

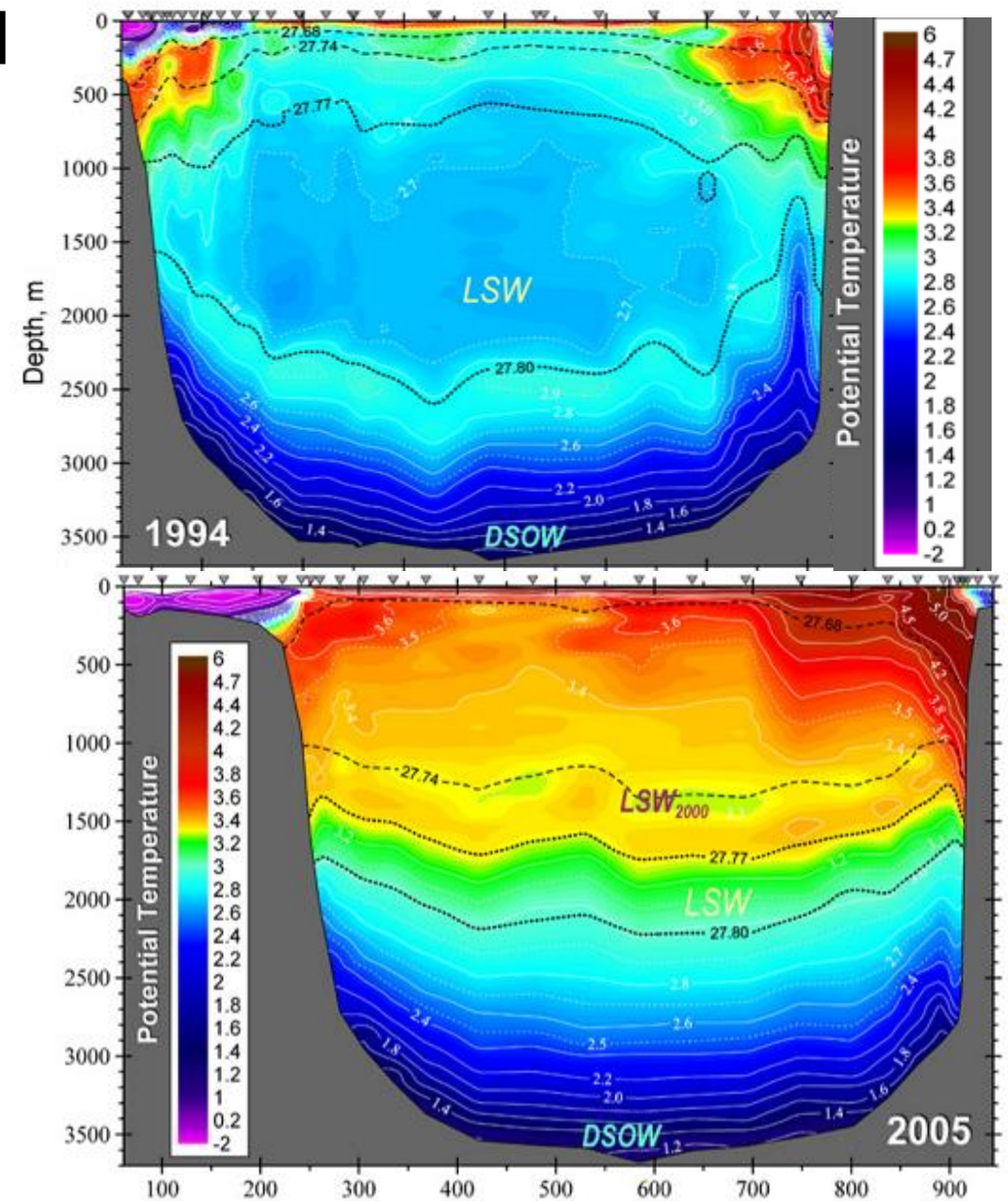


Обнаружение колец Ирмингера в высокоразрешенных данных моделирования океана с применением искусственных нейронных сетей

М.А. Криницкий
зав. Лабораторией машинного обучения в науках о Земле МФТИ
с.н.с. Лаборатории мониторинга климата ИО РАН

Факторы формирования глубокой конвекции

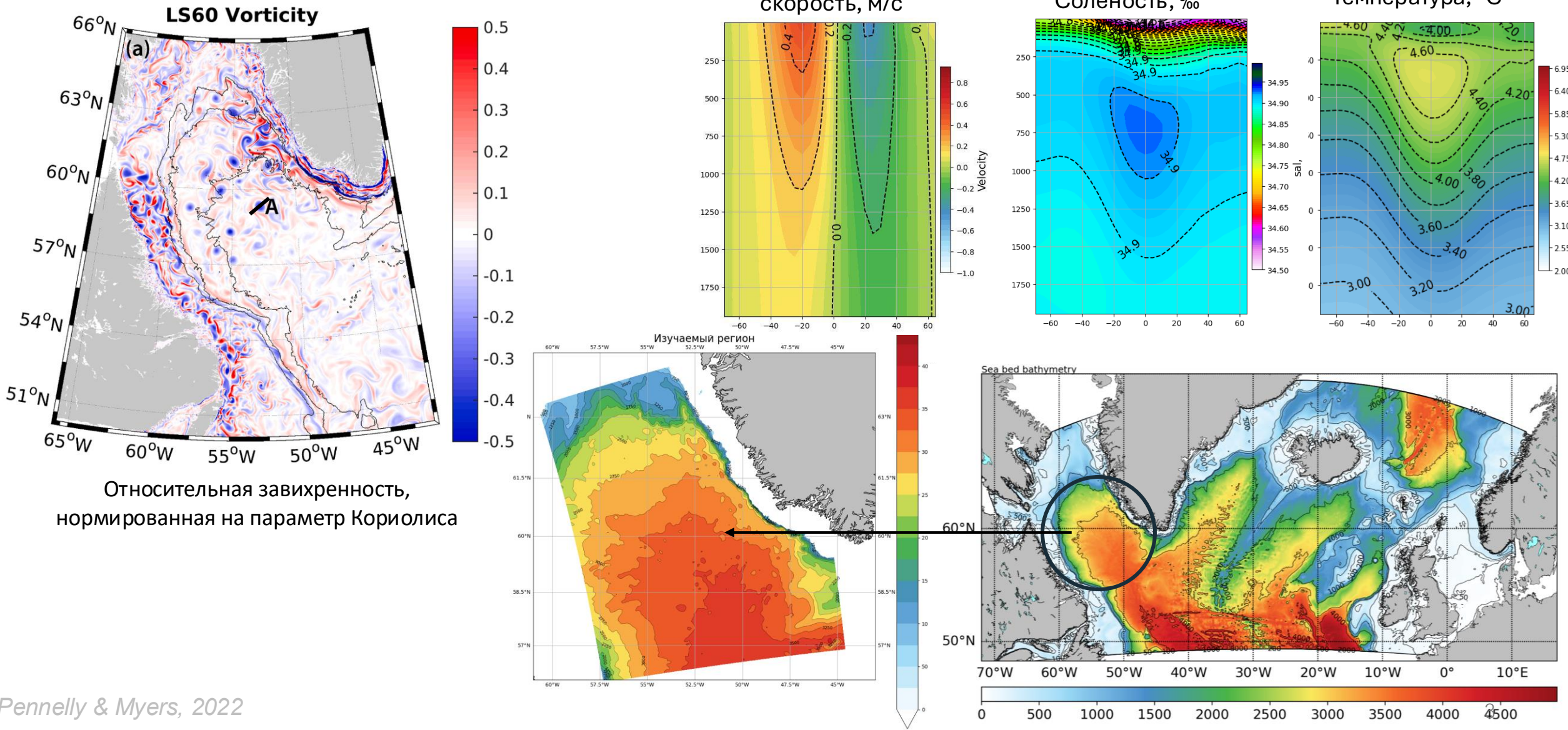
- Интенсивный теплообмен с атмосферой
- сохранение условий стратификации моря Лабрадор после предыдущих конвективных сезонов
- региональная циркуляция (внутренние и пограничные течения)
- горизонтальная адвекция тепла, солености и пресной воды



