

**Проблемы локализации центра и  
анализа формы глаза тропических  
циклонов на инфракрасных спутниковых  
изображениях с помощью машинного  
обучения и компьютерного зрения**

**Якушева Анна Николаевна (1)**

**Ермаков Дмитрий Михайлович (1,2)**

(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

(2) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН),  
Фрязино, Московская обл., Россия

# Обзор исследований

Локализация центра ТЦ					
Статьи	Данные	Метод	Тестовый набор	Метрика	Ошибка
Wimmers et al. (2010)	ПМВ 85–92 ГГц	Алгоритм ARCHER	241 изображение	СКО (RMSE)	<b>0,173°</b>
Neeru et al. (2011)	ИК 10,3-11,3 мкм	Алгоритм спирального центрирования	Два случая ТЦ	CAO (MAE)	<b>0,4°</b>
Wimmers et al. (2016)	ПМВ 85–92 ГГц	Алгоритм ARCHER-2	ТЦ Атлантики 2012 г.		<b>0,59°</b>
Lu et al. (2019)	ИК 10,3-11,3; 11,5–12,5; 3,5–4,0 мкм ВП 6,3–7,6 мкм ВИД 0,55–0,90 мкм	Алгоритм спирального центрирования	29 случаев ТЦ		СКО (RMSE)
Wang et al. (2020)	ИК 10,3-11,3 мкм	Метод Хафа	134 изображения	CAO (MAE)	<b>0.237°</b>
Shin (2022)		Алгоритм спирального центрирования	190 случаев ТЦ	СКО (RMSE)	<b>0.6°</b>
Liu et al. (2022)		Векторы ветра	2 случая ТЦ	CAO (MAE)	<b>0,37°</b>
Qingxiang (2022)		Метод Хафа	2 случая ТЦ		<b>0,18°</b>
Wang et al. (2023)		ИК 10.4, 12.3 мкм ВП 6.2 мкм	Глубокое обучение		490 изображений

# Данные

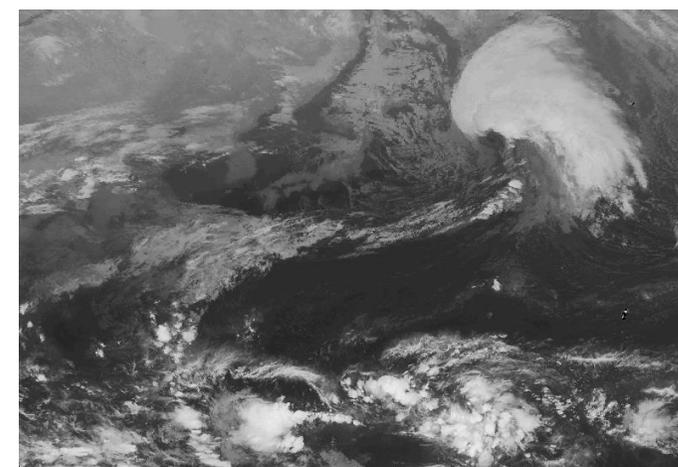
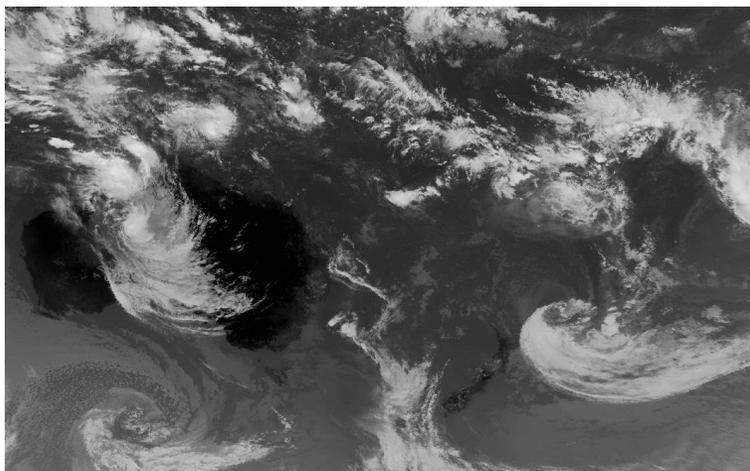
Акватория	Количество изображений
Атлантика	5320
Восточная часть Тихого океана	5873



Акватория	Количество изображений
Северо-Западная часть Тихого	24123
Юго-Западная часть Тихого	12290

Goes/Himawari

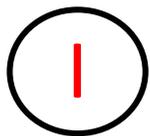
10.3-11.2 мкм





# **Локализация центра тропического циклона. Метод Хафа**

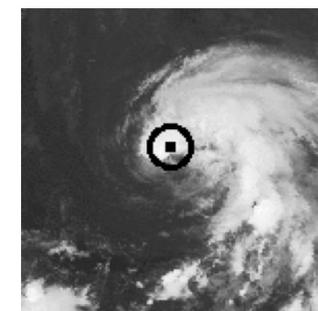
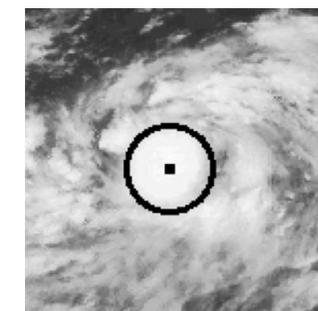
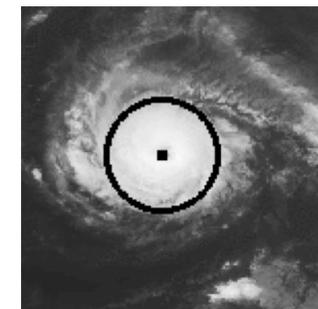
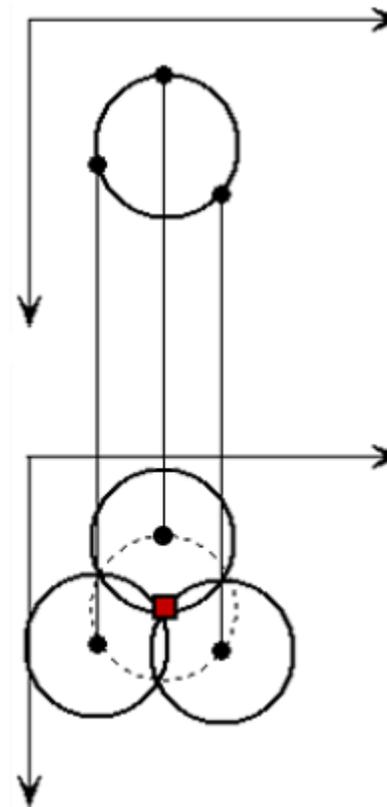
# Алгоритм преобразования и поиска окружности



Предобработка изображений



Метод Хафа поиска окружности



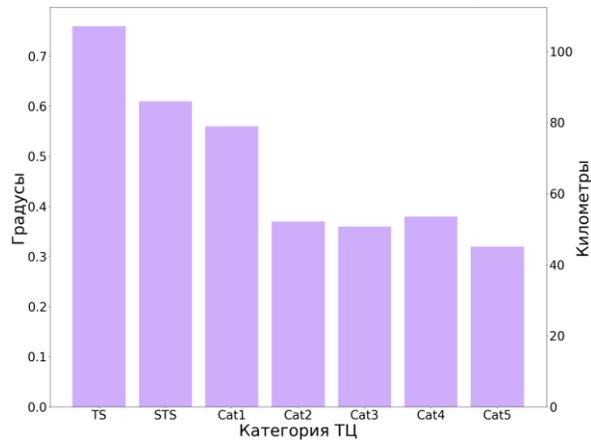
# Результаты

Средняя абсолютная ошибка:

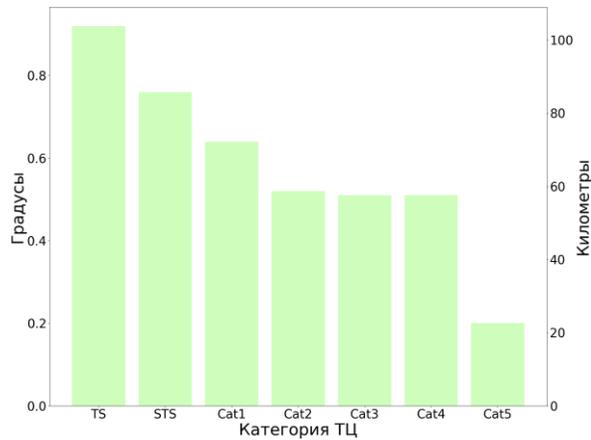
$$CAO = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{true,i} - x_{pred,i})^2 + (y_{true,i} - y_{pred,i})^2}$$

