

Реконструкция энергии космических лучей ультравысоких энергий, зарегистрированных флуоресцентным телескопом: одного такта времени может быть достаточно

Михаил Зотов¹ и Андрей Трусов² для коллаборации JEM-EUSO

¹ НИИЯФ МГУ, Отдел космических наук, Лаборатория КЛ ПВЭ

² Физический факультет МГУ

The 9th International Conference in Deep Learning in Computational Physics
Москва, 2–5 июля 2025 г.

Космические лучи УВЭ. Флуоресцентные телескопы

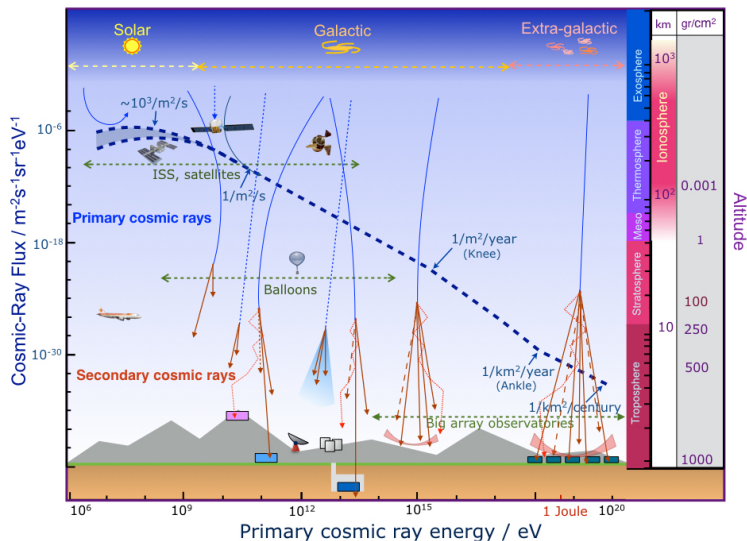
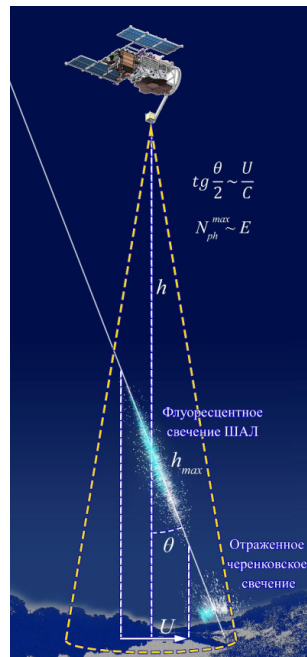
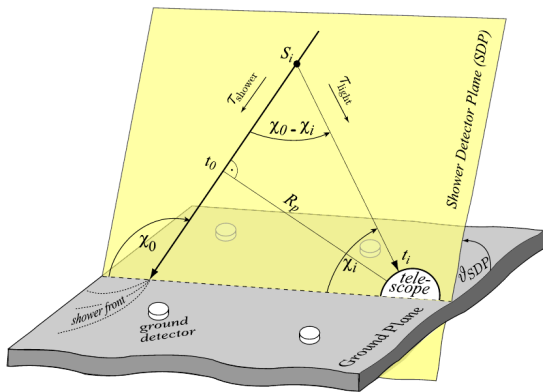


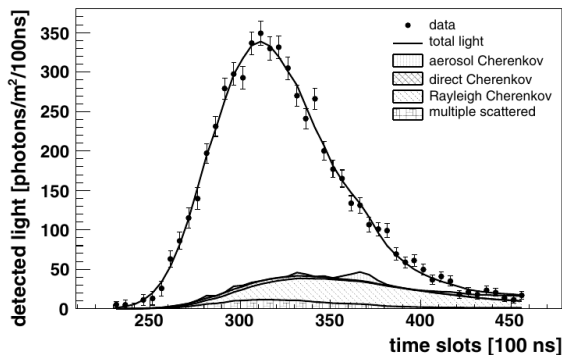
Рис. слева: arXiv:1701.07277, справа: В. Николаева



Классическая процедура реконструкции энергии КЛ по данным ФТ



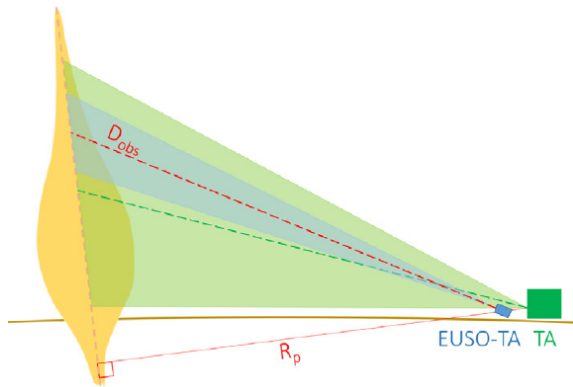
Astropart.Phys.30:167-174, 2008



Auger: Nucl.Instrum.Meth.A620:227-251, 2010

- 1 Распознавание трека на фокальной поверхности ФТ
- 2 Восстановление геометрии ШАЛ
- 3 Оценка энергии (Gaisser–Hillas function)

