

Параметризация субмезомасштабного вертикального потока плавучести с помощью свёрточной нейронной сети на основе крупномасштабных характеристик перемешанного слоя

В.Ю.Резвов^{1,2}, М.А.Криницкий^{1,2}

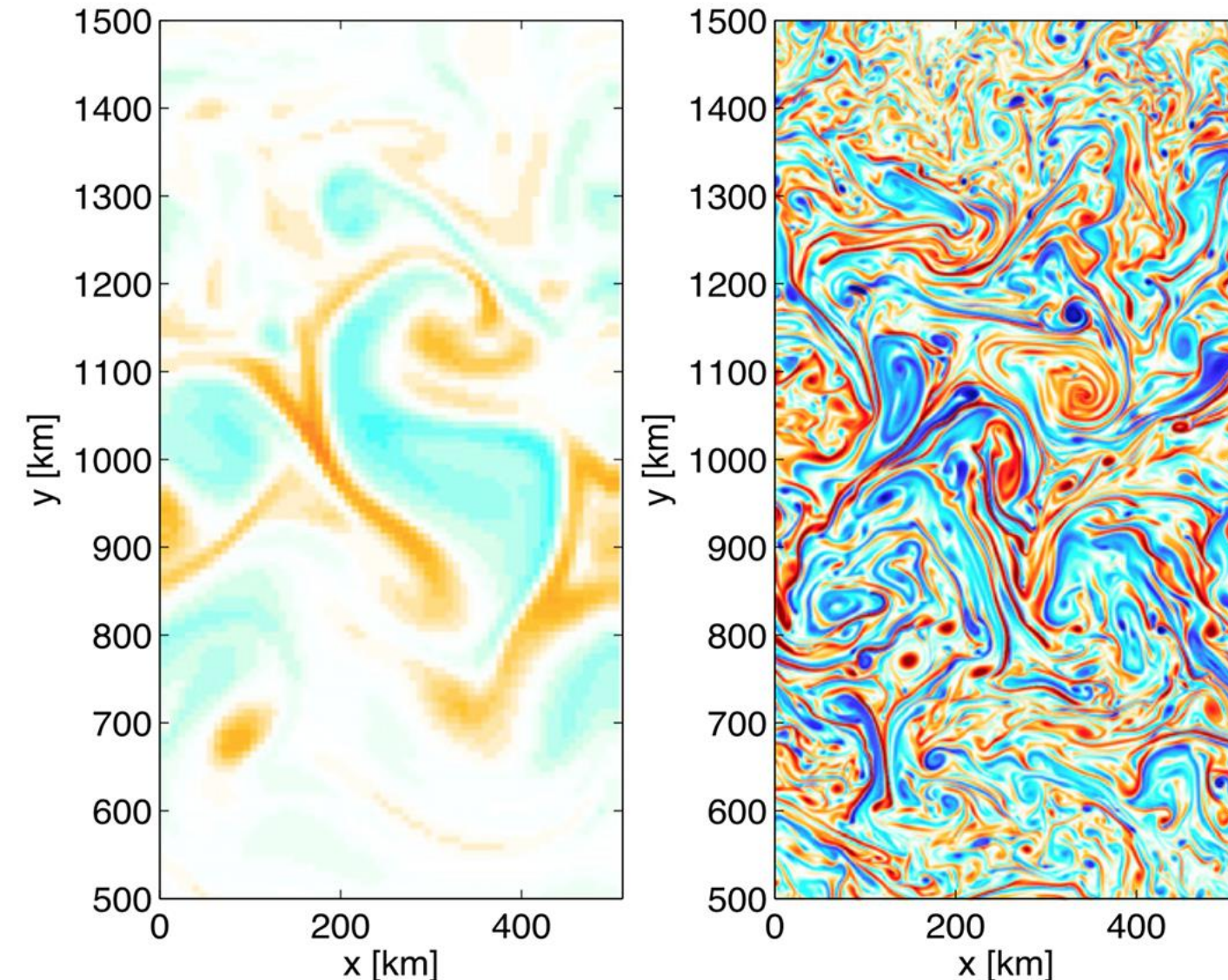
¹Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва

10-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ **DLCP2026**

Москва, 8 июля 2026 г.

