Система оперативного детектирования, локализации и диагностики параметров тропических циклонов по данным метеоспутника Himawari

(Тема диссертационного исследования)

Якушева А.Н.
Научный руководитель: Ермаков Д.М.

Постановка задачи, цели

Актуальность работы

Тропические циклоны — одни из наиболее разрушительных природных явлений. Оперативный мониторинг их положения и интенсивности по спутниковым данным критически важен, но существующие методики (Дворак и его автоматические варианты) либо требуют ручного участия, либо разрознены: отдельно детектирование, отдельно локализация, отдельно оценка интенсивности. Единого автоматического метода «обнаружение → определение центра → диагностика параметров» на базе одного источника данных нет.

Цель работы

Разработать единую автоматическую систему оперативного детектирования, локализации центра и диагностики параметров тропических циклонов по данным геостационарного метеоспутника Himawari (ИК-канал 10.3–11.2 мкм).

Задачи

1.Сформировать обучающие и тестовые наборы ИК-изображений ТЦ по четырём акваториям (Атлантика, восточная, северо-западная и юго-западная части Тихого океана).

2.Разработать модуль детектирования ТЦ на основе ансамбля трёх моделей (бинарный классификатор + YOLO + RT-DETR) с консенсусной логикой.

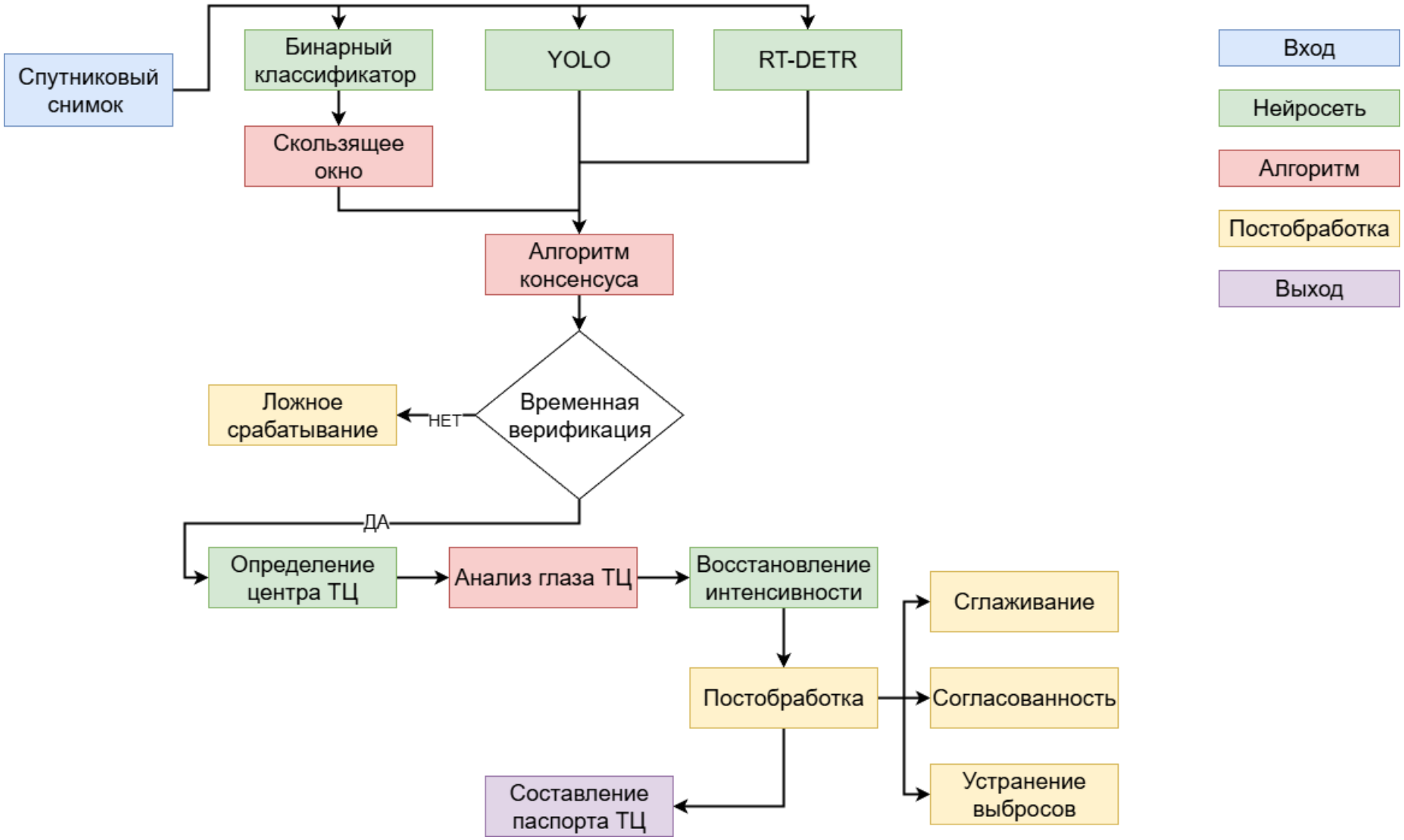
3.Разработать модуль локализации центра ТЦ методом глубокого обучения.

4.Разработать модуль восстановления интенсивности ТЦ по многоспектральным данным.

5.Разработать алгоритм анализа формы глаза ТЦ методами компьютерного зрения.

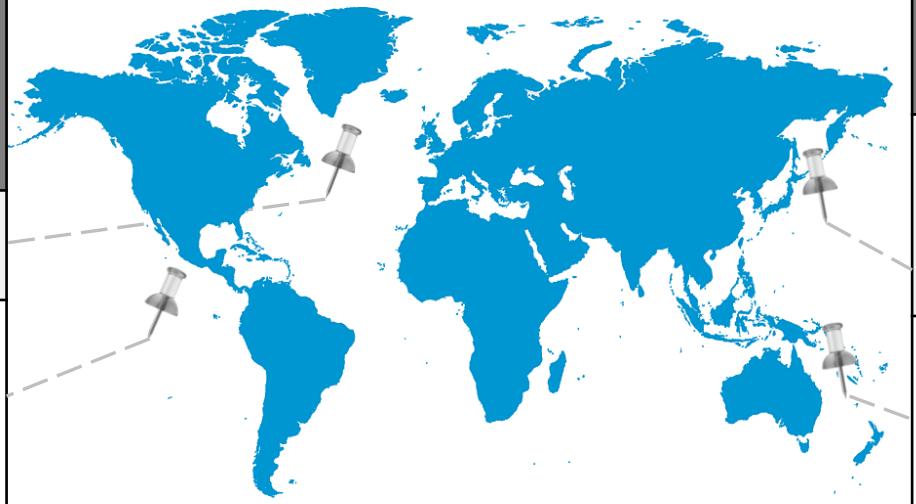
6.Провести верификацию модулей на независимых выборках и оценить точность относительно мировых аналогов.

Блок-схема разрабатываемой архитектуры



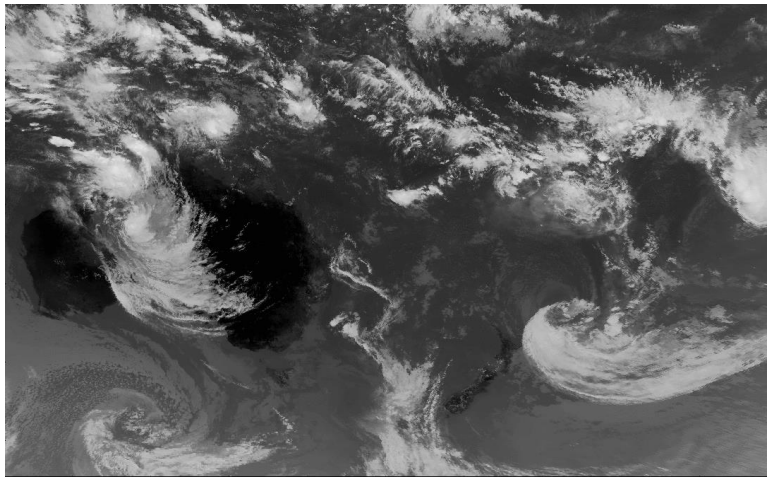
Сбор базы данных

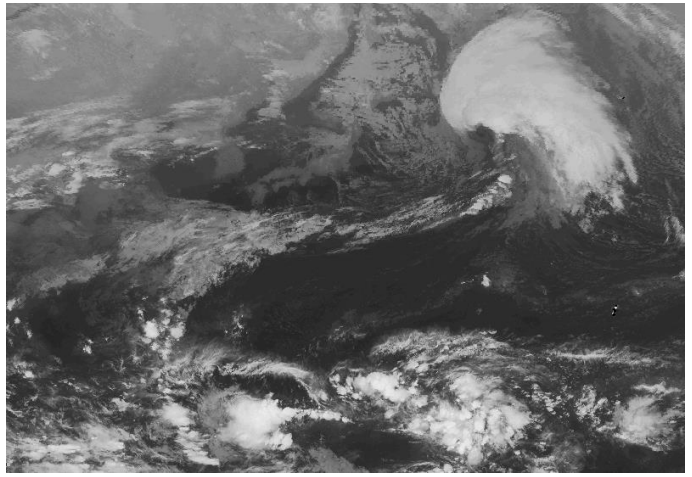
Акватория	Количество изображений
Атлантика	5320
Восточная часть Тихого океана	5873



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

Goes/Meteosat/Himawari
10.3-11.2 мкм





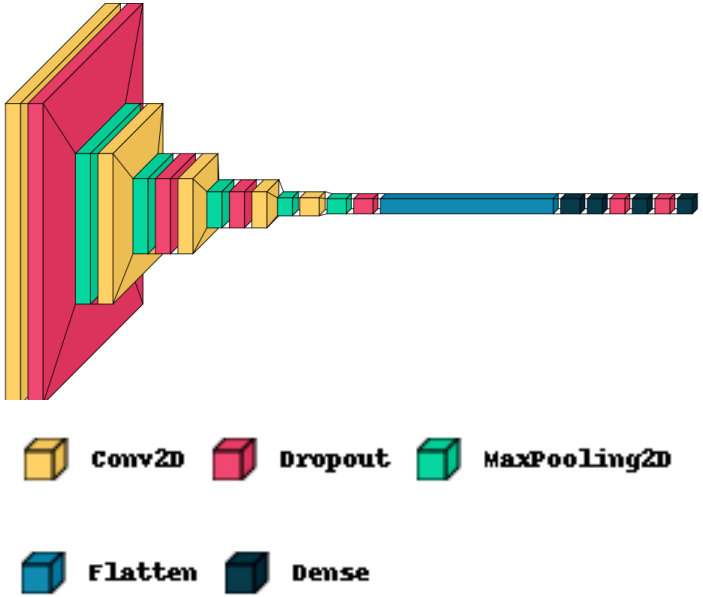
1. Детектирование ТЦ

Обзор исследований

Детектирование тц				
Статьи	**Данные**		**Метод**	**Точность**
Matsuoka et al. (2018)	ИК	10,3-11,3 мкм	Бинарная классификация	**90%**
Zhao et al. (2020)				**96,83%**
Pang et al. (2021)			Трансферное обучение	**97,78%**
Haque et al. (2021)				**87,86%**
Malothu et al. (2022)	Восстановленное поле движения по ИК			**98,27%**
Jena et al. (2022)	ПМВ	85–90 Ггц	Бинарная классификация	**94%**
Kızıloluk et al. (2022)	ИК	10,3-11,3 мкм	Гибридный подход, детектор	**98,69%**
Tong et al. (2022)			Бинарная классификация	**96%**