Yashayev, 2007

Кольца Ирмингера

Вертикальная структура колец Ирмингера



Классы современных методов обнаружения КИ

Метод	Принцип	Преимущества	Недостатки
Геометрические	Пороговый отбор производных от поля скорости	Просты, быстрые в вычислениях	Зависимы от субъективных пороговых значений
Спутниковые	Пороговое выделение контуров по аномалии уровня	Глобальное покрытие, высокая регулярность	Ограничены поверхностью, чувствительны к порогам
Гидрографические	Поиск ядер по T/S-аномалиям	Хорошая точность в обнаружении ядер вихрей	Плохо определяют границы; не работают на субмезомасштабе
Лагранжевые	Отслеживание движения частиц	Хорошо выделяют границы и устойчивые структуры	Крайне ресурсоёмкие в расчётах
<u>Машинное обучение</u>	Автоматическое выявление закономерностей в данных и применение их для распознавания вихрей	Адаптивность, возможность обучаться на неограниченном количестве полей	Зависят от объёма обучающих данных , чувствительны к выбору архитектуры модели

Используемые данные

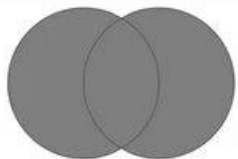
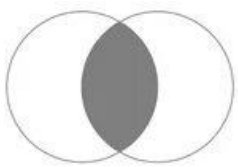
	GLORYS12 (NEMO 3.1)	NNATL12 (NEMO 4)	Экспертная разметка
Разрешение	1/12°(3.5–6 км)	1/12° (3.5–6 км)	1/12° (3.5–6 км)
Вертикальные уровни	50	75	1
Размер сетки	1201 × 301	934 × 402	934 × 402
Период	1993–2019	1993–1995	1995
Батиметрия	ETOPO1	ETOPO (1'), GEBCO08 (30")	-
Частота записи	1 сутки	1 час	1 сутки

Оценка качества

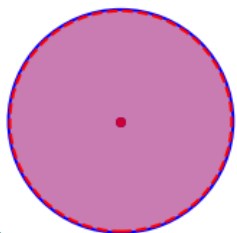
Точность (Precision) - насколько точно алгоритм создает метки вихрей, минимизируя количество ложных срабатываний

IoU (Intersection over Union) – пересечение, деленное на объединение

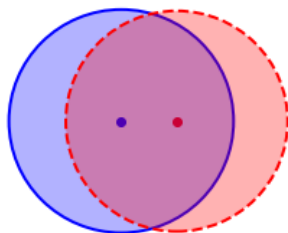
$$\text{IoU} = \frac{\text{Area of Overlap}}{\text{Area of Union}}$$



