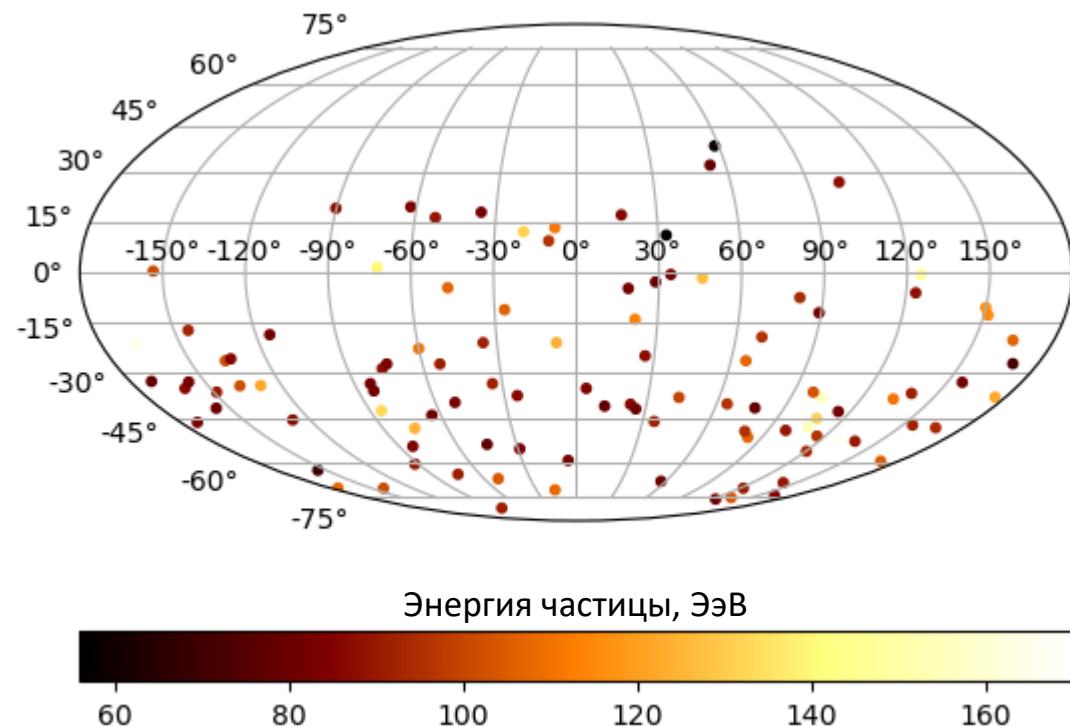


ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Выполнил:
студент 443 группы
Русол Владимир Андреевич

Научный руководитель:
Профессор РАН, доктор физ.-мат. наук
Калашёв Олег Евгеньевич

Открытые данные обсерватории Пьера Оже



1. Каталог космических лучей с наивысшими энергиями:
 - 109 событий с энергией от 46 до 166 ЭэВ
 - 105 событий с энергией от 56 ЭэВ
2. Cosmic-ray dataset
Каталог, включающий в себя 10% всех зарегистрированных космических лучей:
 - 21 событие с энергией от 56 ЭэВ
 - 164 события с энергией от 28 ЭэВ

Оба каталога доступны по ссылке:
<https://opendata.auger.org/>

Полные данные обсерватории на конец 2020 включают 2040 событий с энергией от 32 ЭэВ

Экспозиция обсерватории Пьера Оже

$$\omega(\delta) \propto \cos(a_0)\cos(\delta)\sin(\alpha_m) + \alpha_m\sin(a_0)\sin(\delta),$$

$$\alpha_m = \begin{cases} 0 & \text{if } \xi > 1 \\ \pi & \text{if } \xi < -1 \\ \cos^{-1}(\xi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

