



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ СУДОВОГО НАВИГАЦИОННОГО РАДАРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

А.И. Суслов, М.А. Криницкий, А.В. Гавриков,
М.А. Борисов, Н.Д. Тилинина, В. Ю. Резвов

Актуальность

Ветровые волны:

- Ключевой компонент климатической системы
- Важный фактор взаимодействия океана и атмосферы
- Участвуют в обмене энергией в пограничном слое

Влияние морского волнения:

- Риск для судоходства и береговой инфраструктуры

Проблемы мониторинга:

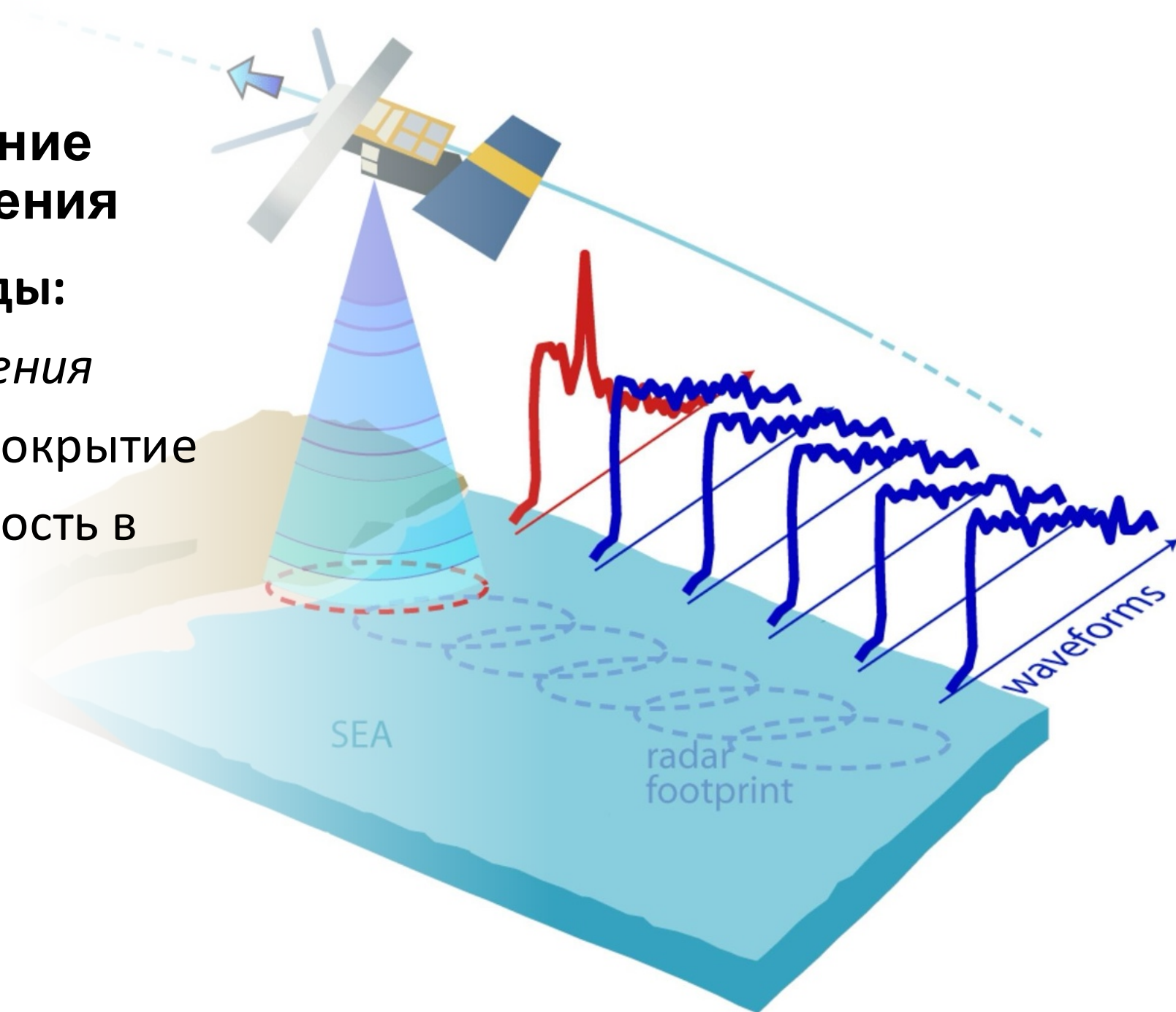
- Проблема непрерывного и надёжного мониторинга волнения остаётся

Методы Измерение ветрового волнения

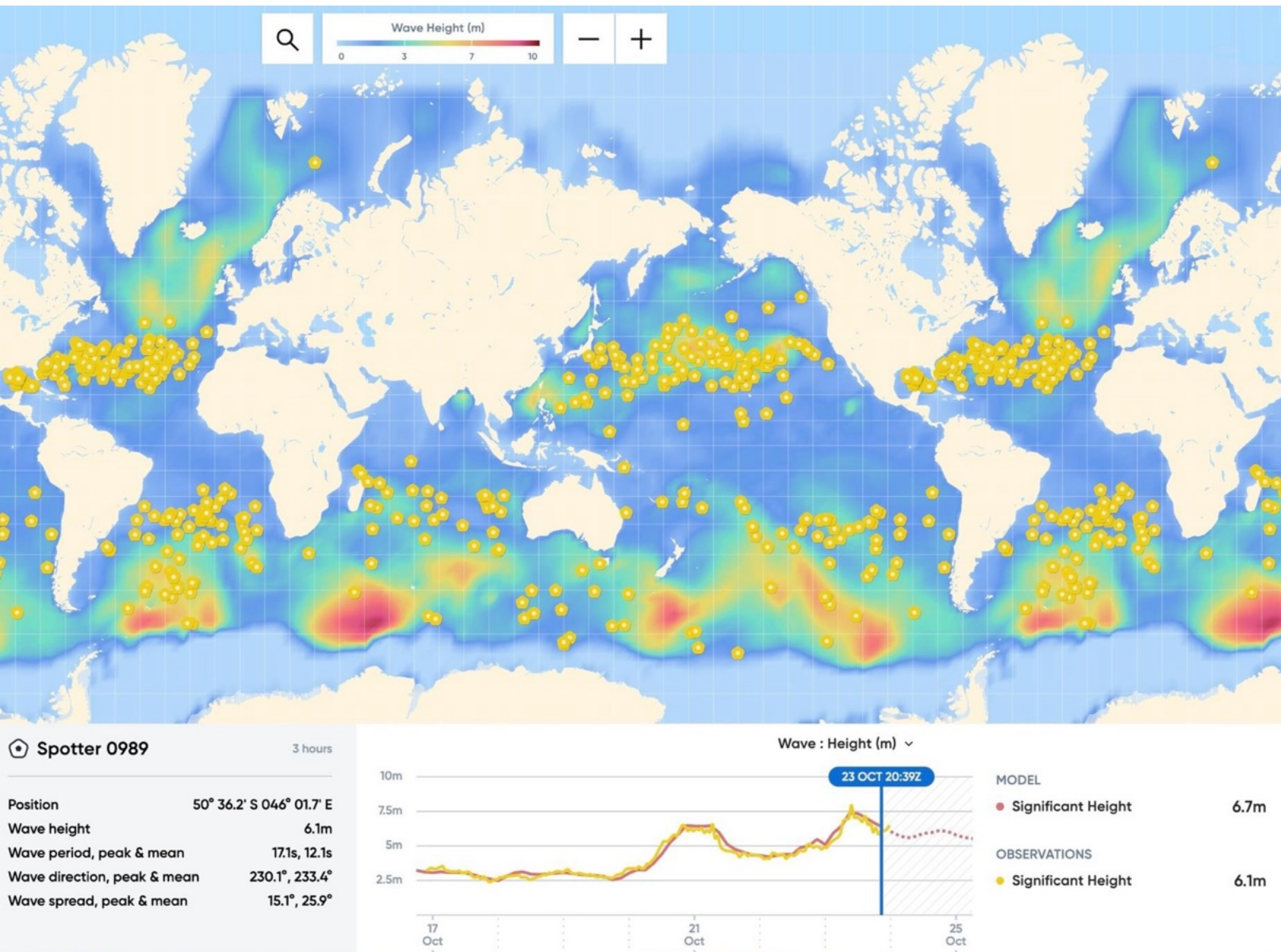
Дистанционные методы:

Спутниковые наблюдения

- Плюсы: Глобальное покрытие
- Минусы: Низкая точность в штормовых условиях



Методы измерения ветрового волнения



Волномерные буи

Плюсы:

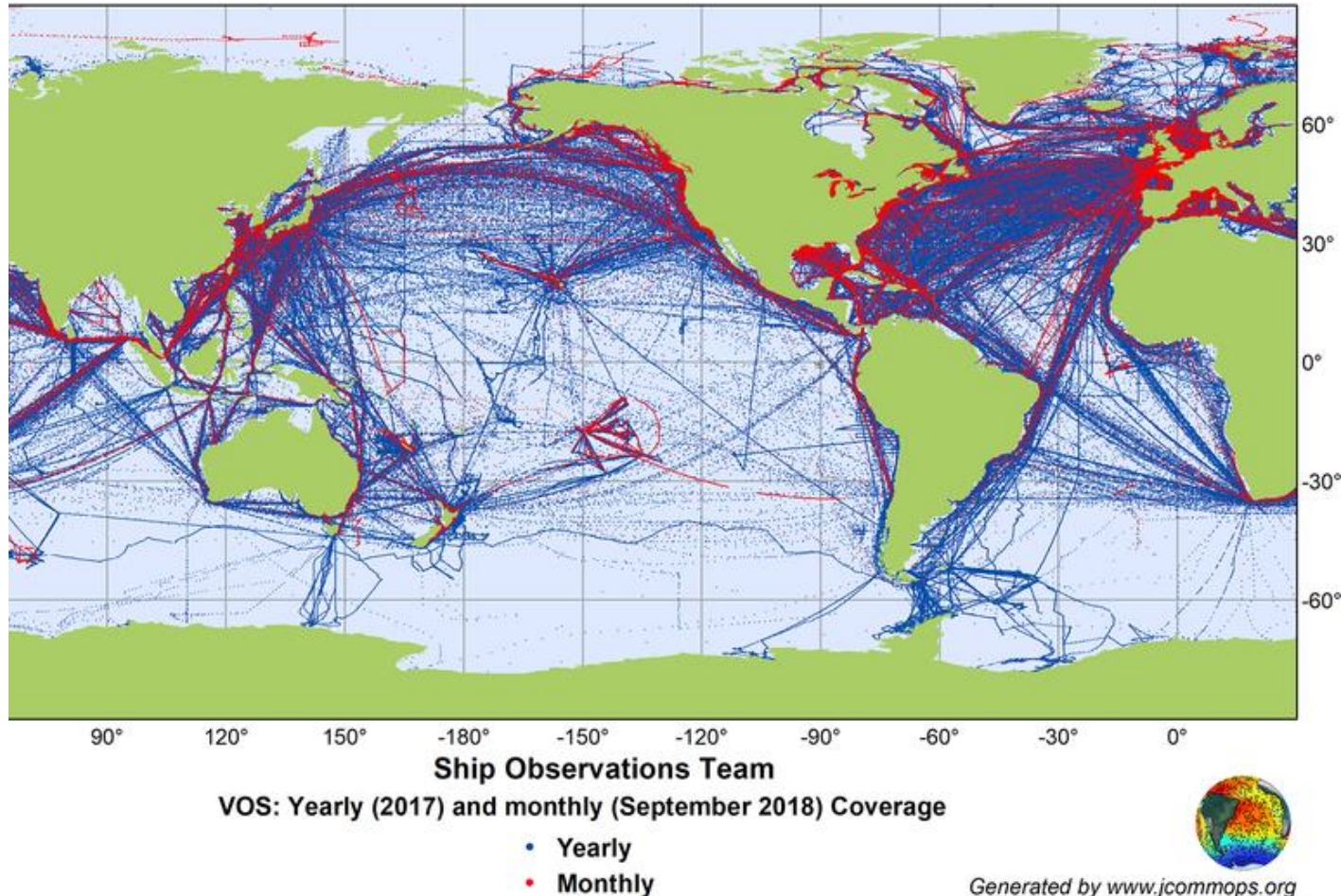
- Высокая точность

Минусы:

- Локальность измерений



Методы измерения ветрового волнения



Визуальные наблюдения (VOS):

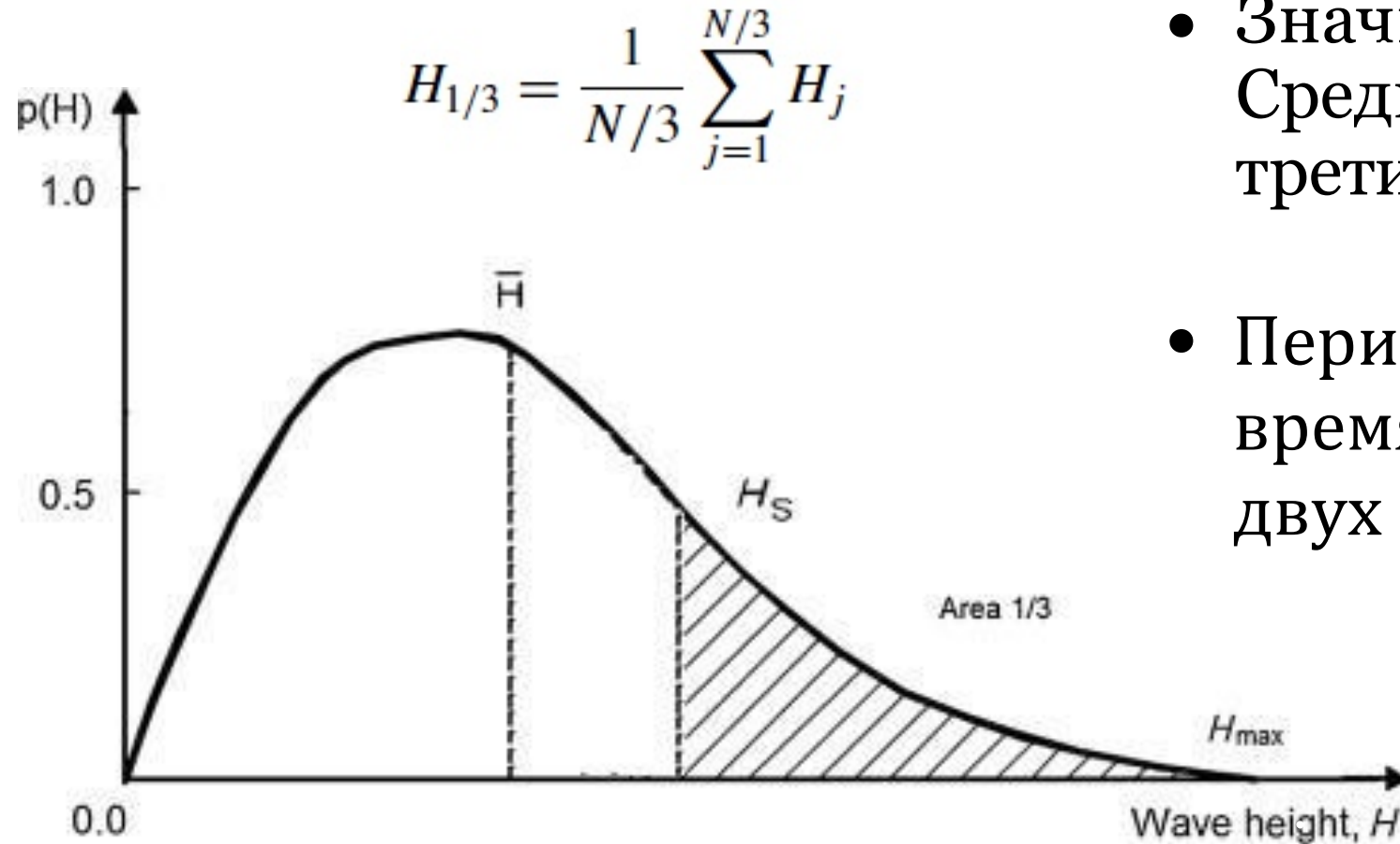
Плюсы:

- Данные с 1784 года, охватывают отдалённые районы

Минусы:

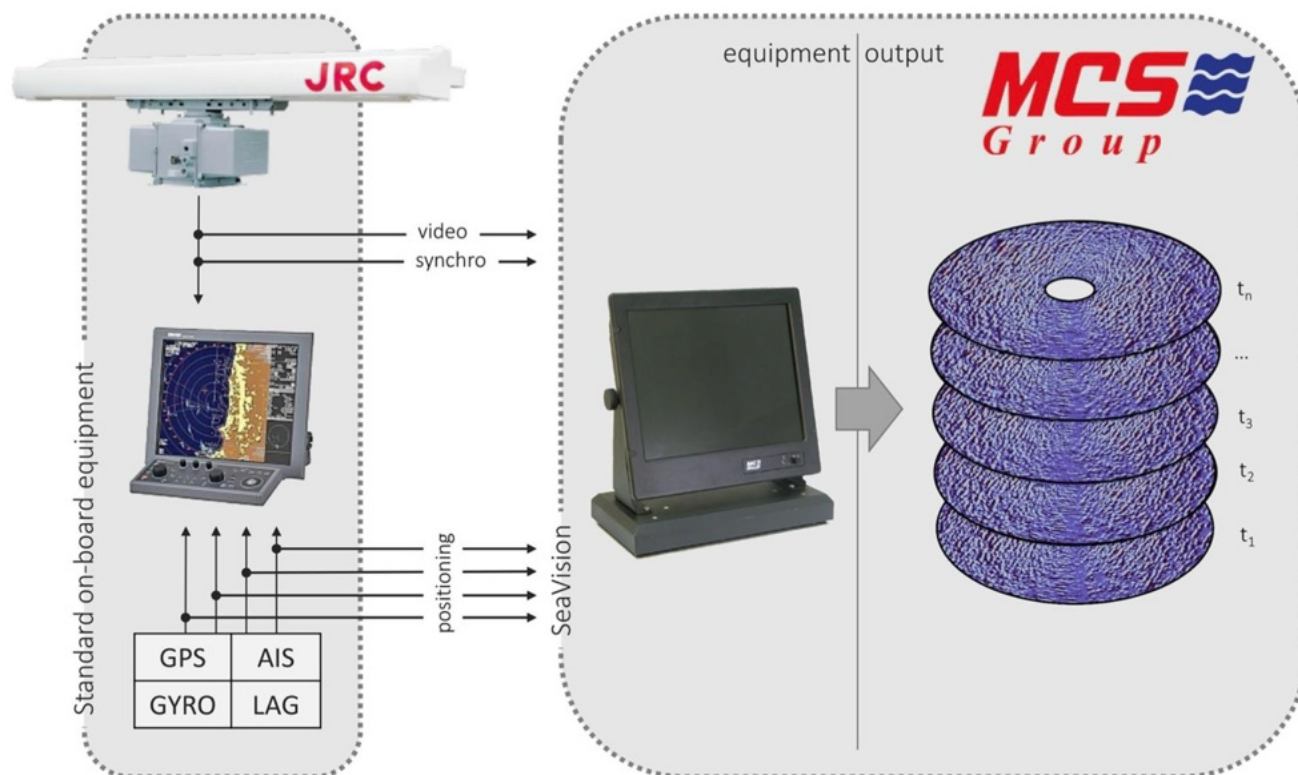
- Нерегулярность и неравноверность, подвержены ошибке наблюдателя

Целевые переменные



- Значимая высота волны - H_s
Средняя высота самой высокой трети волн за измерение
- Период волны - T
время между прохождением двух соседних гребней волны

Радарные измерения



X-диапазон: 8.0 – 12.0 ГГц

$\lambda = 2.5 - 3.75$ см

Частота радара 9.41 ГГц

$\lambda = 3.18$ см

Скорость вр. антенны 27 об/мин

Частота оц-вки сигнала: 80 МГц

разрешение оцифровки

принятого сигнала по

пространству 4096x4096

Tilinina et al. "Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III." Earth System Science Data 14.8 (2022): 3615-3633.