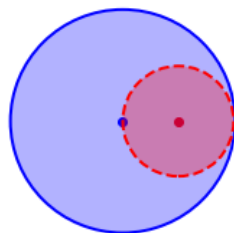
IoU=1.00



IoU=0.52

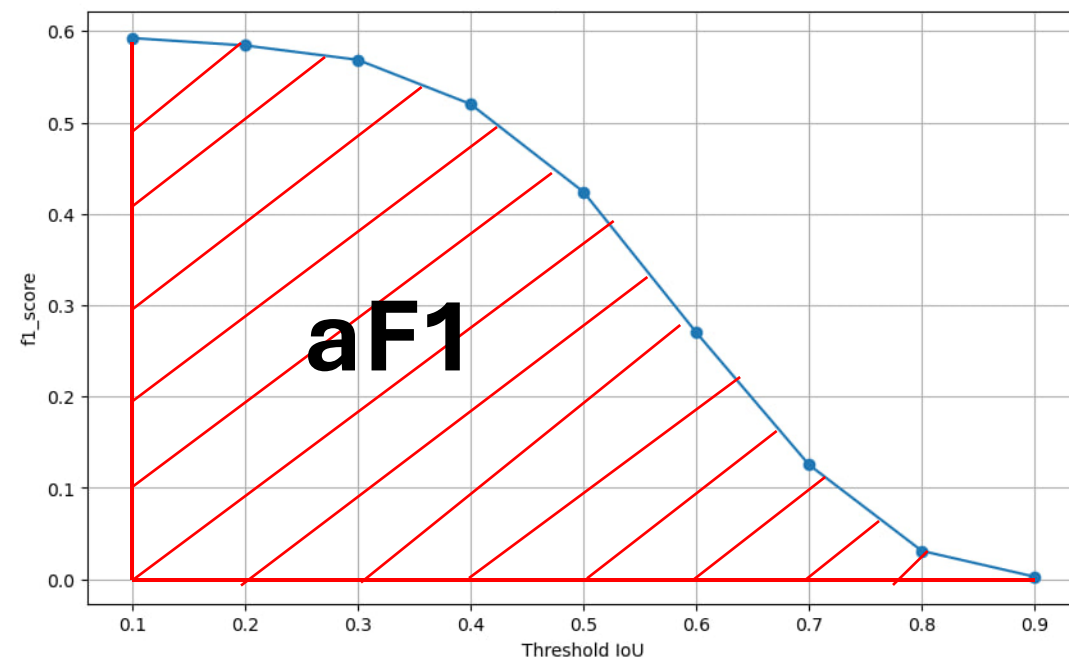


IoU=0.25

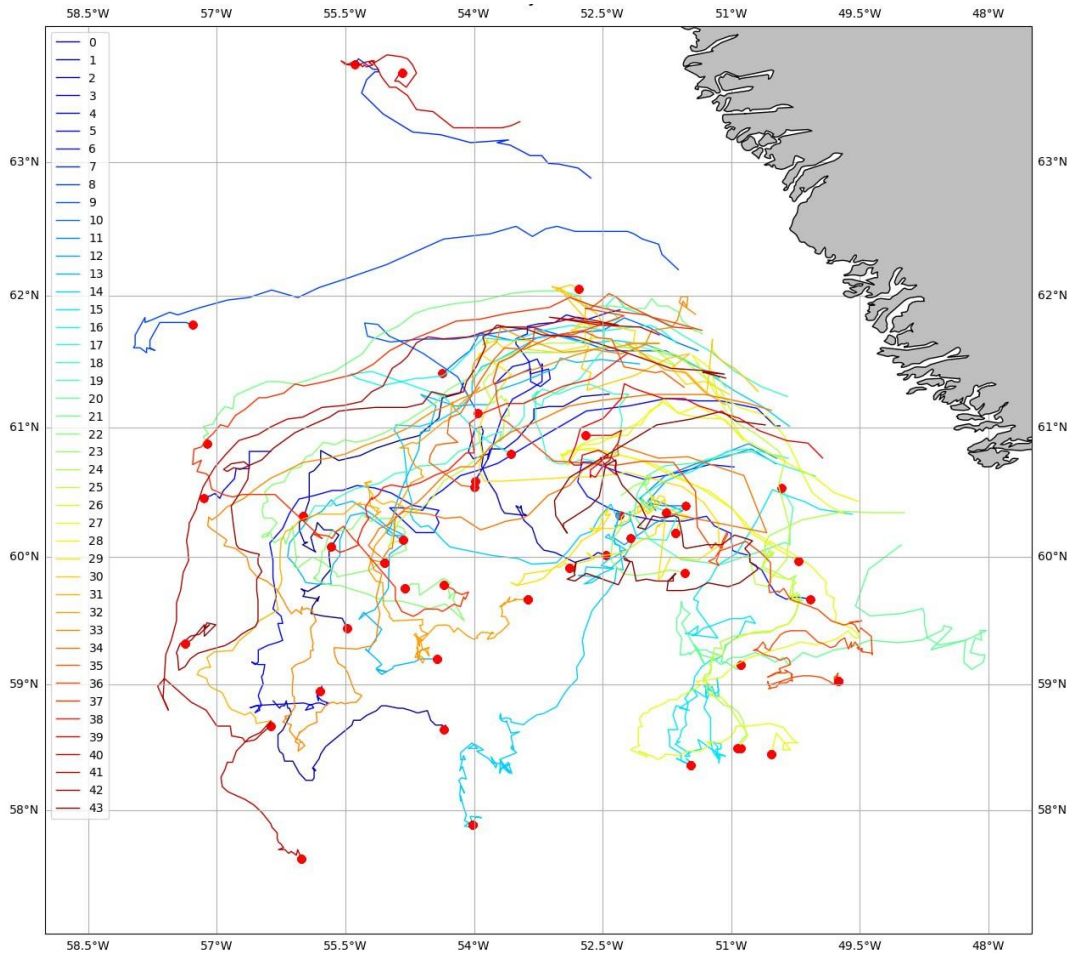


Полнота (Recall) — это мера способности алгоритма обнаружить все вихри без пропуска, не беря во внимание количество ложных срабатываний

$$F1\ Score = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

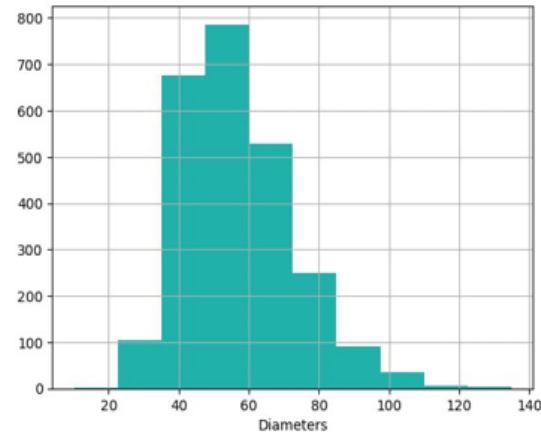


Экспертная разметка

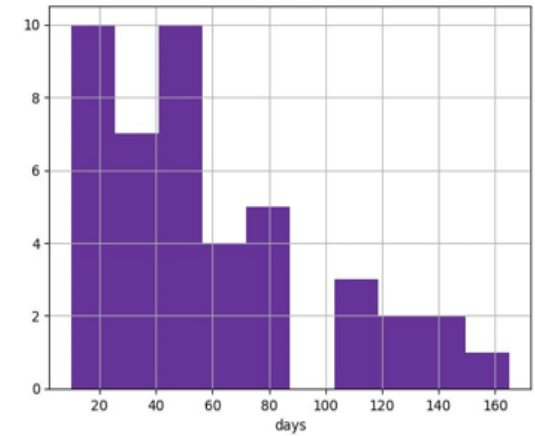


Траектории Колец Ирмингера по данным экспертной разметки за 1995 год. Цветом показаны траектории каждого уникального вихря, красными точками обозначены окончания траекторий.