Флуоресцентный телескоп EUSO-TA



Сложности реконструкции:

- Оптическая система: линзы Френеля диаметром 1 м. Поле зрения $10.5^\circ \times 10.5^\circ \Rightarrow$ ФТ видит только часть трека ШАЛ
- Временное разрешение 2.5 мкс: хорошо для работы на орбите, но слишком грубое для наземного ФТ (в 25 раз больше, чем у Auger и TA) $\Rightarrow$ короткие развёртки

Подробности: Astroparticle Physics 163 (2024) 103007

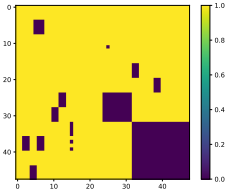
Table A.5

Parameters of the nine detected events from measurements with the external trigger from TA-BRM-FDs. In order from left to right: elevation angle of EUSO-TA during the operation; energy reconstructed by TA, zenith angle θ ; azimuth angle ϕ measured from east counterclockwise; the impact parameter R_p ; the energy rescaled based on this analysis $E_{eq,atm}$; the distance of the shower measured along the telescope optical axis.

elev. (deg)	E_{recTA} (eV)	θ (deg)	ϕ (deg)	R_p (km)	$E_{eq,atm}$ (eV)	D (km)
25	4.90×10^{18}	56.9	15.7	8.3	2.09×10^{18}	8.66
15	1.15×10^{18}	34.5	82.8	2.5	3.27×10^{18}	2.88
25	1.58×10^{18}	62.9	27.0	0.8	6.98×10^{18}	1.04
21	1.12×10^{18}	29.5	254.9	5.0	5.61×10^{17}	5.12
20	3.24×10^{18}	60.4	169.3	9.1	1.88×10^{18}	19.80
10	2.40×10^{18}	41.2	114.8	6.7	3.51×10^{17}	10.03
15	3.31×10^{18}	40.6	210.5	9.0	2.17×10^{18}	10.07
10	5.13×10^{17}	10.6	130.5	1.7	3.10×10^{17}	2.12
15	2.63×10^{18}	8.1	8.0	2.6	2.08×10^{18}	2.76

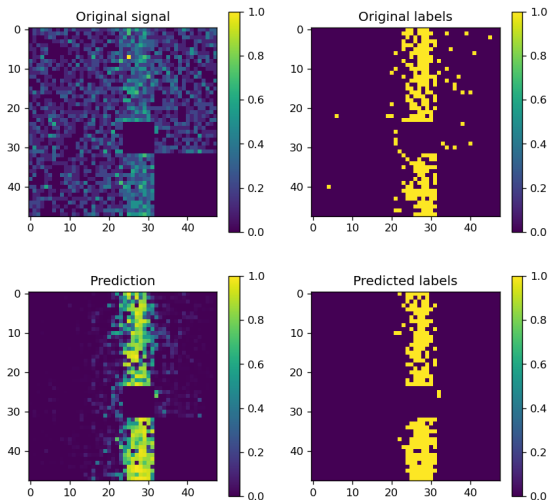
Оценки энергии, θ , ϕ , расстояний: Telescope Array collaboration
Погрешность реконструкции энергии по данным ФТ ТА: 17%.