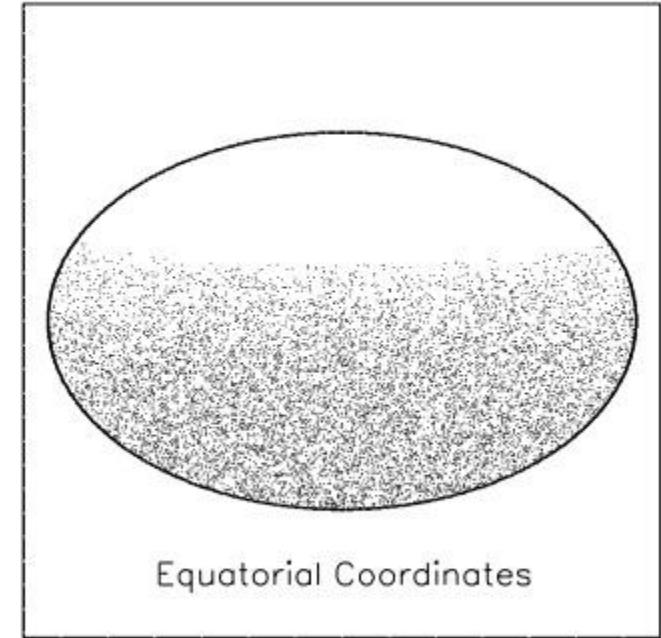
$$\xi \equiv \frac{\cos(\theta_m) - \sin(a_0)\sin(\delta)}{\cos(a_0)\cos(\delta)}.$$

ω – относительная экспозиция обсерватории

δ – склонение

a_0 – широта детектора

θ_m – зенитный угол, до которого эффективность детектора максимальна (зависит только от уменьшения ортогональной площади детектора)



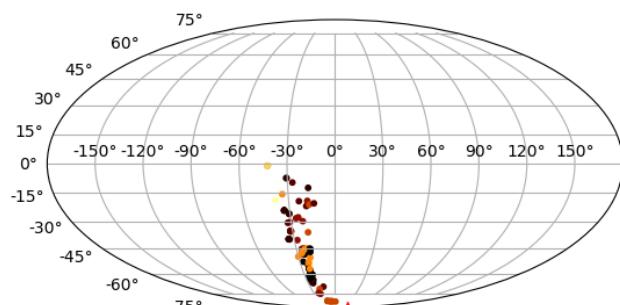
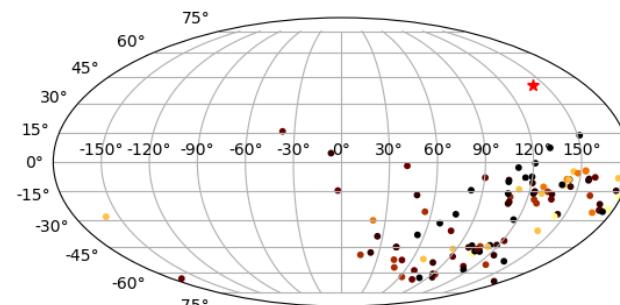
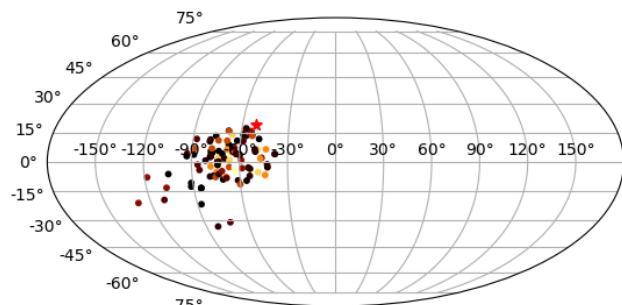
Обсерватория Пьера Оже:

$$a_0 = -35^\circ$$

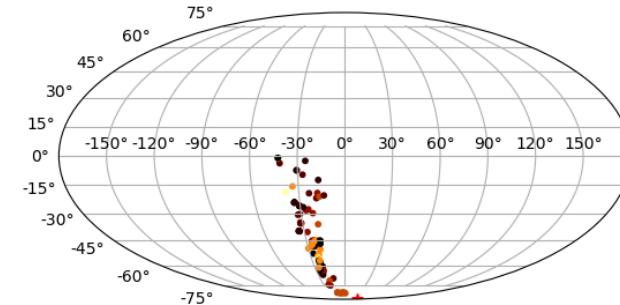
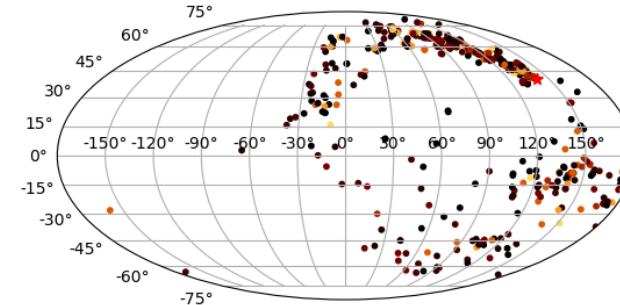
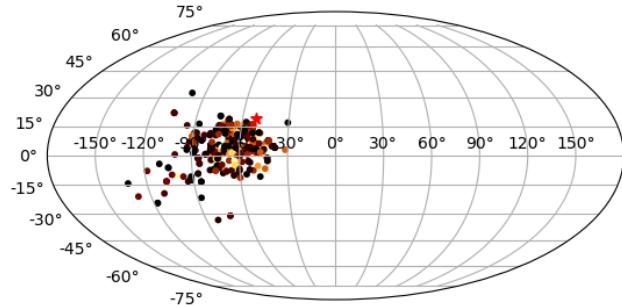
$$\theta_m = 55^\circ$$

Примеры моделирования источников

105
частиц
чистого
сигнала



N частиц,
перебранных
при
генерации



Centaurus A

N = 294

M82

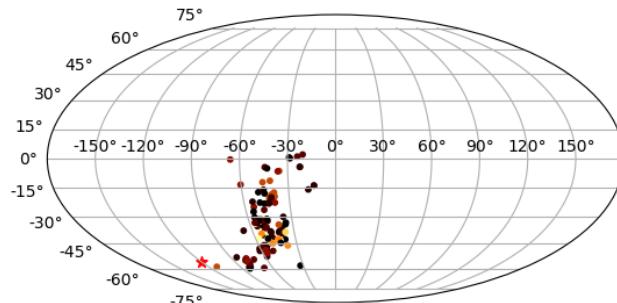
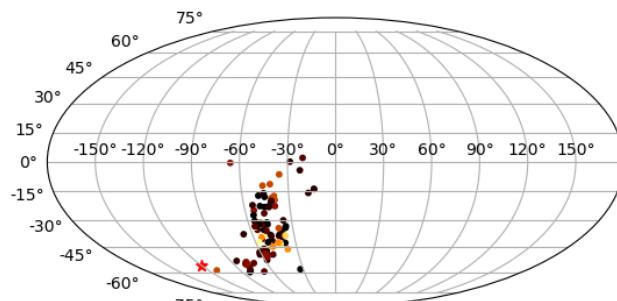
N = 520

NGC253

N = 122

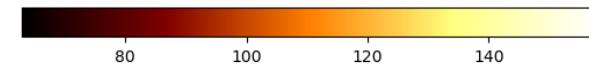
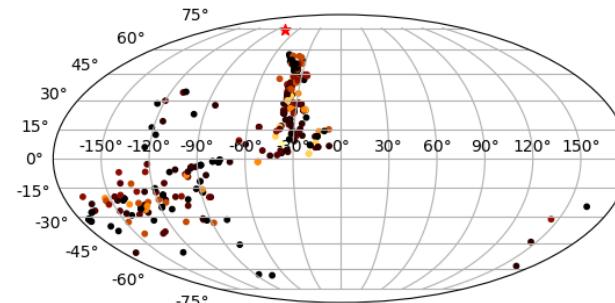
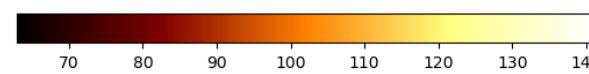
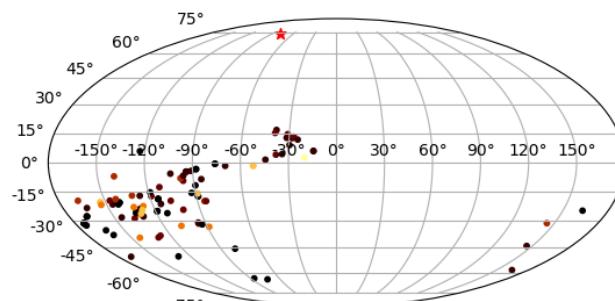
Примеры моделирования источников