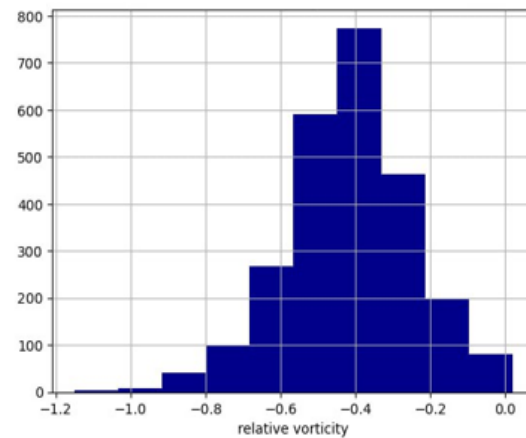
Диаметры КИ



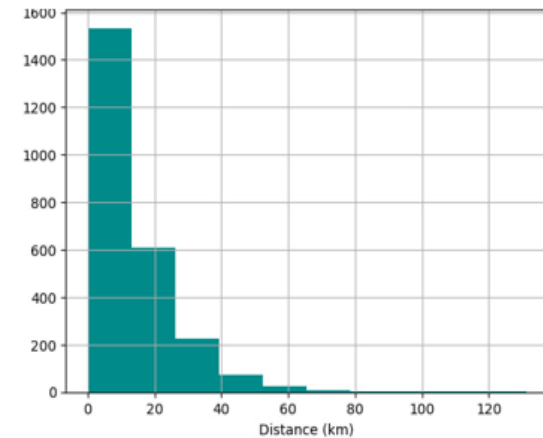
Продолжительность жизни КИ



Интенсивность КИ



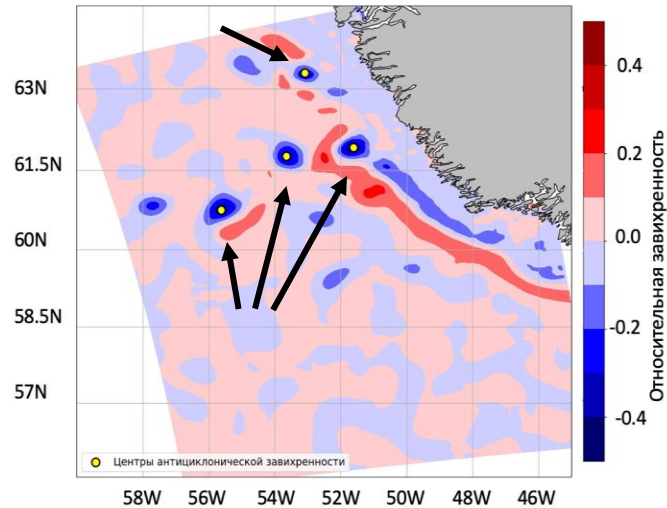
Дистанция между двумя последовательными шагами



Эвристический алгоритм

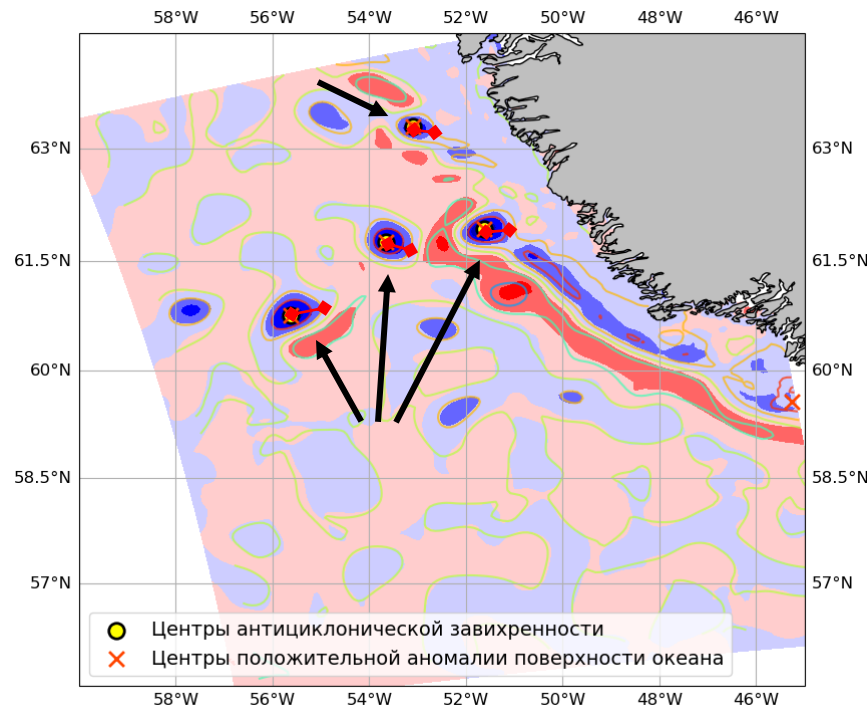
Относительная завихренность

- фильтрация мелкомасштабного шума
- поиск локальных минимумов завихренности
- выборка экстремумов по пороговому значению

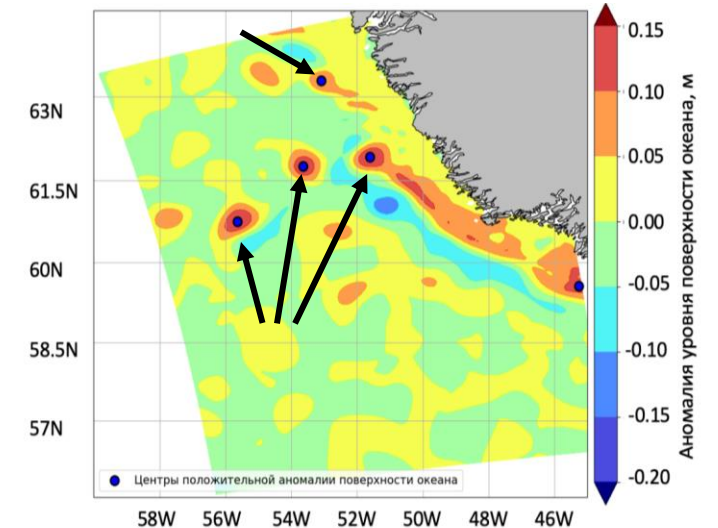


Уровень поверхности океана

- фильтрация мелкомасштабного шума
- расчет пространственной аномалии УПО
- Поиск локальных максимумов АУПО
- выборка экстремумов по пороговому значению