Применимость метода

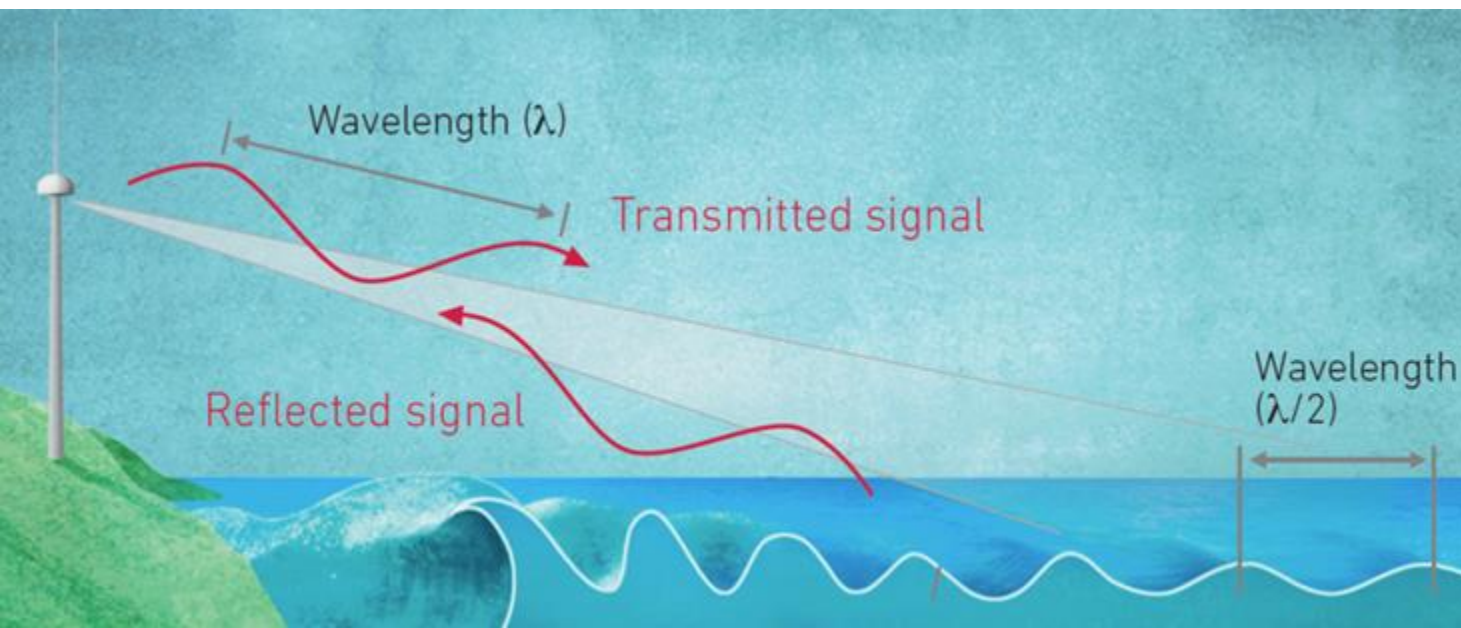
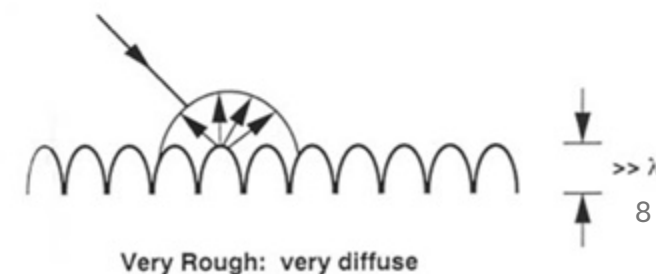
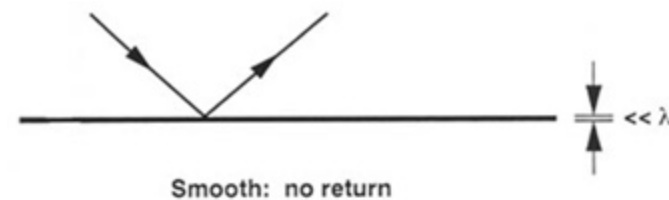
Сигнал радара отражается от поверхности воды,

если: $w_s > 3$ м/с и высота волны $h > 0.5$

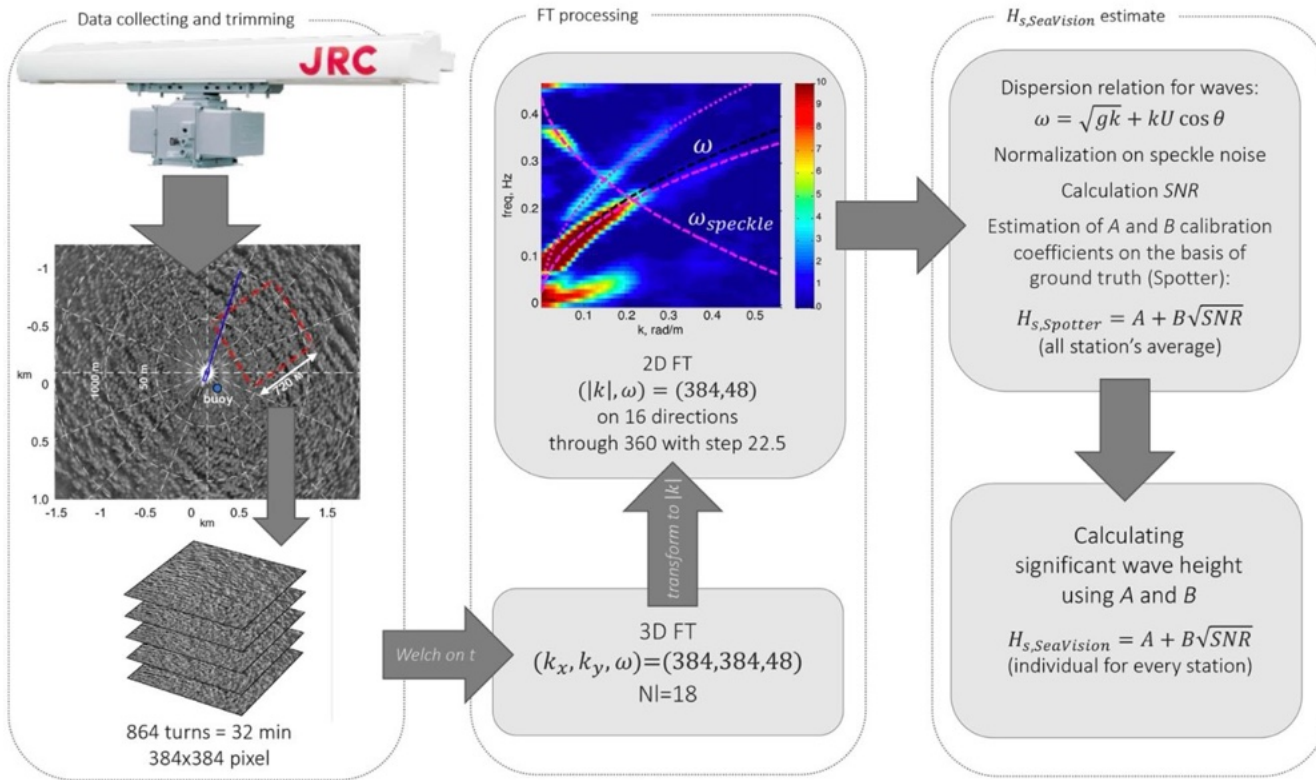
Формируется рябь.

Условие Брэгга:

$$\lambda_w = \frac{\lambda_r}{2}$$



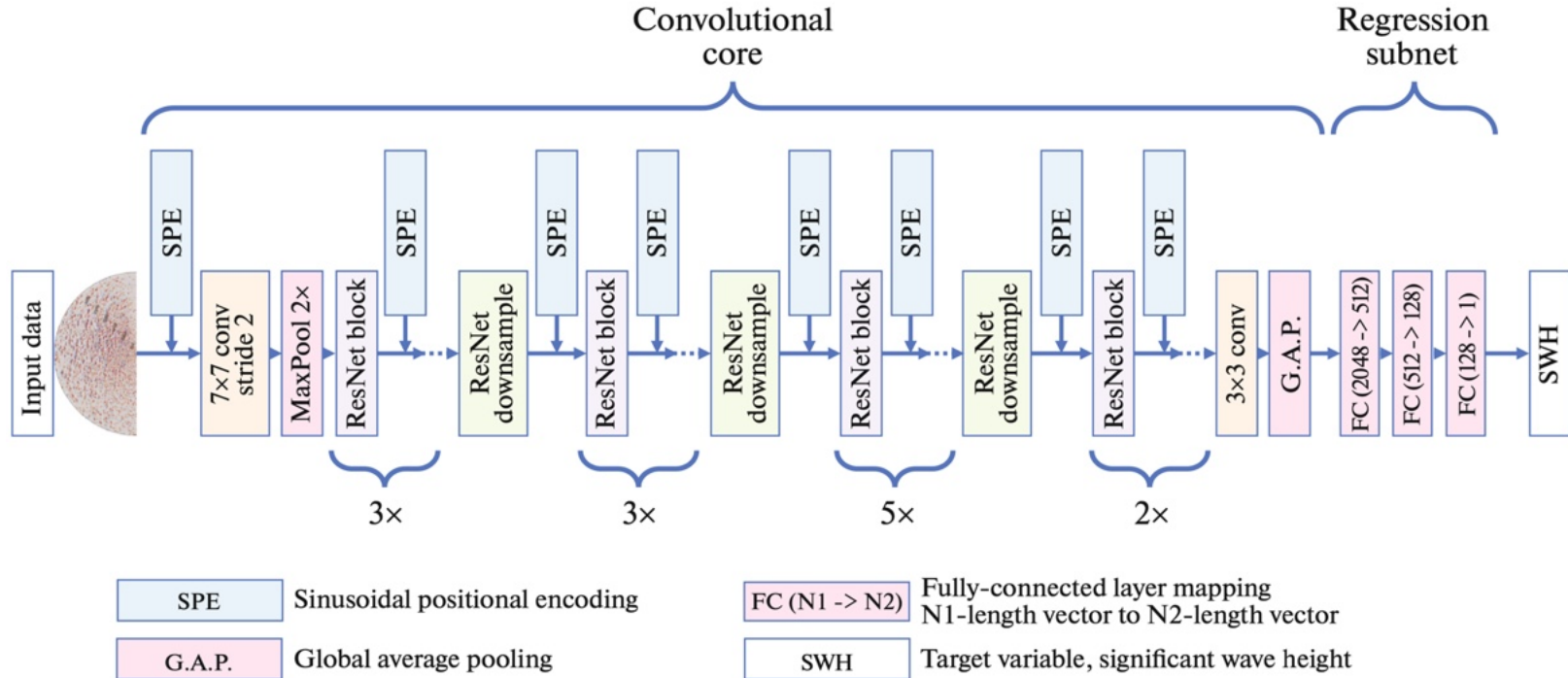
Спектральный алгоритм



- Зона обработки выбирается вручную
- Необходимо иметь 20 мин измерений
- Расчет калибровочных коэффициентов A и B индивидуальны для радара

Tilinina et al. "Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III." Earth System Science Data 14.8 (2022): 3615-3633