Распределение CAO

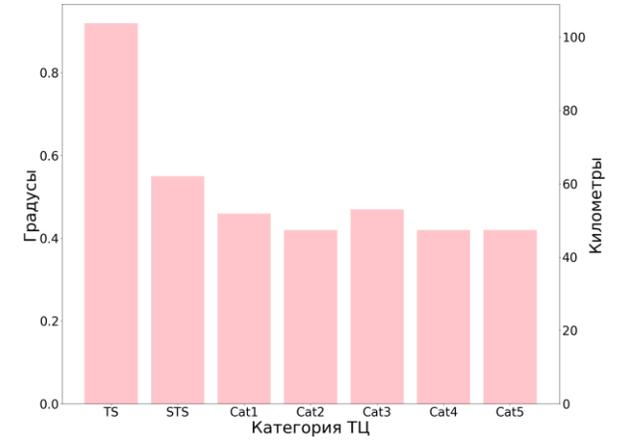
Собственный набор



JMA



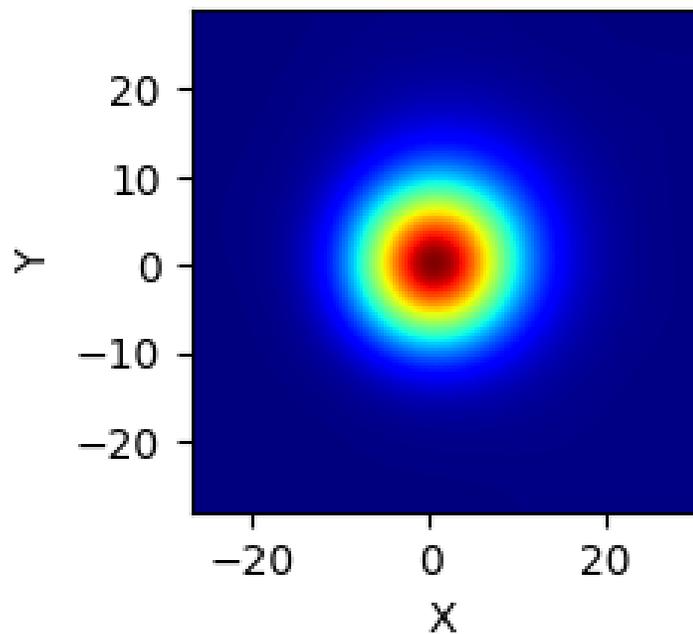
TCIR



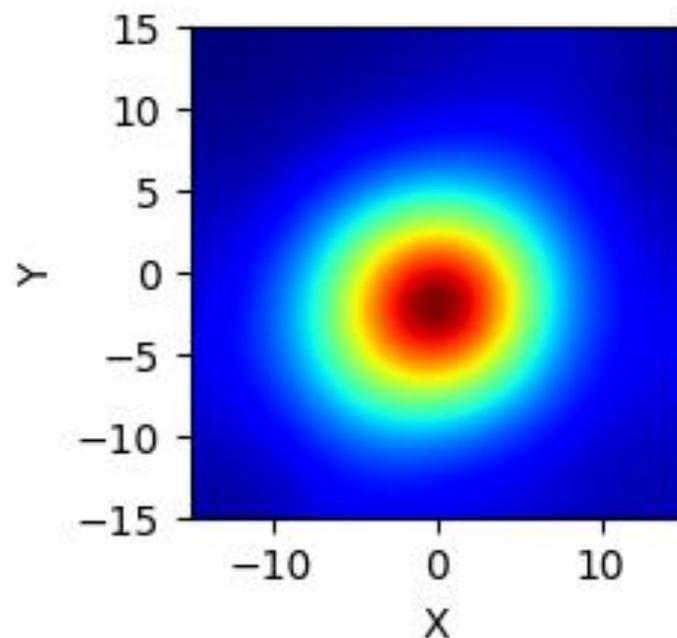
Количество данных	CAO
<b>Собственный набор данных</b>	
3059 (35-160 узлов)	<b>0.45°</b>
<b>JMA</b>	
1695 (35-135 узлов)	0.75°
<b>TCIR</b>	
2384 (35-160 узлов)	0.54°