Справа: «маска» с неработавшими пикселями EUSO-TA

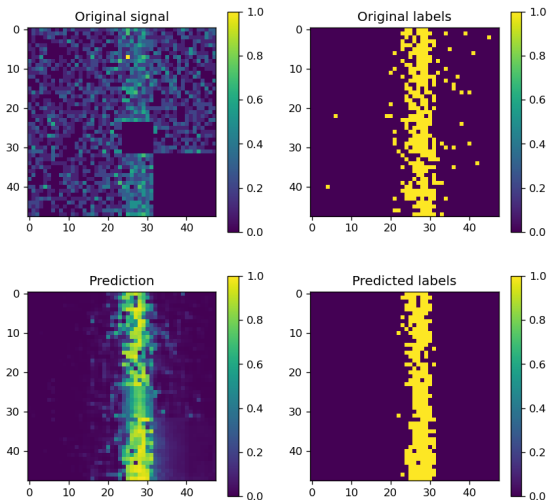


Распознавание треков: свёрточный кодер-декодер

PR AUC=0.832, Balanced acc=0.858, IoU=0.789



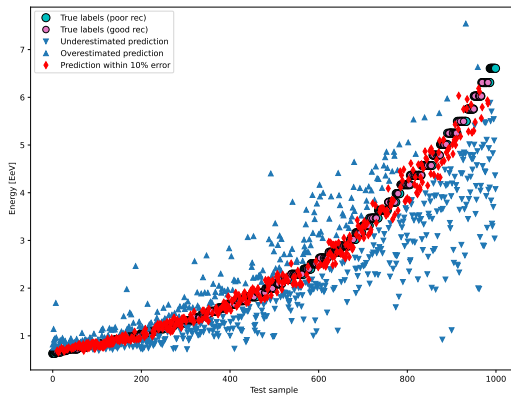
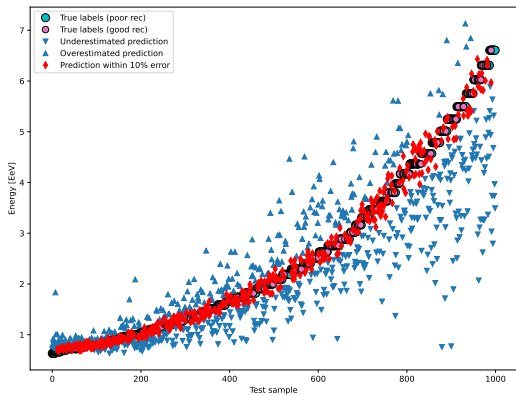
PR AUC=0.810, Balanced acc=0.837, IoU=0.766



Комментарий: возможен перенос моделей для распознавания треков в данных ФТ RAIPS-L (16×48)

Проблема: сложность выбора «наилучшей» модели

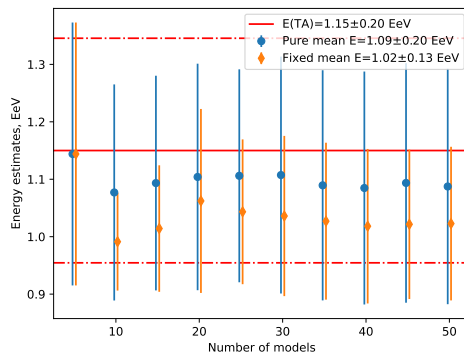
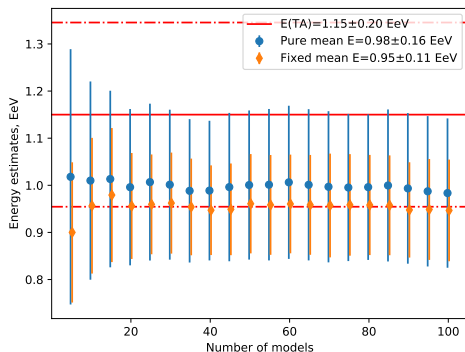
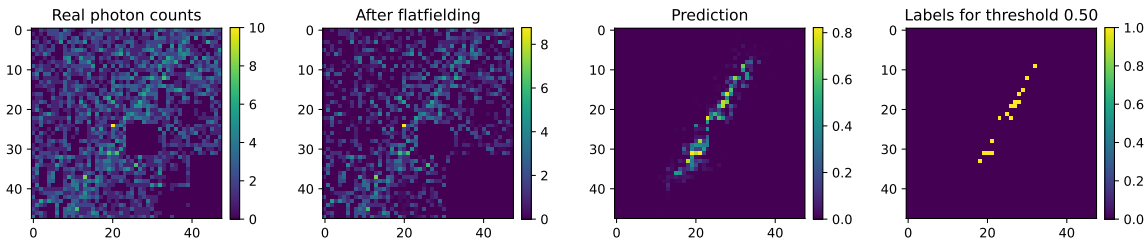
Модельный набор данных: около 250 тыс. «событий» $48 \times 48 \times 8$ с энергиями 0.63–6.6 ЭВ (равномерно по $\lg(E/\text{eV})$). Фиксированная тестовая выборка (1 тыс.), случайная обучающая выборка (76 тыс.)



