

# Выделение сигналов от тепловых нейтронов в электронно-нейтронных детекторах с применением машинного обучения в эксперименте ENDA

Куринов К., <sup>1</sup> Щеголев О., <sup>1,2</sup> Стенькин Ю. <sup>1,2</sup>  
Кулешов Д., <sup>1</sup> Лагуткина А. <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН <sup>2</sup>Московский физико-технический институт

37-я Всероссийская конференция по космическим лучам **Июнь 28, 2022**

## Мотивация и цель работы

- Адроны - “скелет” ШАЛ, чувствительный к первичному составу КЛ.
- Информация о числе “испарительных” нейтронов, сгенерированных высокоэнергетичными адронами ливня позволяет улучшить качество восстановления энергии.
- Анализ фона тепловых нейтронов используется в геофизических исследованиях.

Целью работы является создание метода выделения нейтронных импульсов с применением сверточных нейронных сетей (CNN).

# План презентации

- 1 ENDA-LHAASO
- 2 Методика регистрации
- 3 Базисный метод
- 4 Формирование выборки
- 5 CNN
- 6 Результаты

# LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory)

- Самая большая на данный момент высокогорная установка по регистрации ШАЛ (145 Га), расположенная в Тибете на высоте 4400 м. над уровнем моря.
- Один из значимых результатов полученных на установке - открытие ПэВатронов.



Рис. 1: Общий вид установки LHAASO

## Некоторые решаемые задачи:

- 1 Гамма астрономия (100 ГэВ - 1 ПэВ) (поиск галактических и внегалактических источников).
- 2 КЛ (исследование спектра в области излома, источник КЛ).
- 3 Анизотропия космических лучей сверхвысоких энергий.

## Установка ENDA

- В рамках обсерватории LHAASO создается установка ENDA (Electron Neutron Detector Array). На территории ИЯИ РАН в Москве и в Китае на плато Янгбаджинг созданы прототипы установки ENDA из 16 эн-детекторов.
- Эн-детектор может обнаруживать как электроны, так и тепловые нейтроны, генерируемые адронами ШАЛ в окружающей среде.

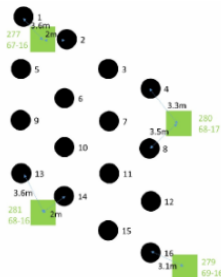
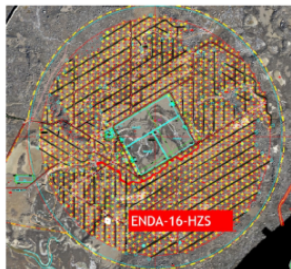
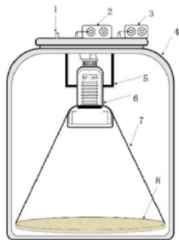
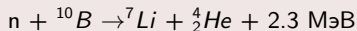


Рис. 2: Слева: Расположение ENDA внутри LHAASO. Справа: Конфигурация ENDA. Черные кружки - (эн-детекторы), зеленые - электромагнитные детекторы.

## Электронно-нейтронный детектор

- Конструкция детектора является стандартной для сцинтилляционных детекторов ШАЛ, однако вместо толстого пластического сцинтиллятора используется специализированный тонкий сцинтиллятор на основе  $ZnS(Ag) + B_2O_3$ .

### Реакция



- 1- HV input port.
- 2- d8 preamplifier (DIU).
- 3- d5 preamplifier (UI).
- 4- black PE barrel.
- 5- PMT fixed holder.
- 6- PMT.
- 7- light collecting cone.
- 8- scintillator.

Рис. 3: Схема эн-детектора



Рис. 4: Образец сцинтиллятора

# Методика регистрации

Ради улучшения временного разрешения, необходимого для счета нейтронных импульсов, используется время интегрирования равное 1 мкс. В этом случае алгоритм разделения на основе интегрирования заряда дает низкое качество классификации.

