

Comparing Direct and Autoregressive Neural Forecasting Strategies for Black Sea Ocean State Prediction at Sub-Seasonal Horizons

Mikhail Borisov¹ Mikhail Krinitskiy¹² Stanislava Vostrikova¹ Mikhail Vasiliev¹

¹ МФТИ (Московский физико-технический институт) ² ИО РАН им. П.П. Ширшова



Зачем нейросети для прогноза Чёрного моря?

Замкнутый бассейн, высокая экологическая чувствительность, нет ML-бенчмарка

ПРОБЛЕМА

Чёрное море — замкнутый бассейн с резким галоклином и уязвимой экосистемой

Прогнозы ТПО, солёности и течений на 30–60 суток нужны для оперативной океанографии и мониторинга загрязнений

Физический реанализ GLORYS12 довольно точен, но дорог: один прогноз — дни работы HPC

Нейросетевая модель способна показать сопоставимое качество, инференс выполняется за секунды

НАШ ПОДХОД

Переменные: ТПО, солёность, придонная T, глубина перемешанного слоя, течения u и v — 6 полей

Регион: Чёрное море 40–47.6° с.ш., 27.25–42.3° в.д., сетка 92×182, 1/12° (~9 км)

Обучение: GLORYS12 1993–2022 (ежедневно) · Тест: 2023–2024 — строго независимый

Три стратегии прогноза: direct-30, direct-60, rollout-1step — на двух архитектурах

Данные: реанализ GLORYS12 + спутниковая валидация

GLORYS12 – Обучение

Глобальный физический реанализ Copernicus Marine Service

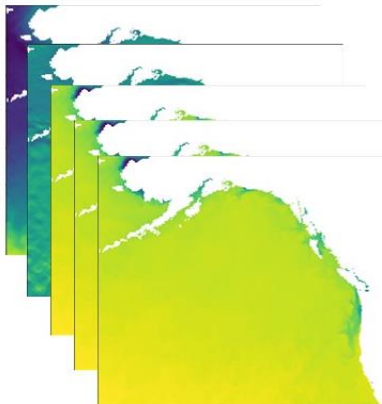
Период: 1993-01-01 – 2022-12-31 (ежедневные поля)

Разрешение: $1/12^\circ$ (~8–9 км) | Сетка: 92×182

Регион: Чёрное море $40\text{--}47.6^\circ\text{N}$, $27.25\text{--}42.3^\circ\text{E}$

Целевые переменные:

1. глубина перемешанного слоя
2. потенциальная температура
3. температура придонного слоя
4. зональные течения
5. меридиональные течения
6. солёность