Сверточная нейронная сеть



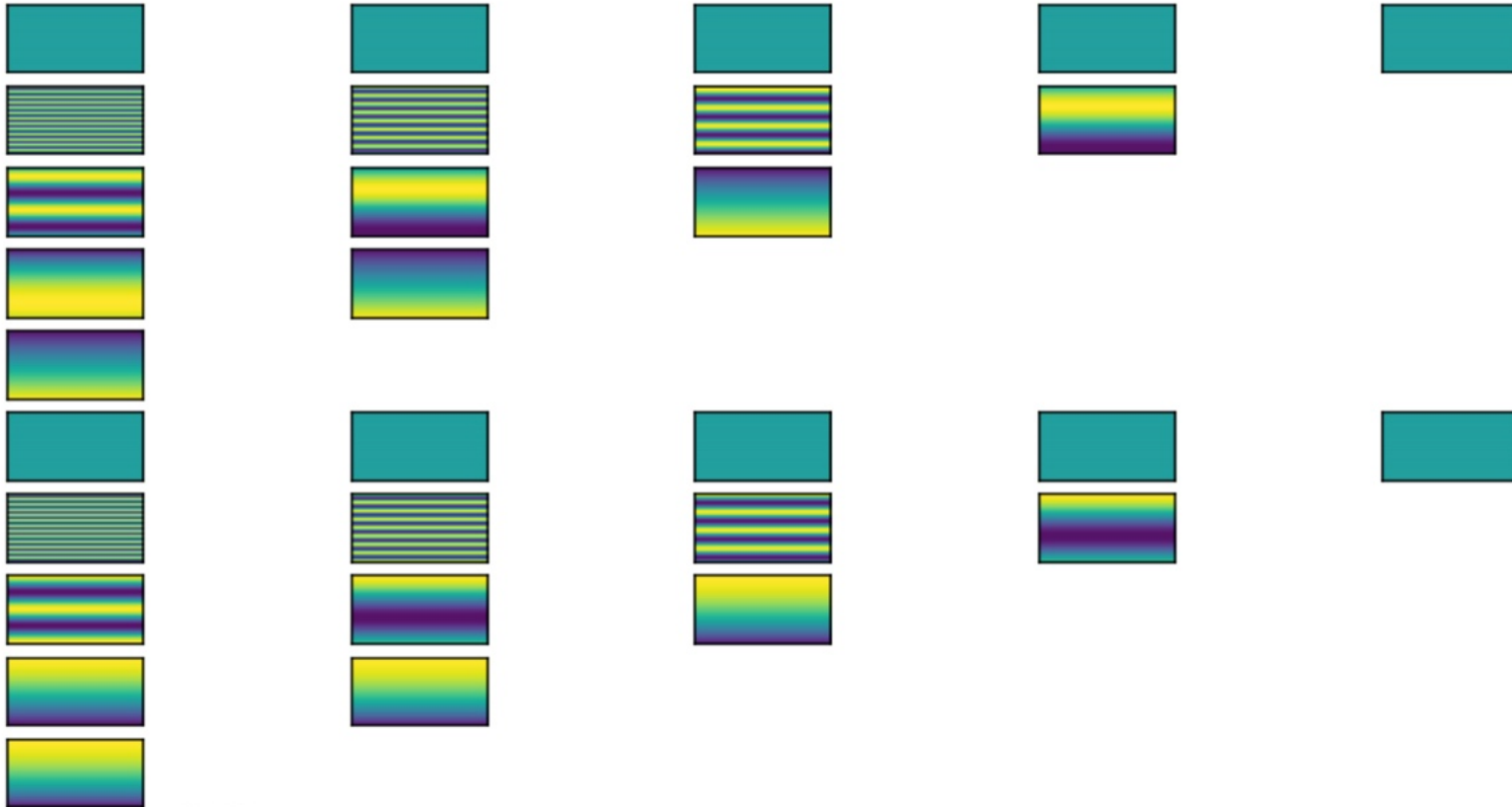
Krinititskiy et. Al "Estimating Significant Wave Height from X-Band Navigation RadarUsing Convolutional Neural Networks." *MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN* 78 (2023): 1.

Модификации ResNet 50:

- функция активации Mish
- Позиционное кодирование по пространственным переменным
- Новая полносвязная часть, с целевыми переменными (H_s и T)

Позиционное кодирование

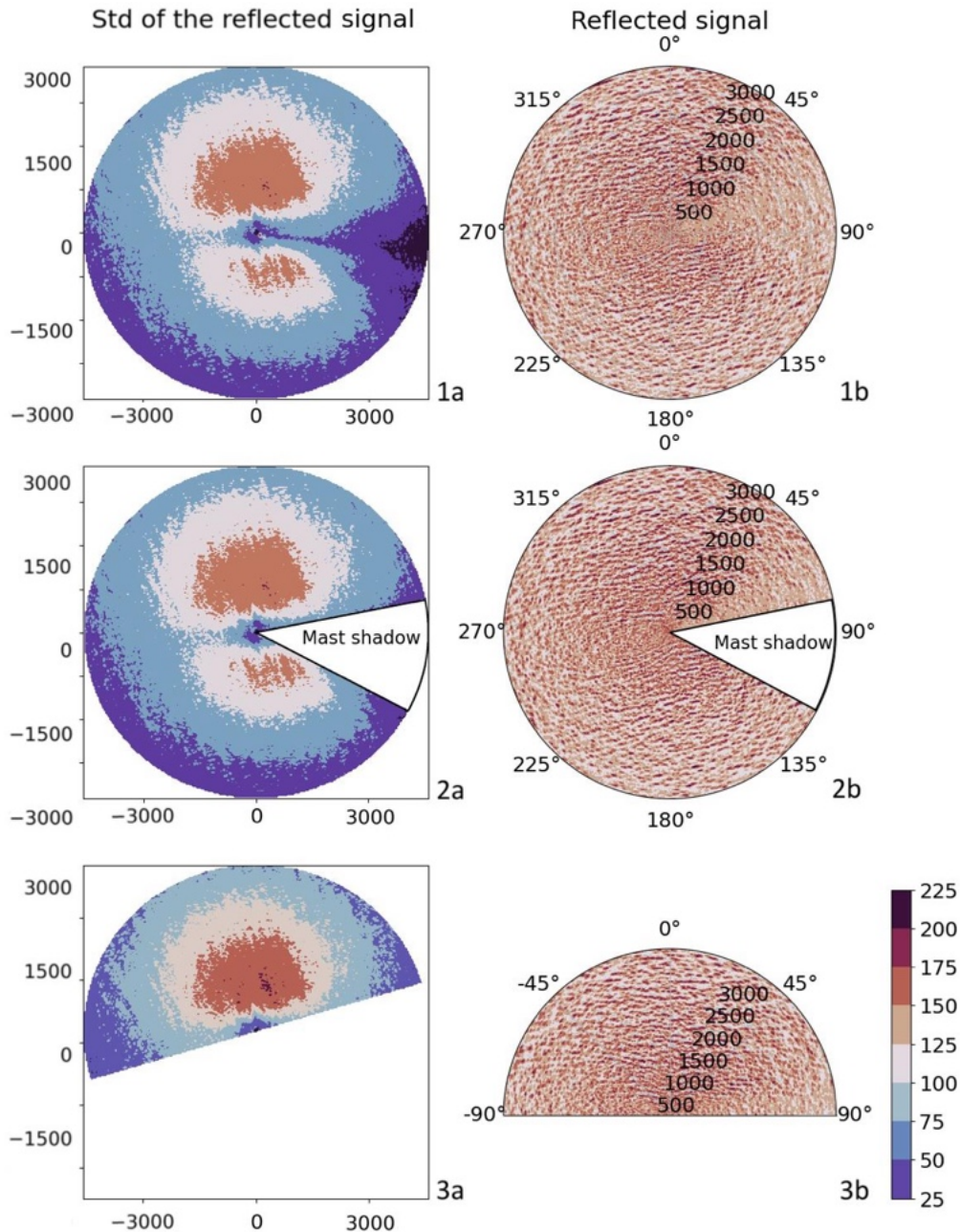
Позиционное кодирование – добавление в нейронную сеть слоев с гармоническими сигналами по направлениям x и y .



Предобработка данных

Поиск оптимальной области:

1. Расчет дисперсии по времени
2. Разделение на 64 сектора
3. Удаление затененной области ($\sim 45^\circ$)
4. Выбор 32 контрастных секторов
5. Формирование сегмента 2048×1867 px



Целевые переменные H_s и T

Значимая высота волны:

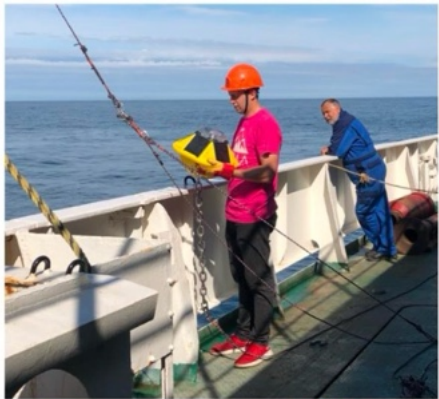
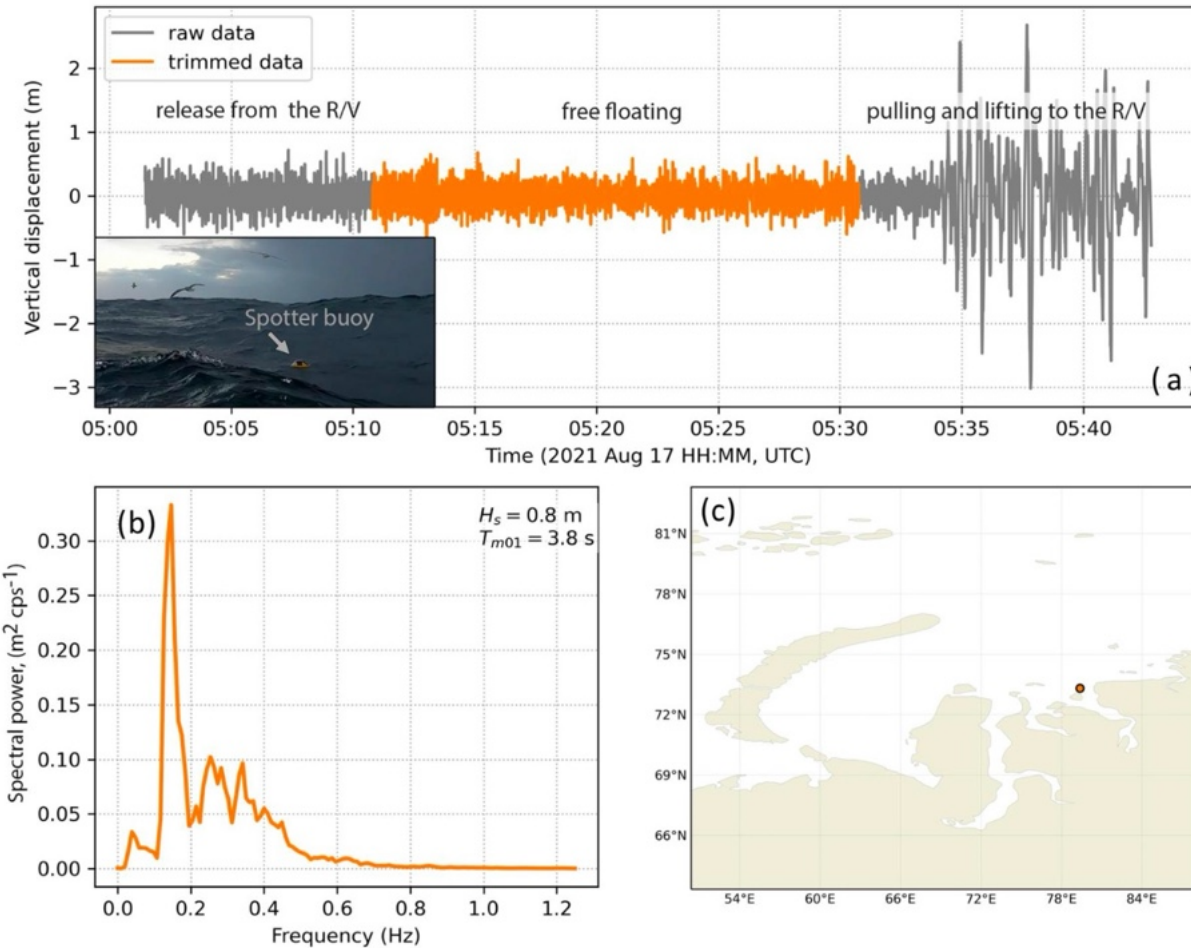
$$m_{0,buoy} = \int_0^{\infty} S_{buoy}(f) df$$