105
частиц
чистого
сигнала



Fornax A

$N = 119$



M87

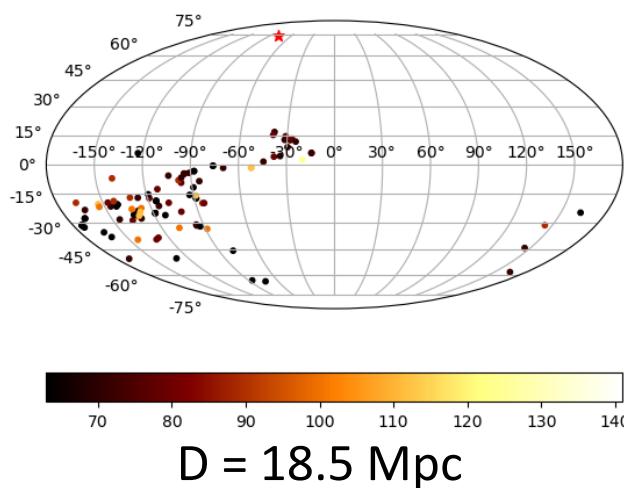
$N = 300$

Использованная модель

Слой	Формат вывода
InputLayer	(None, 105, 4)
BatchNormalization	(None, 105, 4)
EdgeConvolution	(None, 105, 80)
EdgeConvolution	(None, 105, 80)
GlobalAveragePooling1D	(None, 80)
Dense	(None, 1)

Параметр	Значение
Обучающая выборка	10000
Валидационная выборка	10000
Тестовая выборка	50000
Критерий ранней остановки	8
α	0.01
β	0.05
$\delta E/E$	0.085
Радиус источника, °	1

Результаты для M87



$\alpha = 0.01$

$\beta = 0.05$

Поле: jf

Nside = 256: обучено 20 сетей

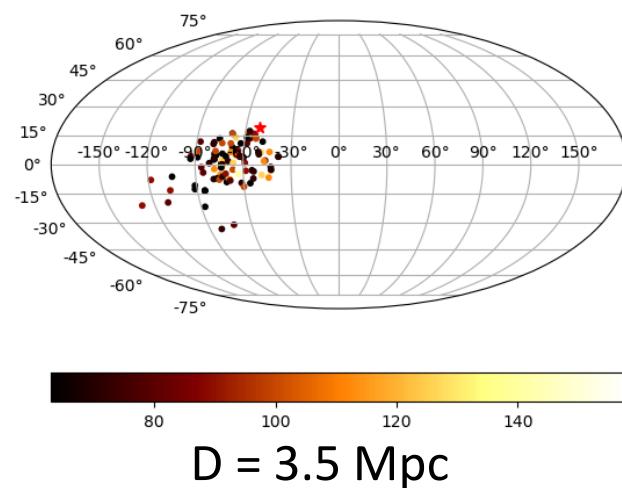
Параметр	Минимум	Среднее	Максимум
Validation fraction		21/105	
Test fraction		22/105	
Prediction	0.051	0.065	0.081

Поток с высокой точностью не превышает 22/105

Nside = 512

Параметр	Значение
Validation fraction	21/105
Test fraction	22/105
Prediction	0.070

Результаты для Centaurus A



$\alpha = 0.01$

$\beta = 0.05$

Поле: jf

Nside = 256: обучено 25 сетей

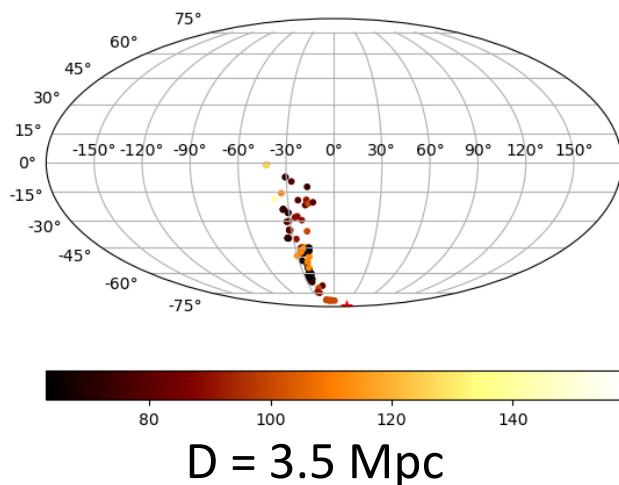
Параметр	Минимум	Среднее	Максимум
Validation fraction		16/105	
Test fraction		17/105	
Prediction	0.067	0.078	0.099