Актуальность исследования



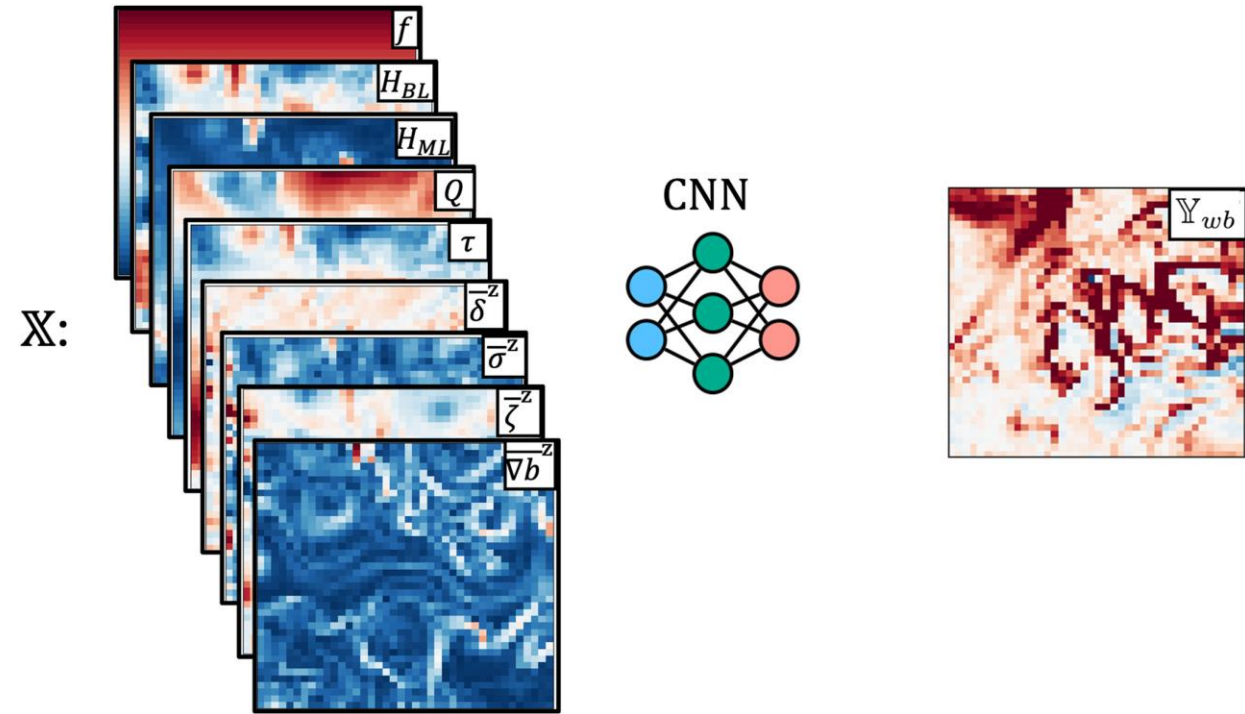
Разрешение ВЛИЯЕТ на результаты моделирования океана!

Вертикальная компонента завихренности на поверхности океана в идеализированных расчётах с разрешением ~ 8 км (слева) и ~ 1 км (справа).

Capet Xavier, Roulet Guillaume, Klein Patrice, Maze Guillaume (2016). Intensification of upper ocean submesoscale turbulence through Charney baroclinic instability. *Journal Of Physical Oceanography*. 46 (11). 3365-3384. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0050.1>

Актуальность исследования

- Перемешанный слой океана — ключевой посредник в обмене между океаном и атмосферой;
- Субмезомасштабные фронты и вихри (1–10 км) создают вертикальный поток плавучести, отвечающий за восстановление градиента плотности в перемешанном слое;
- В глобальных климатических моделях (GCM) субмезомасштабы не разрешены;
- Классическая параметризация даёт интегральную оценку, но не воспроизводит пространственную структуру потока, не учитывает нелокальные эффекты;
- **Перспективы нейросетевого подхода – CNN способны выучивать сложные нелинейные и нелокальные зависимости между крупномасштабными полями и подсеточным потоком [Bodner et al., 2025]**