$$H_{s,buoy} = 4\sqrt{m_{0,buoy}}$$

Период:

$$m_{1,buoy} = \int_0^{\infty} S_{buoy}(f) f df$$

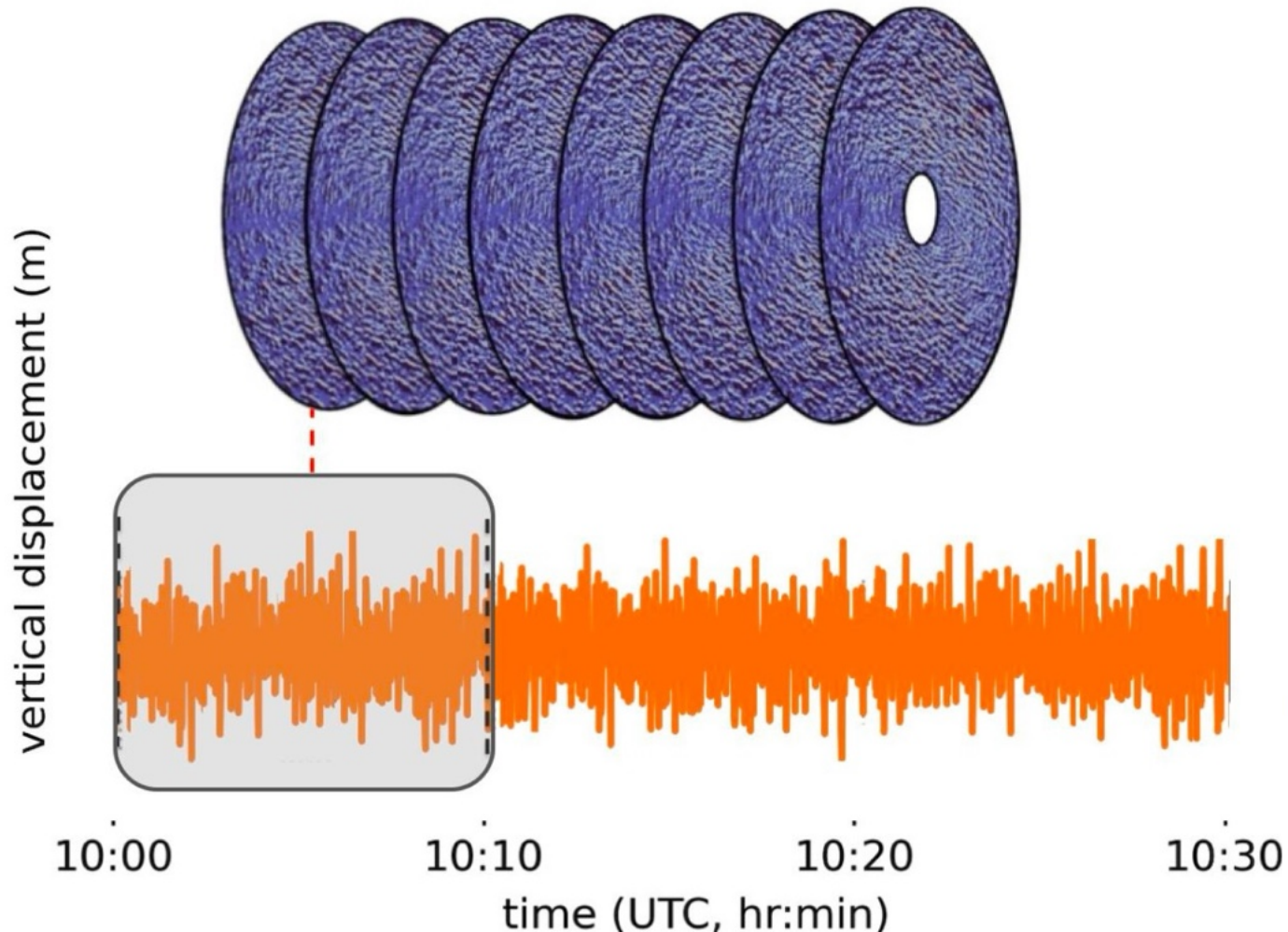
$$T_{s,buoy} = \frac{m_0}{m_1}$$



Целевые переменные H_s и T

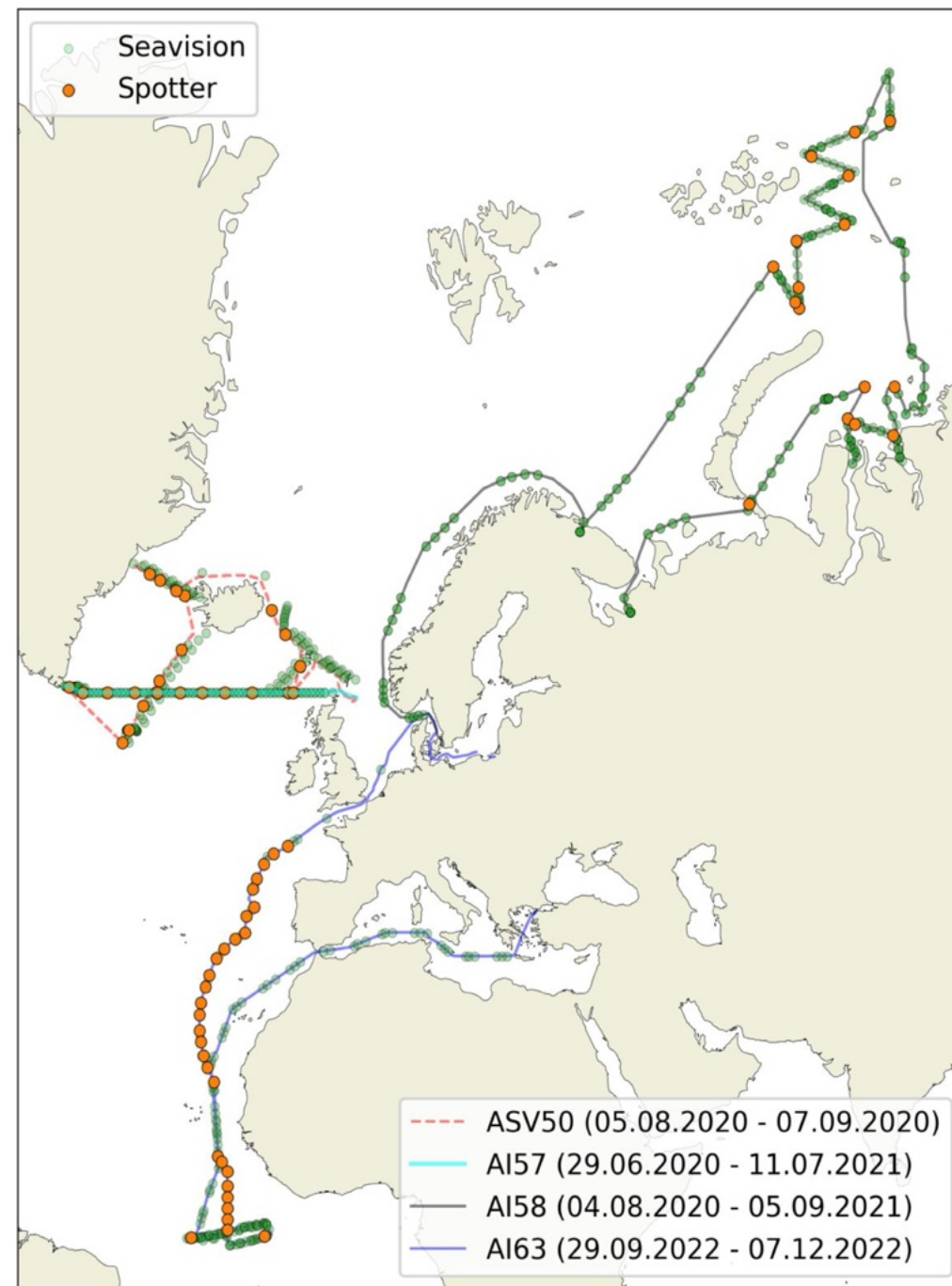
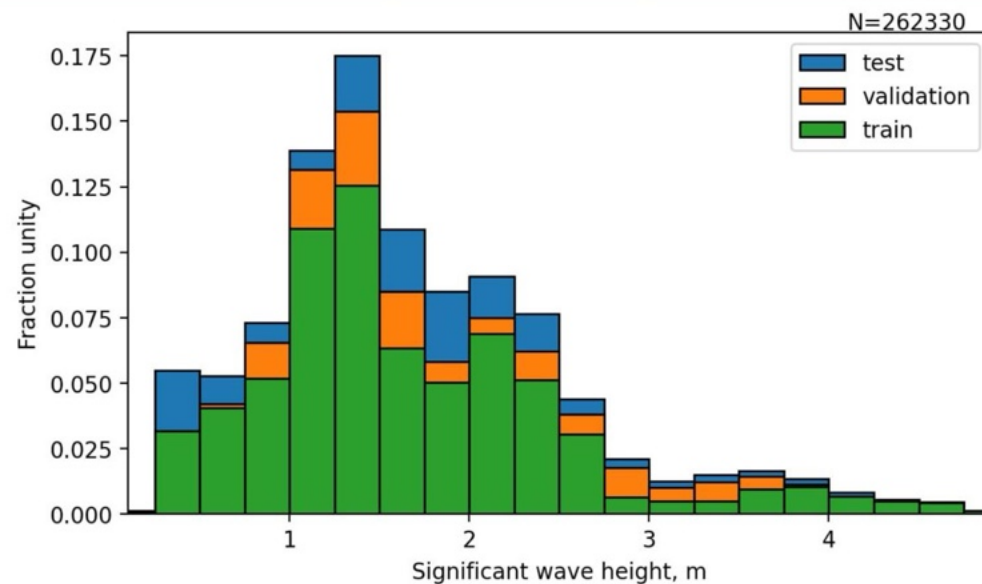
H_s и T рассчитывается **скользящим окном** (10 мин) по данным волномерного буя;