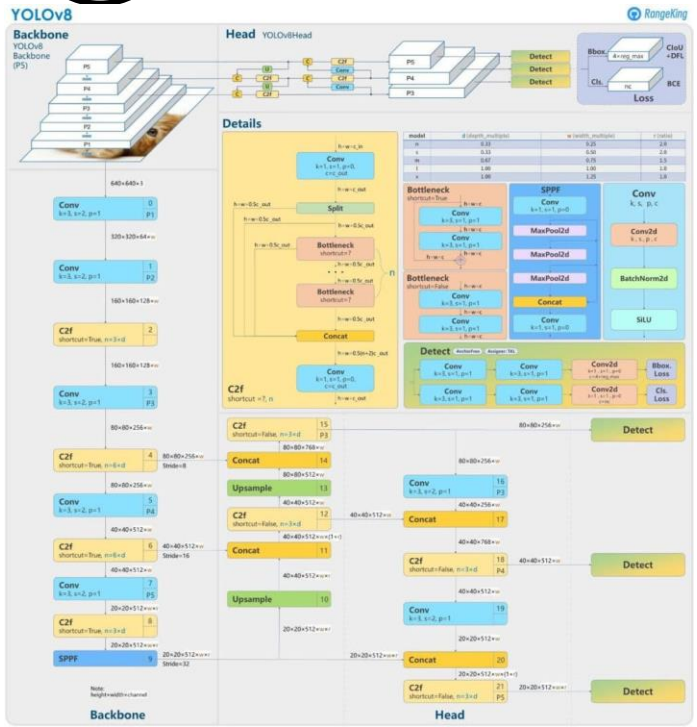
Детектирование ТЦ

I Бинарный классификатор



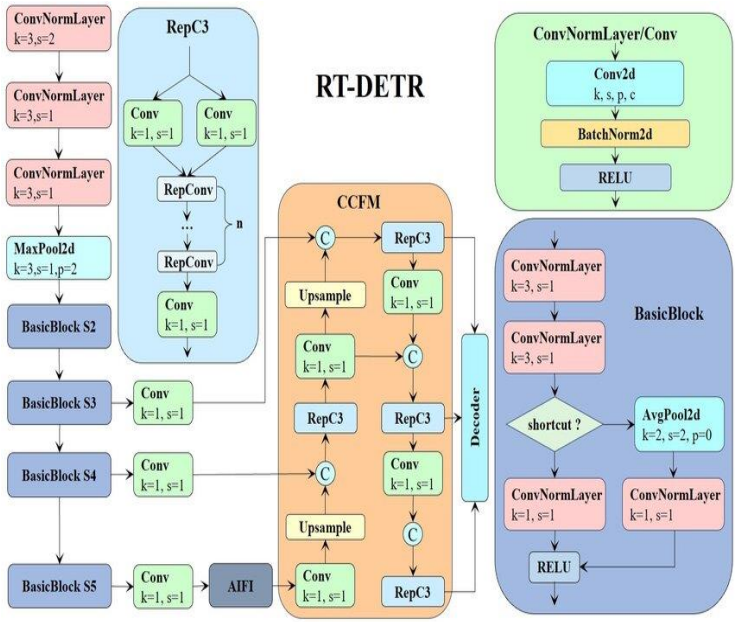
Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
98.3%	99.4 %	96.9 %	98.1 %

II Yolo



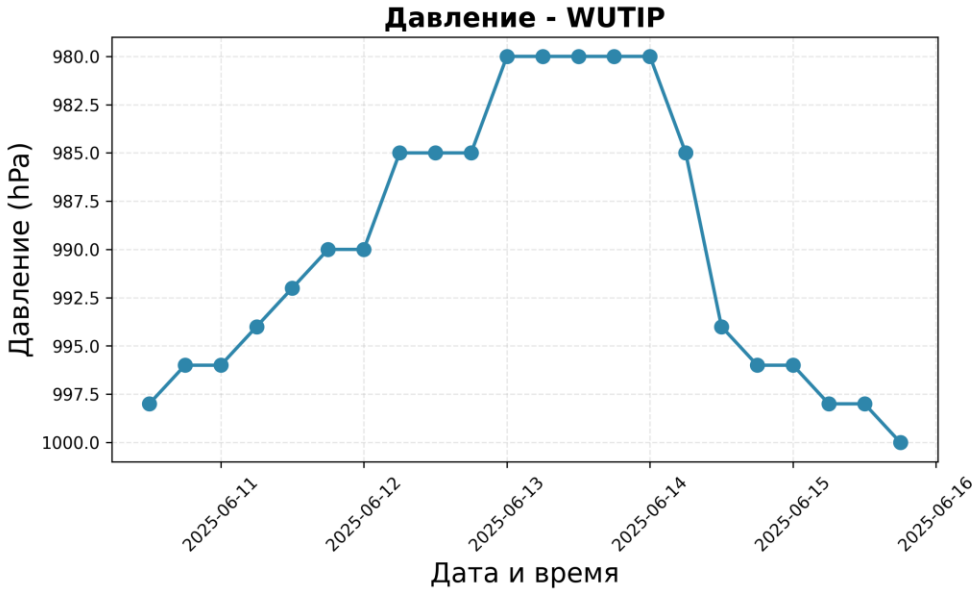
Precision	Recall	F1-Score
71 %	76 %	73 %

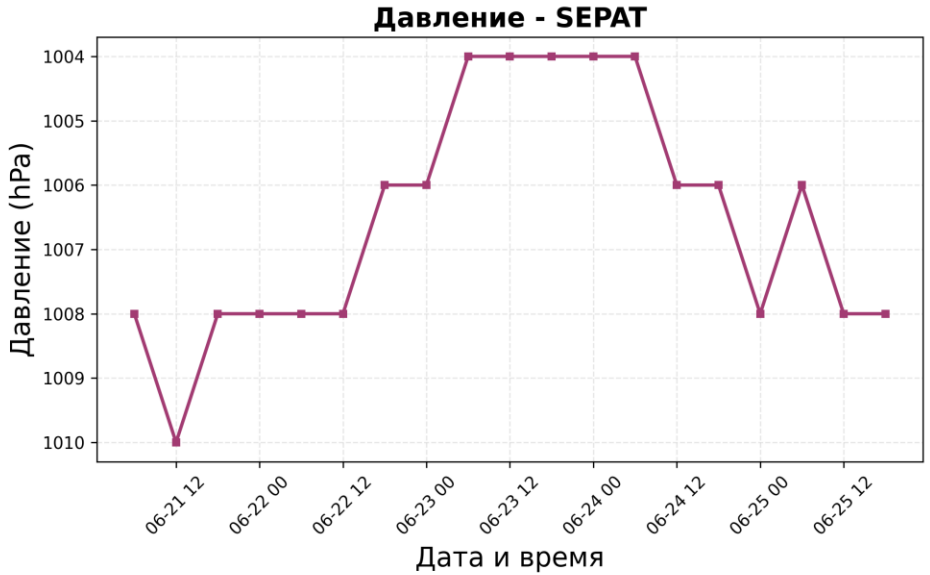
III RT-DETR



Precision	Recall	F1-Score
33.4 %	92 %	50 %

Тропические циклоны Северо-Западной части Тихого океана 2025 года





Консенсус методов детектирования

1. **Бинарный классификатор** (уверенность=0.7)
    1. Скользящее окно 4 размеров (9, 11, 13, 15 градусов)
    2. Шаг = 2 градуса
2. **YOLO** (уверенность =0.15)
3. **RT-DETR** (уверенность =0.5)

Консенсусная логика:

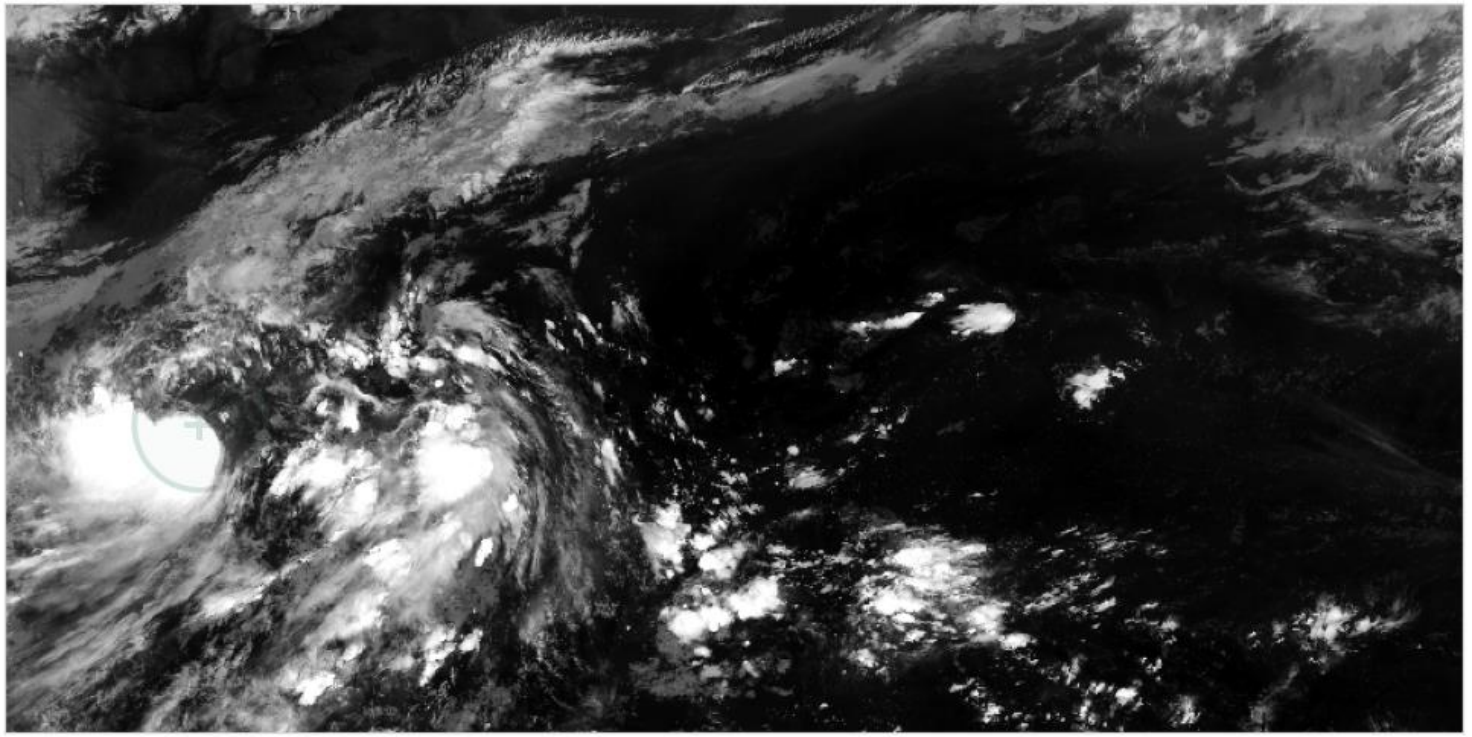
• Циклон **детектирован** если ≥2 модели его нашли

ТЦ	Записи где интенсивность>0	True Positive	False Negative	False Positive	Recall	Precision	F1
Sepat	5	3	2	0	0.6	1	**0.75**
Wutip	13	13	0	**3**	1	0.8	**0.9**

Пример детектирования ТЦ Wutip

Tropical Cyclone Detection Ensemble

HS_H09_20250611_1800_B14_FLDK_R20.png



STAGE 0

Input

LEGEND

- Cyclone (GT)
- Missed / FP
- Binary CLS
- YOLO
- RT-DETR

DETECTIONS

Binary CLS	-
YOLO	-
RT-DETR	-

CONSENSUS (min. 2 models)