# Распределение центров ТЦ на разных наборах данных

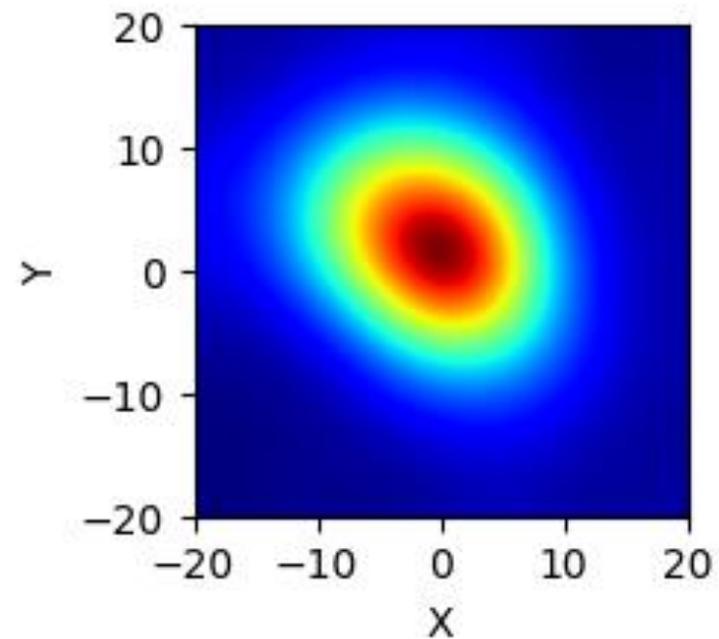
Собственный набор данных



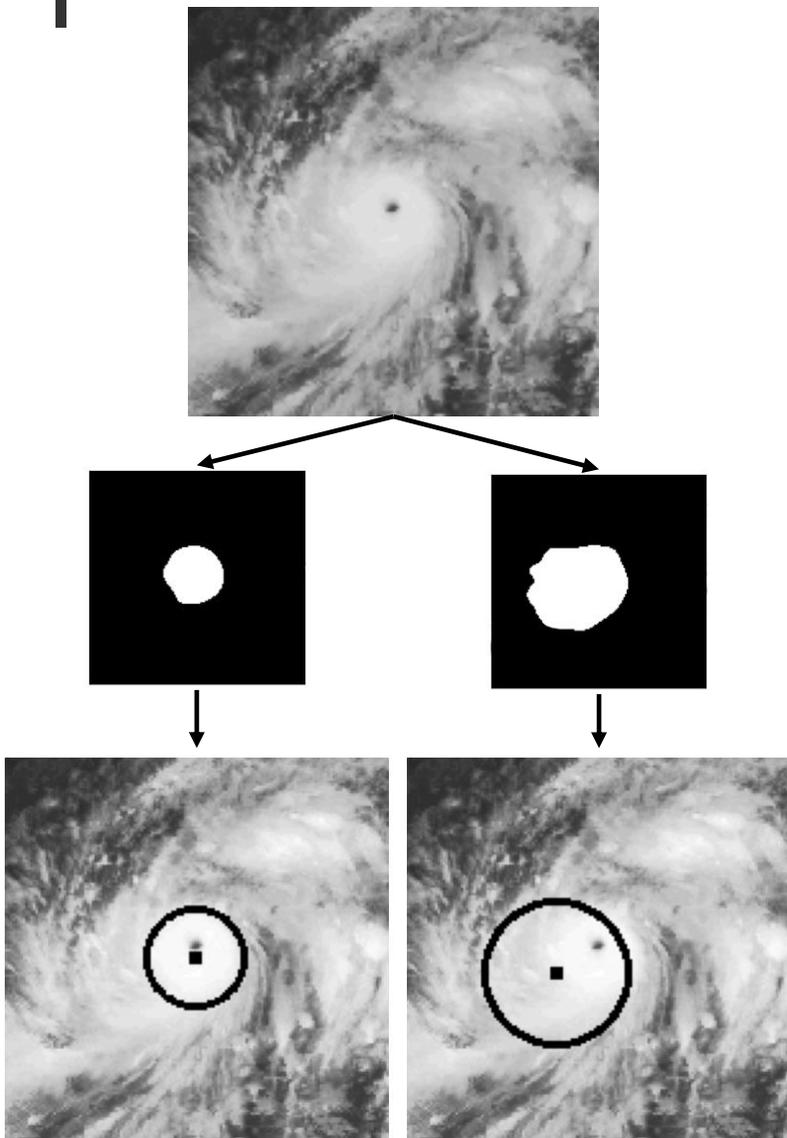
TCIR



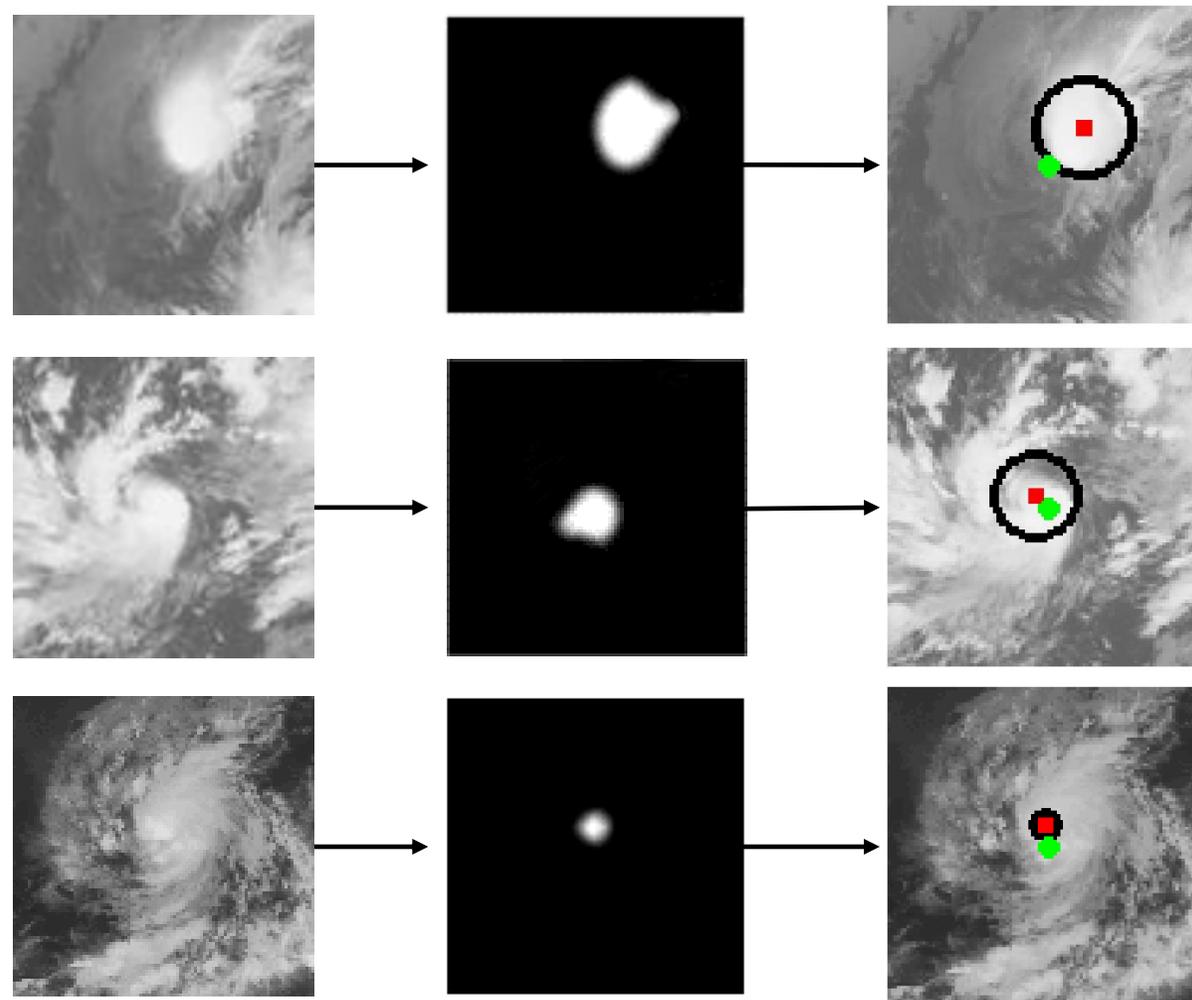
JMA



# Обсуждение ошибок



- Центр с помощью алгоритма поиска окружности
- Центр по данным НУЦ





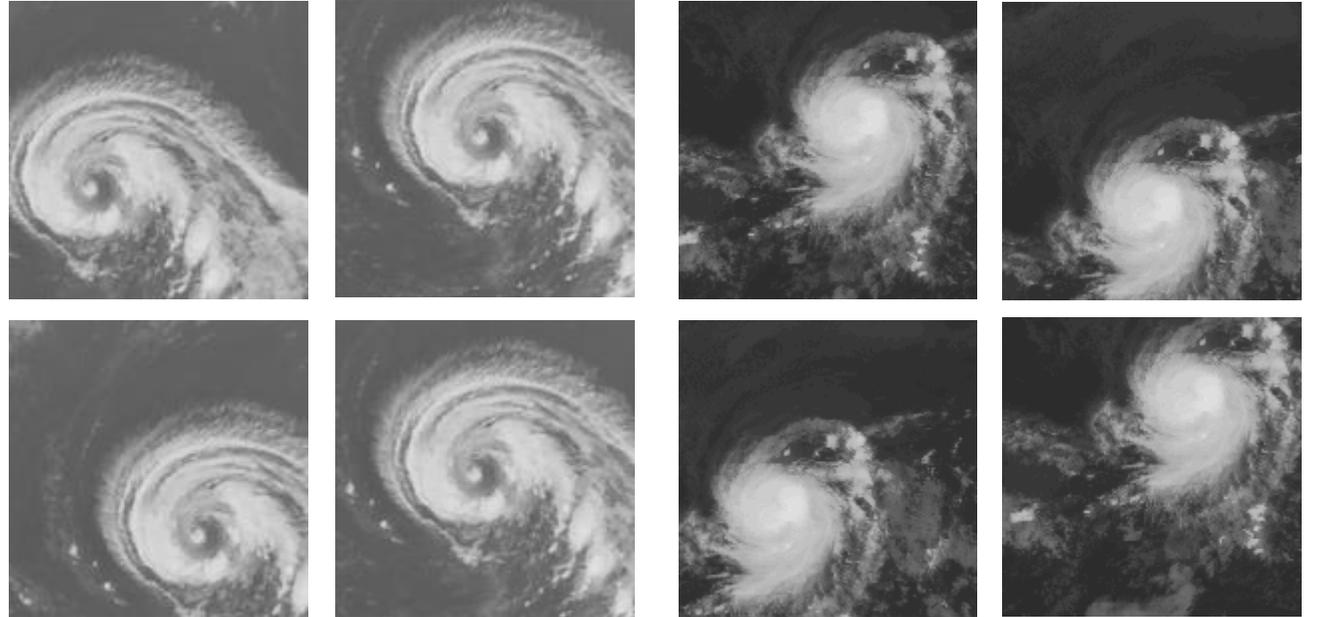
# **Локализация центра тропического циклона с помощью нейронной сети**

# Предобработка данных

## Аугментация

01

Изображение смещается в определённом диапазоне



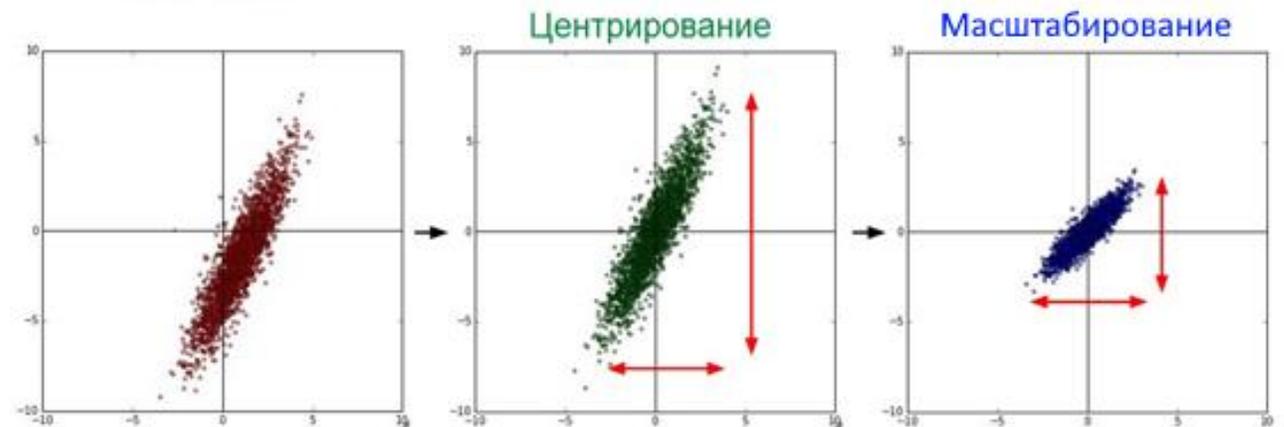
## Нормализация

02

Центрирование данных по нулю

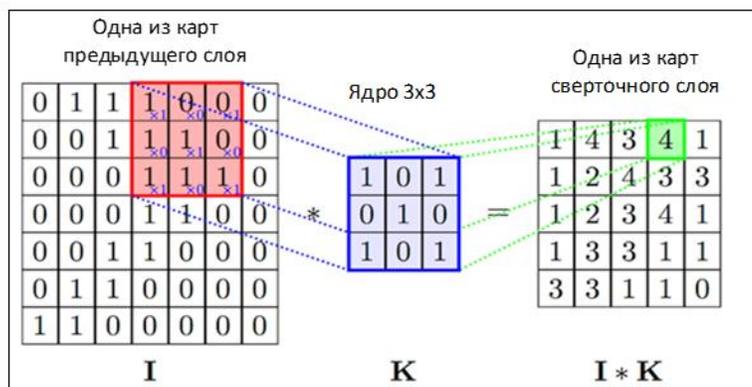
03

Масштабирование. Разделение данных по каждому измерению на их стандартное отклонение.