Model	MAPE, %	R^2	$\mu \pm \sigma$, %
Слева:	18.2	0.760	3.0 ± 24.2
Справа:	18.1	0.759	2.9 ± 24.4

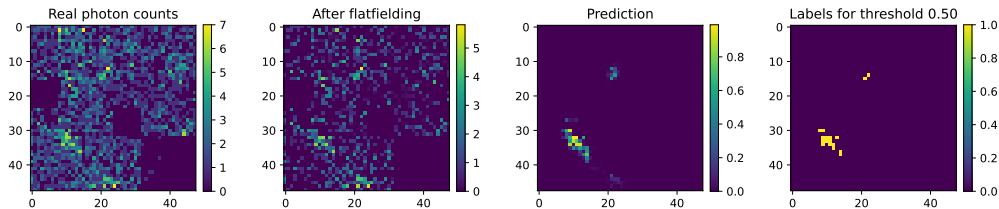
Не всегда наблюдается корреляция между метриками и точностью реконструкции!

2015-05-13: $E(TA) = 1.15 \pm 0.20$ ЭэВ ($R_p = 2.5$ км)

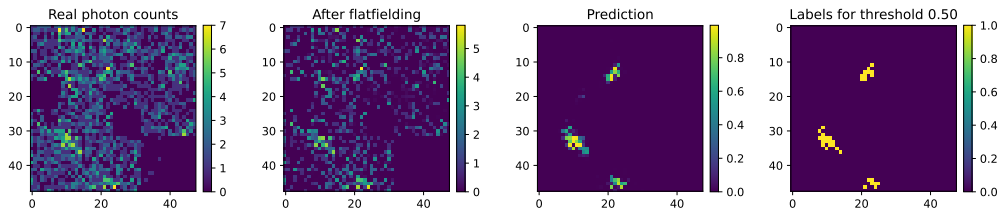


Слева: НС обучаются реконструировать только E, справа: E и расстояние до оси ШАЛ

2015-10-15: $E(\text{TA}) = 3.31 \pm 0.56$ ЭэВ ($R_p = 9.0$ км)

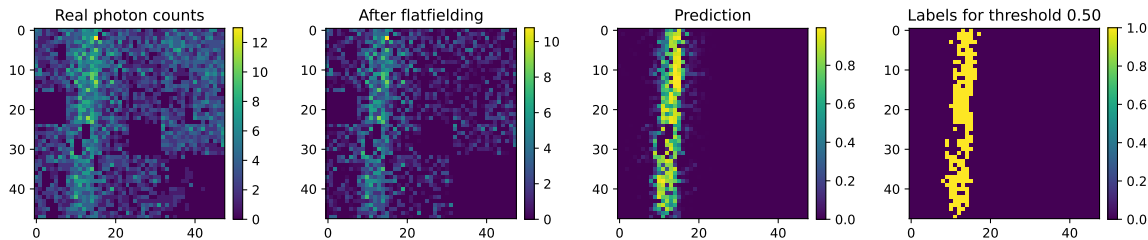


Та же модель распознавания треков, что и выше



Модель распознавания треков, обученная без маски

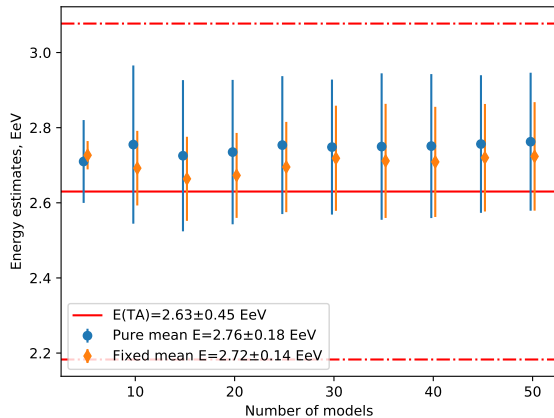
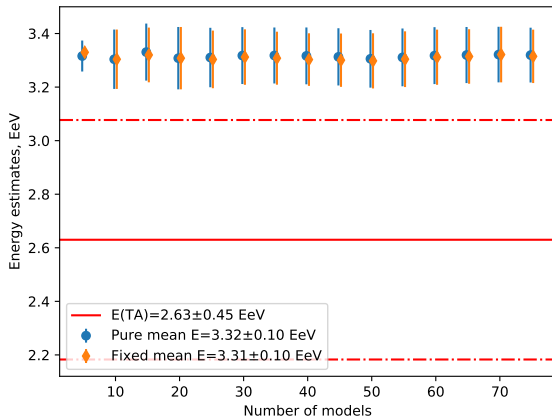
По-видимому, трек распознан лишь частично $\Rightarrow$ сильно заниженные оценки энергии $\lesssim 2$ ЭэВ.
Лучшая оценка: 2.94 ± 0.81 ЭэВ (при обучении НС реконструкции энергии без маски)



Яркий трек от ШАЛ на небольшом расстоянии от ФТ, $\theta = 8.1^\circ$, $\phi = 8.0^\circ$. В первоначальном наборе данных аналогичных событий не было $\Rightarrow$ завышенные оценки энергии ~ 4 ЭэВ.