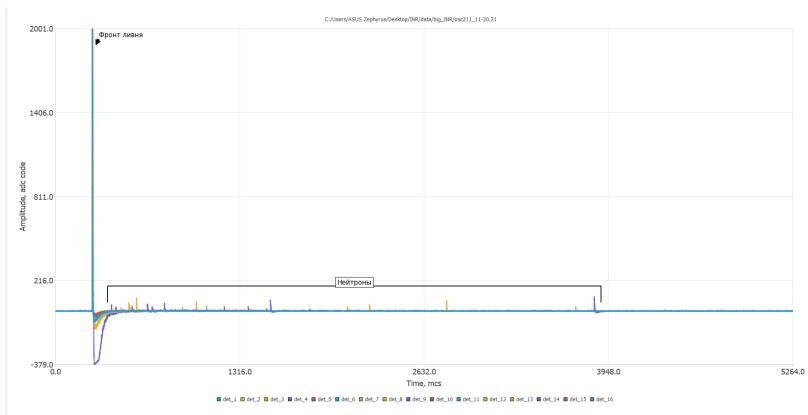


Рис. 5: Осциллограмма события ШАЛ

# Базисный метод

На данный момент в установке работает алгоритм, согласно которому на основе анализа распределения по фронту нарастания импульса, выбирается пороговое значение и все фронты нарастания импульса лежащие слева от этого значения считаются импульсами от заряженной компоненты и фона, а справа импульсами от нейтронной компоненты.

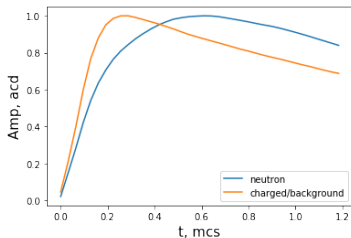


Рис. 6: Профиль фронта импульса заряженной и нейтронной компоненты.

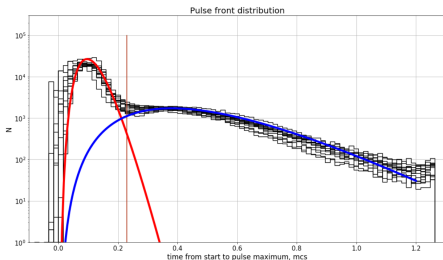
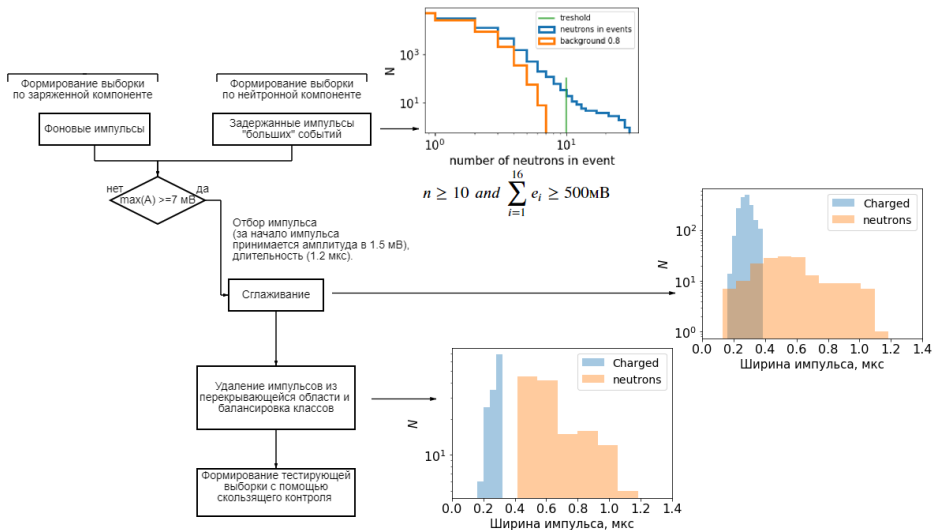


Рис. 7: Распределение импульсов по времени нарастания фронта



# Формирование выборки



Нейронная сеть, состояла из двух частей. Первая часть - сверточная сеть, на вход подается вектор ( $N, 38$ ), а на выходе вектор (embedding), размером ( $N, 128$ ). Функция потерь 1-го слоя Sub-center ArcFace. Вторая часть - классификатор, переводящий эмбединг в конечный вектор из двух нейронов. Функция потерь 2-го слоя - перекрестная энтропия.