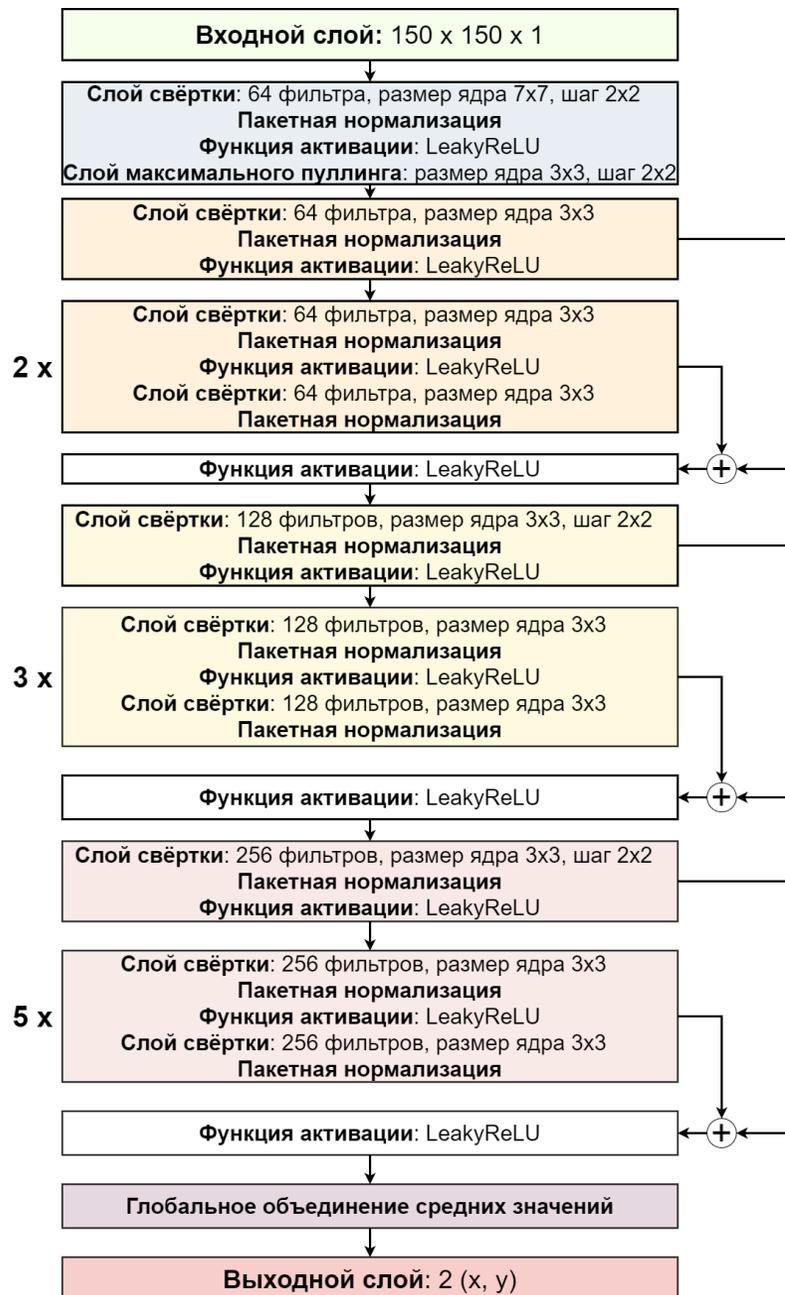
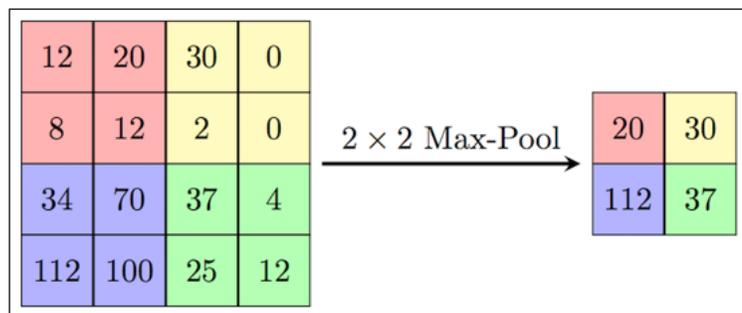


# Архитектура нейронной сети

## ❖ Свёрточный слой



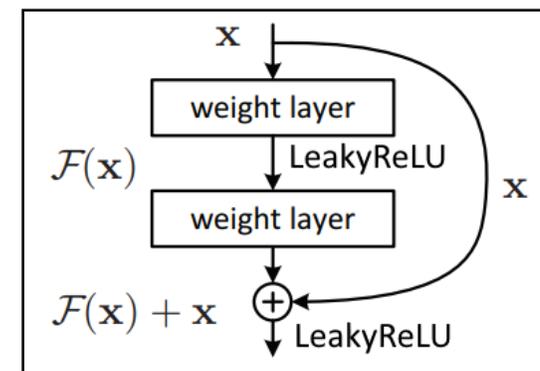
## ❖ Слой максимального пуллинга



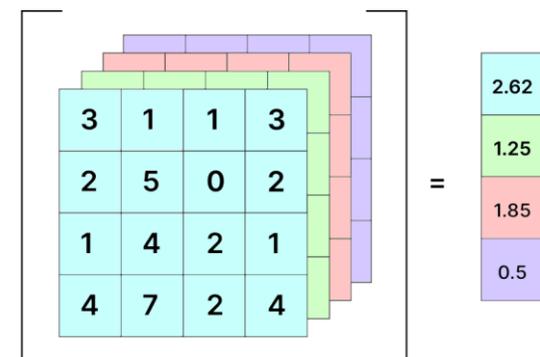
## ❖ Функция активации «LeakyReLU»:

$$f(x) = \begin{cases} 0,2 x & x < 0 \\ x & x \geq 0 \end{cases}$$

## ❖ Пропуск соединений



## ❖ Глобальное объединение средних значений



# Обучение нейронной сети

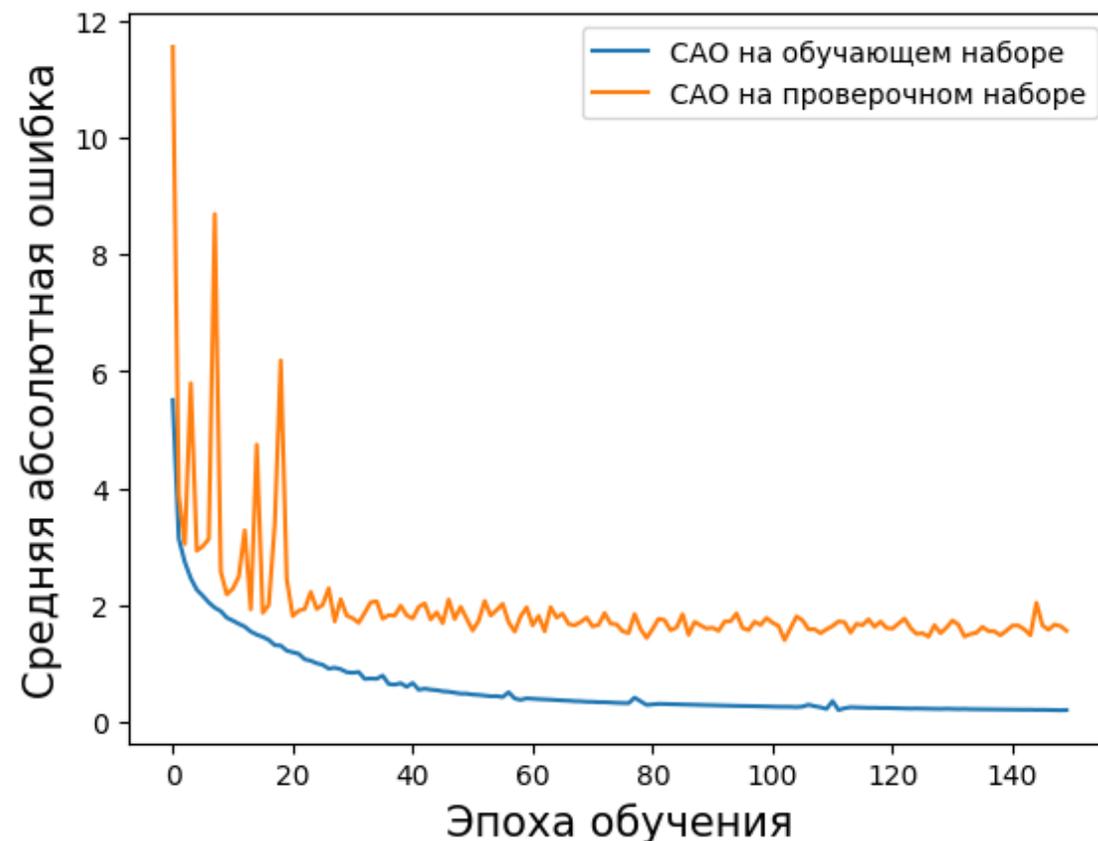
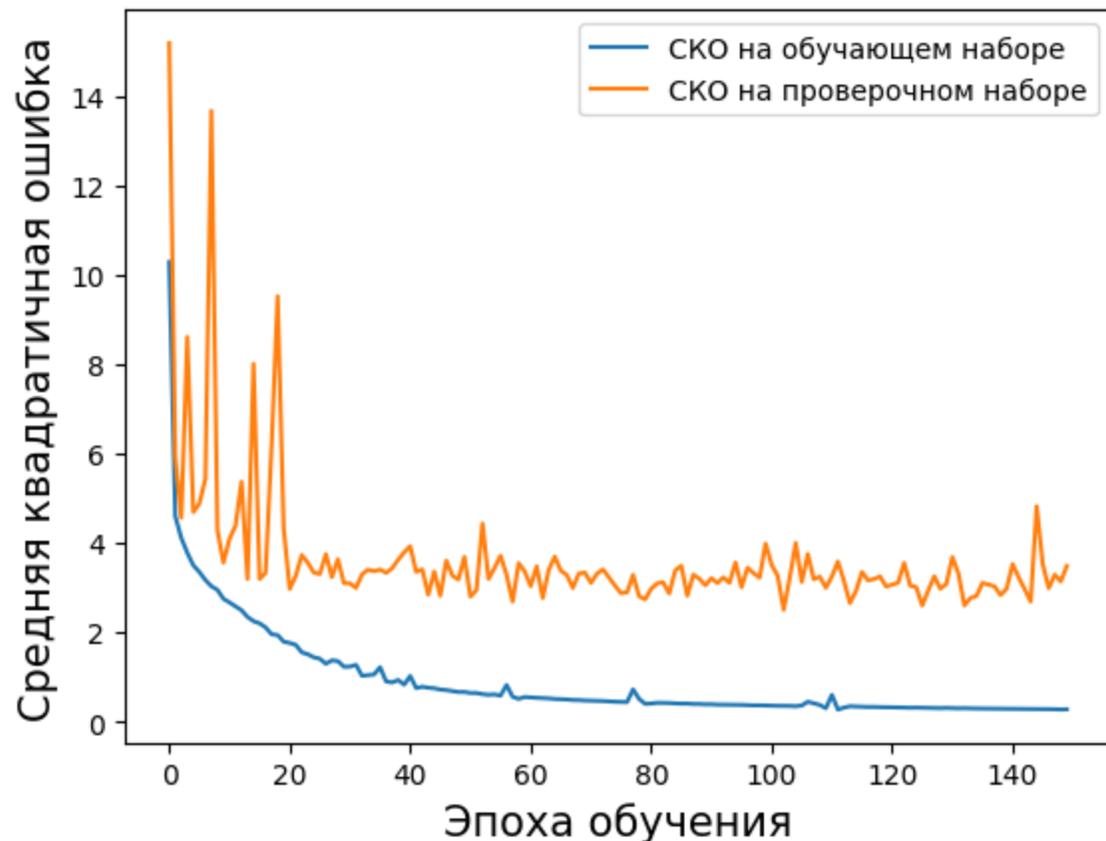
❖ Оптимизатор - Adam