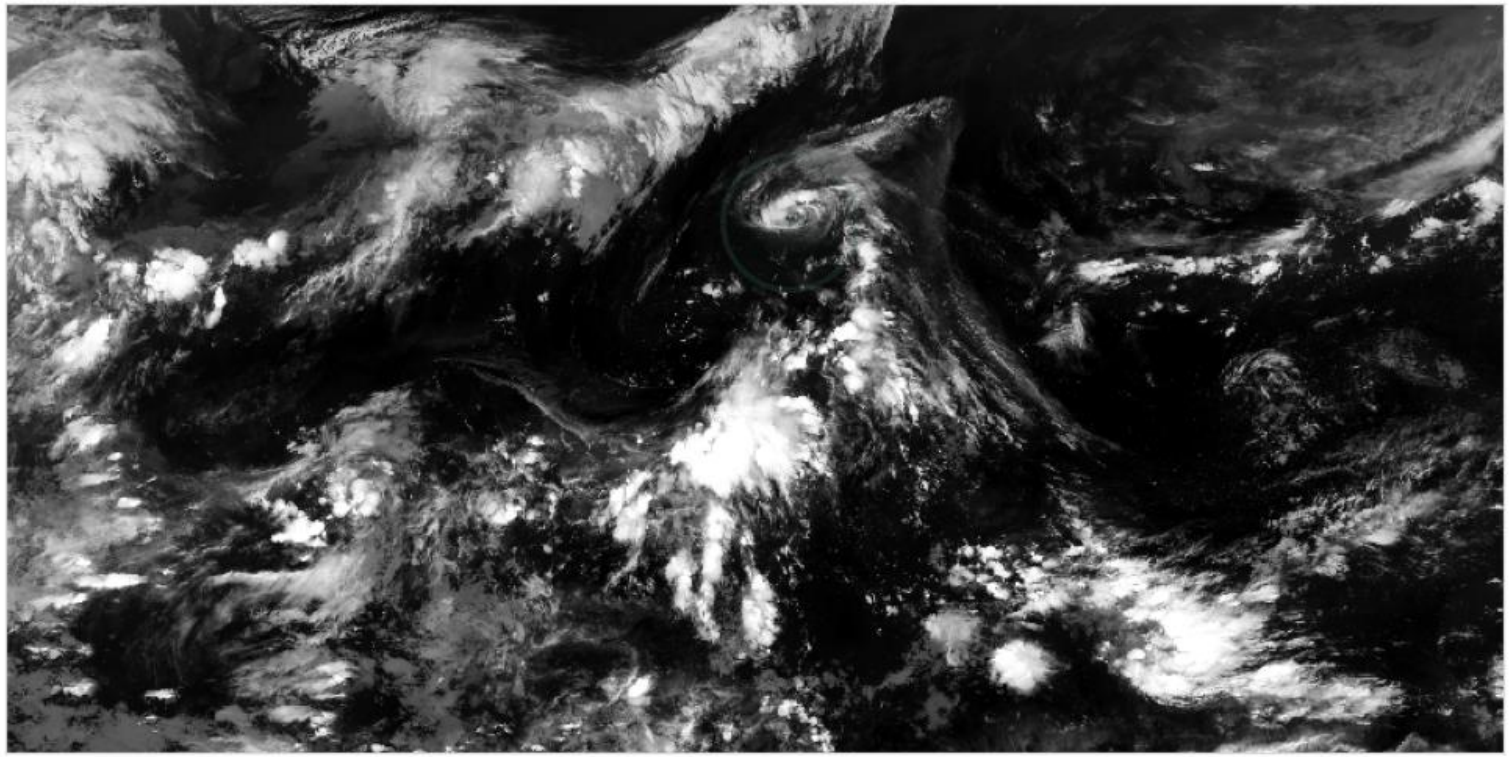
Detected	-
Missed	-
False pos.	-

1. Input | 2. Binary CLS | 3. YOLO | 4. RT-DETR | 5. Consensus | 6. Report

Пример детектирования ТЦ Sepat

Tropical Cyclone Detection Ensemble

HS_H09_20250623_1800_B14_FLDK_R20.png



STAGE 0

Input

LEGEND

- Cyclone (GT)
- Missed / FP
- Binary CLS
- YOLO
- RT-DETR

DETECTIONS

Binary CLS	-
YOLO	-
RT-DETR	-

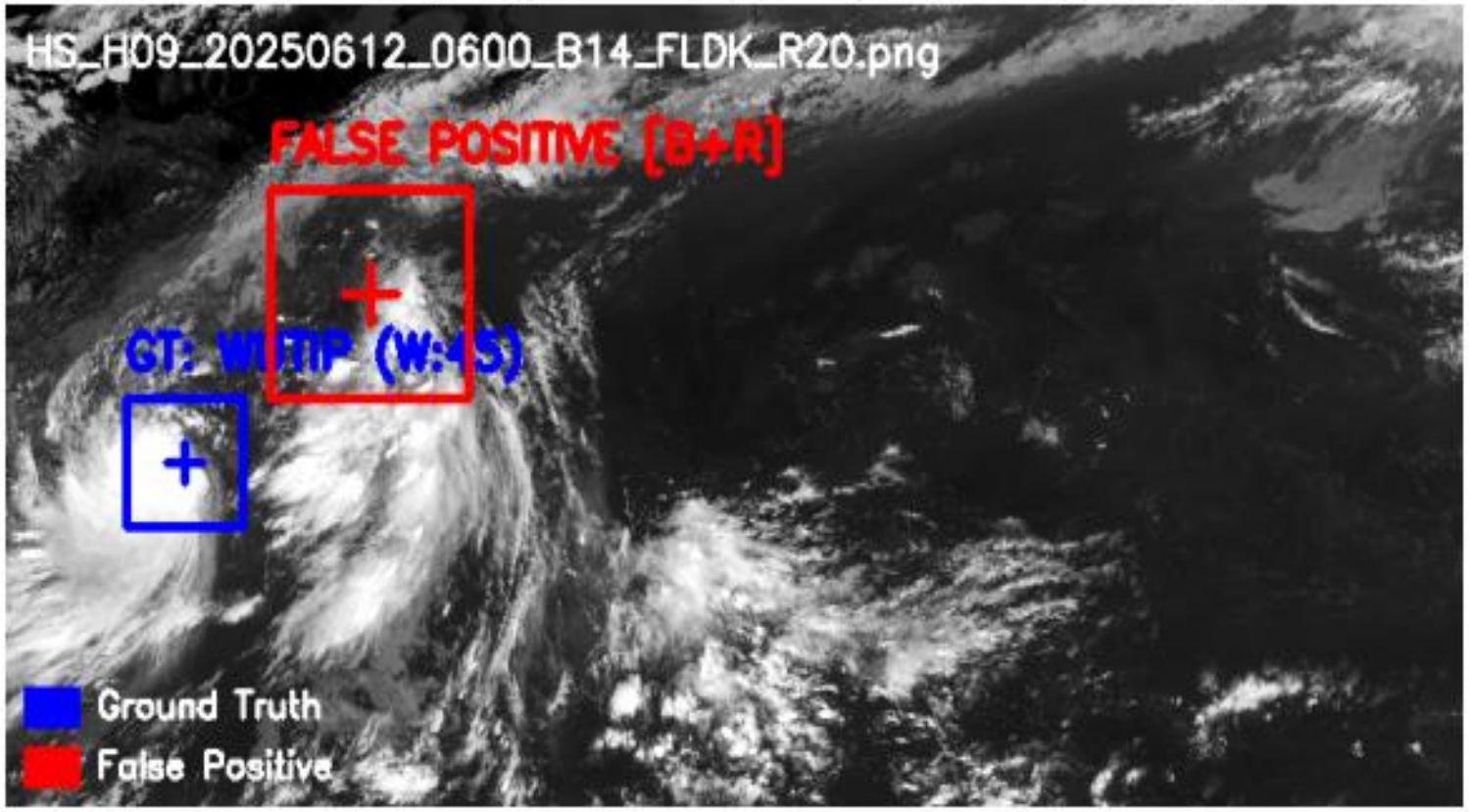
CONSENSUS (min. 2 models)

Detected	-
Missed	-
False pos.	-

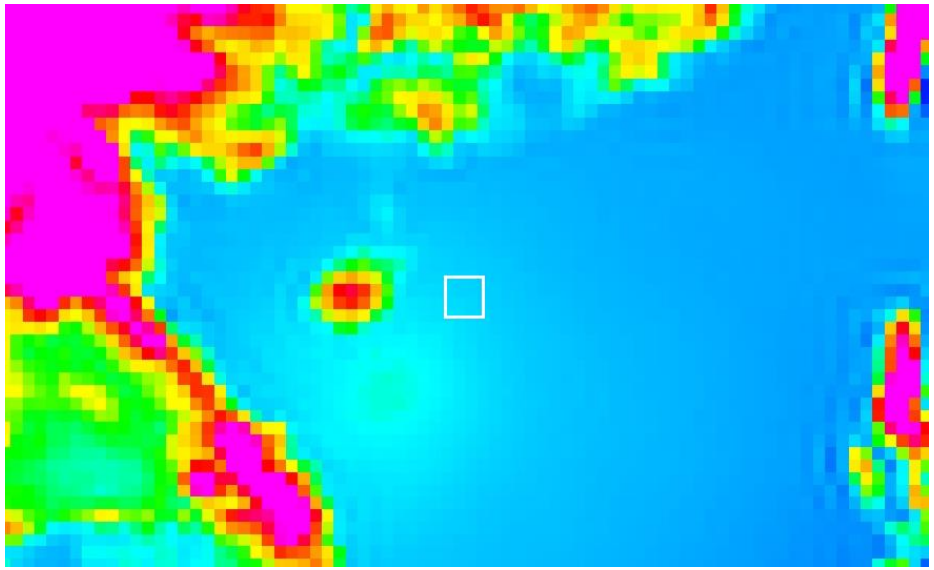
1. Input | 2. Binary CLS | 3. YOLO | 4. RT-DETR | 5. Consensus | 6. Report

Проверка ошибок на микроволновых данных

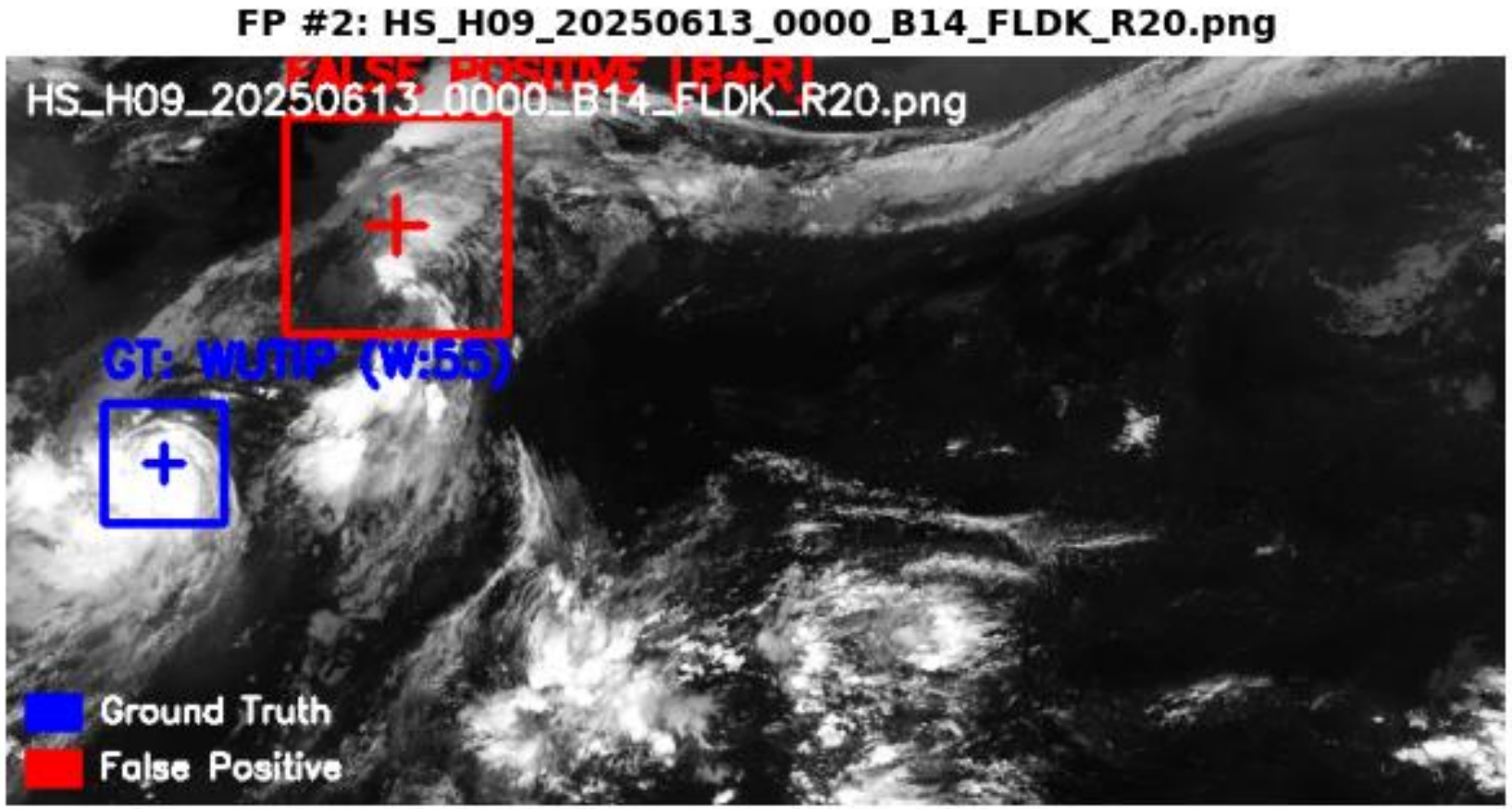
FP #1: HS_H09_20250612_0600_B14_FLDK_R20.png