Обучение 1993–2022 | Тест 2023–2024

Спутниковые данные – Валидация

SST

NOAA OISST v2

0.25° ежедневно

SSS

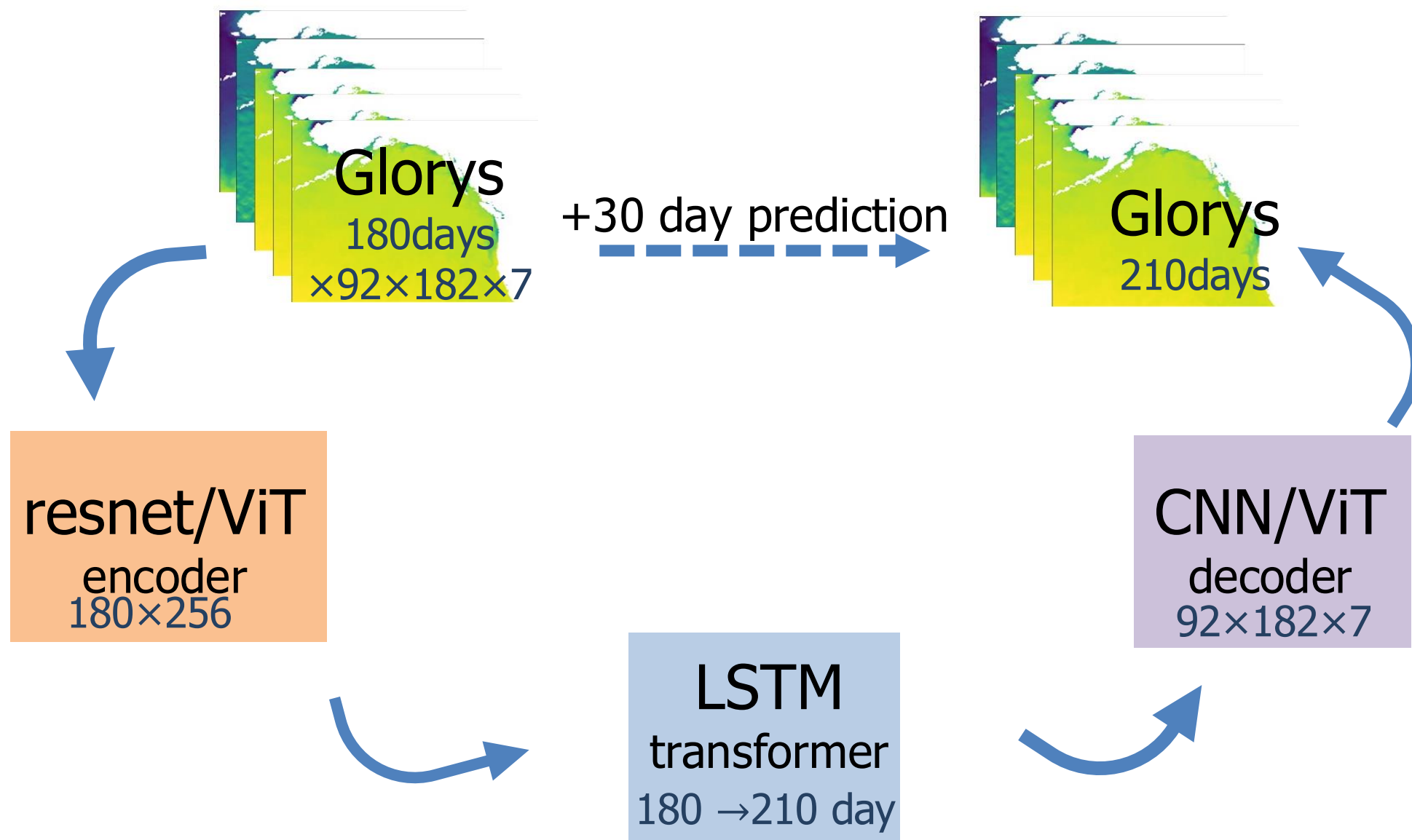
NASA SMAP L2c

0.25° орбитально

Подход к валидации:

- Все метрики на 2023–2024 годах | спутники и буи – независимые источники
- RMSE, MAE, Смещение – по всем валидным пикселям
- Годовые и сезонные карты отклонений
- Спутники и Argo полностью независимы от обучения

Общая схема пайплайна



Контрастное предобучение энкодера

Обучение пространственных представлений без разметки



Формирование пар для контрастного обучения

Положительные пары: одно поле в пределах ± 15 дней

Отрицательные пары: снимки > 45 дней разницы

Аугментации: пространственный кроп, отражение, гауссово размытие

Размерность: 256-D эмбединг на суточный снимок

MLP проектор: 4096 скрытых единиц

Энкодер A – ResNet-50: LARS | Батч 80 | LR $1.5e-4$

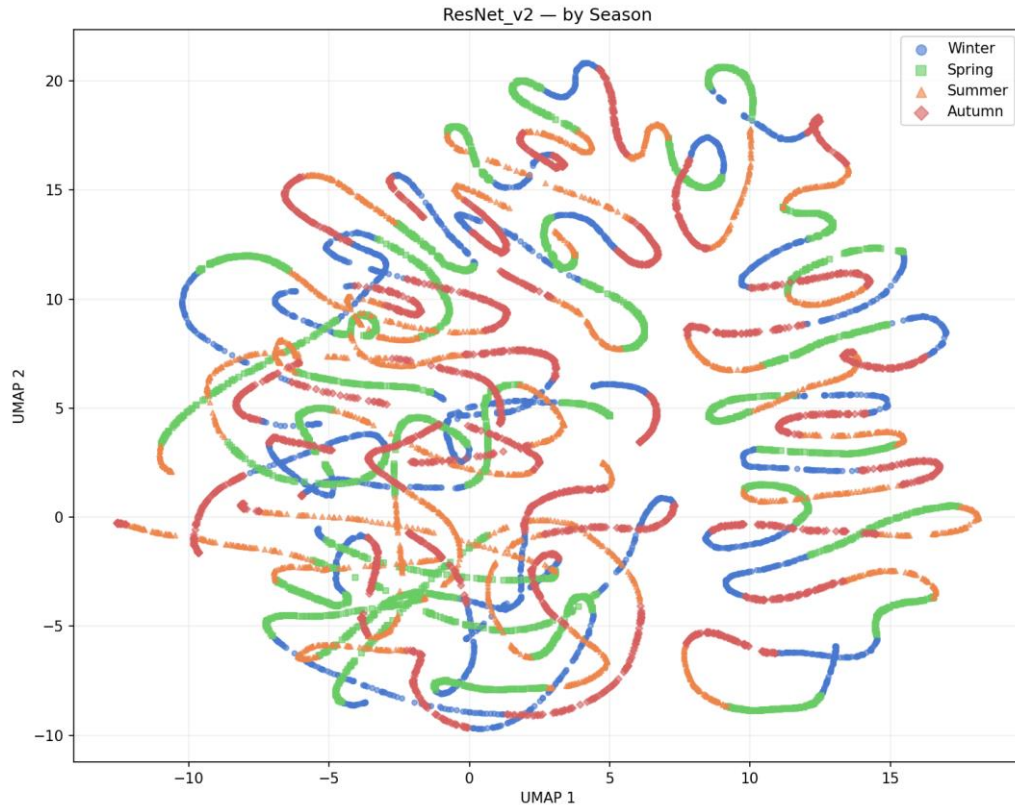
Энкодер B – ViT-Small: AdamW | Батч 64 | LR $1.5e-4$