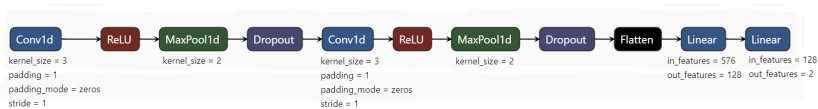


Рис. 8: Схема нейросети

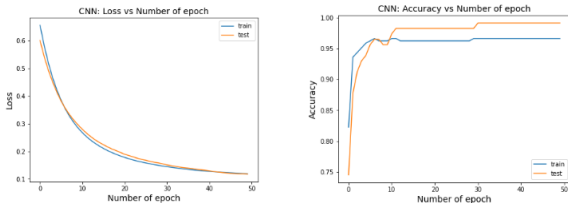


Рис. 9: Слева: График зависимости потерь от эпохи. Справа: График зависимости точности классификации от эпохи.

Отображение векторов на плоскость проводилось с помощью метода t-SNE.

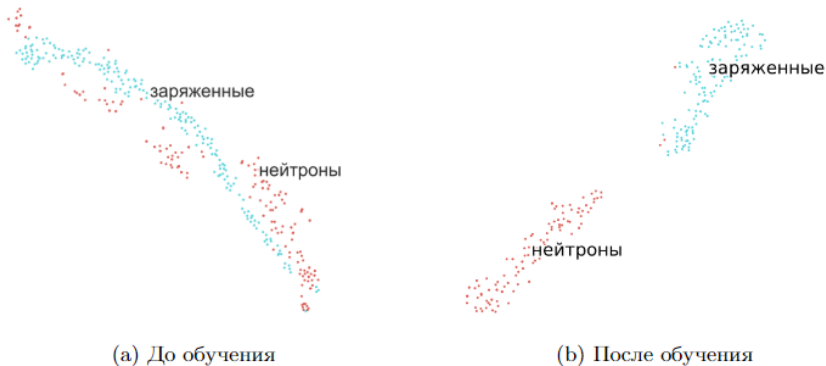


Рис. 10: Отображение векторов на плоскости

## Сравнение результатов

Эффективность методов разделения определялась путем оценки основных метрик классификации на основе матрицы ошибок.

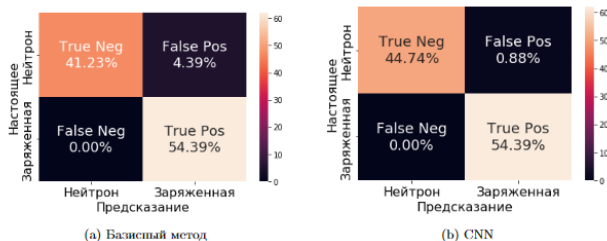


Рис. 11: Матрица ошибок

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F1-score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

Метрика	Базисный метод	CNN
Precision	95%	<b>99%</b>
Recall	96%	<b>99%</b>
F1-score	96%	<b>99%</b>

Таблица 1: Сравнение результатов для тестирующей выборки. ▶

Также алгоритм был протестирован на данных с прототипа ENDA-YBJ. Из-за различных шагов оцифровки в установке ENDA-INR (32 нс) и ENDA-YBJ (20 нс), импульсы для ENDA-YBJ были экстраполированы на шаг в 32 нс. Проверка работы алгоритмов показала ошибочную классификацию в 20% случаев базисным методом по сравнению с нейросетевым подходом. Все ошибочно классифицированные импульсы имели ширину импульса, находящуюся в перекрывающейся области.

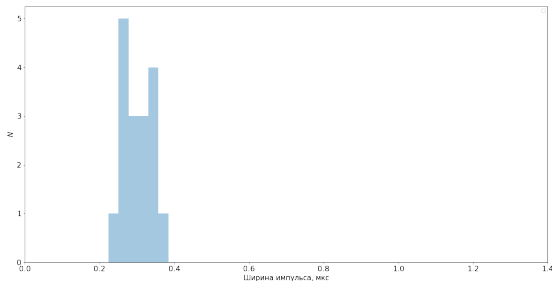


Рис. 12: Распределение по времени нарастания фронта импульса

## Заключение

- Был разработан метод выделения сигналов от тепловых нейтронов с использованием сверточных нейронных сетей в электронно-нейтронных детекторах. Алгоритм показал лучшее качество классификации на тестирующей выборке по сравнению с базисным методом, который применяется на данное время в установке.
- Алгоритм показал хорошую обобщающую способность при проверке в области перекрытия фронтов нарастания импульса заряженной и нейтронной компоненты.

*Спасибо за внимание!*

# Приложение (ошибочно классифицированные импульсы)