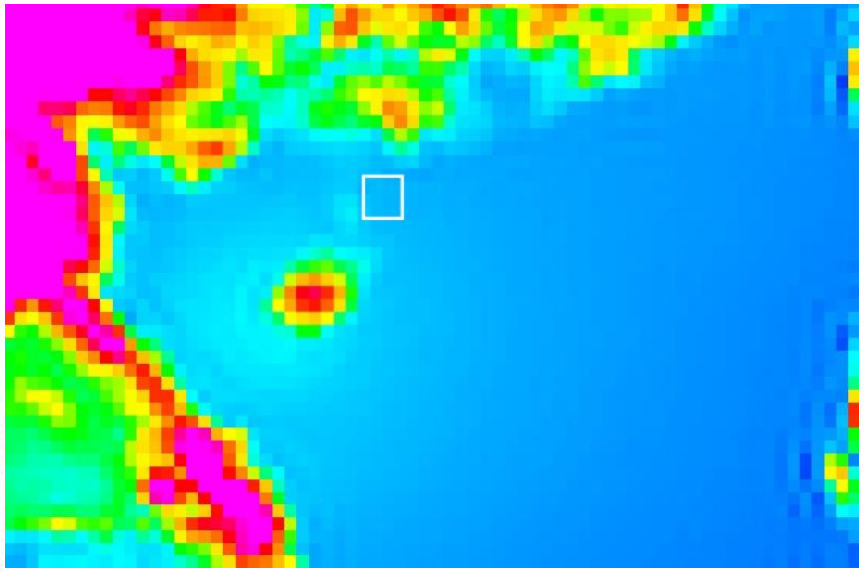
Давление в гПа:
997.92015625



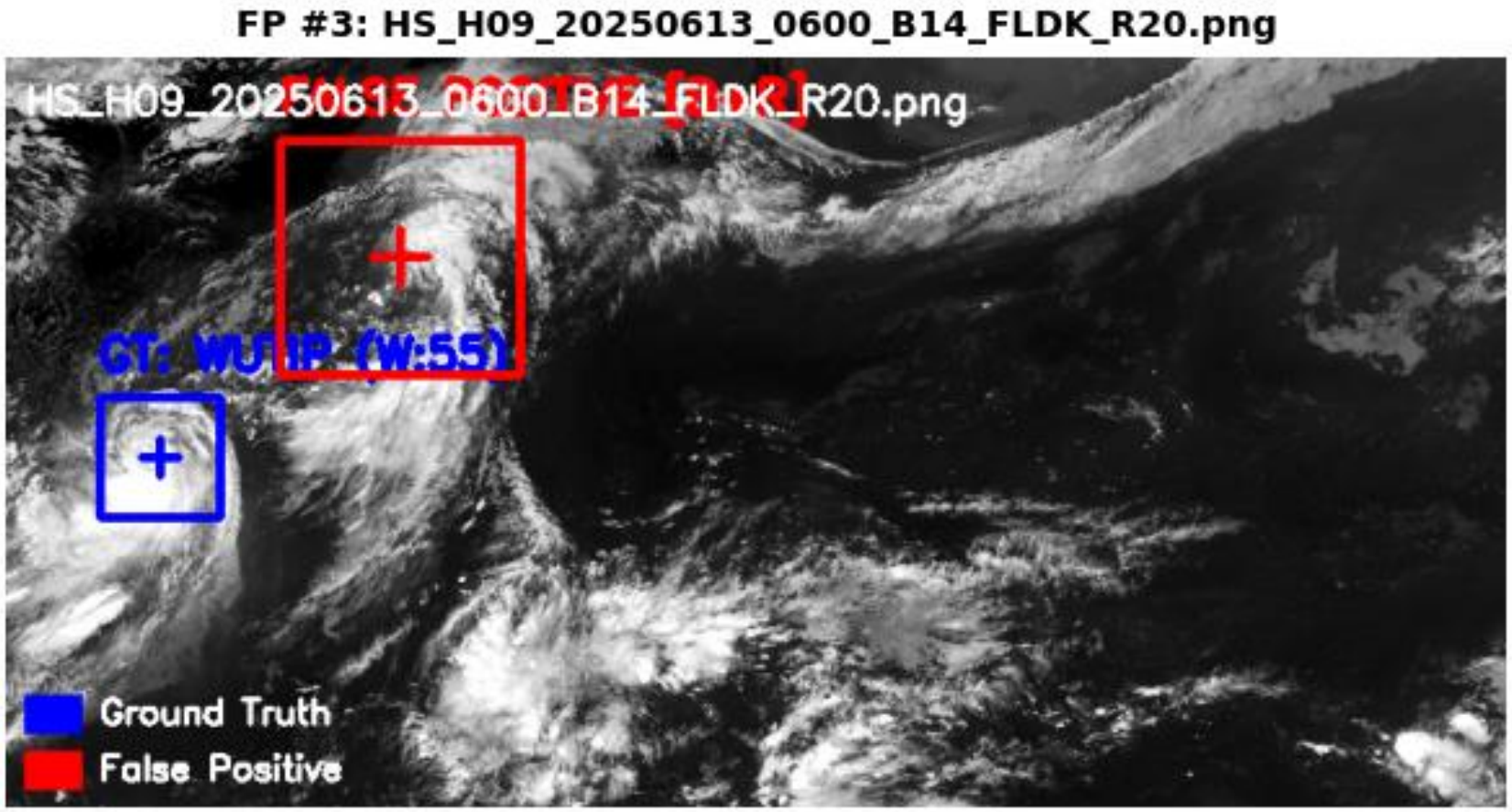
Проверка ошибок на микроволновых данных



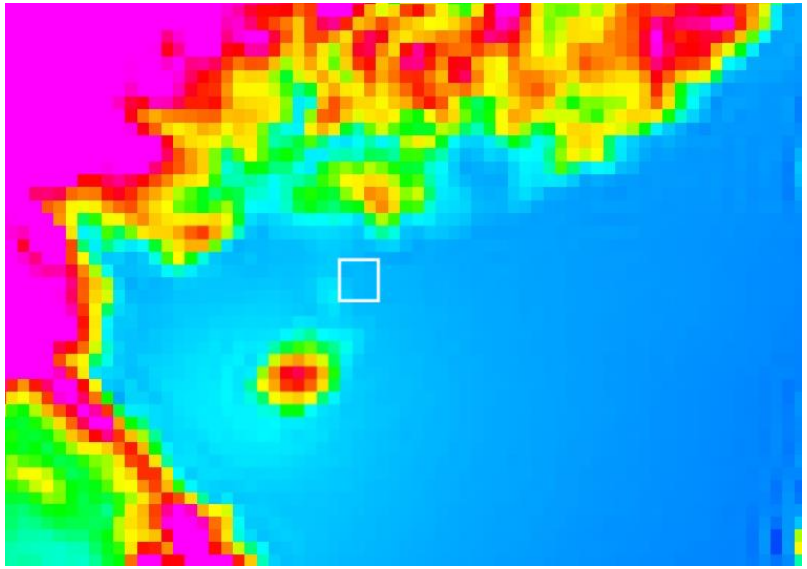
Давление в гПа:
1003.1428125



Проверка ошибок на микроволновых данных



Давление в гПа:
1002.4828125



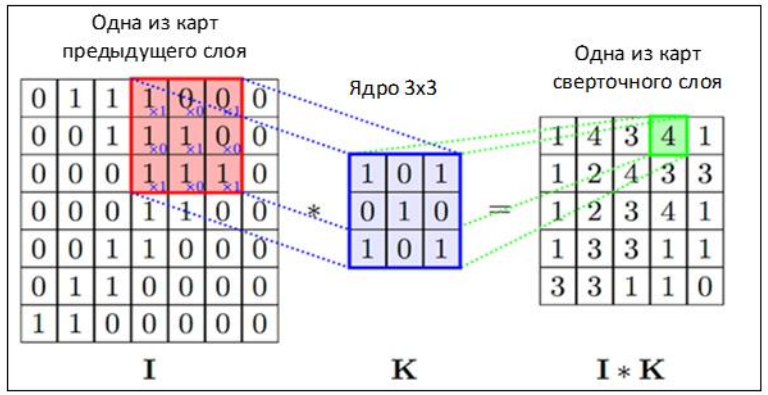
2. Локализация ТЦ

Обзор исследований

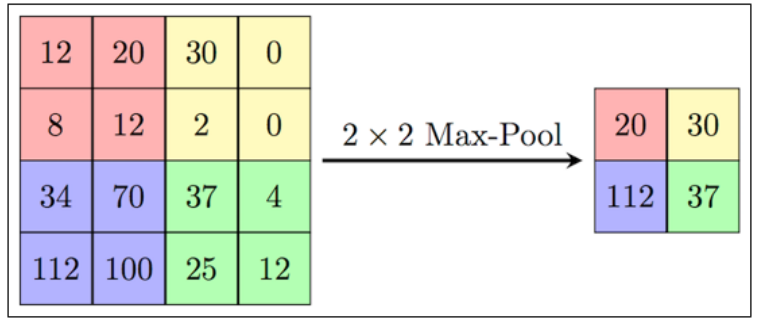
Локализация центра ТЦ					
Статьи	Данные	**Метод**	Тестовый набор	Метрика	**Ошибка**
Wimmers et al. (2010)	ПМВ 85–92 ГГц	Алгоритм ARCHER	241 изображение	СКО (RMSE)	0,173°
Neeru et al. (2011)	ИК 10,3-11,3 мкм	Алгоритм спирального центрирования	Два случая ТЦ	САО (MAE)	0,4°
Wimmers et al. (2016)	ПМВ 85–92 ГГц	Алгоритм ARCHER-2	ТЦ Атлантики 2012 г.		0,59°
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		0,49°
				СКО (RMSE)	0,58°
Wang et al. (2020)	ИК 10,3-11,3 мкм	Метод Хафа	134 изображения	САО (MAE)	**0.237°**
Shin (2022)		Алгоритм спирального центрирования	190 случаев ТЦ	СКО (RMSE)	0.6°
Liu et al. (2022)		Векторы ветра	2 случая ТЦ	САО (MAE)	0,37°
Qingxiang (2022)		Метод Хафа	2 случая ТЦ		**0,18°**
Wang et al. (2023)	ИК 10.4, 12.3 мкм ВП 6.2 мкм	Глубокое обучение	490 изображений		**0,26°**
Якушева А.Н., Ермаков Д.М.	ИК 10,3-11,3 мкм	Глубокое обучение	**3593 изображений**	САО (MAE)	**0.27°**

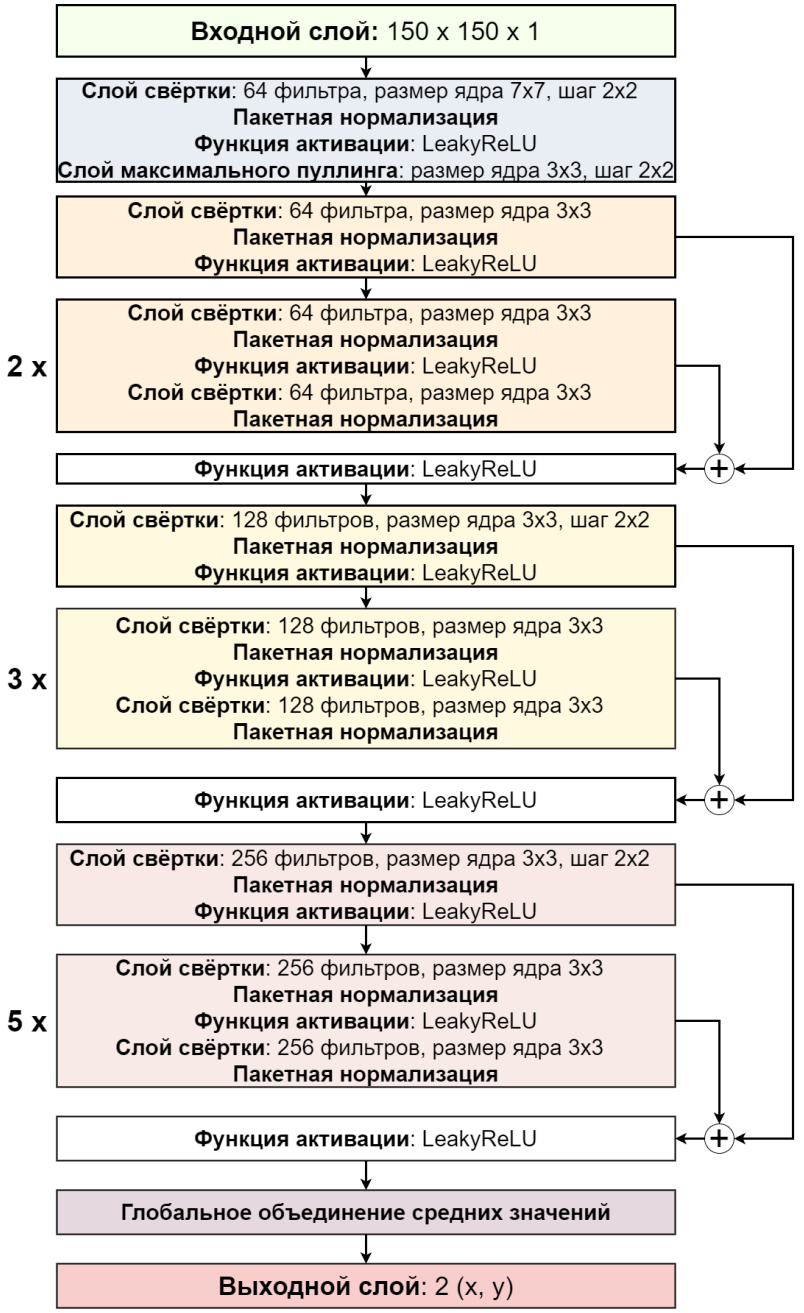
Архитектура нейронной сети

❖ Свёрточный слой



❖ Слой максимального пуллинга

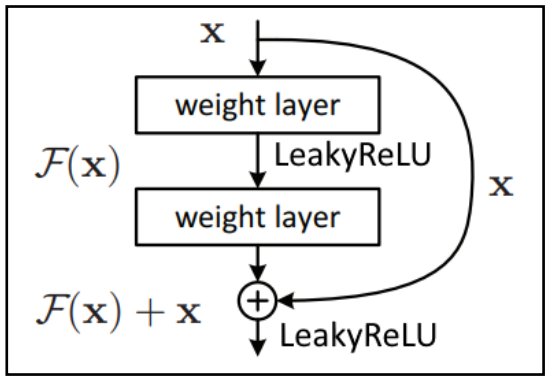




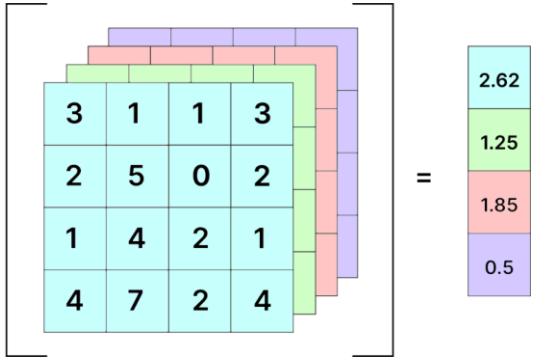
❖ Функция активации «LeakyReLU»:

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

❖ Пропуск соединений



❖ Глобальное объединение средних значений

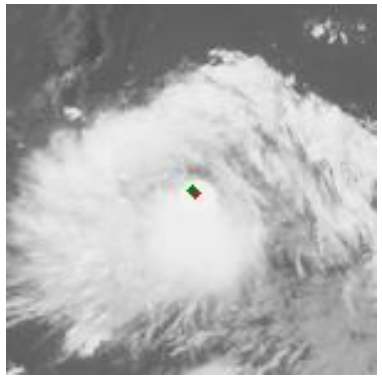


Примеры локализации центра ТЦ

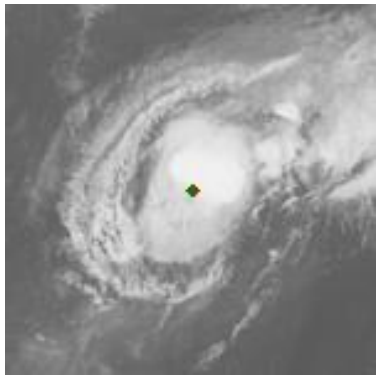
Центр по оценке нейросети

Центр по данным Национальных ураганных центров

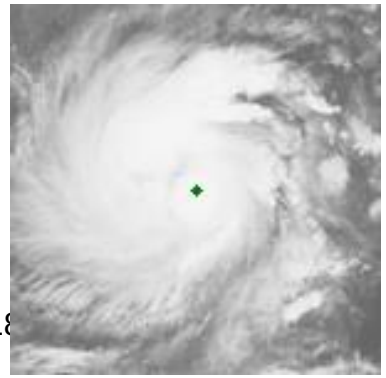
TS ≤ 45 узлов



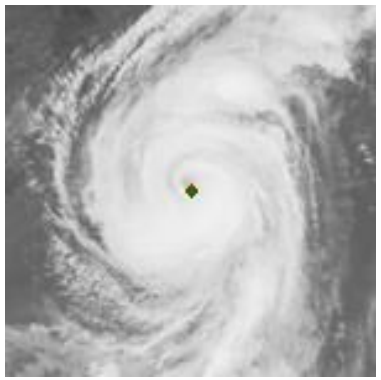
STS 46—64 узла



Cat1 64—82 узла



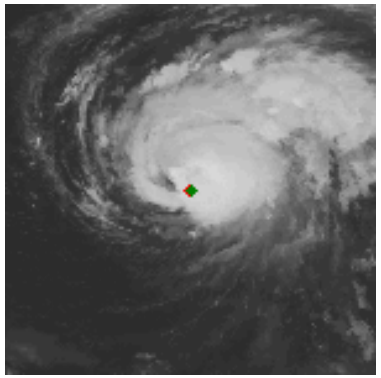
Cat2 83—95 узлов



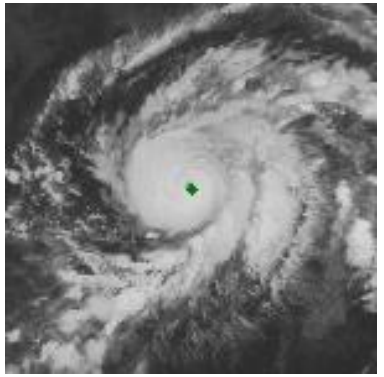
Сводные метрики точности модели на тестовой выборке (**3593** изображений ТЦ)

Метрика	Пиксели	Градусы (°)	Километры
CAO (евклидово)	2,98	**0,2681**	**29,79**
Медиана	1,05	0,0943	10,48
Разброс	4,28	0,3848	42,76
Макс. ошибка	38,20	3,4382	—
CAO по оси X	2,01	0,1809	20,11
CAO по оси Y	1,80	0,1620	18,01

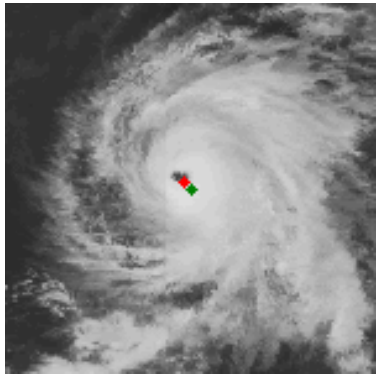
Cat3 96—112 узлов



Cat4 113—136 узлов

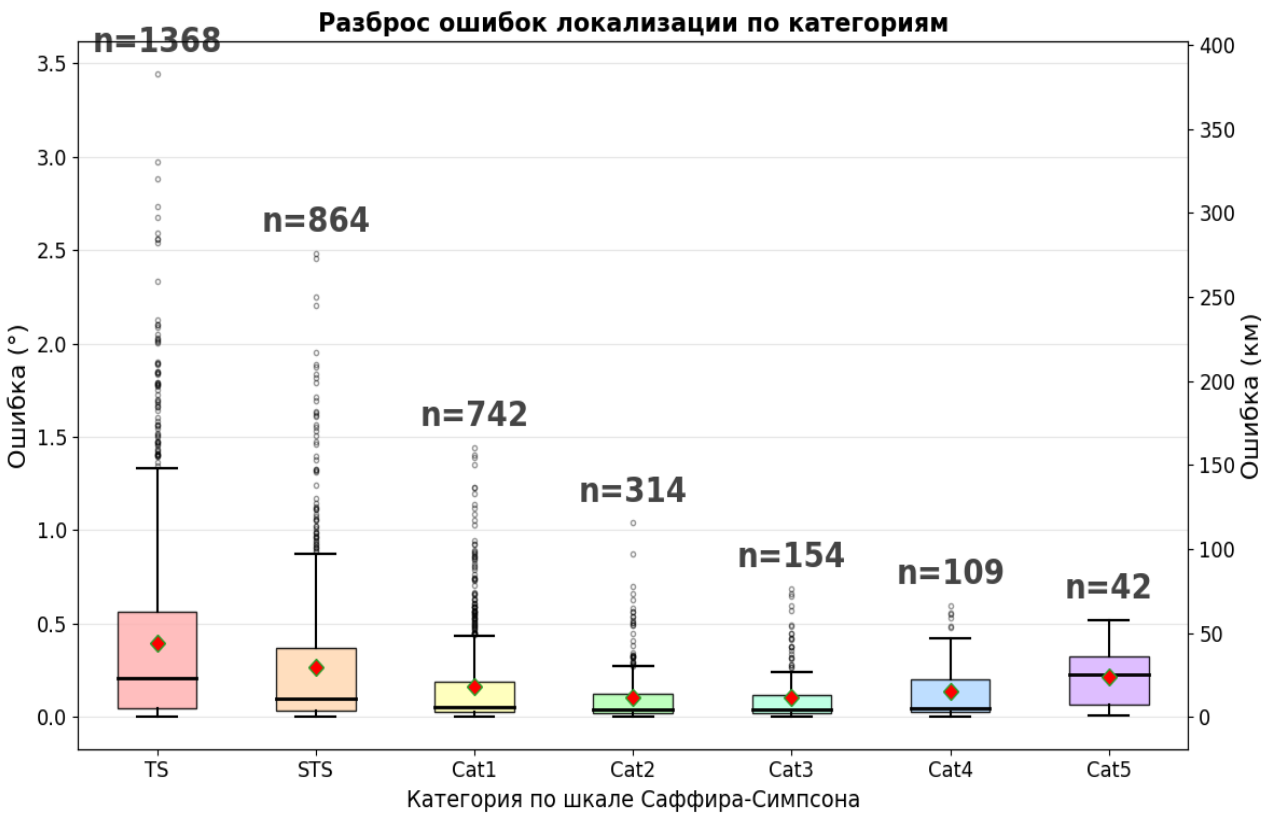


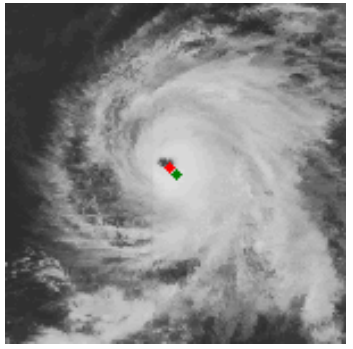
Cat5 ≥ 137 узлов

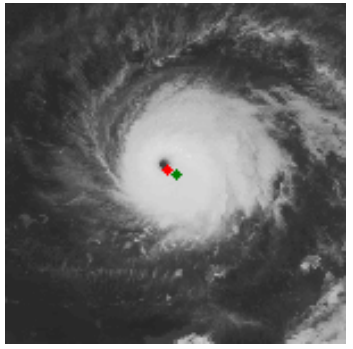


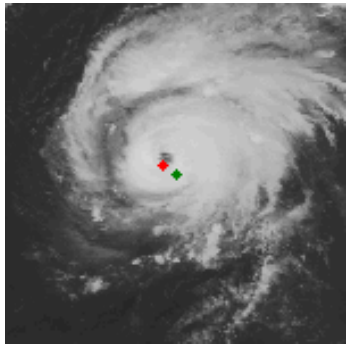
Результаты локализации по категориям

Категория	N	CAO (°)	Медиана (°)	IQR (°)	CAO (км)	Медиана (км)
TS ≤ 45 узлов	1368	0,39	0,21	0,52	43,71	22,82
STS 46—64 узла	864	0,27	0,10	0,34	29,86	10,80
Cat1 64—82 узла	742	0,16	0,05	0,16	17,92	6,02
Cat2 83—95 узлов	314	**0,10**	**0,04**	0,10	**11,45**	**4,28**
Cat3 96—112 узлов	154	**0,11**	**0,04**	0,10	**11,98**	**4,26**
Cat4 113—136 узлов	109	0,13	0,05	0,18	14,96	5,27
Cat5 ≥ 137 узлов	442	0,22	0,22	0,26	24,10	24,99
ИТОГО	**3593**	**0,27**	**0,10**	**0,33**	**29,77**	**10,61**