❖ Функция ошибки – Дисперсия (MSE)

❖ Метрики оценки нейросети во время обучения:

CAO (MAE)

СКО (RMSE)



# Результаты

❖ Средняя абсолютная ошибка:

$$CAO = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{true,i} - x_{pred,i})^2 + (y_{true,i} - y_{pred,i})^2}$$

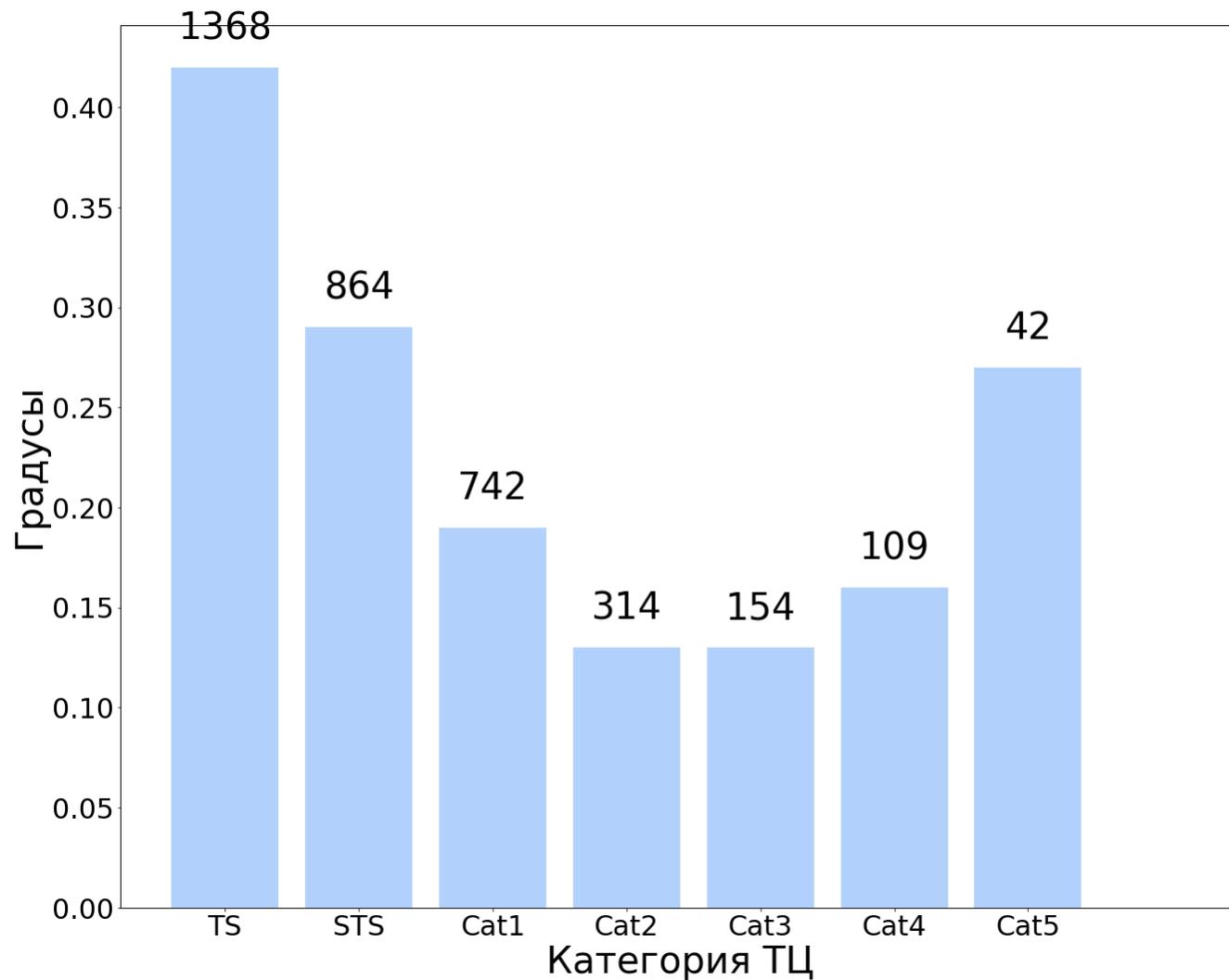
❖ Средняя квадратичная ошибка:

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_{true,i} - x_{pred,i})^2 + (y_{true,i} - y_{pred,i})^2]}$$

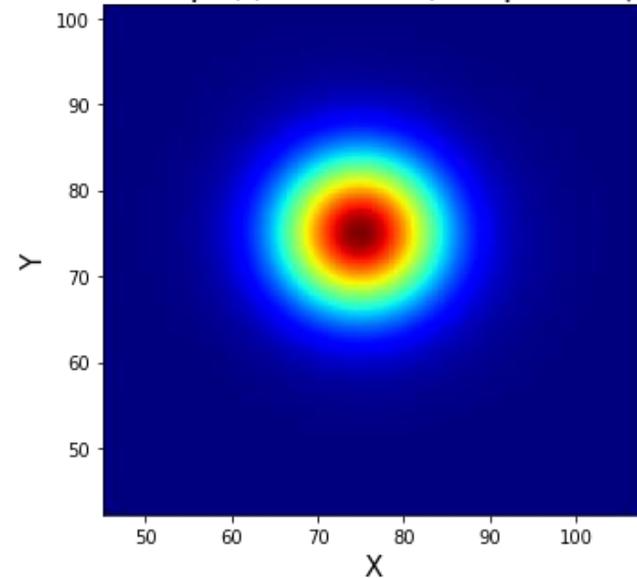
Тестовый набор ТЦ (года)	Количество	CAO	CKO
2007, 2009, 2012, 2017	3593	<b>0.28°</b> <b>30.85 км</b>	0.49° 54.18 км
2005, 2014, 2016, 2019	4366	0.36° 40.18 км	0.55° 60.96 км

# Результаты

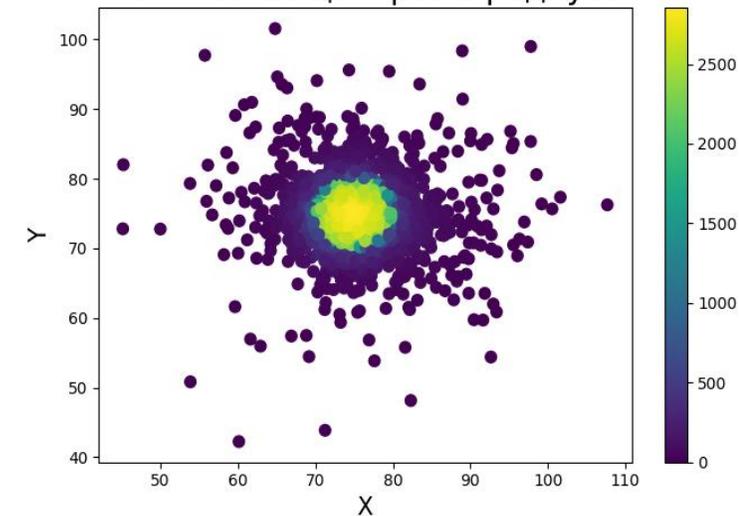
## Распределение средней абсолютной ошибки



## Распределение центров ТЦ



## Количество центров в радиусе





Оригинальное  
изображение

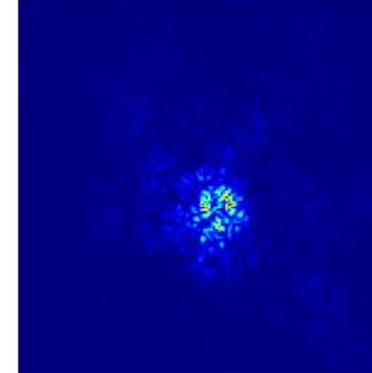
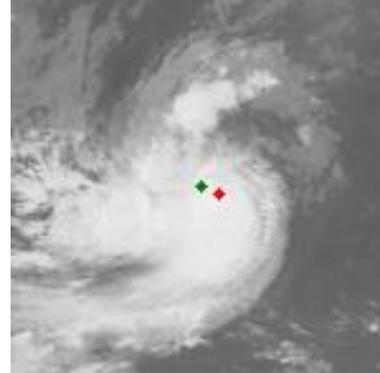
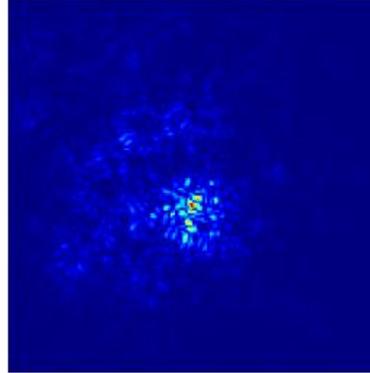
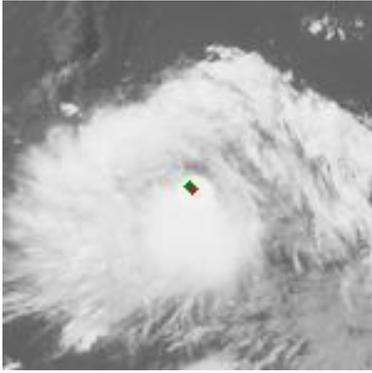
Тепловая карта  
значимости