Обучение: 200 эпох | GLORYS12 1993–2021

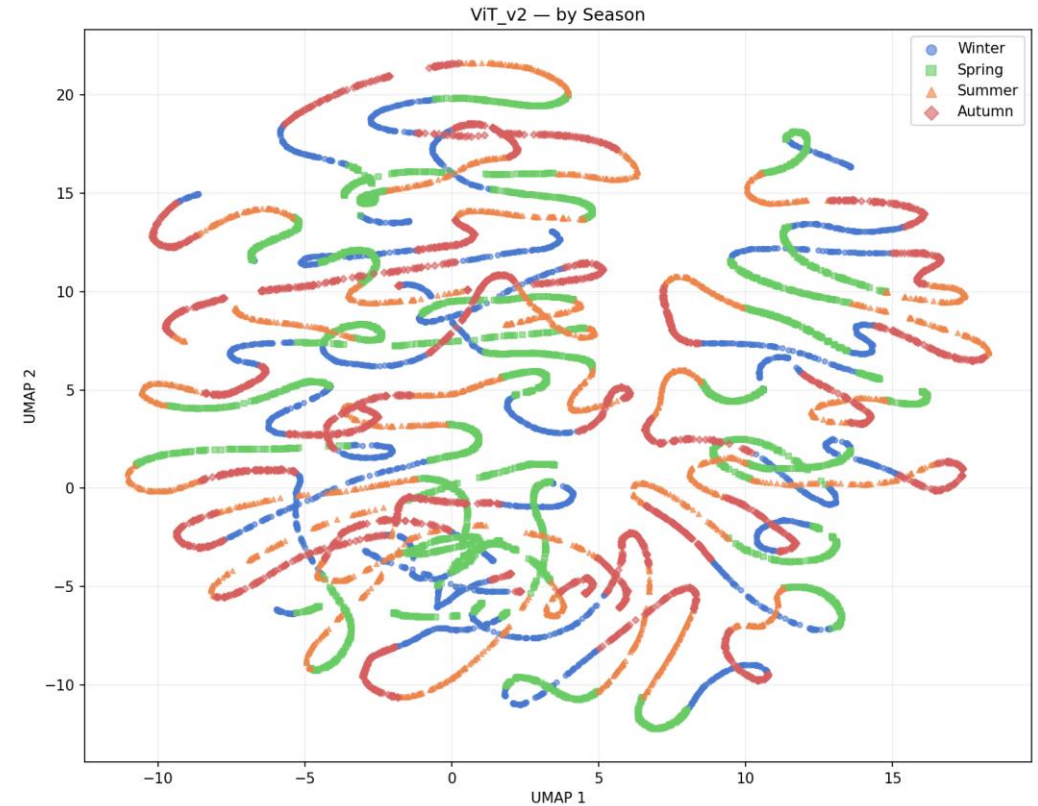
Разметка: не нужна

Что выучил энкодер? UMAP латентного пространства

Проекция эмбеддингов всех суточных полей 1993–2022, цвет — сезон



ResNet-50 — сложные петлевые траектории, сезоны перемешаны



ViT-Small — многомасштабные петли

Три стратегии прогноза — 6 конфигураций

Каждая стратегия реализована для обеих архитектур

V2 · Direct-30

Прогноз латента на +30 суток одним шагом

Энкодер → предиктор(180) → z_{+30}
→ декодер

Стабильное обучение

Лучшее качество на 30 сутках

V3 · Direct-60

Прогноз латента сразу на +60 суток

Более трудная одношаговая задача

Тот же пайплайн, дальше горизонт

Проверка предела прямого прогноза

V4 · Rollout-1step

Обучение на прогноз +1 сутки