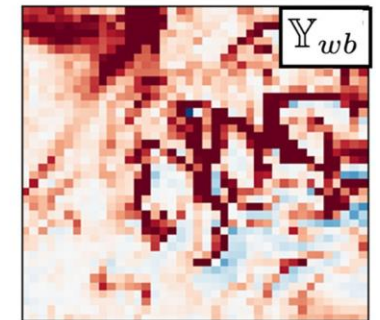
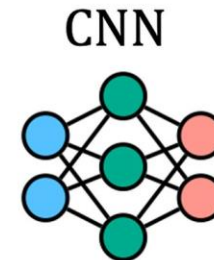
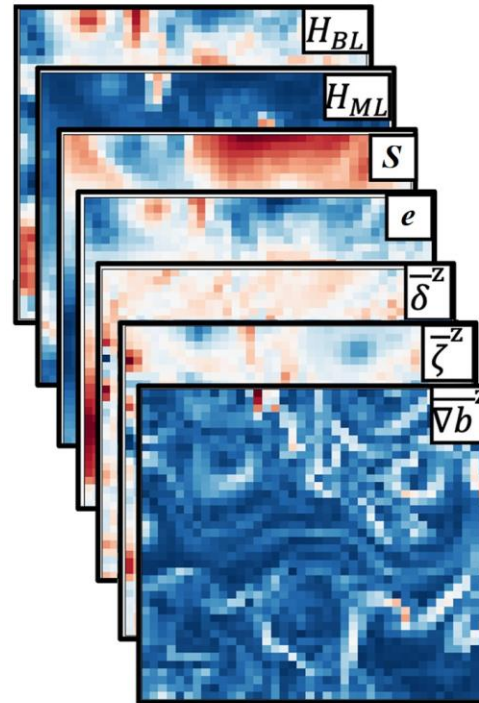
Bodner, A., Balwada, D., & Zanna, L. (2025). A data-driven approach for parameterizing ocean submesoscale buoyancy fluxes. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 17, e2025MS004991. <https://doi.org/10.1029/2025MS004991>

Цель работы

Построить нейросетевую параметризацию осреднённого по перемешанному слою субмезомасштабного вертикального потока плавучести по крупномасштабным характеристикам

Модуль горизонтального градиента плавучести $|\nabla b|$
 Вертикальная компонента относительной завихренности ζ
 Горизонтальная дивергенция δ
 Скорость деформации S
 Глубина перемешанного слоя H_{ML}
 Глубина турбулентного пограничного слоя H_{BL}
 Турбулентная кинетическая энергия e

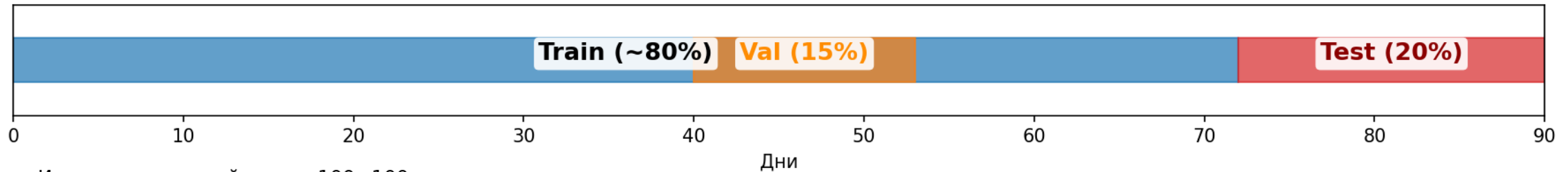
$\mathbb{X}$:



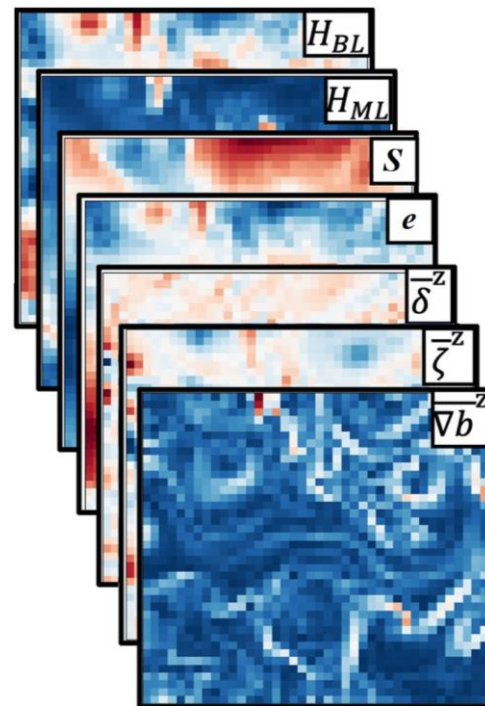
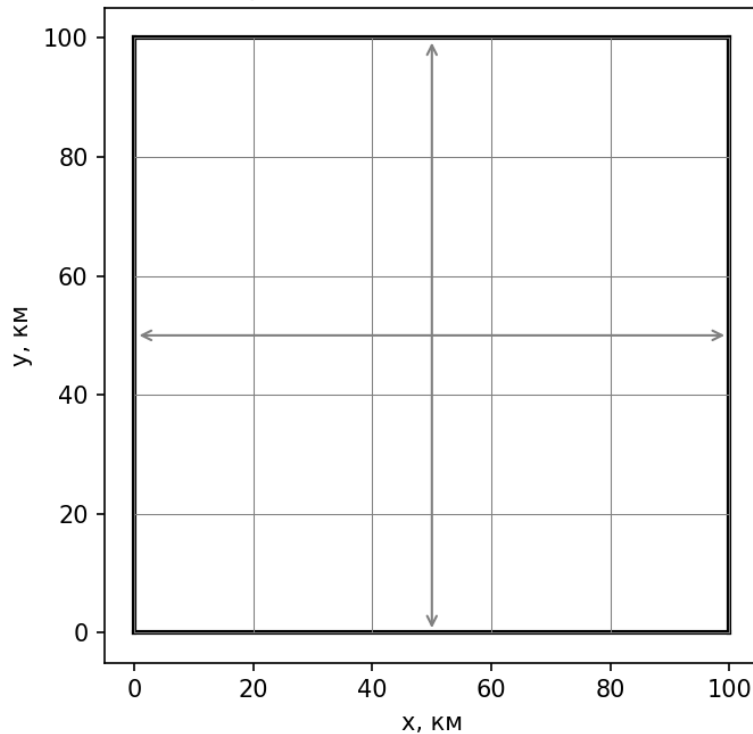
Используемые данные

Идеализированный численный эксперимент (Oceananigans)

Разбиение данных (534 шага, ~89 дней)

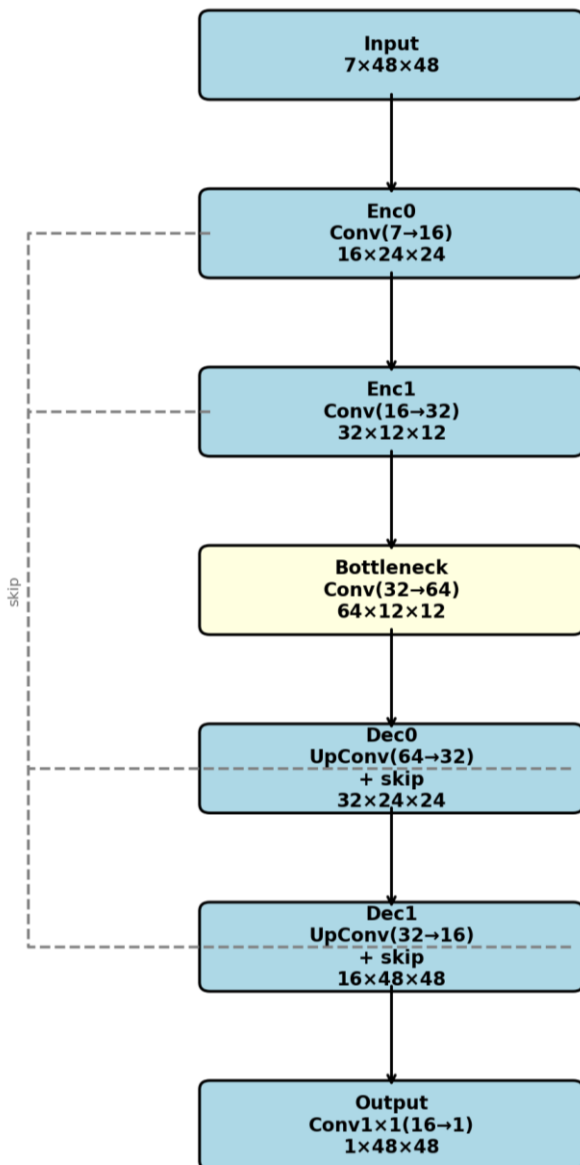


Идеализированный домен 100×100 км
(периодический, сетка 48×48)



Модуль горизонтального градиента плавучести $|\nabla b|$
 Вертикальная компонента относительной завихренности ζ
 Горизонтальная дивергенция δ
 Скорость деформации S
 Глубина перемешанного слоя H_{ML}
 Глубина турбулентного пограничного слоя H_{BL}
 Турбулентная кинетическая энергия e

Конфигурация обучения нейросетевой модели



Глубина: 2 уровня сжатия/восстановления

Всего параметров: ~100 тыс.