Оригинальное  
изображение

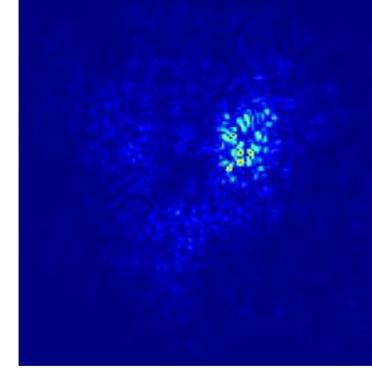
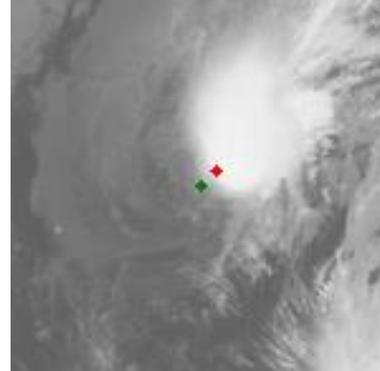
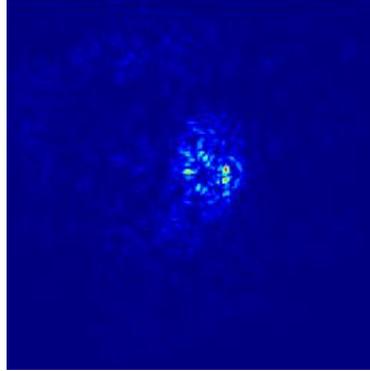
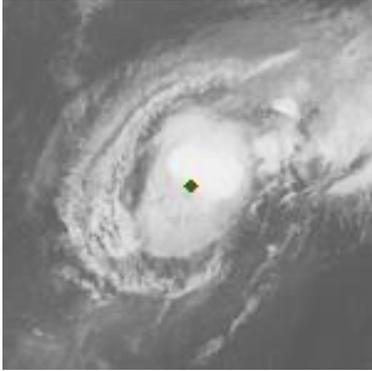
Тепловая карта  
значимости

- Центр по оценке  
нейросети
- Центр по данным  
НУЦ

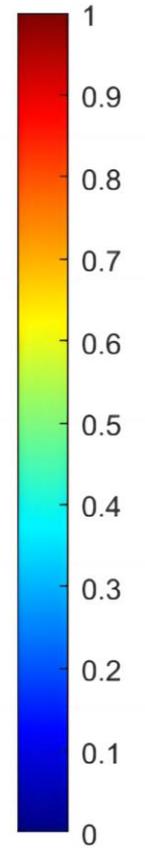
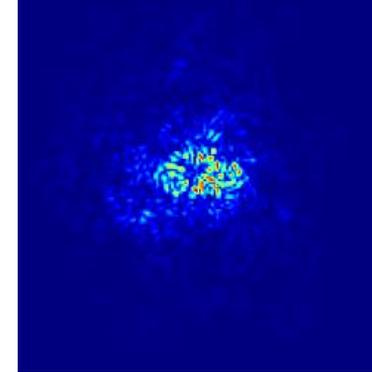
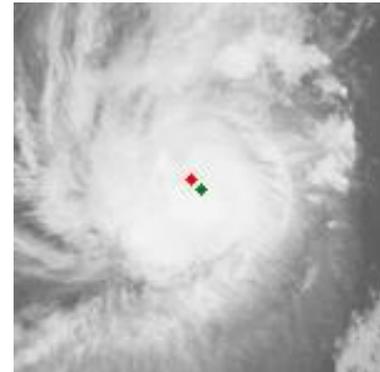
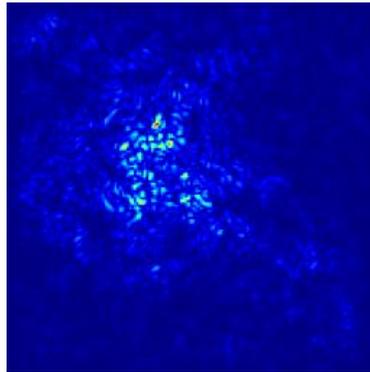
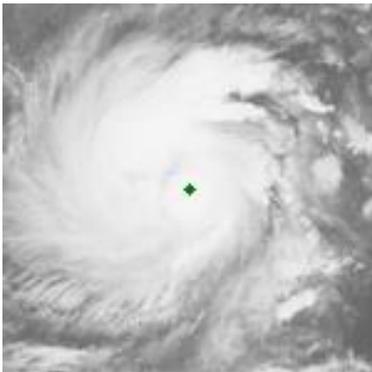
TS



STS

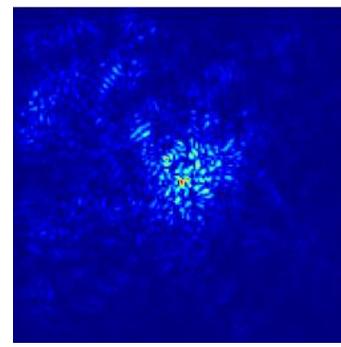
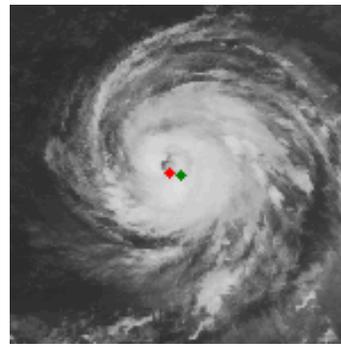
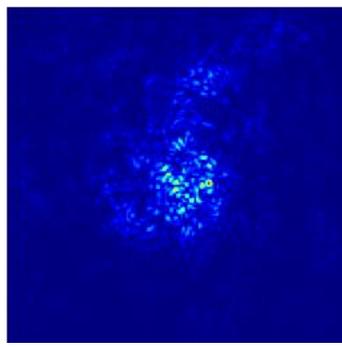
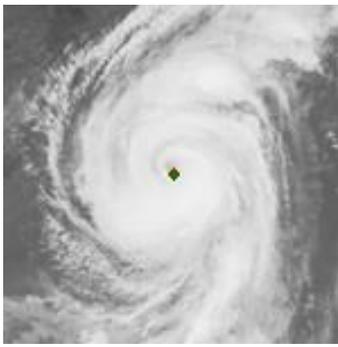


Cat1

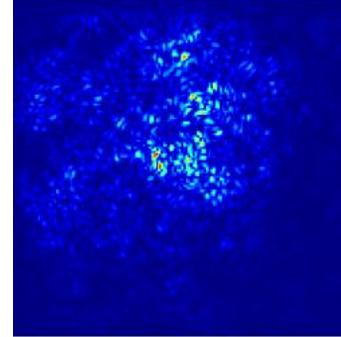
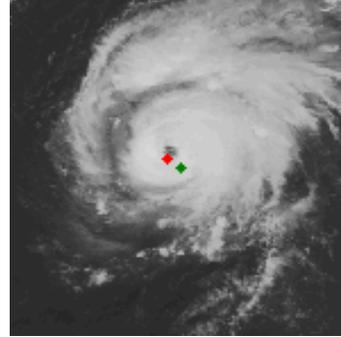
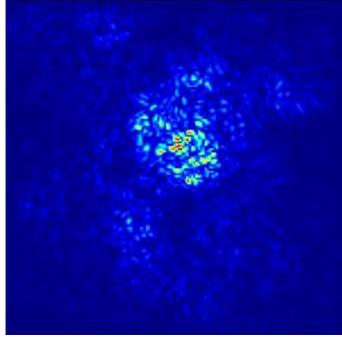
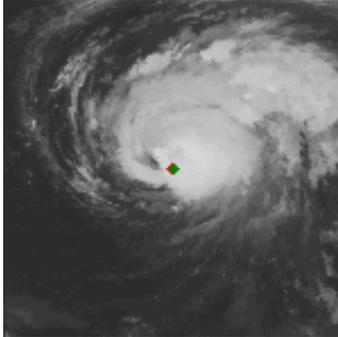




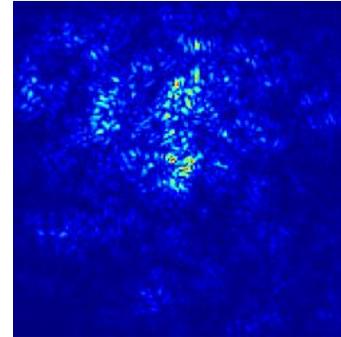
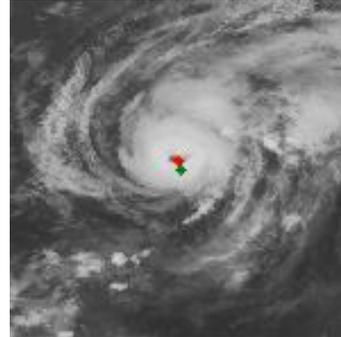
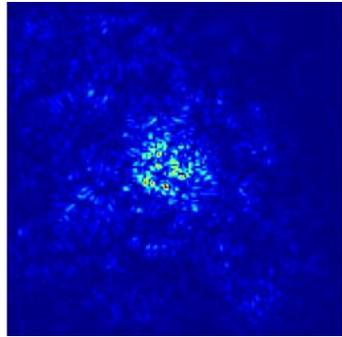
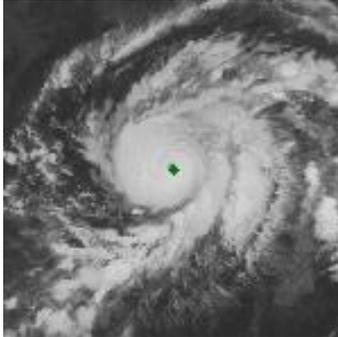
Cat2