На инференсе — авторегрессия 30 шагов с обратной связью через энкодер

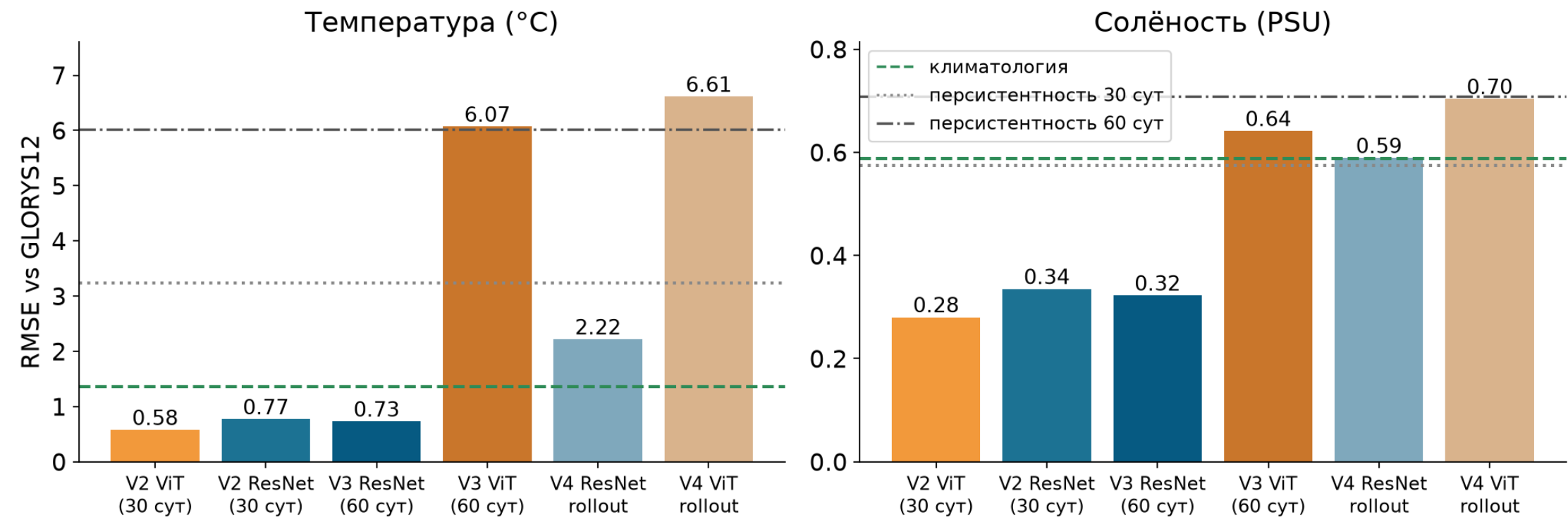
Накопление ошибки от шага к шагу

Физически привлекательно, но рискованно

RMSE против GLORYS12

Тест 2023–2024 · температура и солёность

RMSE шести конфигураций, тест 2023–2024

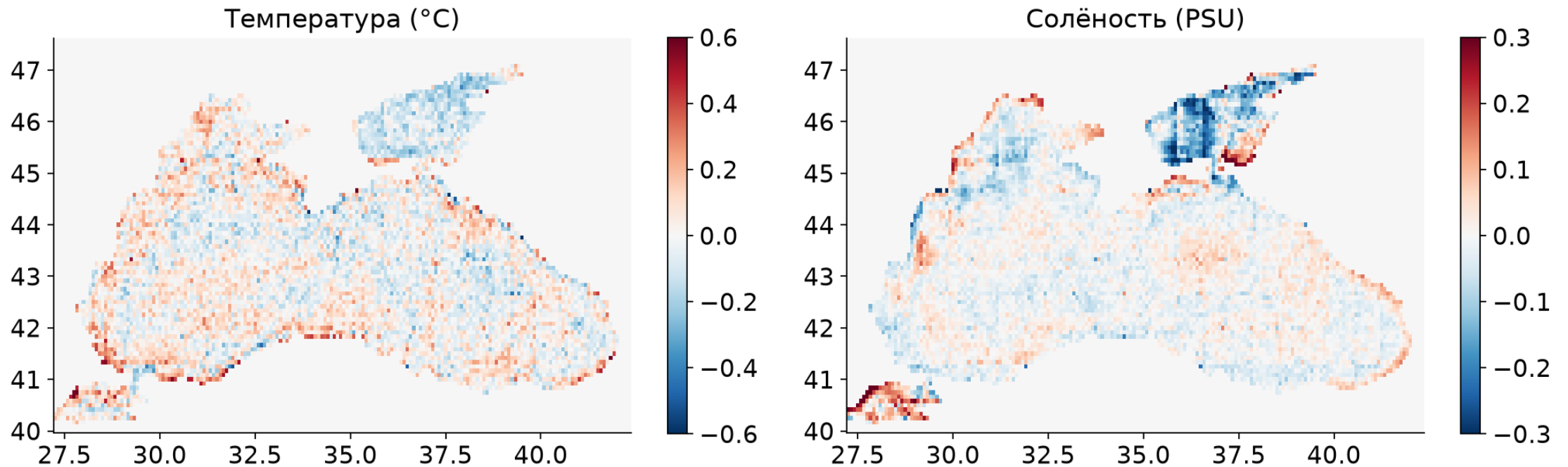


ТПО: V2 ViT 0.58°C · V3 ResNet 0.73°C · V3 ViT 6.07°C — коллапс · V4 rollout 2.22°C · persistence-30 3.24°C

Пространственное распределение ошибки – 30 суток

Прямой прогноз 30 сут (V2 ViT) · среднее смещение за 2023–2024

Среднее смещение 2023–2024 — V2 ViT (lead 30 сут)

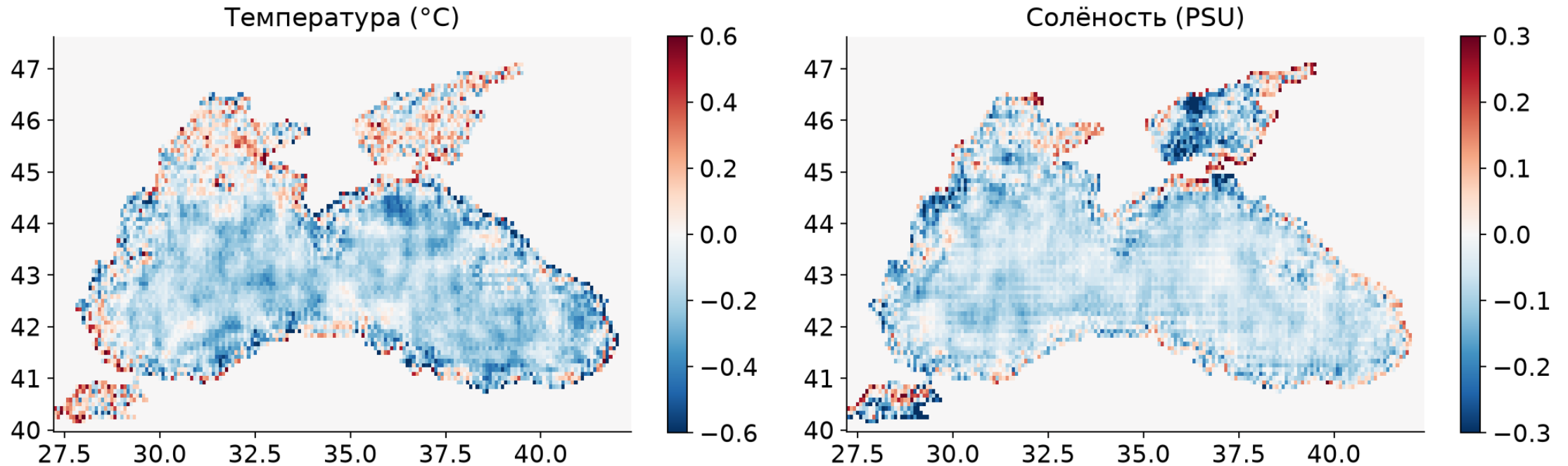


V2 ViT: смещение в пределах $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$, пространственно однородное