- Радарные снимки – 27 rpm (0.45 Гц) синхронизируются с показаниями буя **Spotter** (2.5 Гц)

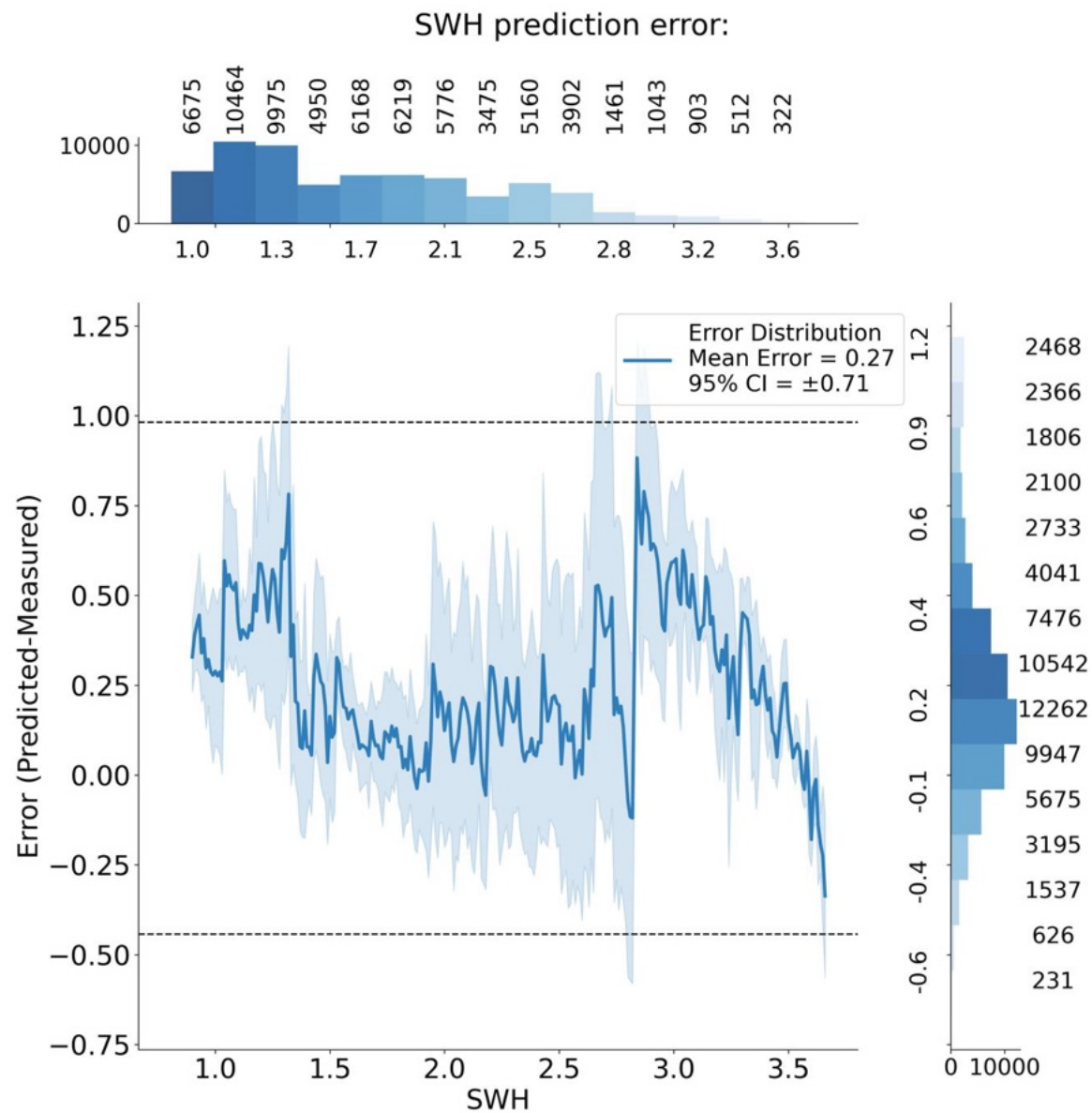
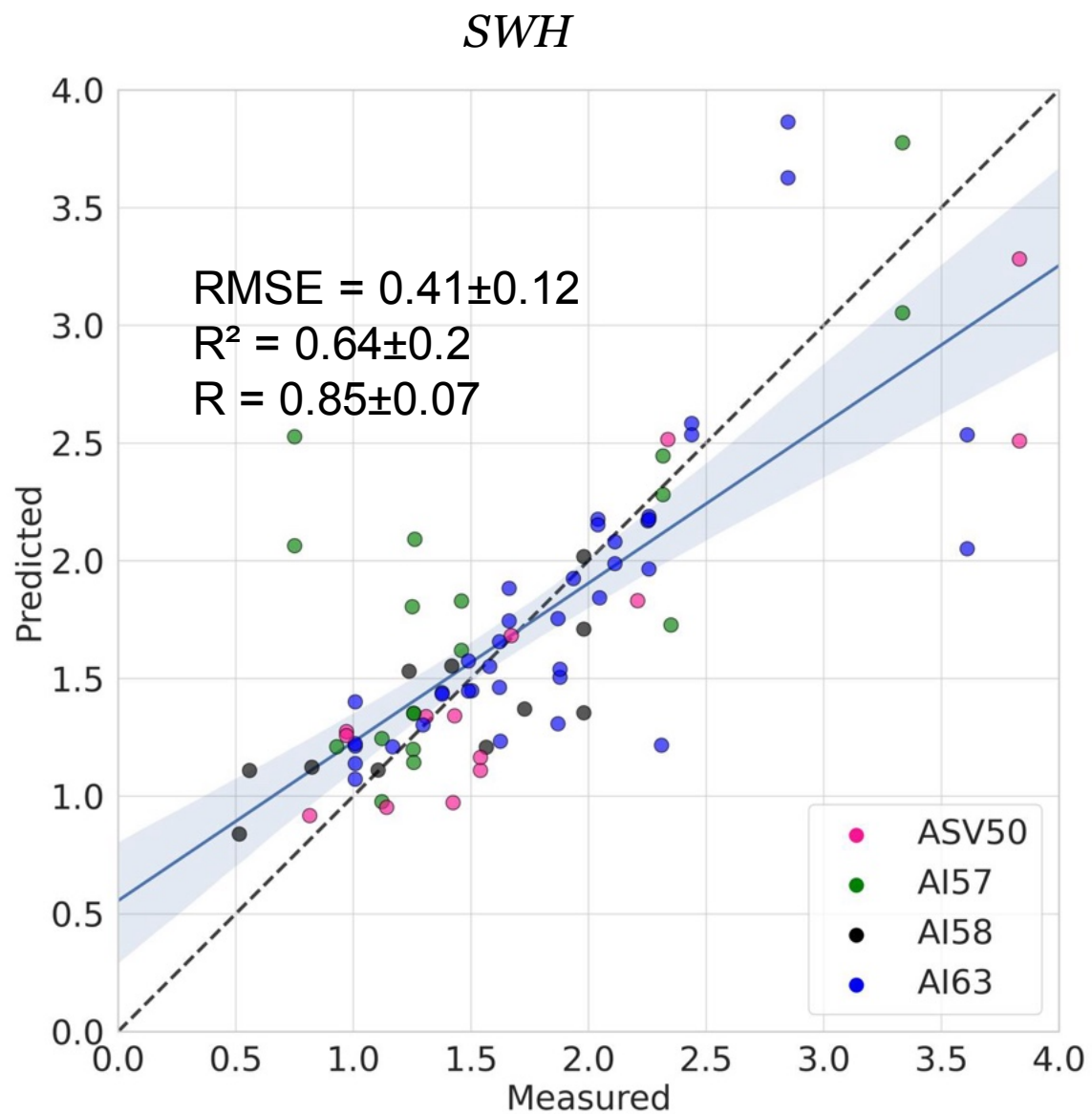