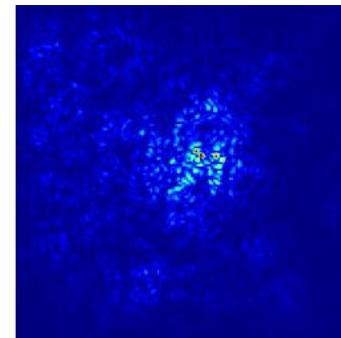
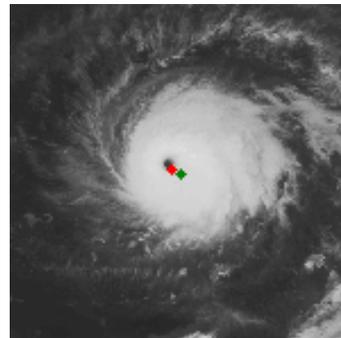
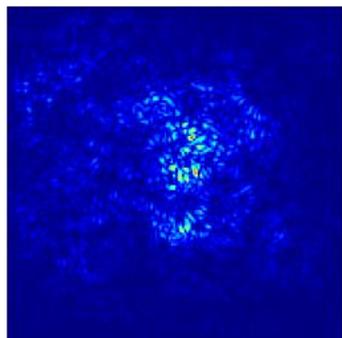
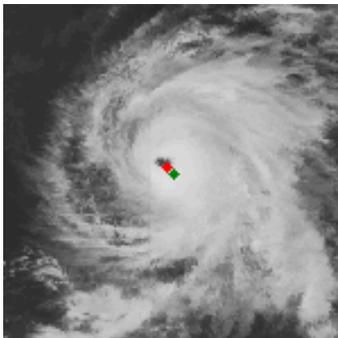
Cat3



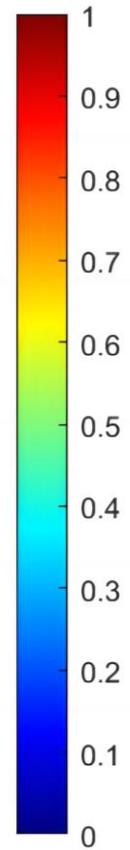
Cat4

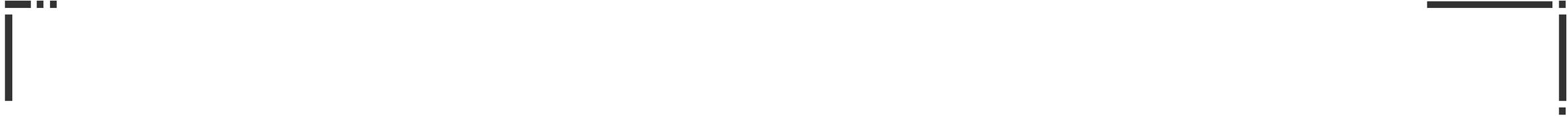


Cat5



- Центр по оценке нейросети
- Центр по данным НУЦ





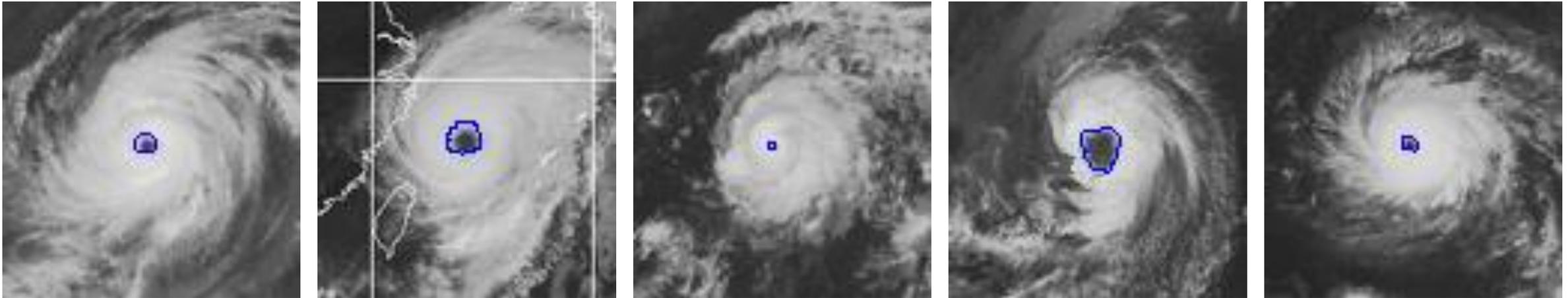
# **Анализа формы глаза тропических циклонов**

# Описание алгоритма

1. Поиск контуров с помощью градиентов
2. Для каждого контура определяется расстояние от центра масс до восстановленного нейросетью центра
3. Определяется индекс окружности по следующей формуле

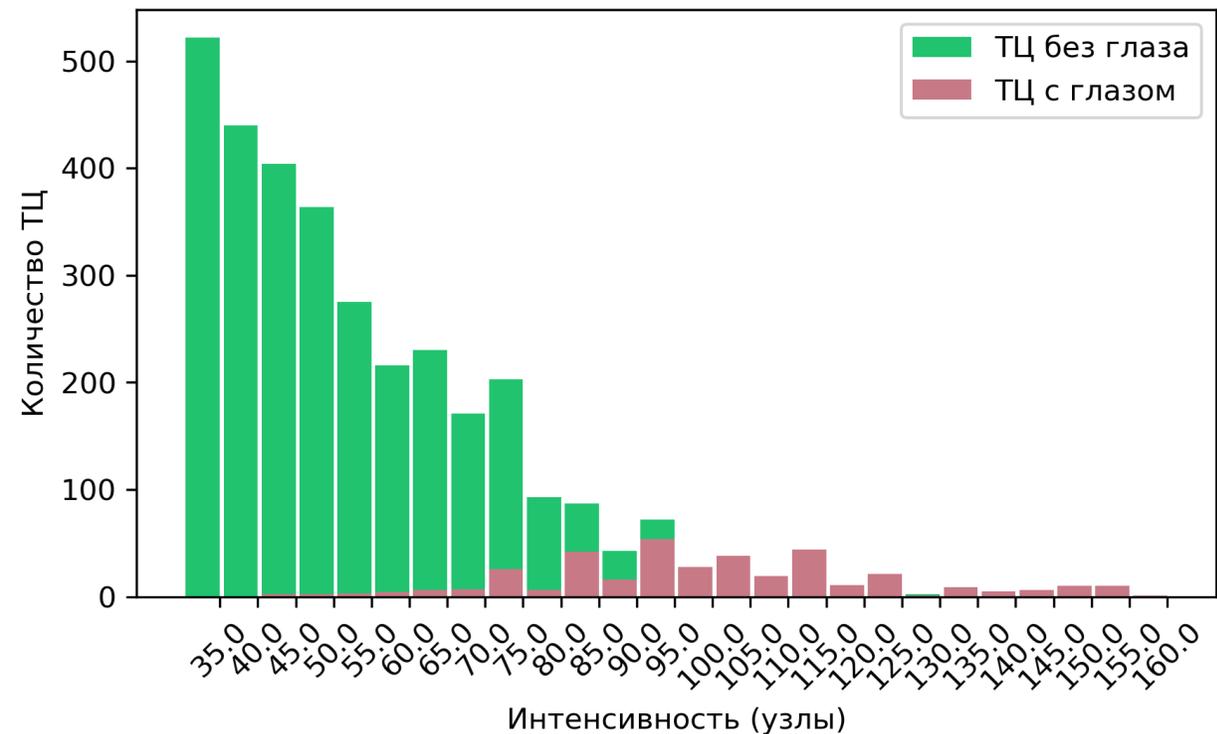
$$\frac{r_{max} - r_{min}}{r_{max} + r_{min}}$$