↔ Радиус вихря

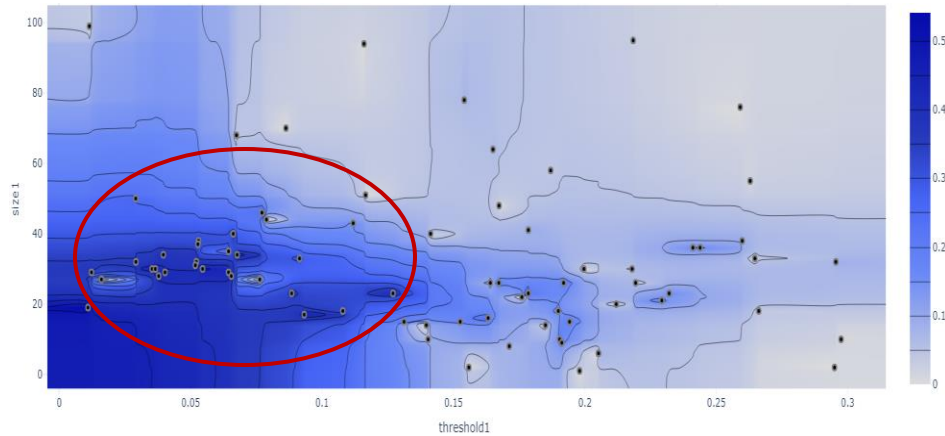


Оптимизированный эвристический

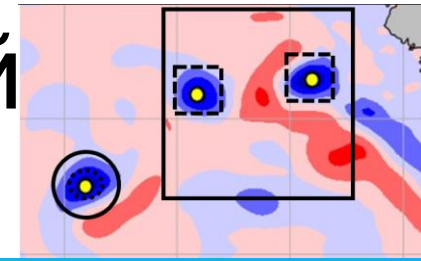
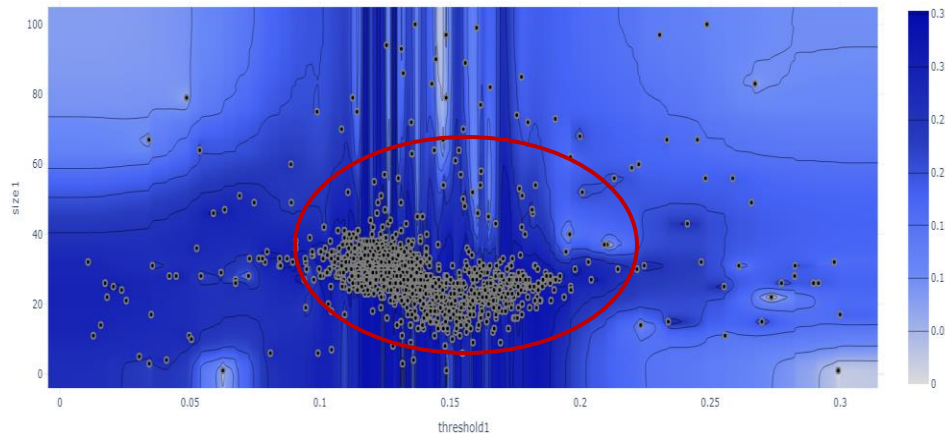


OPTUNA

пределение плотности вероятности
в начале оптимизации



Распределение плотности вероятности в
конце оптимизации



Алгоритм поиска
центра вихря

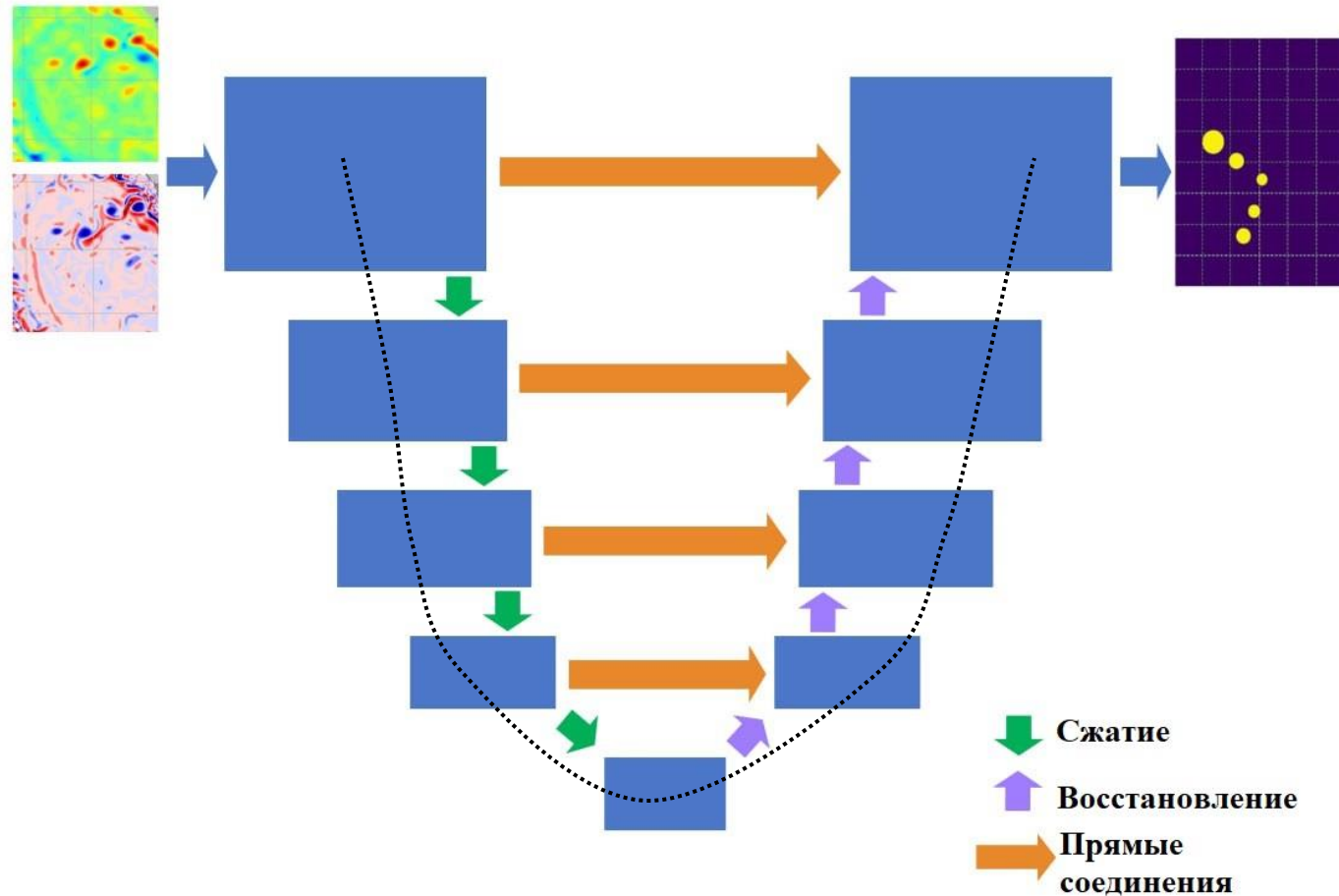
- Размер окрестности поиска локального минимума относительной завихренности A_c
- Пороговое значение T_c , по которому производится фильтрация значений относительной завихренности для нахождения центра вихря
- Размер окрестности поиска локального максимума аномалии уровня поверхности моря A_n
- Пороговое значение T_n , по которому производится фильтрация значений аномалии уровня поверхности моря для нахождения центра вихря
- Пороговое значение T_r , по которому производится фильтрация значений относительной завихренности для нахождения радиуса вихря
- Радиус R_c , в пределах которого производился поиск отфильтрованных по пороговому значению T_r узлов сетки