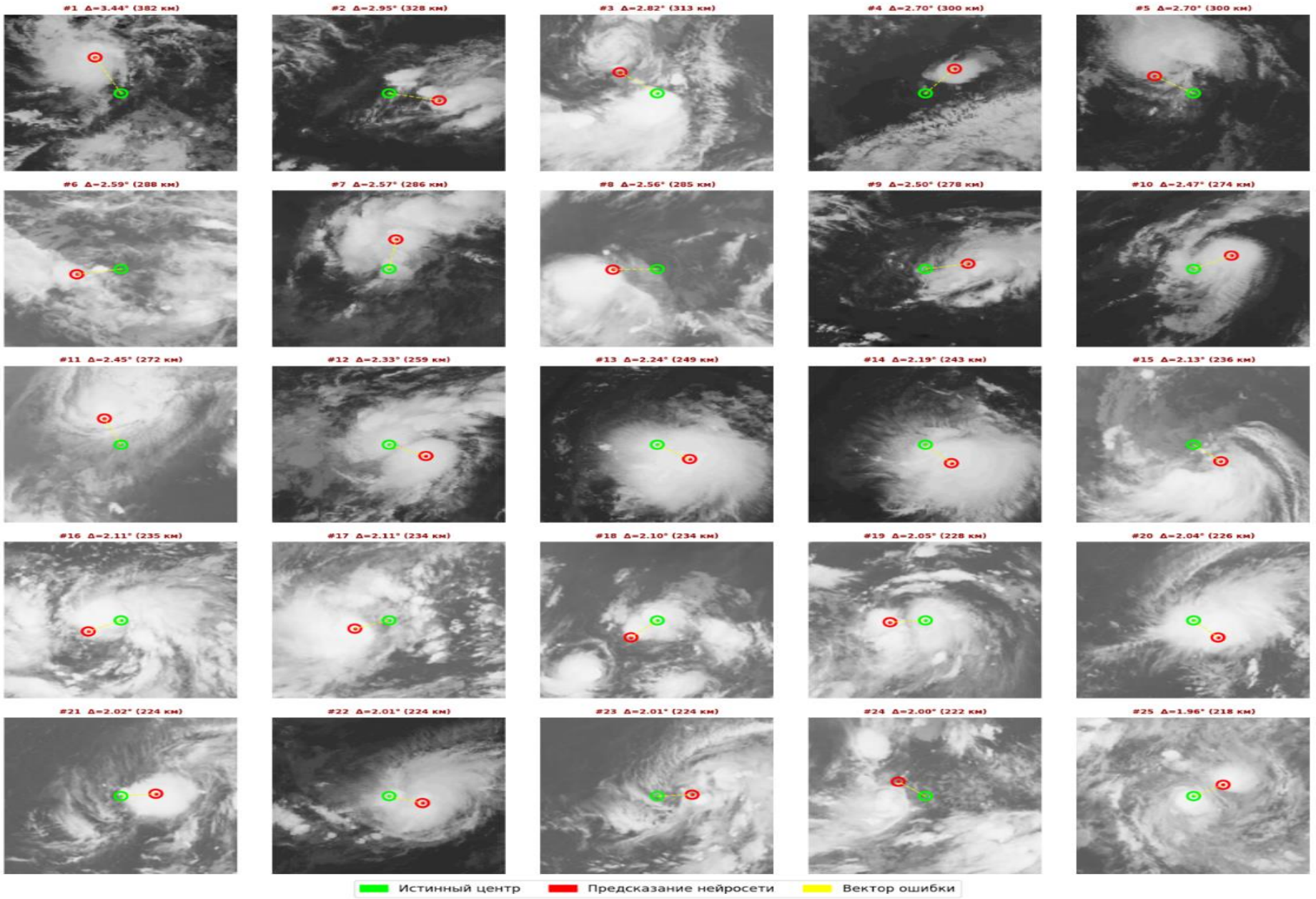








Наибольшие ошибки

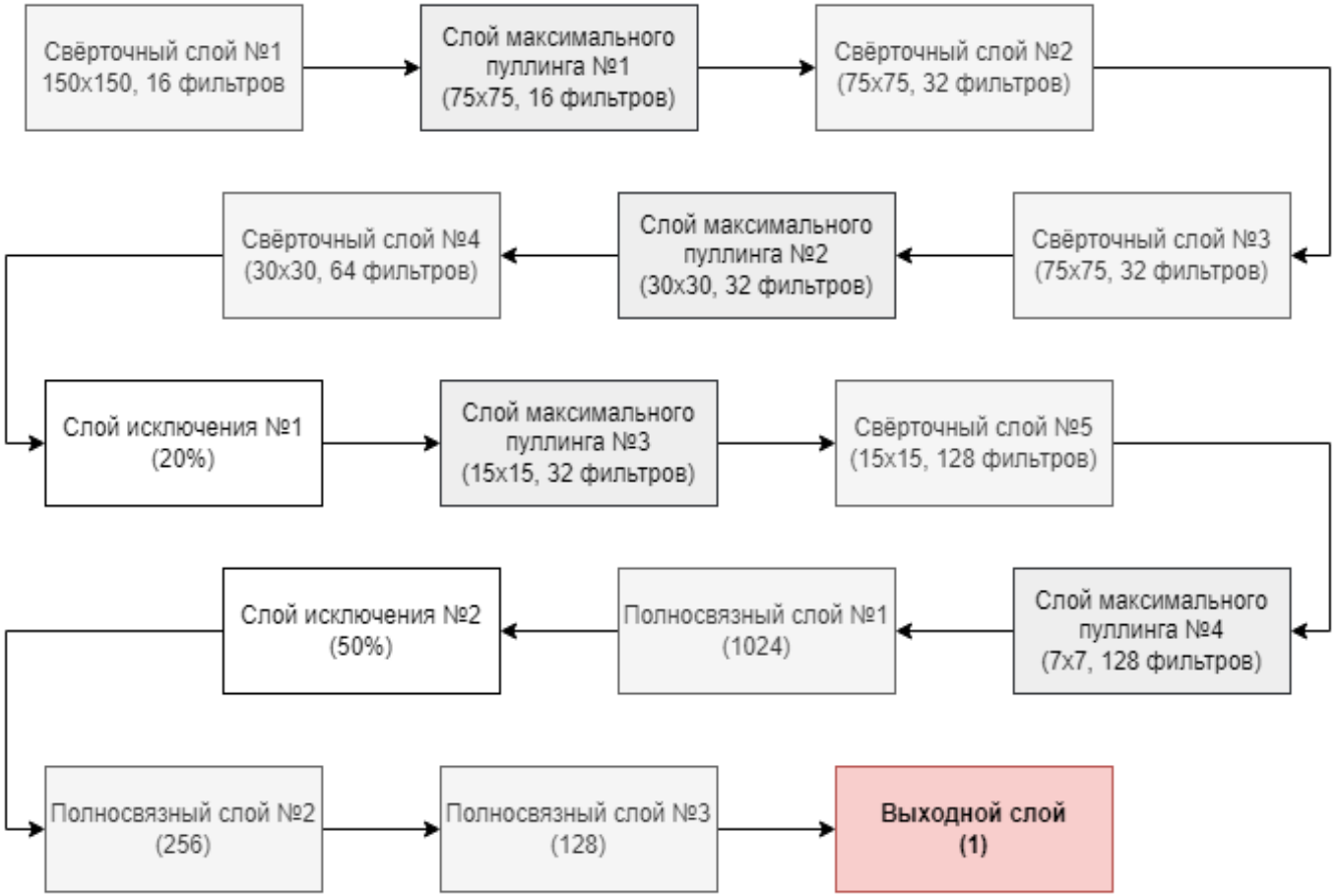


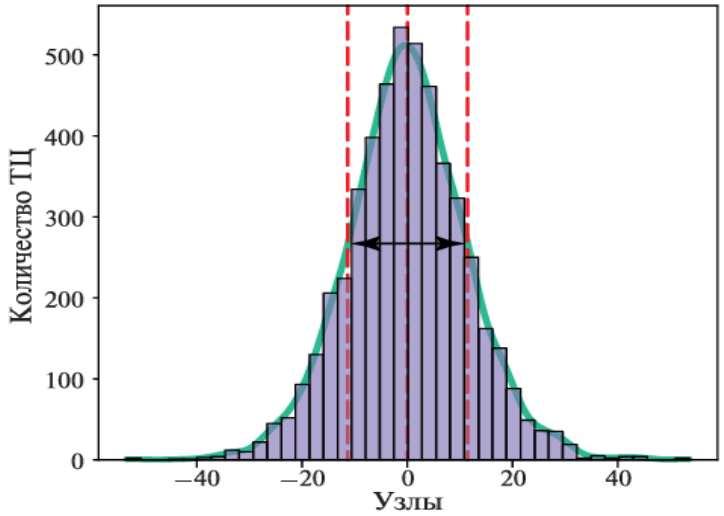
3. Восстановление интенсивности ТЦ

Обзор исследований

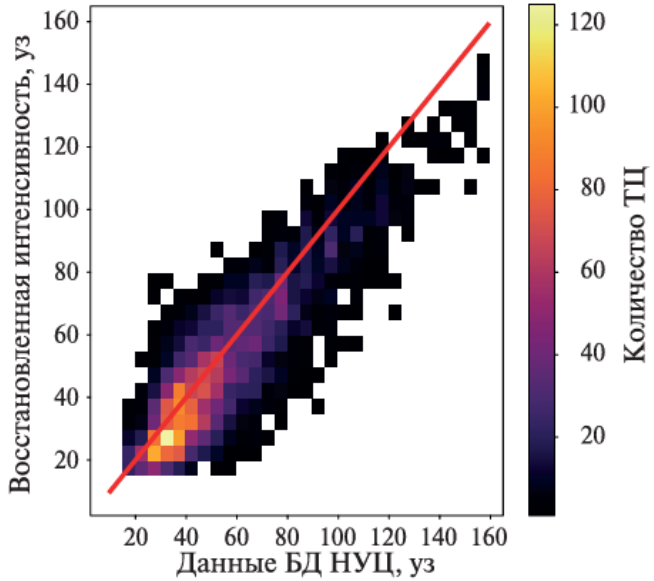
Восстановление интенсивности				
Статьи	Данные		Тестовый набор	**RMSE (узлы)**
Yong Zhao et al. (2016)	ИК	10,3-11,3 мкм	52 случая за 2008, 2009 года	12,69
Jay Samuel Combinido et al. (2018)	ИК	10,2-11,5 мкм	ТЦ Тихого океана за 2015, 2016	13,23
Velden, Herndon (2018)	ИК, ПМВ	10,2-11,5 мкм 85 - 89 Ггц		**8,3**
Juhyun Lee et al. (2019)	ИК, ВП	10.7-12.0, 6.7, 3.9 мкм	С-З часть Тихого океана за 2017	**8,32**
Kunsheng Xiang (2019)	ПМВ	85 - 89 Ггц	С-З часть Тихого океана за 2017	11,55
Wimmers, Velden (2019)	ПМВ	37, 85–92 Ггц	ТЦ за 2007, 2017 года	14,3
Якушева А.Н., Ермаков Д.М. (2024)	**ИК, ВП**	**10,2-11,5 мкм, 6.2-6.9 мкм**	**ТЦ за 2007, 2009, 2012 и 2017 > 4500 изображений**	**11,3**