Активации: ReLU

Нормализация: отсутствует (BatchNorm не используется)

Регуляризация: weight decay 1e-4, без dropout

Функция потерь: MSE

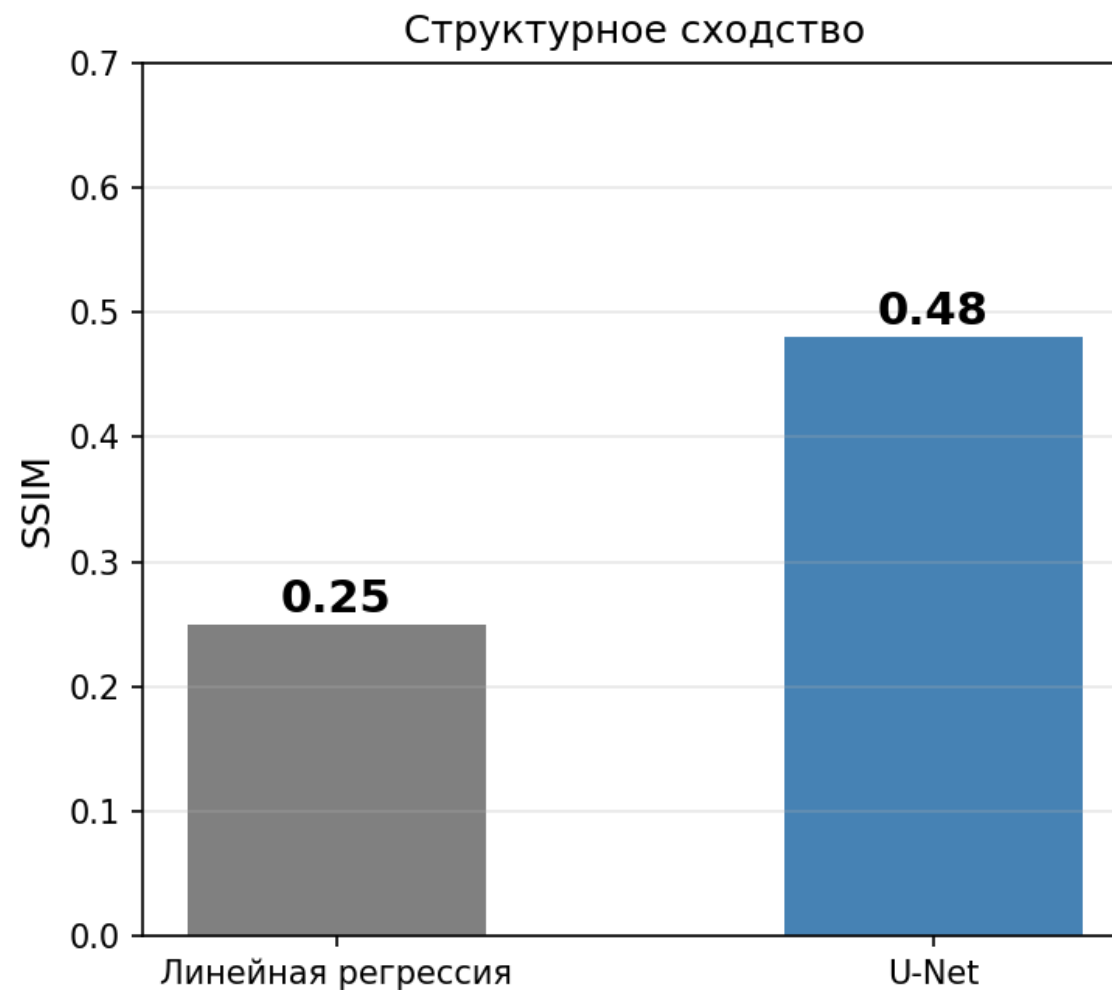
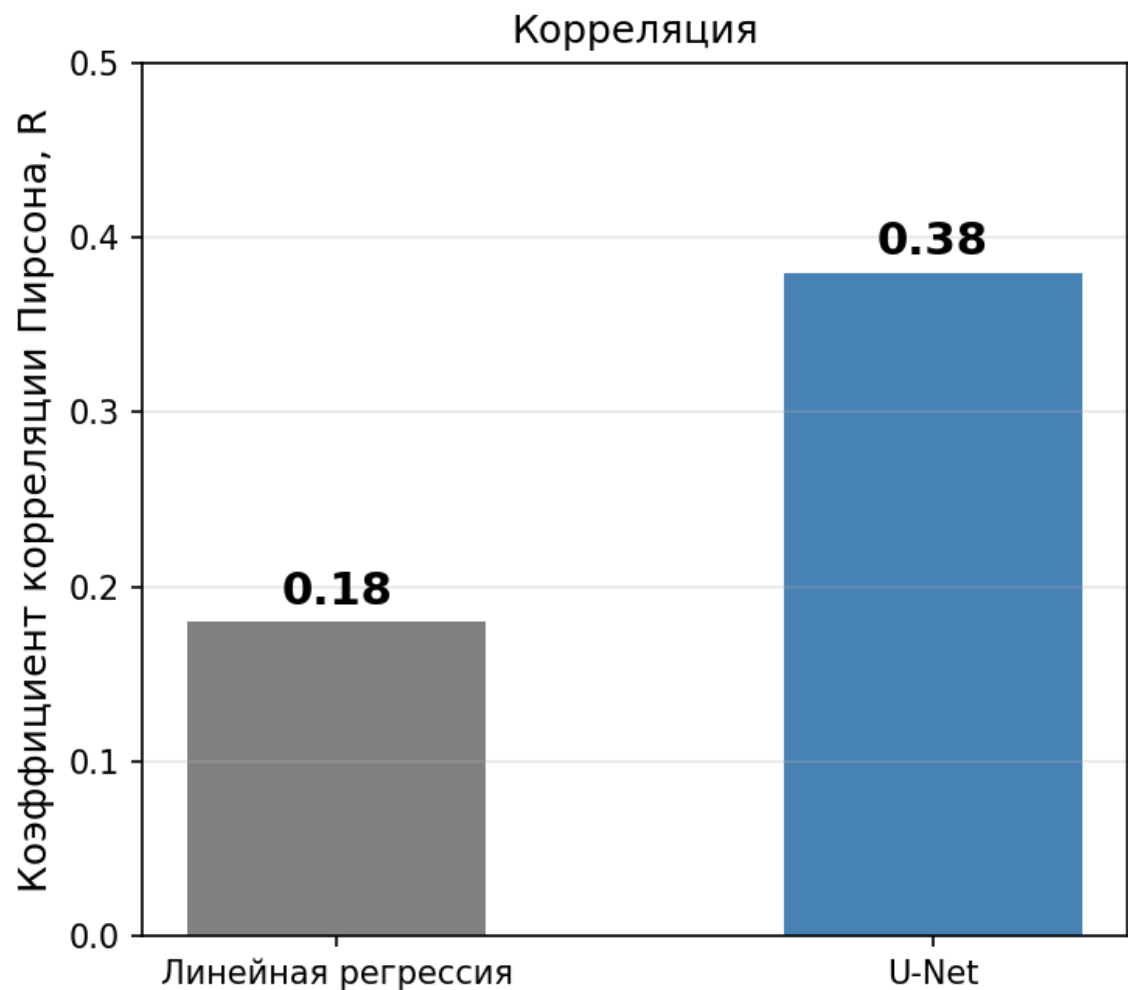
Оптимизатор: Adam, lr=0.001