Алгоритм поиска
радиуса вихря

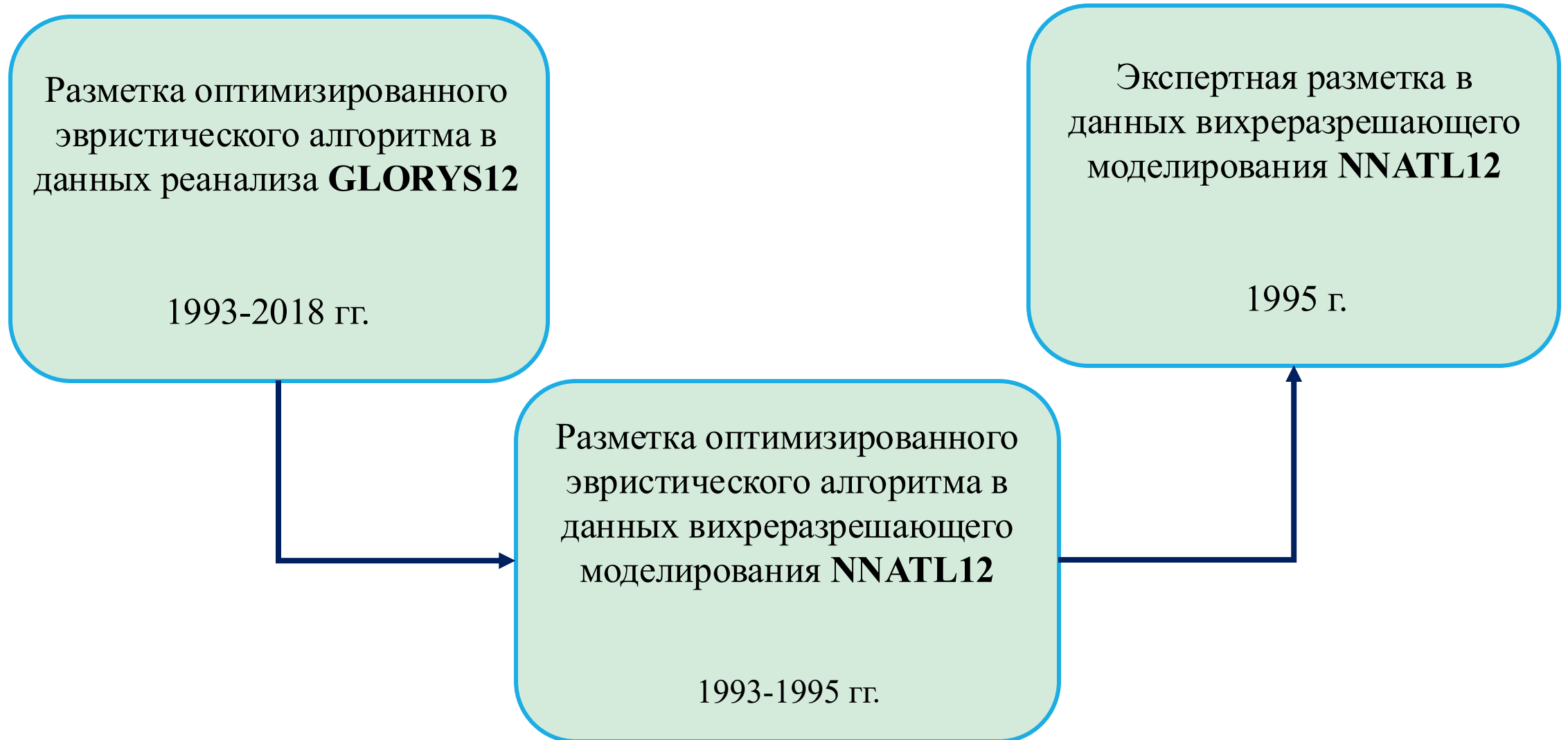
Метод	Качество	Скорость
Экспертный	1	50 часов
Эвристический	0.232	43,4 секунд
Оптимизированный эвристический	0.352	40,3 секунд