Смоделировали ~ 3.5 тыс почти вертикальных событий на расстояниях ≤ 3 км, уменьшили обучающий набор до 100 тыс, повторили обучение.

2015-11-07: $E(TA) = 2.63 \pm 0.45$ ЭэВ ($R_p = 2.6$ км)

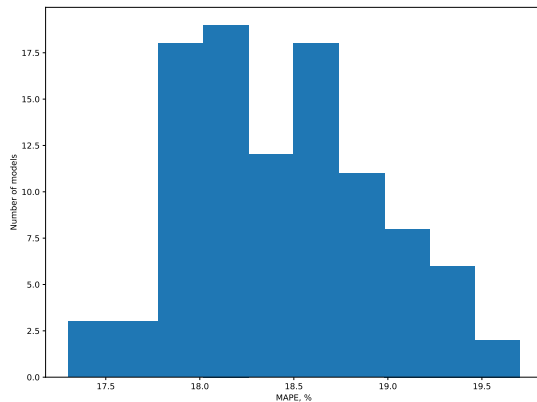
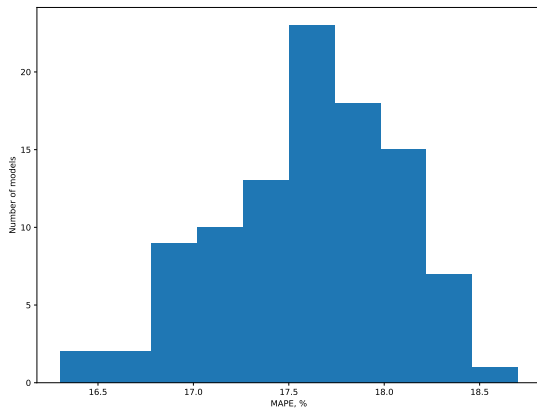


Слева: обучение моделей и реконструкция энергии так же, как рассказано ранее (по размеченным/распознанным трекам)*

Справа: обучение и реконструкция энергии без какой-либо информации о треках (ни в обучающем наборе, ни в данном событии)

*The Tukey fence: сохраняем результаты внутри интервала значений $[Q_1 - k(Q_3 - Q_1); Q_1 + k(Q_3 - Q_1)]$, $k = 1.5$

Сравнение реконструкции энергии с распознаванием треков и без



Слева: обучение 100 моделей для реконструкция энергии по размеченным/распознанным трекам: $\text{MAPE} = 17.6 \pm 0.5\%$

Справа: обучение 100 моделей для реконструкция энергии без какой-либо информации о треках: $\text{MAPE} = 18.4 \pm 0.5\%$

- Реализована процедура распознавания треков ШАЛ от КЛ ультравысоких энергий, зарегистрированных флуоресцентными телескопами (EUSO-SPB2, EUSO-TA, PAIPS,...), и последующей оценки энергии первичных частиц с помощью нейронных сетей
- С помощью этой процедуры удалось получить разумные оценки энергии нескольких событий, зарегистрированных малым наземным ФТ EUSO-SPB2 за единственный такт времени
- По-видимому, при использовании нейронных сетей этап распознавания трека не является обязательным для получения оценки энергии КЛ, но не все моменты работы НС до конца понятны
- В планах: проверка/адаптация моделей на сигналах калибровочного лазера эксперимента Telescope Array

[†]Поиск треков ШАЛ в данных телескопа PAIPS-L осуществляется при поддержке гранта РНФ 22-62-00010. Анализ данных телескопа EUSO-TA на основе НС выполняется в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

- Реализована процедура распознавания треков ШАЛ от КЛ ультравысоких энергий, зарегистрированных флуоресцентными телескопами (EUSO-SPB2, EUSO-TA, PAIPS,...), и последующей оценки энергии первичных частиц с помощью нейронных сетей
- С помощью этой процедуры удалось получить разумные оценки энергии нескольких событий, зарегистрированных малым наземным ФТ EUSO-SPB2 за единственный такт времени
- По-видимому, при использовании нейронных сетей этап распознавания трека не является обязательным для получения оценки энергии КЛ, но не все моменты работы НС до конца понятны
- В планах: проверка/адаптация моделей на сигналах калибровочного лазера эксперимента Telescope Array

Благодарю за внимание!

[†]Поиск треков ШАЛ в данных телескопа PAIPS-L осуществляется при поддержке гранта РНФ 22-62-00010. Анализ данных телескопа EUSO-TA на основе НС выполняется в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.