4. Определяется площадь каждого контура
5. Взвешенное решение

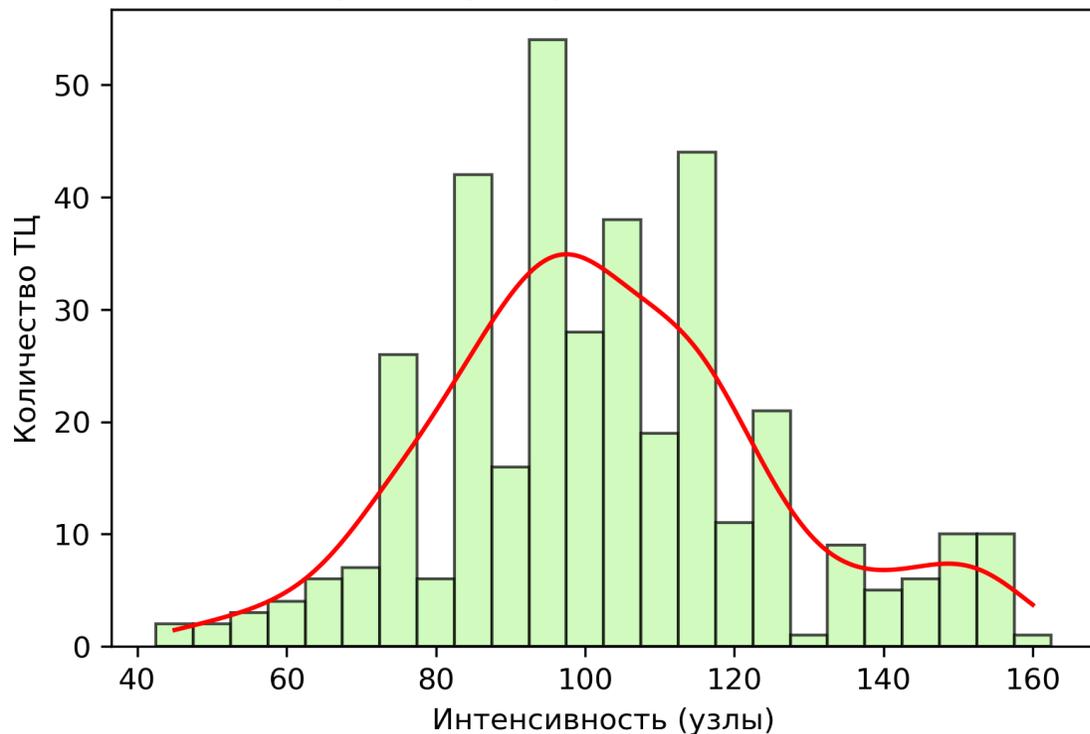


# Результаты

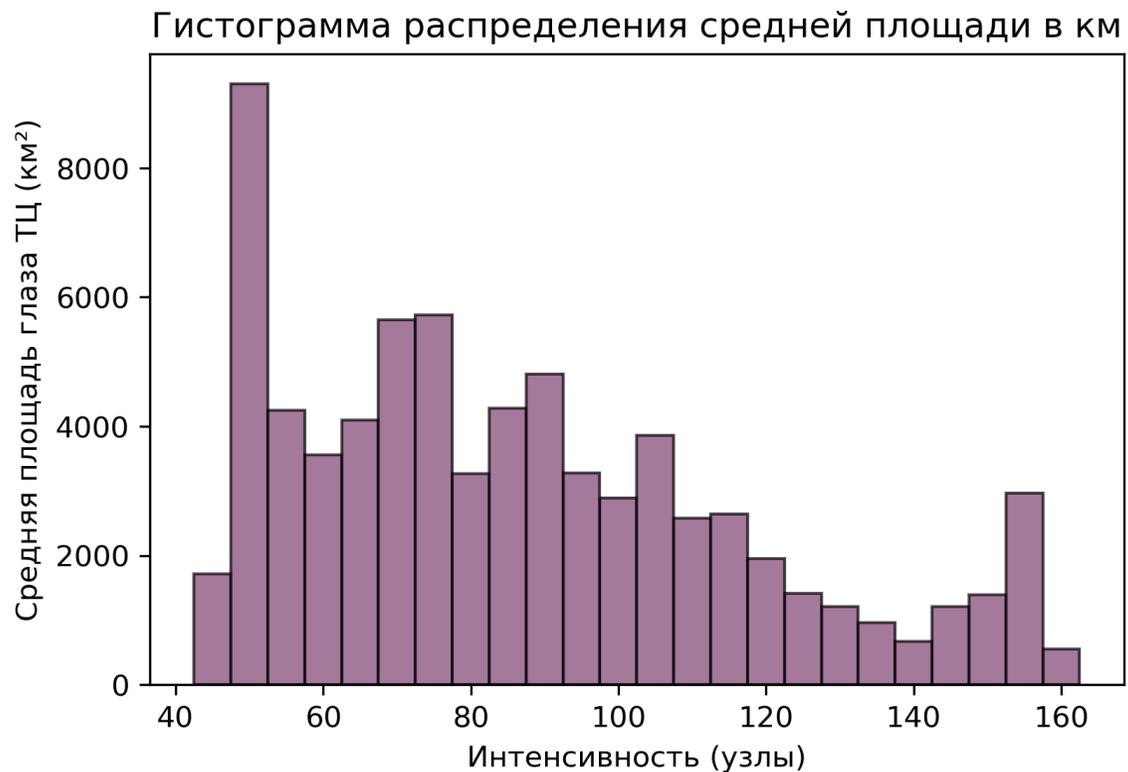
Соотношение ТЦ с глазом и без



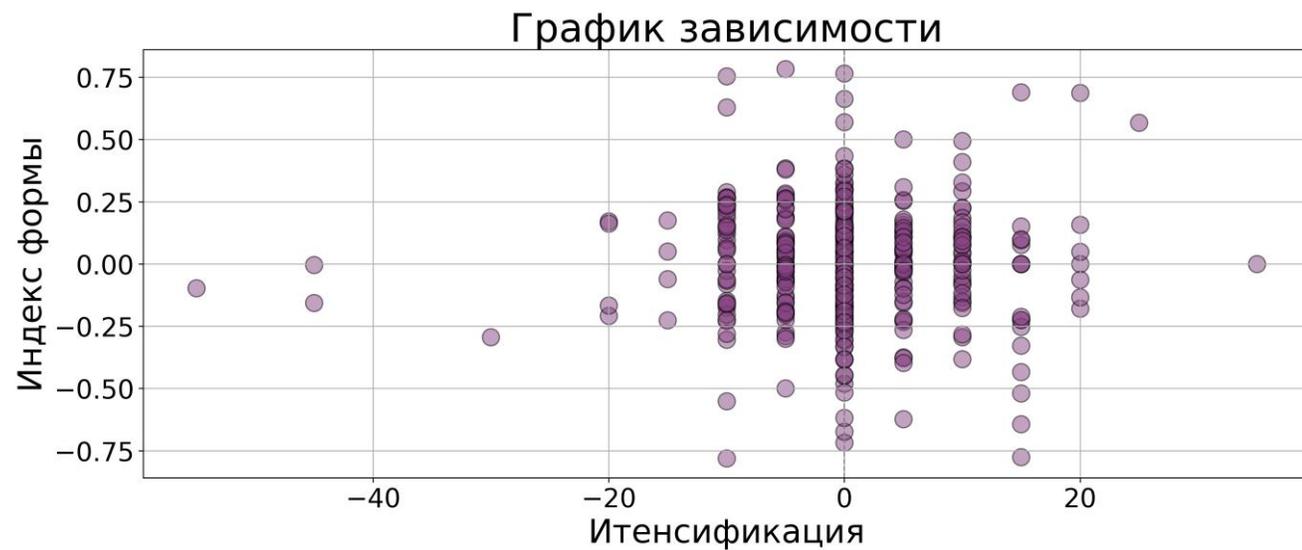
Гистограмма распределения ТЦ с глазом



# Результаты



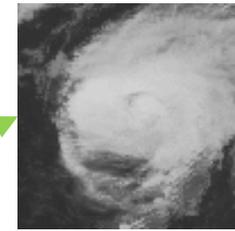
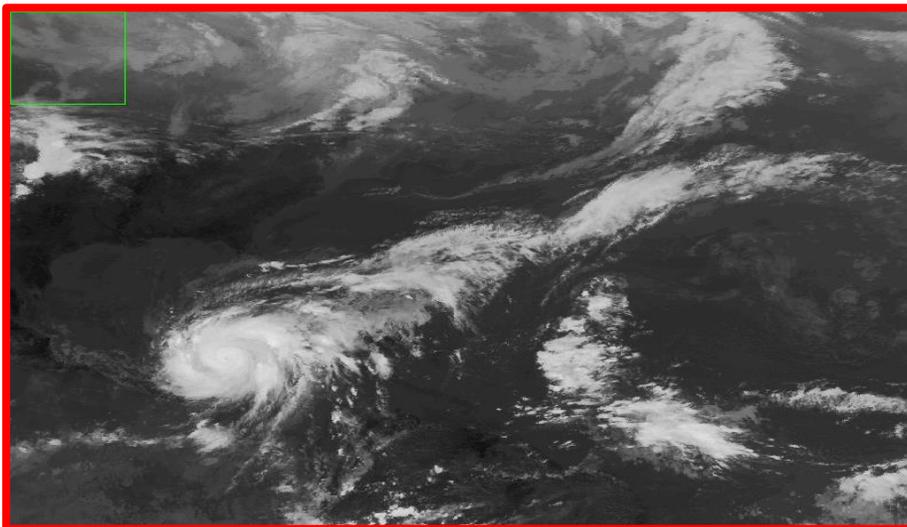
$$Ind = \frac{r_{max} - r_{min}}{r_{max} + r_{min}}$$



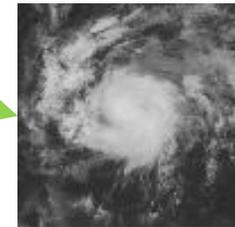
# Система восстановления характеристик ТЦ

1. Детектирование и локализация ТЦ  
Точность 98%, СКО 0.49°

2. Восстановление интенсивности, определение  
наличия и характеристик глаза. СКО 11.3 узла



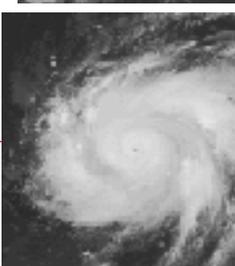
Интенсивность : 80.85 узлов  
Координаты: 29.8 С 72.0 З



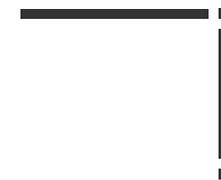
Интенсивность : 67.10 узлов  
Координаты: 12.8 С 54.4 З



Интенсивность : 25.06 узлов  
Координаты: 12.2 С 54.4 З



Интенсивность: 112.63 узлов  
Координаты: 17.4 С 83.4 З  
Есть глаз



**Спасибо за внимание!**