Нейросетевой метод

Архитектура U-Net

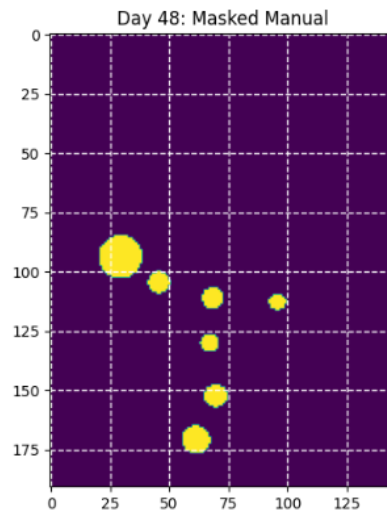


Нейросетевой метод

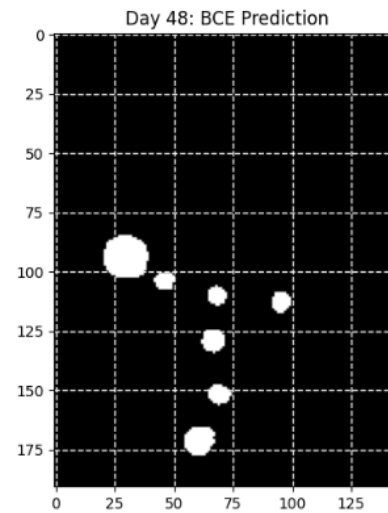


Визуализация результатов

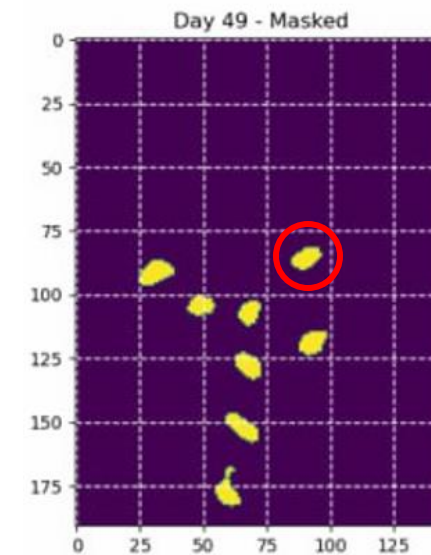
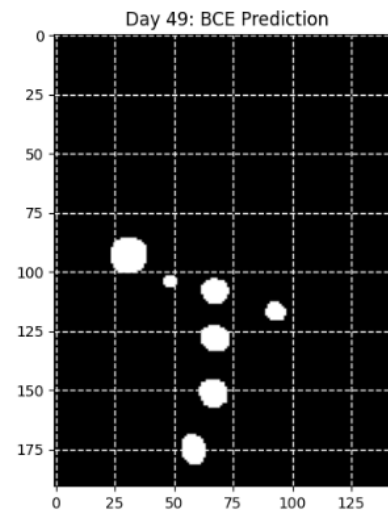
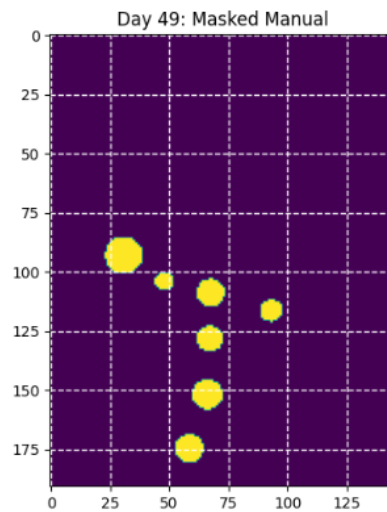
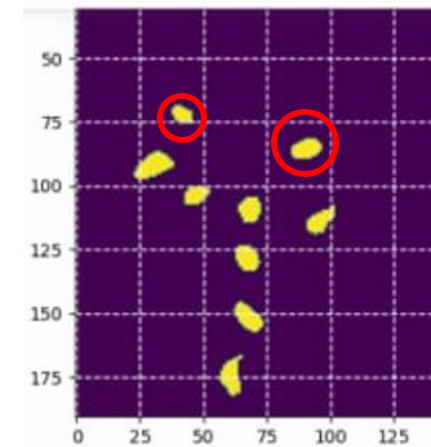
Экспертный



Нейросетевой



Эвристический



Результаты

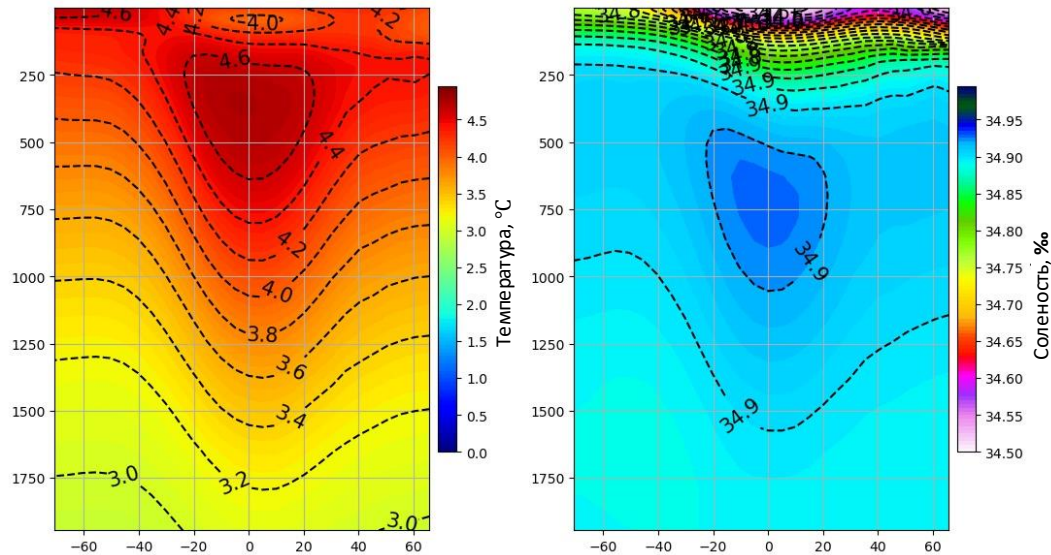
Метод	Качество	Скорость
Экспертный	1	50 часов
Эвристический	<u>0.232</u>	43,4 секунд
Оптимизированный эвристический	0.352	40,3 секунд
Нейросетевой	<u>0.904</u>	4,6 секунд

Оптимизация по F1-мере привела к улучшению качества идентификации на **52%**

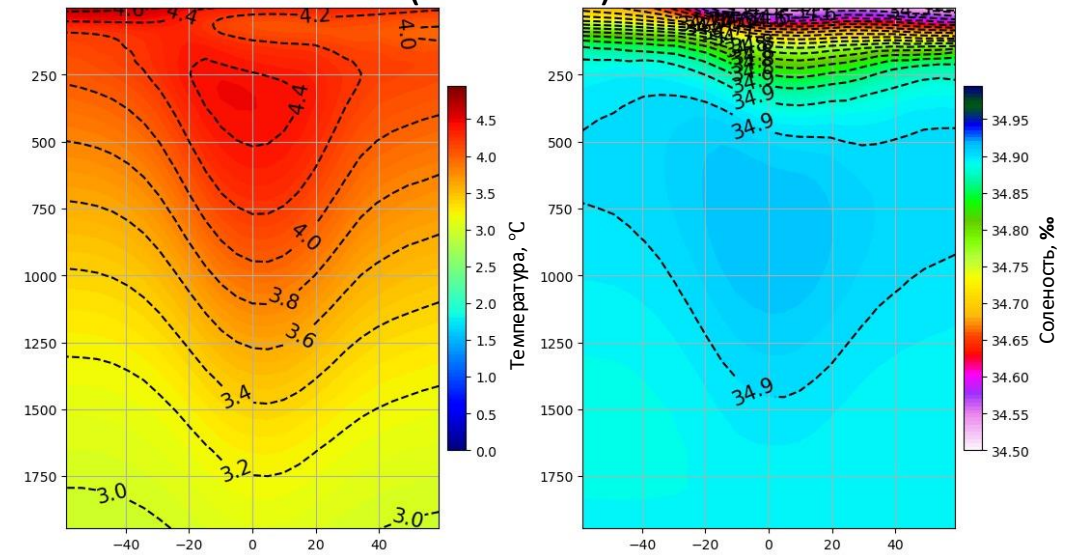
Качество нейросетевого алгоритма превосходит эвристический до оптимизации на **290%** и на **157%** по сравнению с эвристическим алгоритмом после оптимизации