Архитектура нейронной сети, результаты





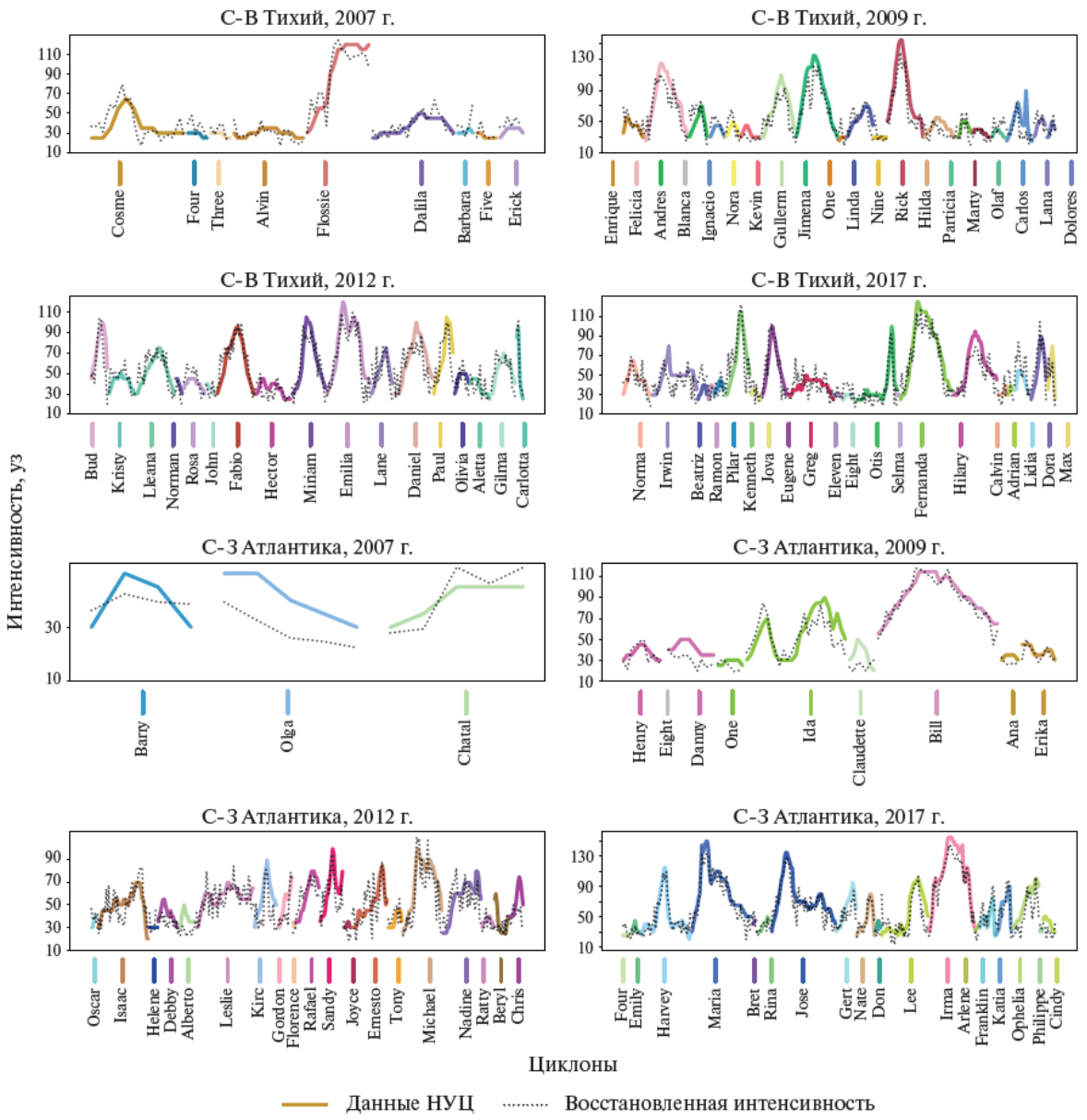
Распределение невязок



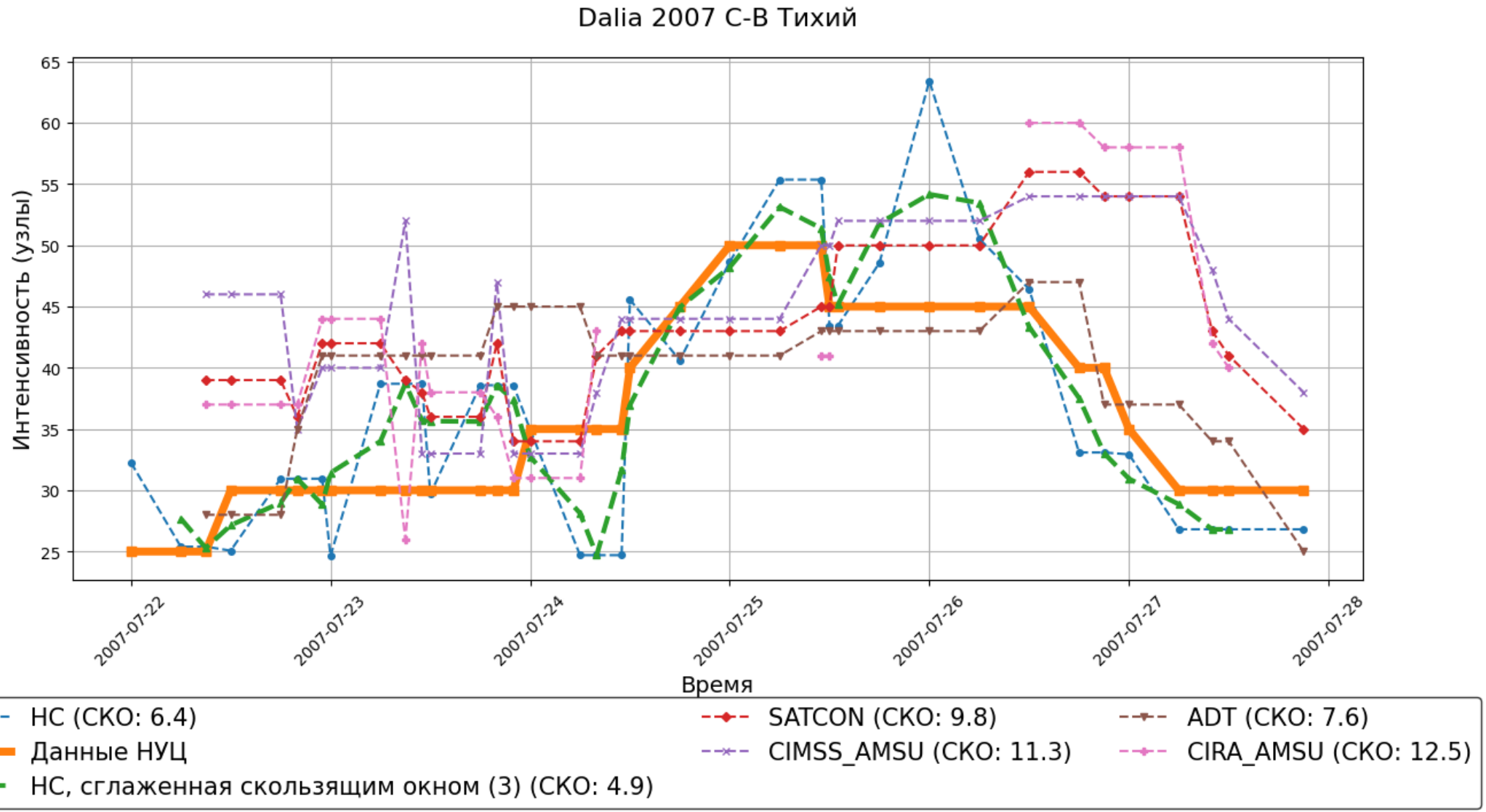
Гистограмма рассеяния

Примеры восстановления интенсивности ТЦ

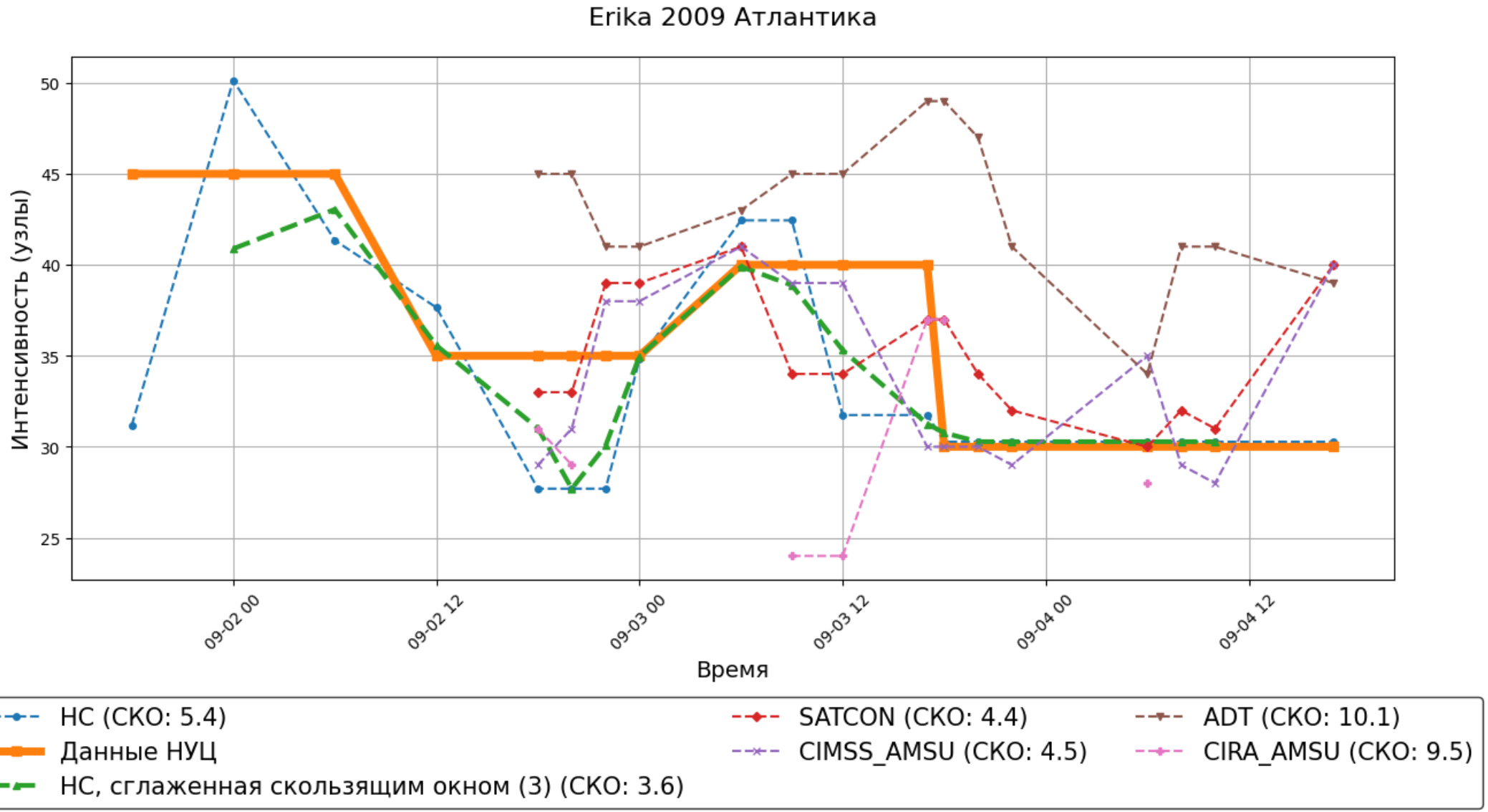
Категория	Диапазон, узлы	Количество примеров	RMSE	MAE
TD	≤33	1055	10.20	7.73
TS	34–63	2357	10.05	7.87
Cat 1	64–82	872	11.68	9.20
Cat 2	83–95	223	13.85	10.67
Cat 3	96–112	297	15.94	11.71
Cat 4	113–136	142	17.24	14.74
Cat 5	≥137	58	16.74	15.84
Итого	все	**5004**	**11.34**	8.71