Пространственное распределение ошибки – 60 суток

Прямой прогноз 60 сут (V3 ResNet) · среднее смещение за 2023–2024

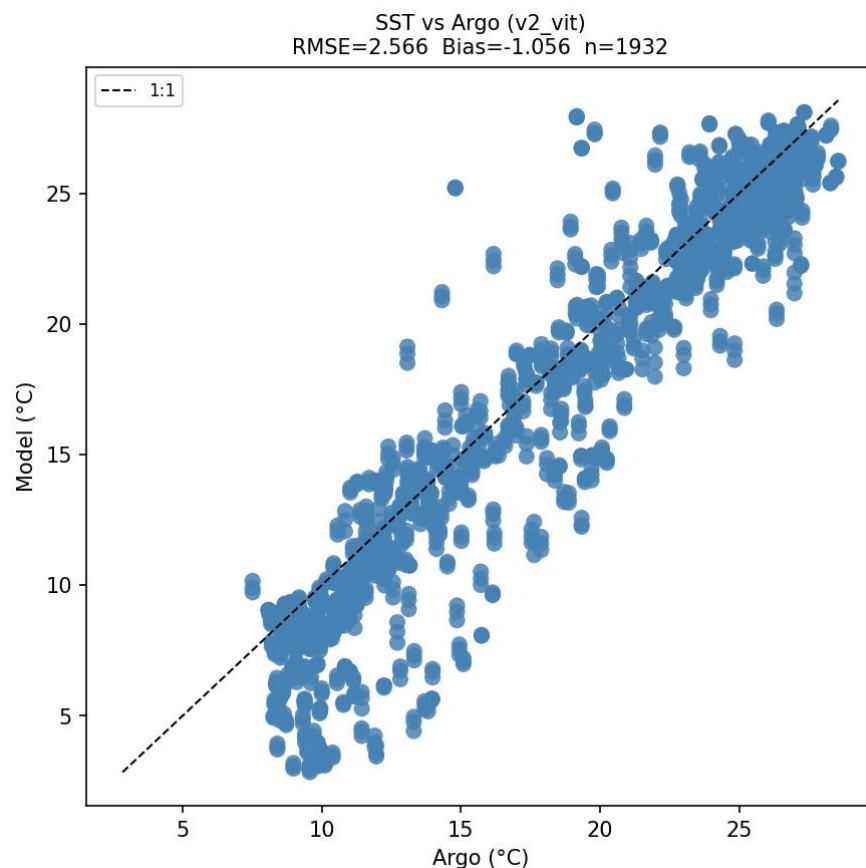
Среднее смещение 2023–2024 — V3 ResNet (lead 60 сут)



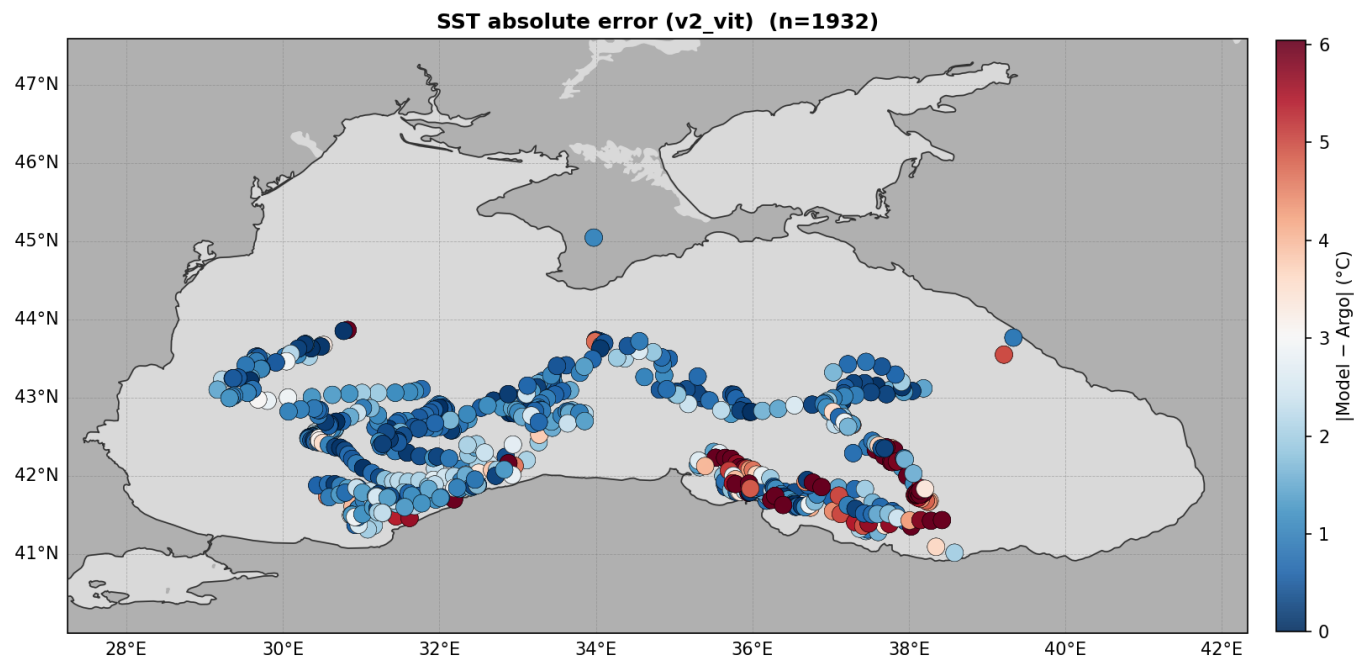
V3 ResNet: локальные зоны до -1.7°C — побережье и северо-западный шельф