Расписание lr: CosineAnnealingWarmRestarts ($T_0=50$, $T_{mult}=2$)

Эпохи: 250

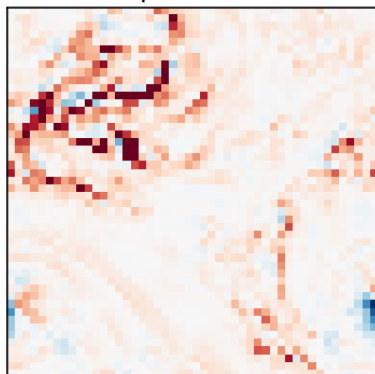
Batch size: 16

Результаты

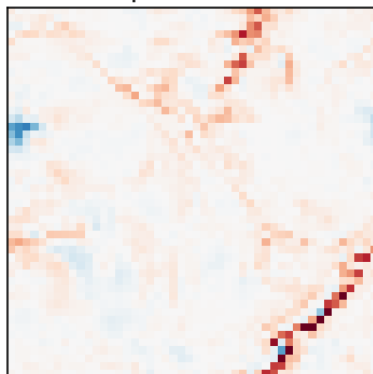


Результаты

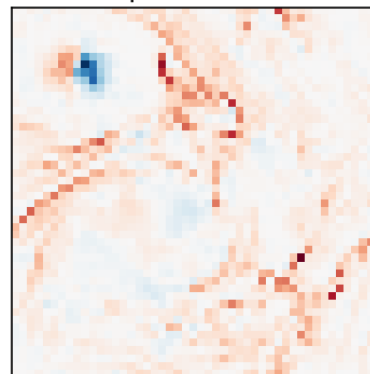
Train | True (t=57)



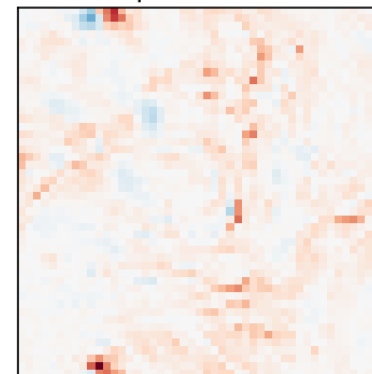
Train | True (t=327)



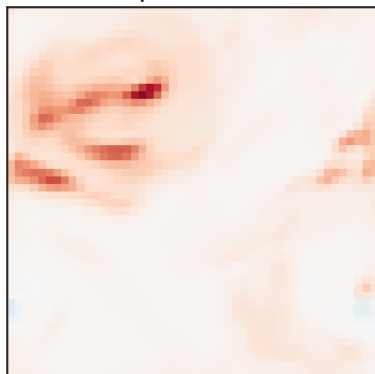
Test | True (t=430)



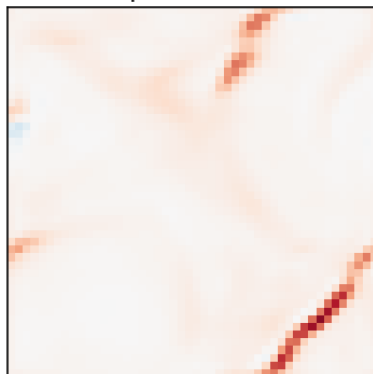
Test | True (t=521)



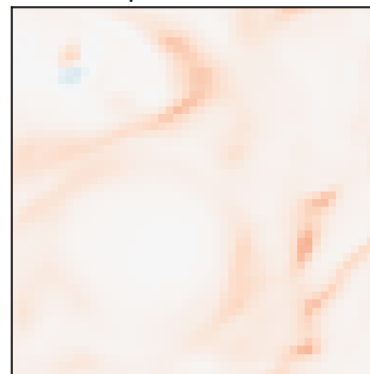
Train | Pred (t=57)



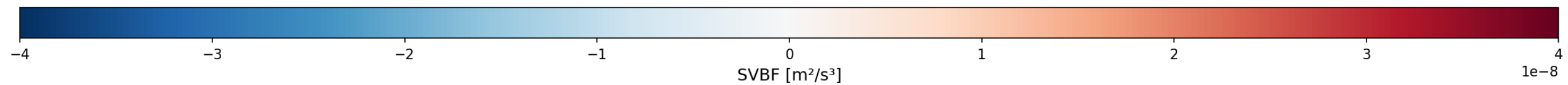
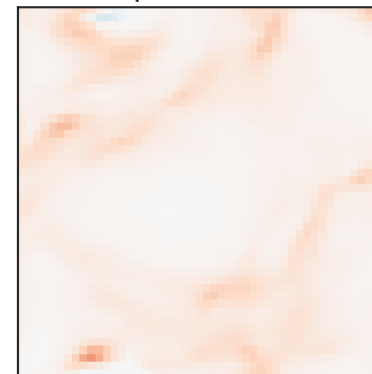
Train | Pred (t=327)



Test | Pred (t=430)