Данные

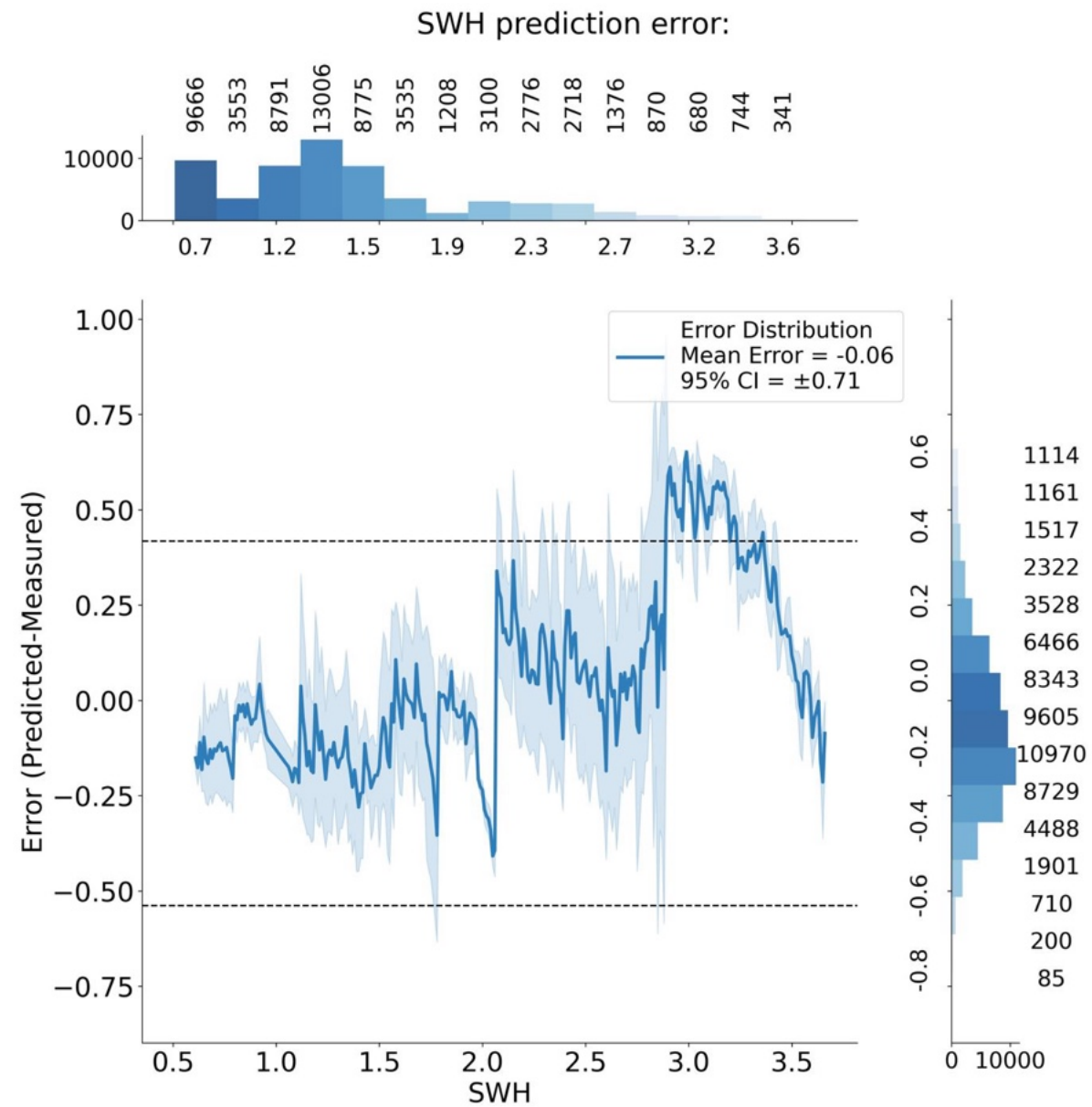
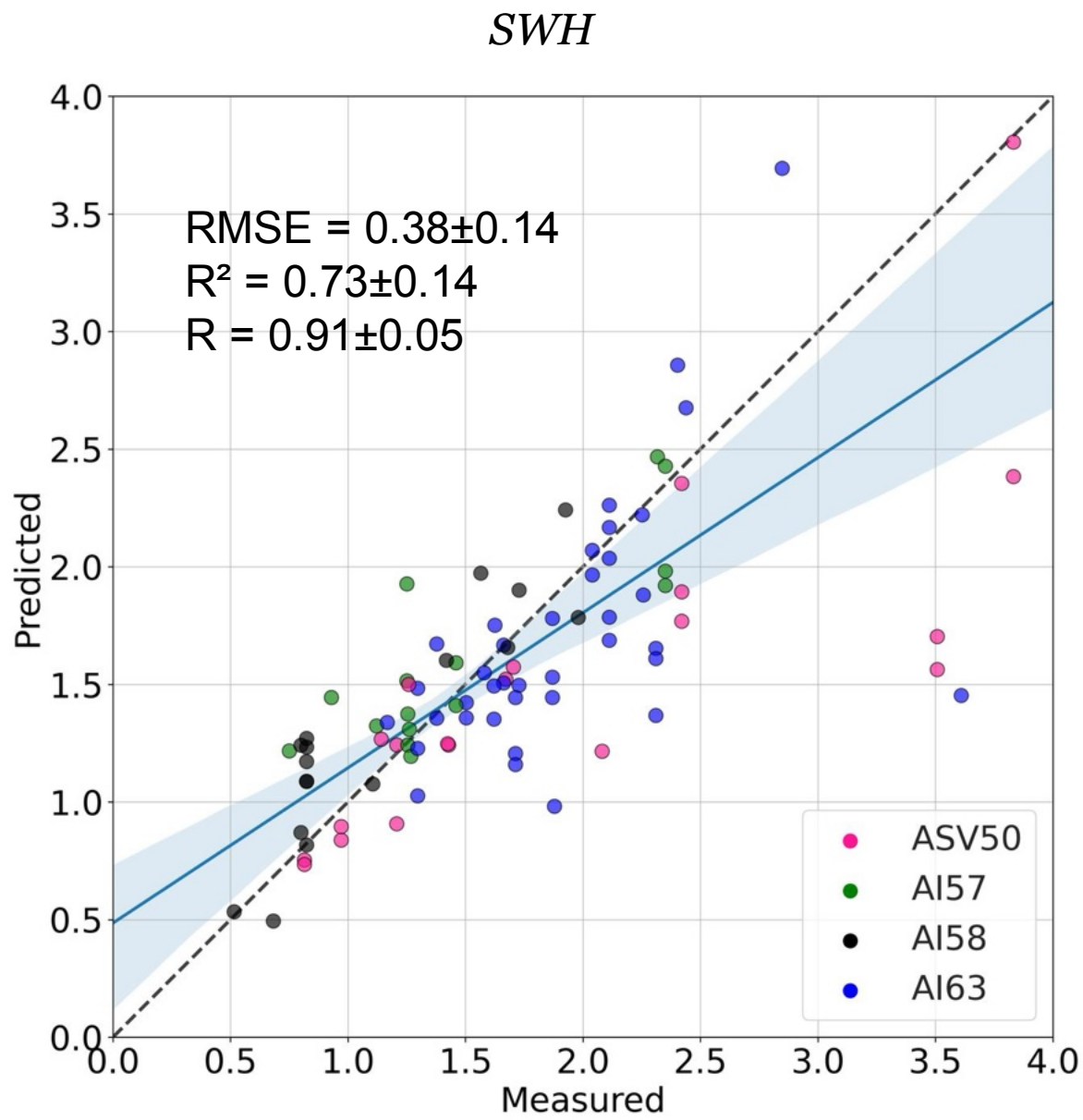
Expedition	Buoy stations	SeaVision stations
ASV50 (05.08.2020 - 07.09.2020)	24	157
AI57 (29.06.2020 - 11.07.2021)	12	76
AI58 (04.08.2020 - 05.09.2021)	16	55
AI63 (29.09.2022 - 07.12.2022)	30	209
Total	82	497



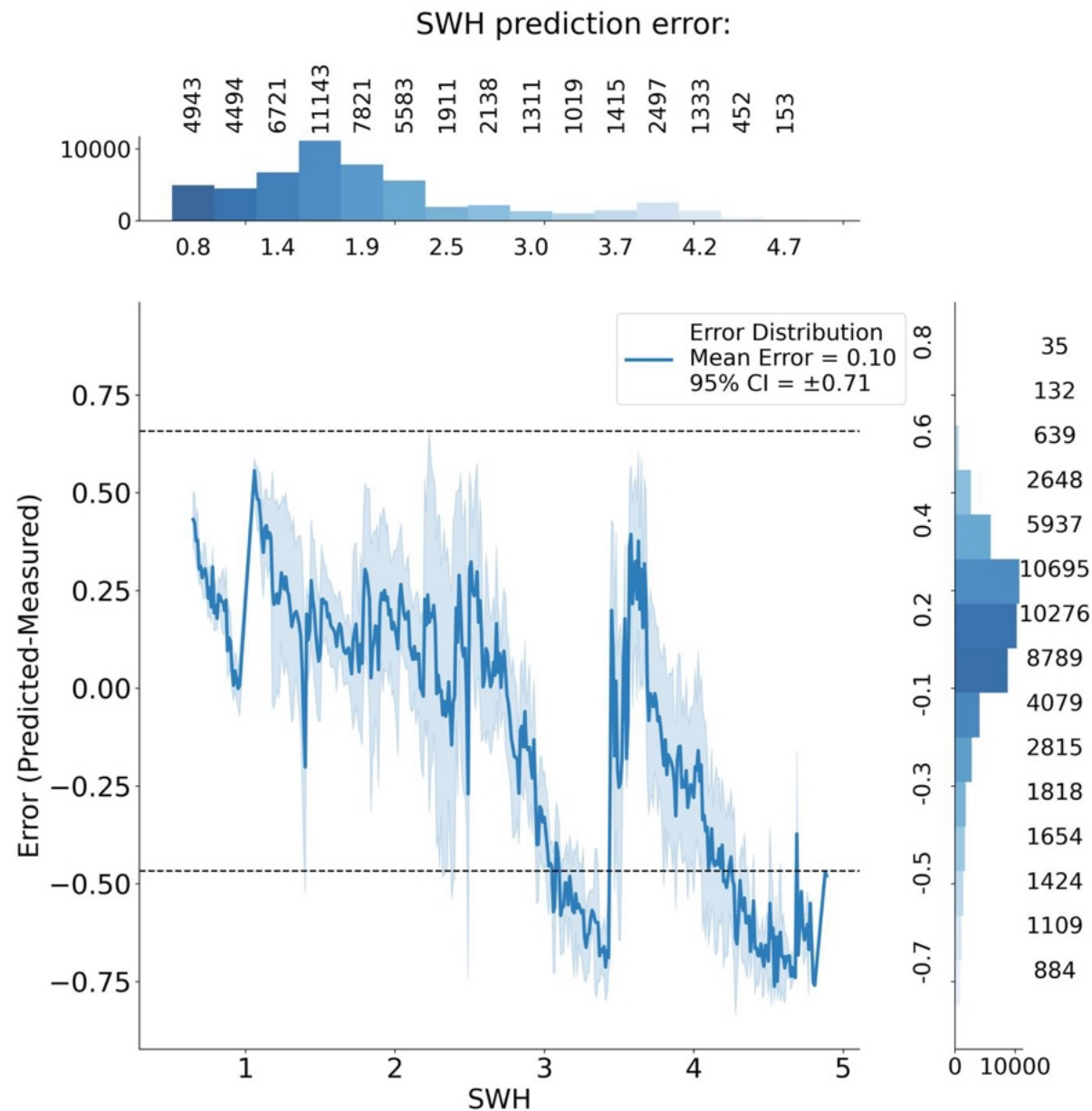
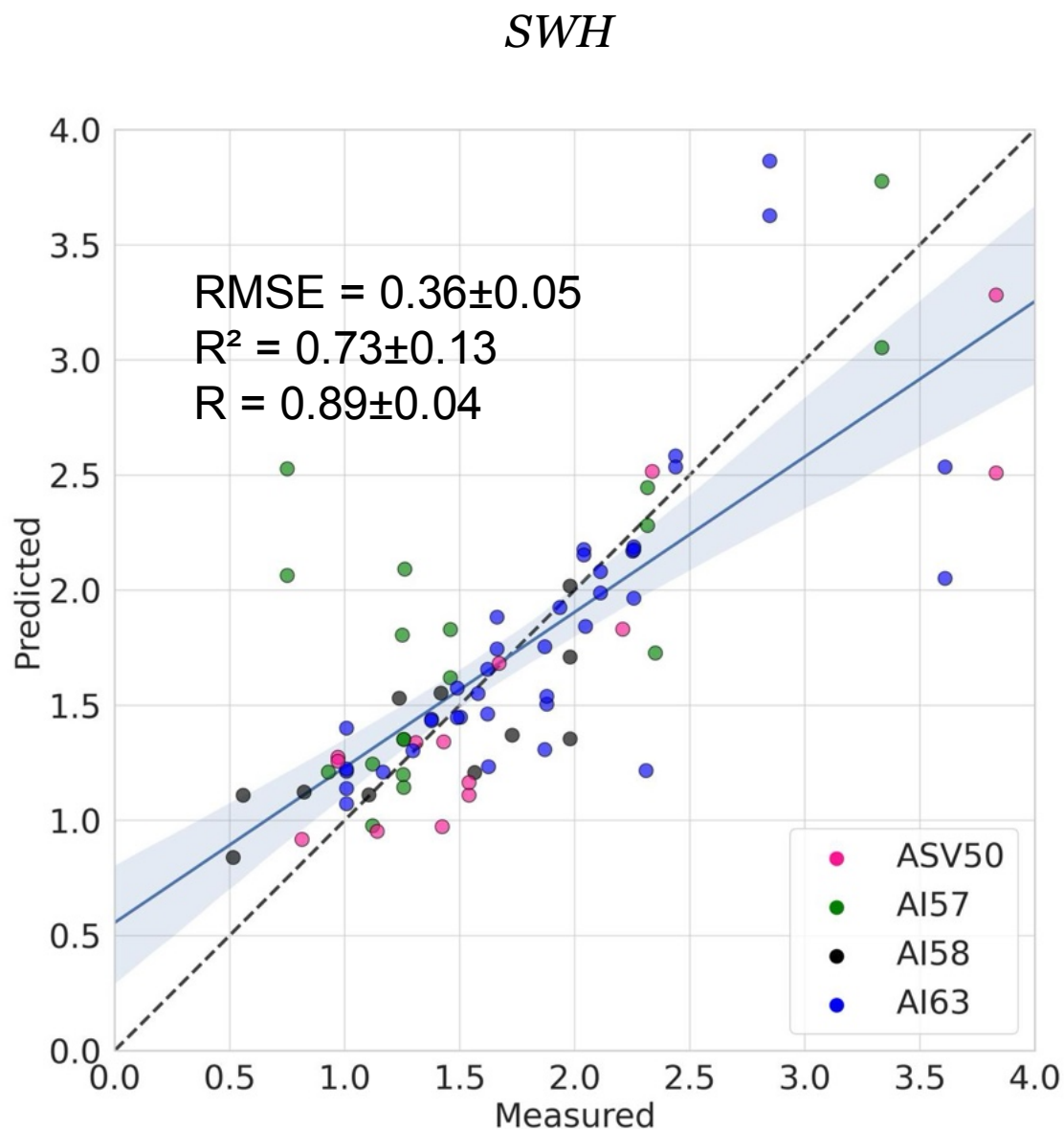
Результаты (ПК)