Независимая валидация: буи Argo, тест 2023–2024

In-situ температура поверхностного слоя (≤ 20 дбар) · V2 ViT, lead 30 сут · 1932 сопоставления



Рассеяние: модель vs буй, ТПО

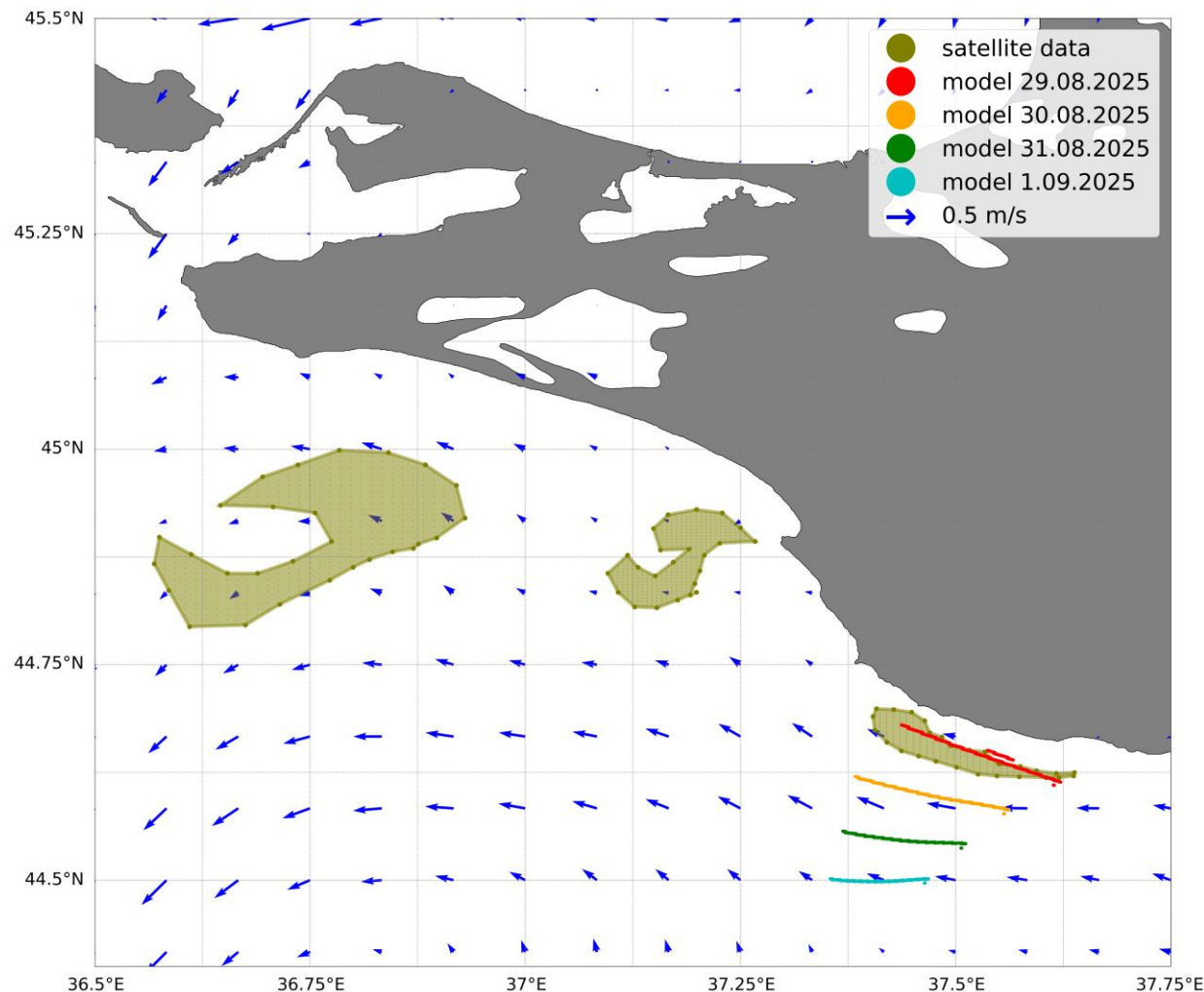


Абсолютная ошибка в точках всплытия

RMSE 2.57°C · смещение -1.1°C · точка-против-ячейки 9 км: включает ошибку репрезентативности

Лагранжев перенос нефтяного пятна

Керченский пролив, август 2025 · прогнозные течения → траектории частиц



МЕТОД

Прогнозные поля u и v подаются в лагранжеву модель переноса частиц (PyGNOME)

2500 частиц из точки условного разлива

Интегрирование траекторий по модельным течениям; сравнение со спутниковым контуром пятна