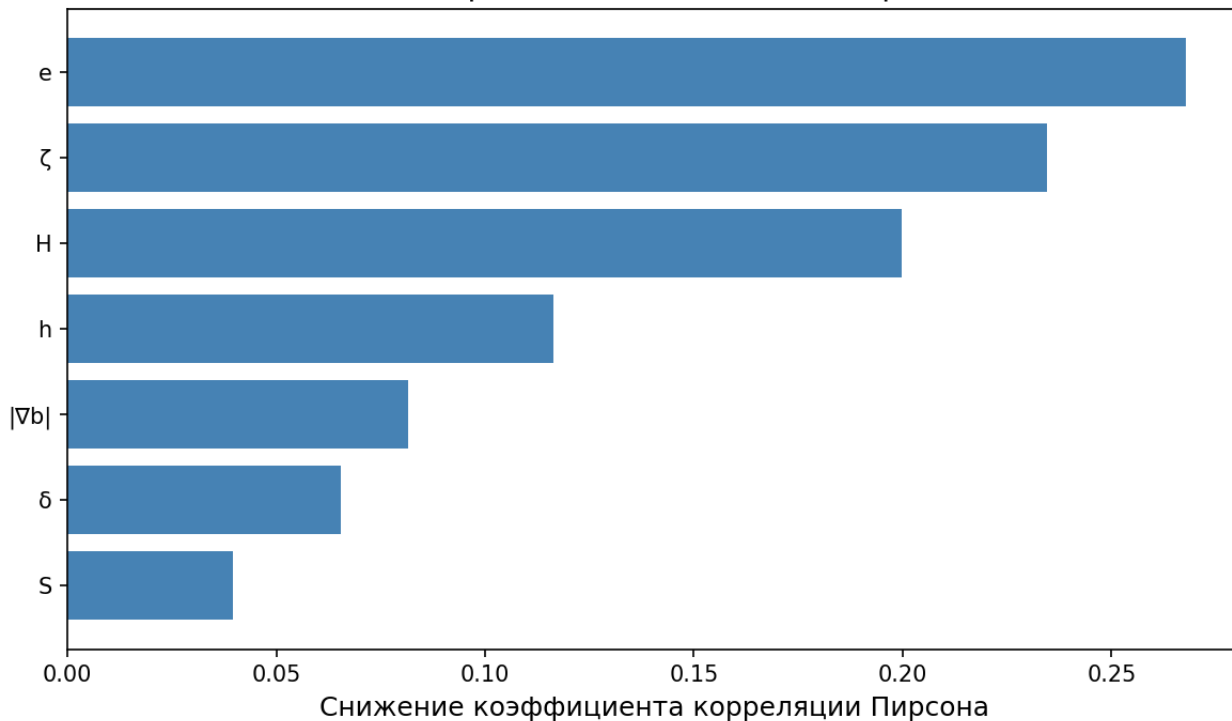


Test | Pred (t=521)



Результаты

Важность признаков (Permutation Importance)



В идеализированном периодическом домене локальные вихревые характеристики и турбулентная энергия важнее крупномасштабной деформации.

$$S = \sqrt{(\overline{u_x^z} - \overline{v_y^z})^2 + (\overline{v_x^z} + \overline{u_y^z})^2}$$

Роль **S**, отмеченная в глобальных исследованиях [Bodner et al., 2025], здесь менее выражена из-за отсутствия сильных фронтов.

Выводы и дальнейшая работа

U-Net (depth=2, base=16) предсказывает осреднённый SVBF с корреляцией Пирсона 0.38, тогда как линейная регрессия даёт 0.18. Переход к нелинейной пространственной модели более чем вдвое увеличивает объяснённую дисперсию.

Модель воспроизводит крупномасштабную структуру поля (знак, форму и расположение основных пятен потока), но сглаживает мелкомасштабные детали и занижает экстремальные значения.

Наиболее важные предикторы: завихренность (ζ), турбулентная кинетическая энергия (e) и глубина перемешанного слоя (H). Роль деформации (S) в идеализированном домене оказалась менее выраженной, чем в глобальных исследованиях.

Выводы и дальнейшая работа

Расширение набора предикторов: включить компоненты градиента плавучести ($\partial b / \partial x$, $\partial b / \partial y$) — это потенциально улучшит воспроизведение мелкомасштабной изменчивости.

Увеличение длины временного ряда для охвата более широкого спектра синоптических ситуаций и снижения переобучения.

Предсказание вертикального профиля SVBF с добавлением глубины как дополнительного признака — переход от осреднённой величины к полноценной вертикальной структуре параметризации.