Анализ вертикальной структуры вихрей

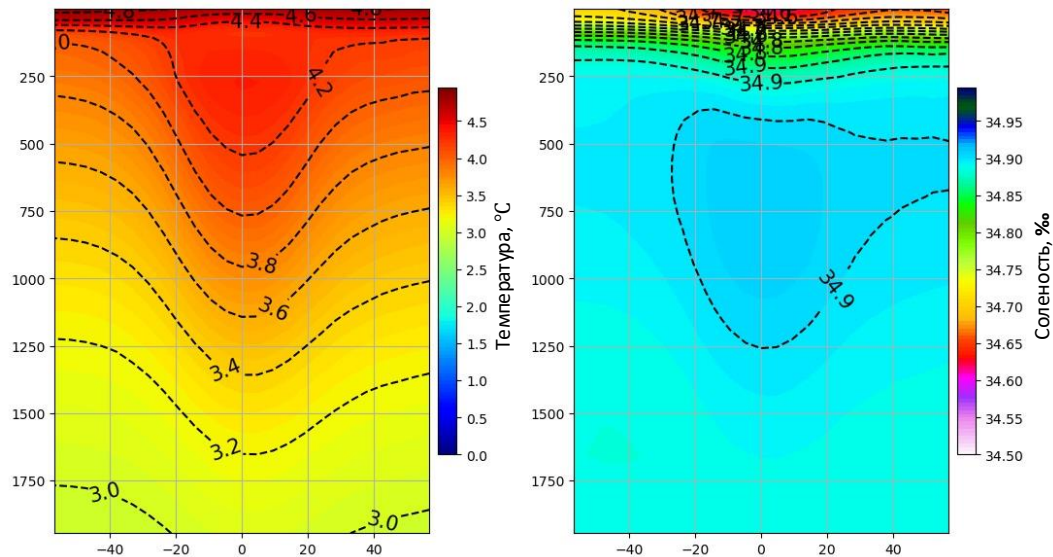
Эвристический алгоритм (NNATL12)



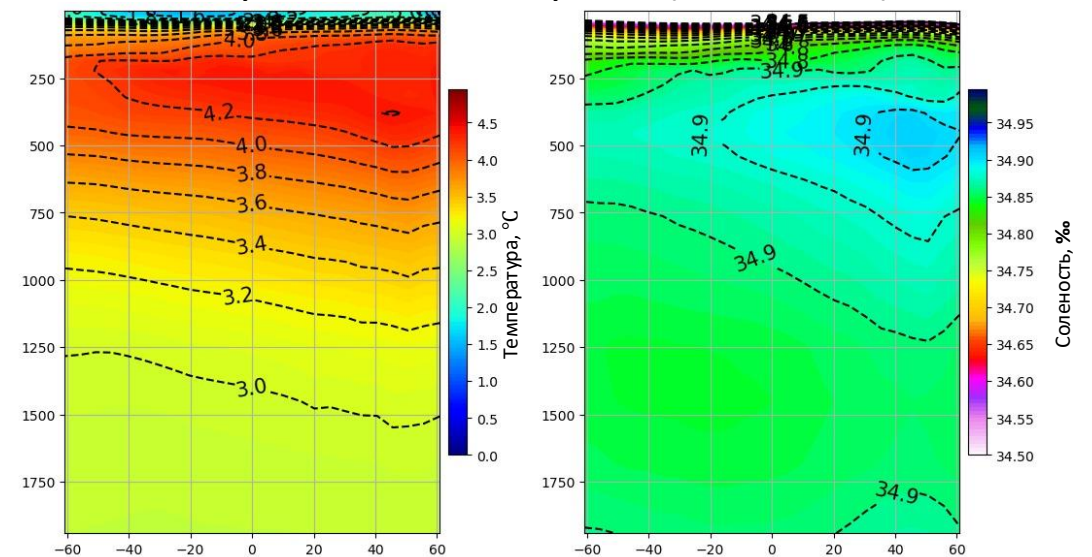
Оптимизированный Эвристический алгоритм (NNATL12)



Нейросетевой алгоритм (NNATL12)



Нейросетевой алгоритм (GLORYS12)



Заключение и перспективы

- Разработан, применен и оптимизирован эвристический метод детектирования колец Ирмингера в данных численного моделирования. (повысило качество на 52%)
- В качестве альтернативы разработан и применен нейросетевой метод, который показал качество идентификации, значительно превышающее опорные методы и оптимизированный эвристический метод. (повысило качество еще на 157%)
- Выявлено, что в данных GLORYS12 вертикальная структура колец Ирмингера более низкого качества по сравнению с вертикальной структурой в NNATL12
- Установлено, что выбор метода идентификации сильно влияет на характеристики вихрей, попадающих в выборку. Пороговые методы склонны либо пропускать менее интенсивные вихри, либо детектировать множество шума, и в обоих случаях искажают физическую картину. Нейросетевой подход позволяет идентифицировать как интенсивные, так и слабо выраженные вихри на разных стадиях эволюции.
- Разработанная методика обладает высокой степенью универсальности и может быть применена не только к Кольцам Ирмингера, но и к **другим вихрям в различных районах Мирового океана**. Её ключевое преимущество заключается в том, что для адаптации к новому региону или типу вихревых структур требуется наличие эталонной выборки. Это позволяет масштабировать метод на глобальный уровень и использовать его как гибкий инструмент в задачах мониторинга и изучения вихревой активности, динамики водных масс и процессов теплообмена в океане.