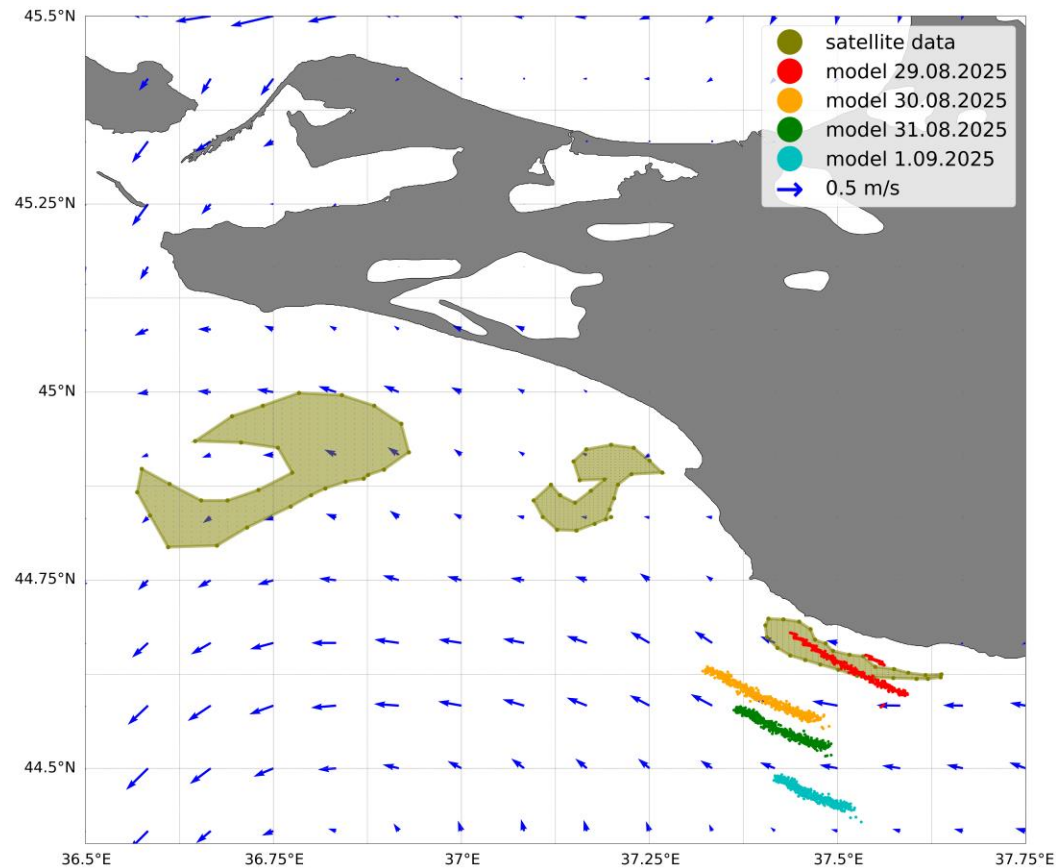
РЕЗУЛЬТАТ

Расстояние Вассерштейна: ~6 км на сутки +1, ~70 км на сутки +3

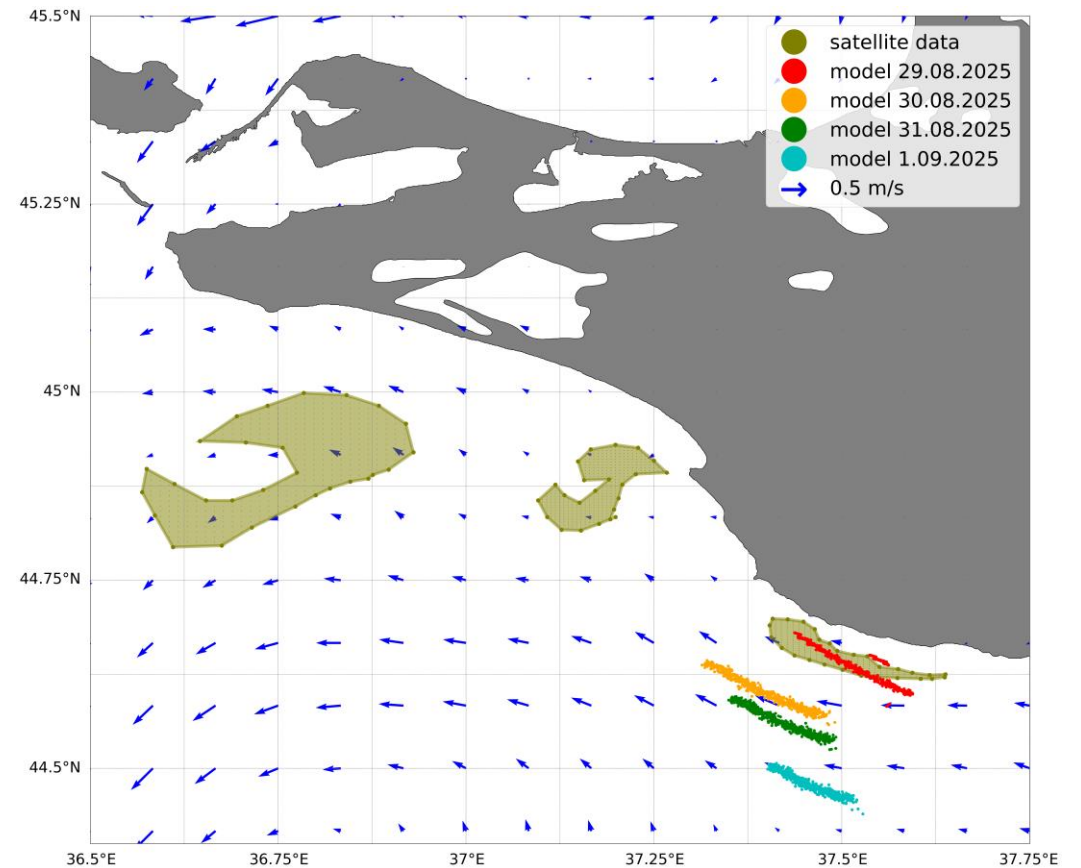
Прогнозные течения пригодны для оперативных задач переноса