Сигнал с высокой точностью не превышает 17/105

Nside = 512

Параметр	Значение
Validation fraction	16/105
Test fraction	17/105
Prediction	0.122

Результаты для NGC253



$\alpha = 0.01$

$\beta = 0.05$

Поле: jf

Nside = 256: обучено 20 сетей

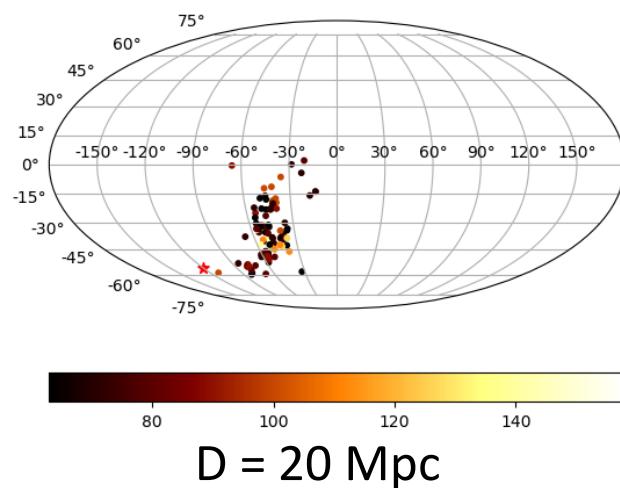
Параметр	Минимум	Среднее	Максимум
Validation fraction	12/105	12.8/105	13/105
Test fraction	13/105	14.7/105	15/105
Prediction	0.366	0.398	0.444

Ни одна из 20 сетей не обнаружила сигнал

Nside = 512

Параметр	Значение
Validation fraction	13/105
Test fraction	15/105
Prediction	0.384

Результаты для Fornax A



$D = 20$ Mpc

$\alpha = 0.01$

$\beta = 0.05$

Поле: j_f

Nside = 256: обучено 25 сетей

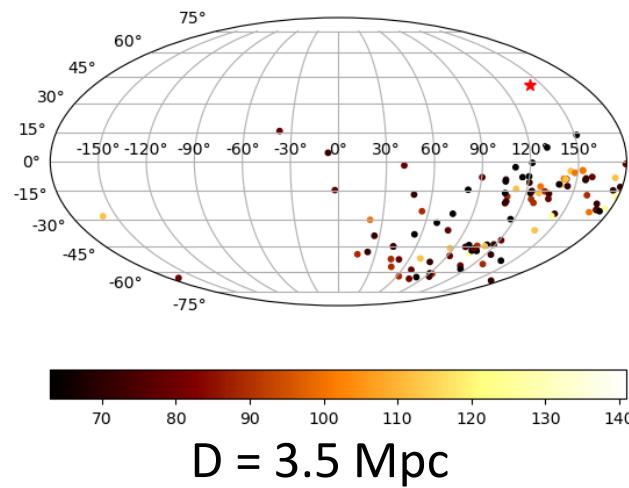
Параметр	Минимум	Среднее	Максимум
Validation fraction	14/105	15.8/105	16/105
Test fraction	15/105	17.5/105	12/105
Prediction	0.424	0.461	0.587

2 сети с меньшим значением Test fraction фиксируют сигнал
Возможно, сигнал лежит в диапазоне от 15/105 до 17/105

Nside = 512

Параметр	Значение
Validation fraction	15/105
Test fraction	16/105
Prediction	0.517

Результаты для M82



$\alpha = 0.01$

$\beta = 0.05$

Поле: j_f

Nside = 256: обучено 23 сети

Параметр	Минимум	Среднее	Максимум
Validation fraction	29/105	29.6/105	30/105
Test fraction	30/105	31.6/105	32/105
Prediction	0.552	0.775	0.885

Все обученные сети фиксируют сигнал
Сигнал превышает 30/105

Nside = 512

Параметр	Значение
Validation fraction	22/105
Test fraction	28/105
Prediction	0.962

Спасибо за внимание!