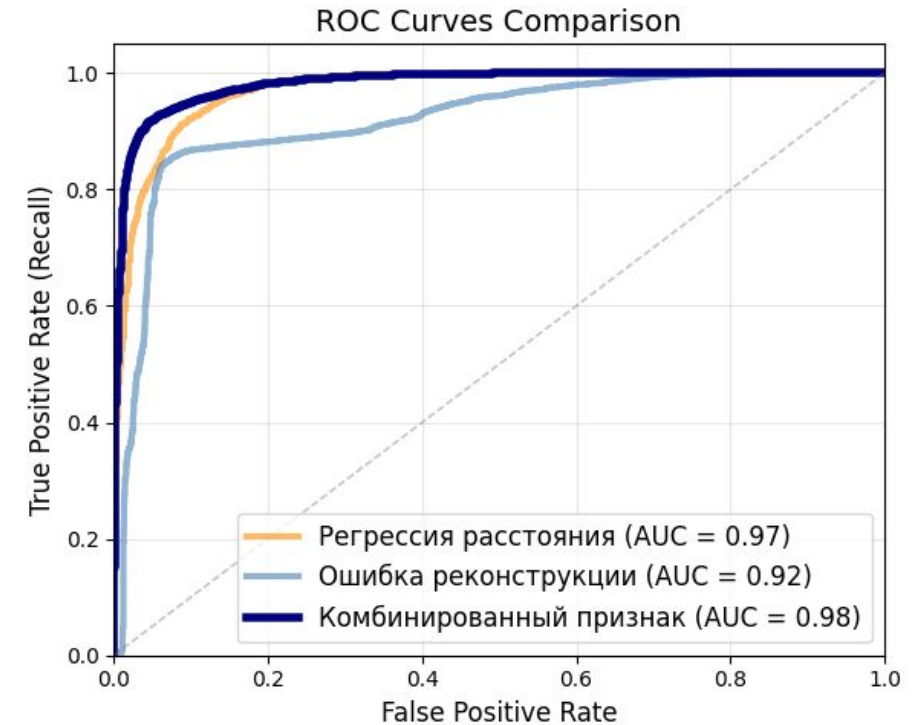
Разделяющая прямая:

$$15.785 * x + 3.694 * y - 13.590 = 0$$



Метрики: 1 порог vs 2 порога

Recall				
	1 признак	2 признака	baseline, частная ошибка	baseline, полную ошибка
истинные максимумы	97,7%	97,8%	98.1%	95.9%
ложные максимумы	71,9%	85,5%	95%	46.5%



baseline = критерий, построенный по ошибке аппроксимации образа. Оптимизация критерия для конкретной энергии даёт высокую точность разделения на этой энергии (частная ошибка). Распространение критерия на весь диапазон энергий с учетом зависимости границы разделения от f_{sp} позволяет посчитать полную ошибку.

Выводы

1

Предложенный метод (CNN + автоэнкодер) достаточно успешно фильтрует ложные максимумы без зависимости от параметров первичной частицы.

2

Автоэнкодер не идеален для классификации, однако отлично дополняет более явно интерпретируемые признаки.

3

STN блок необходим для выучивания симметрии истинных образов.

4

Метод позволяет отфильтровать 85.5% ложных максимумов, сохранив 97.8% истинных.

Спасибо за внимание.

Работа поддержана грантом РФФ
23-72-00006

«Разработка автоматизированного метода
оптимизации модели телескопа для
исследования первичных космических
лучей в диапазоне 10^{15} — 10^{18} эВ по
отраженному от снега и прямому
черенковскому свету широких
атмосферных ливней»