Перенос пятна: чувствительность к горизонту прогноза

Сценарий у Керченского пролива · прогнозные течения ResNet (finetuned), lead 30 и 60 сут



Lead 30 сут



Lead 60 сут

Вассерштейн: ~5.5 км (+1 сут) · ~36 км (+2) · ~76 км (+4) — и почти не растёт от lead 30 к 60 (5.5 → 5.3 км)

Выводы

1. Прямой прогноз надёжнее rollout на примере прогноза на 30 суток.
2. Уязвимость архитектуры: ViT коллапсирует на direct-60 ($6.07^{\circ}\text{C} \approx$ персистентность), ResNet — нет
3. UMAP выявляет схожие геометрии - мультимасштабные траектории с петлями

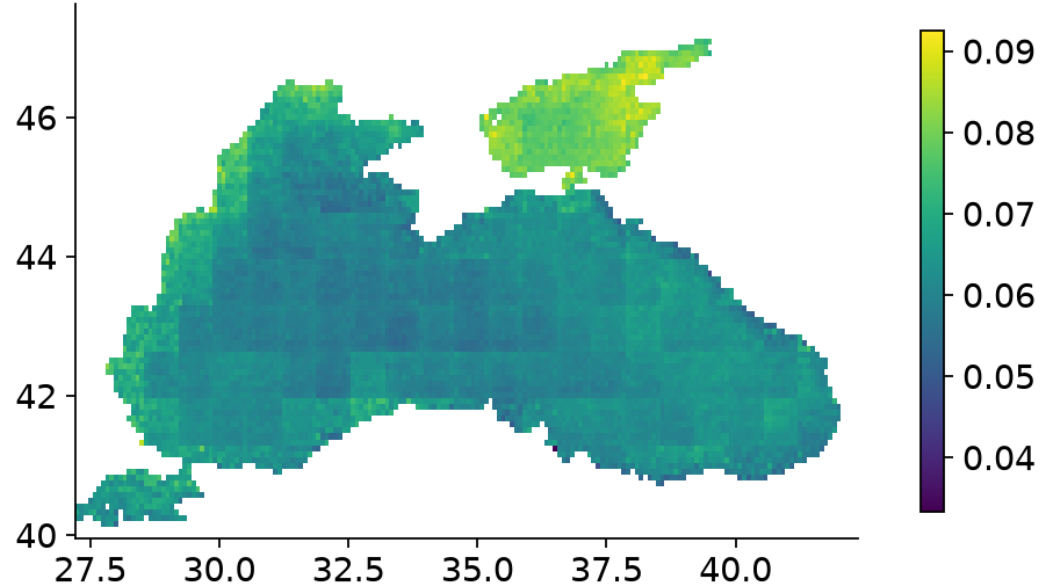
Перспективы и дальнейшее развитие:

- Горизонты 90+ суток
- Ветровое воздействие ERA5 на входе
- Другие бассейны
- Добавление вертикальных уровней GLORYS12

Оценка неопределённости: lagged ensemble

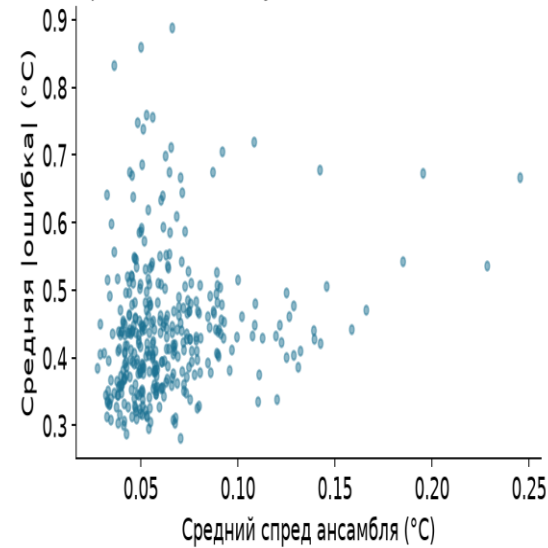
8 членов ансамбля — прогнозы одной даты со стартов $t_0-0 \dots t_0-7$ суток (leads 30–37)

Средний спред ансамбля — температура (°C)

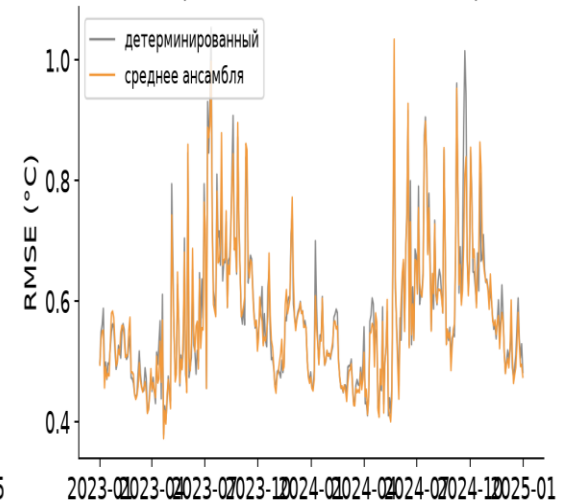


Lagged ensemble (8 членов, старты $t_0-0 \dots -7$), V2 ViT, температура

Спред vs ошибка, суточные значения ($r = 0.18$)



RMSE во времени: ансамбль vs один прогноз



ТПО, V2 ViT: RMSE детерм. 0.577°C → среднее по ансамблю 0.572°C · корреляция spread–|ошибка| = 0.18 · спред занижен (недодисперсия) — типично для lagged-ансамбля