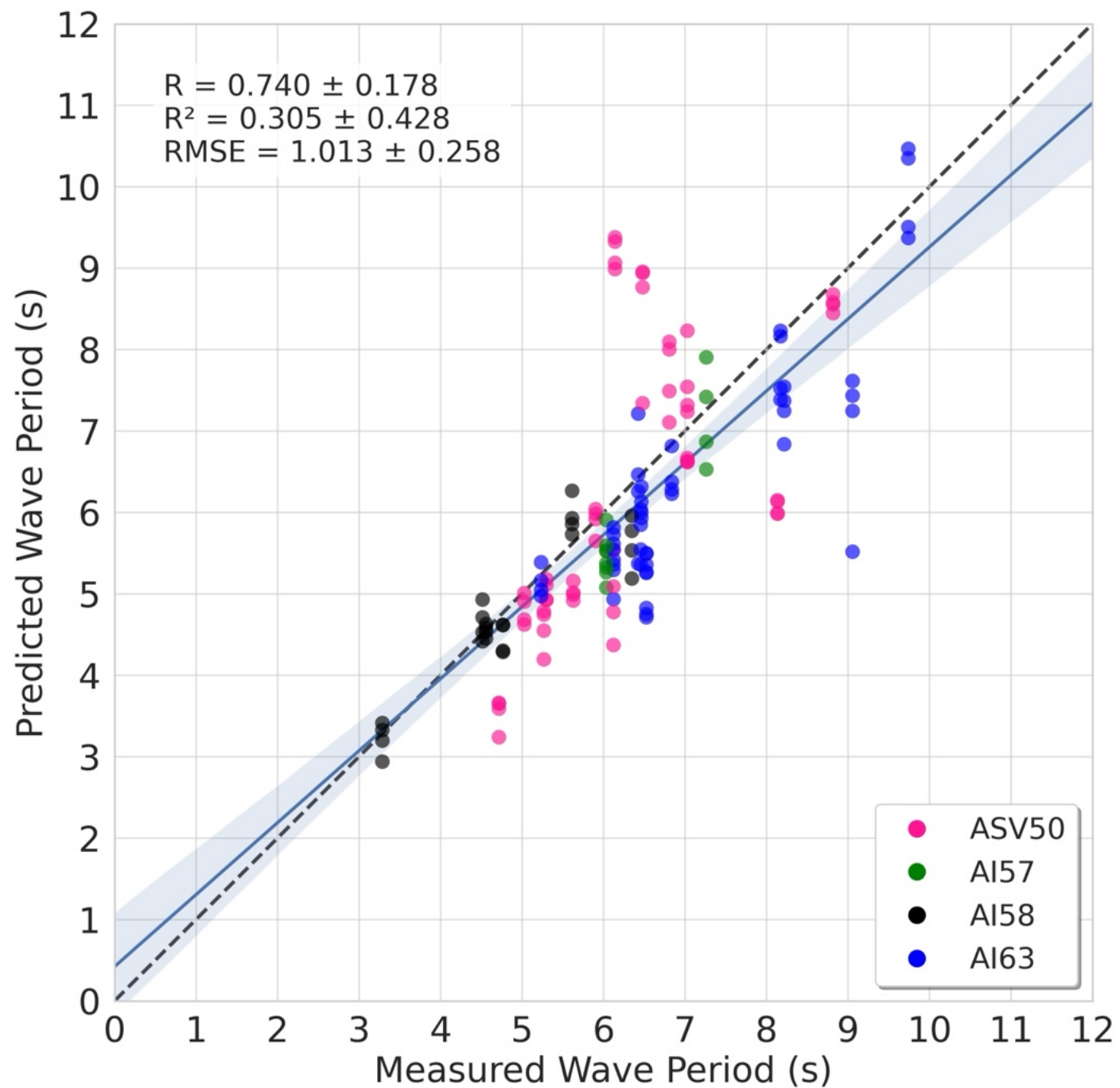
Результаты (без ПК)



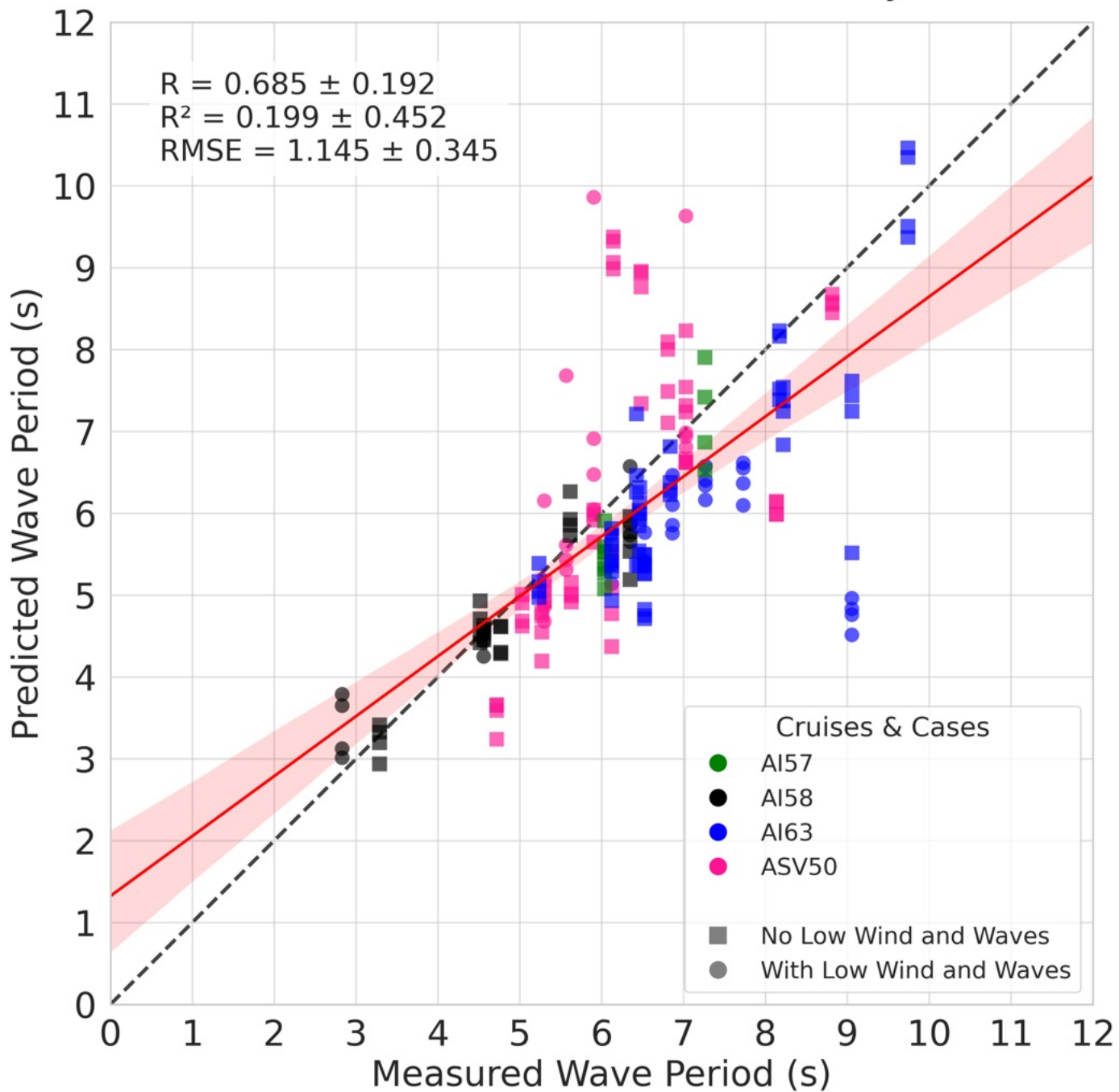
Результаты (ПК низкие волны)



Wave Period - No Low Wind and Waves



Wave Period - Overall Summary



Заключение

- ResNet 50 для оценки значимой высоты волны и периода по данным судового радара X-диапазона:
- Обучена на экспедиционных данных ИО РАН (Атлантика, Арктика)
- Качество сопоставимо с классическим методом
- Преимущества: мгновенная оценка SWH (vs. 20 мин), обработка большей области, не требует калибровки

Перспективы

- Аппроксимация длины и направления волны
- Адаптация для движущегося судна
- Обучение НС на синтетических данных
- Комбинирование спектрального анализа с МО
- Валидация по спутниковым данным и визуальные наблюдениям
- Автоматизация оценки волновых характеристик
- Внедрение систем SeaVision на судах