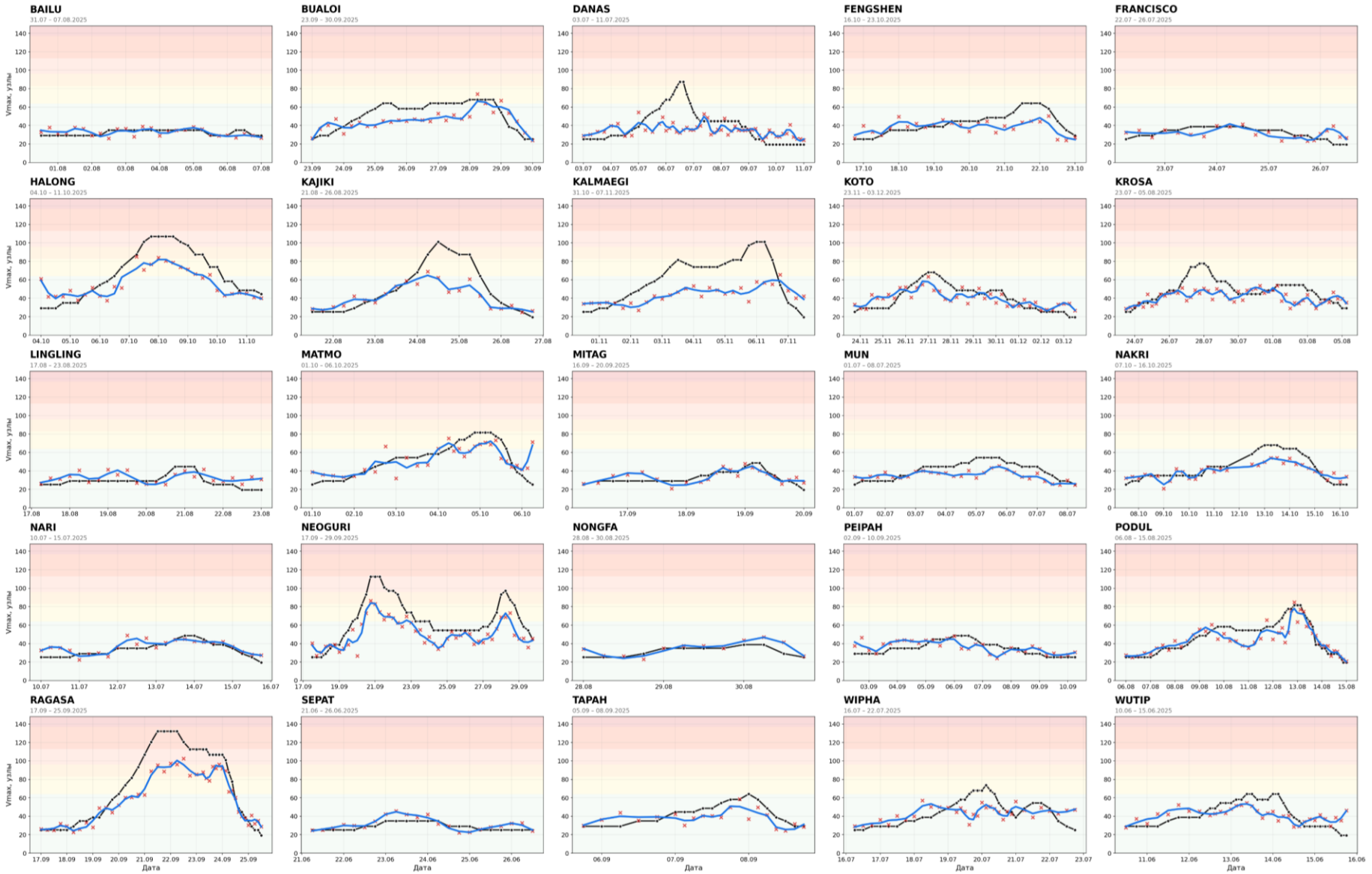
Пример восстановления интенсивности ТЦ



Пример восстановления интенсивности ТЦ



Пример восстановления интенсивности ТЦ 2025 года, Himawari, БД CMA



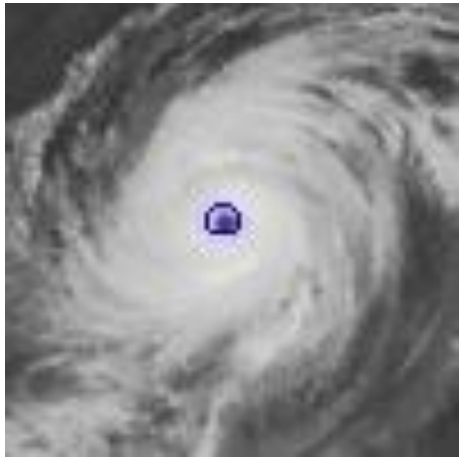
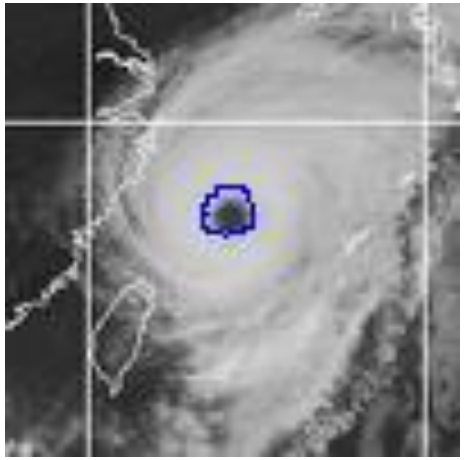
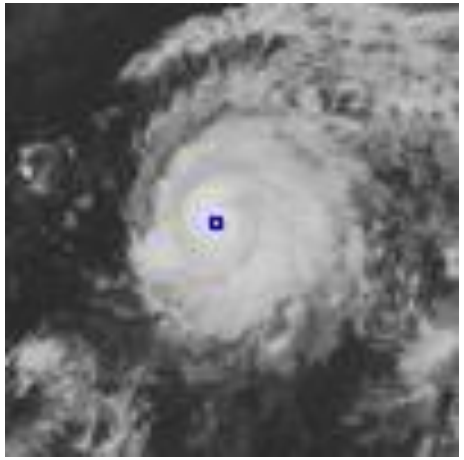
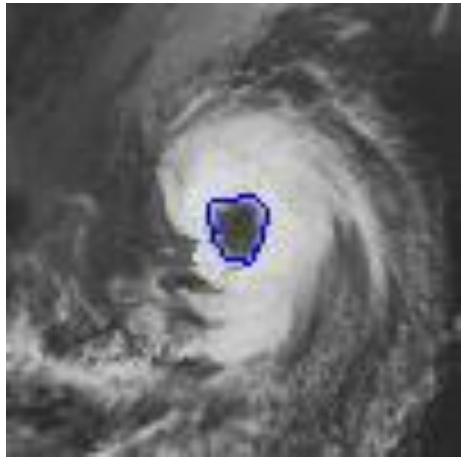
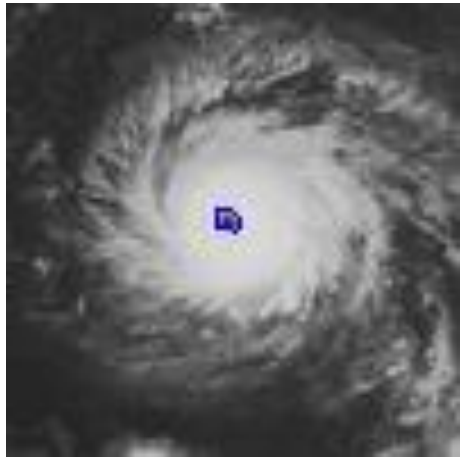
4. Анализа формы глаза тропических циклонов

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

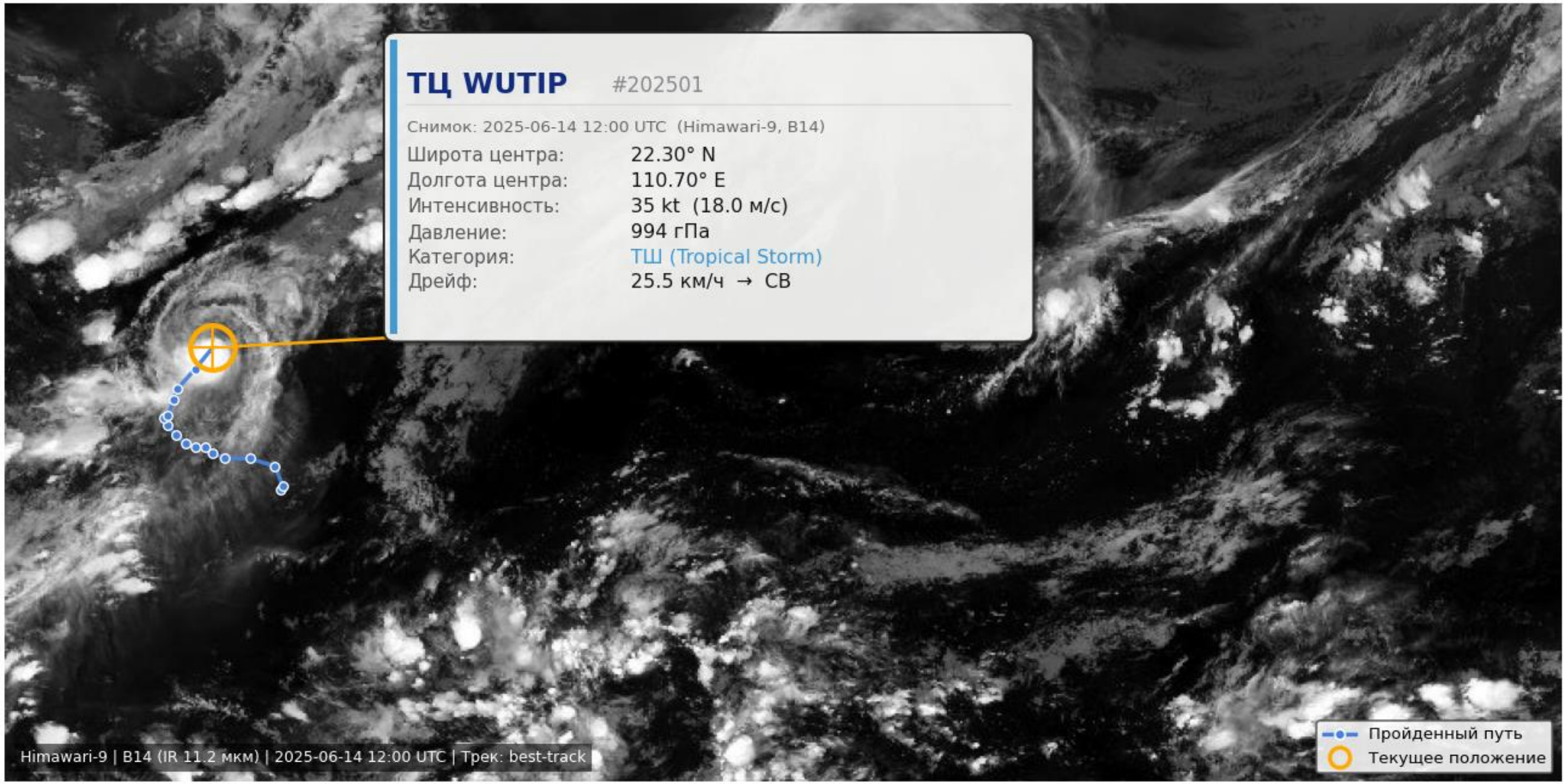
$$\frac{r_{max} - r_{min}}{r_{max} + r_{min}}$$

4. Определяется площадь каждого контура
5. Взвешенное решение

Пример работы системы автоматического мониторинга

Проект пользовательского интерфейса



Статьи и конференции

Детектирование ТЦ

- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Развитие процедур автоматического детектирования и локализации центров тропических циклонов на спутниковых изображениях** // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования
- Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 184. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Разработка и верификация алгоритмов автоматического детектирования тропических циклонов по данным геостационарных спутников** // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2025. С. 310. DOI 10.21046/23DZZconf-2025a
- Якушева А.Н. **Нейронные сети в задачах дистанционного зондирования Земли** // 12-я
- международная Школа-семинар Спутниковые методы и системы исследования Земли. 2024. г.
- Таруса.

Локализация ТЦ

- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Методы восстановления локализации центров ТЦ** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2026. (Готовится к публикации)
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Развитие процедур автоматического детектирования и локализации центров тропических циклонов на спутниковых изображениях** // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования
- Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 184. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Проблемы автоматической локализации центров тропических циклонов на инфракрасных спутниковых изображениях** // 21-я конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва: ИКИ РАН, 2024
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Проблемы локализации центра и анализа формы глаза тропических циклонов на инфракрасных спутниковых изображениях с помощью машинного обучения и компьютерного зрения** // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2024. С. 310. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a
- Yakusheva A.N., Ermakov D.M., Mitnik L.M. **Localization of the center of tropical cyclones based on infrared satellite images using machine learning and computer vision** // 16th Pan Ocean Remote Sensing Conference 2025 Keelung, Taiwan
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Локализация центров тропических циклонов с помощью разработанной сверточной нейросети** // 23-я конференция молодых ученых. Москва: ИКИ РАН, 2026

Восстановление интенсивности ТЦ

- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Разработка новой автоматической методики восстановления интенсивности тропических циклонов по данным многоспектральных спутниковых наблюдений Земли с помощью искусственных нейросетей** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 336-349. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-336-349
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Методы восстановления интенсивности тропических циклонов по данным ДЗЗ: современное состояние и перспективы** // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 336-349. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-25-39
- Якушева А.Н., Ермаков Д.М. **Развитие алгоритмов технического зрения для уточнения параметров тропических циклонов по данным дистанционного зондирования Земли** // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 477. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a
- Якушева А.Н. **Восстановление параметров тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений Земли с помощью алгоритмов компьютерного зрения** // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных Ломоносов-2023. Москва: МГУ. 2023.

Выводы

- Разработана единая автоматическая система мониторинга ТЦ по данным Himawari, объединяющая детектирование, локализацию центра, восстановление интенсивности и анализ формы глаза.
- **Детектирование.** Ансамблевый подход (бинарный классификатор + YOLO + RT-DETR) с консенсусной логикой (циклон считается обнаруженным при согласии ≥2 моделей) показал F1 от 0.75 (Sepat) до 0.90 (Wutip). Перекрёстная проверка ошибок на микроволновых данных подтвердила корректность ложных срабатываний/пропусков.
- **Локализация центра.** Разработанная свёрточная сеть на тестовой выборке из 3593 изображений достигла CAO 0.27° (29.77 км), медиана 0.10° (10.61 км) — результат на уровне лучших мировых работ. Точность растёт с интенсивностью: для Cat2–Cat3 CAO снижается до 0.10–0.11° против 0.39° для слабых TS.
- **Восстановление интенсивности.** На выборке свыше 5000 изображений достигнут RMSE 11.3 узла. Выявлена систематическая ошибка регрессии к среднему: переоценка слабых систем и недооценка сильных (Cat4–5 MAE до ~15–16 узлов) — направление для дальнейшей калибровки.
- **Анализ формы глаза.** Предложен алгоритм автоматического выделения и описания формы глаза ТЦ методами компьютерного зрения.
- Результаты опубликованы в рецензируемых журналах и представлены на международных конференциях (ИКИ РАН, Pan Ocean Remote Sensing Conference). Система интегрируется в мониторинговый комплекс ИКИ РАН.