



# ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ВНЕТРОПИЧЕСКИМИ ЦИКЛОНАМИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Чешм Сиахи В.<sup>1</sup>  
Кудрявцев В.Н.<sup>1,2</sup>  
Юровская М.В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Морской Гидрофизический Институт РАН, Севастополь, Россия

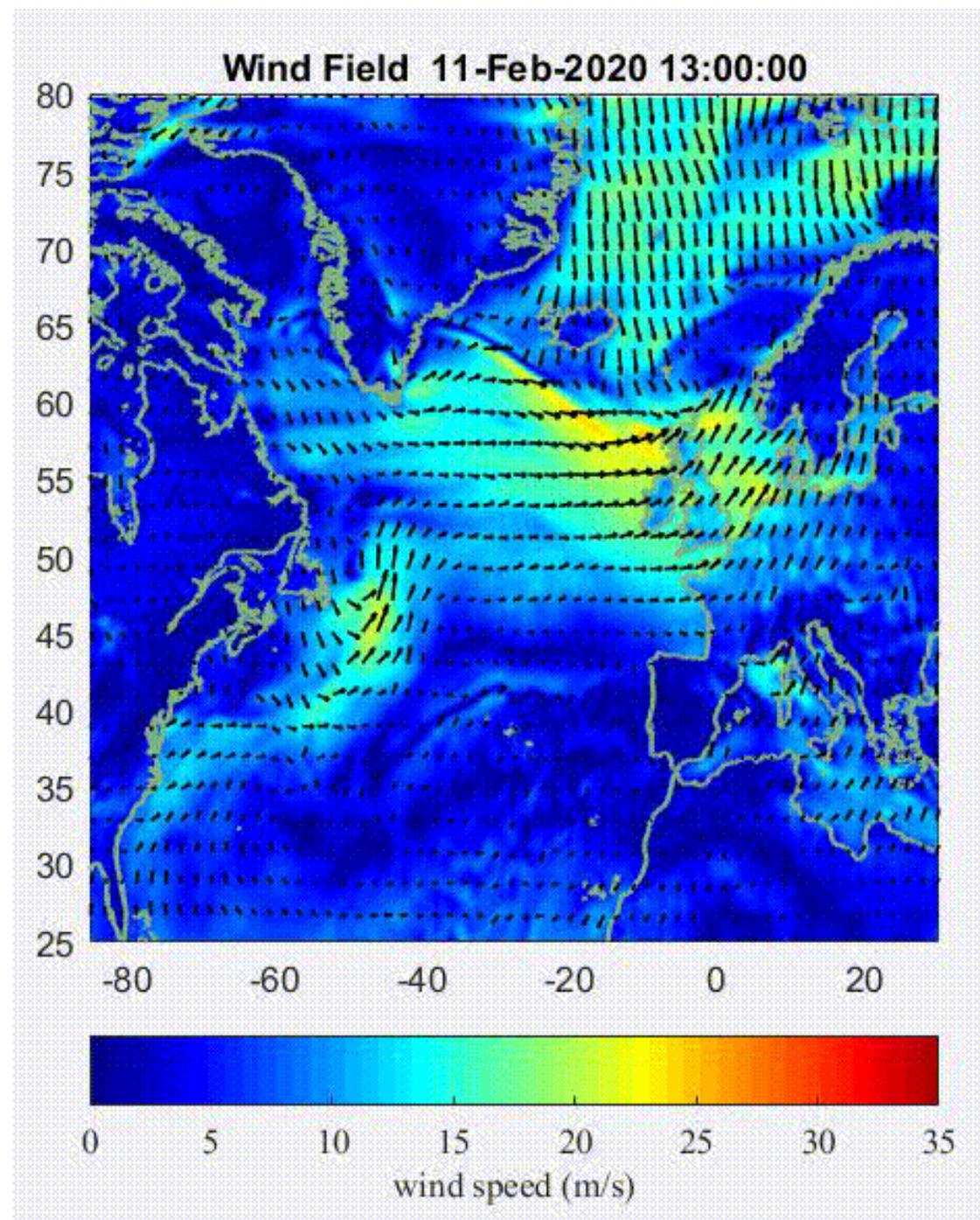
vahid@rshu.ru

# Введение

- Экстремальные волны, возникающие в океане и закрытых морях, опасны для деятельности человека и личной безопасности. Несмотря на редкость этих событий, они могут быть связаны с серьезными последствиями, такими как значительные повреждения судов, морских сооружений и потенциальная гибель людей.
- Несмотря на тщательный непрерывный космический и полевой (буи, бортовой) мониторинг, экстремальные погодные явления, как правило, по-прежнему не имеют очень точной информации о быстро меняющихся ветровых полях, связанных с ними локальных волнах и системах опережающей зыби.
- Для возможности рассмотрения ансамблей решений более упрощенные решения были разработаны и представлены в работе [Kudryavtsev et al. \(2021\)](#). Предлагаемая **2D параметрическая модель** легко дает основные статистические характеристики поверхностных волн.
- Основной целью данной работы является применение адаптированной модели Kudryavtsev et al. (2021) для исследования **ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ.**

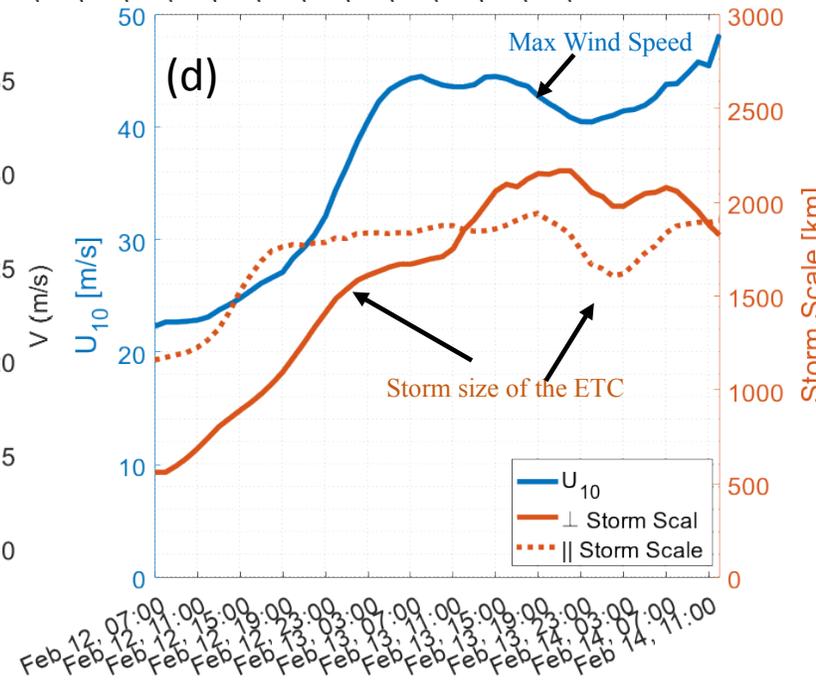
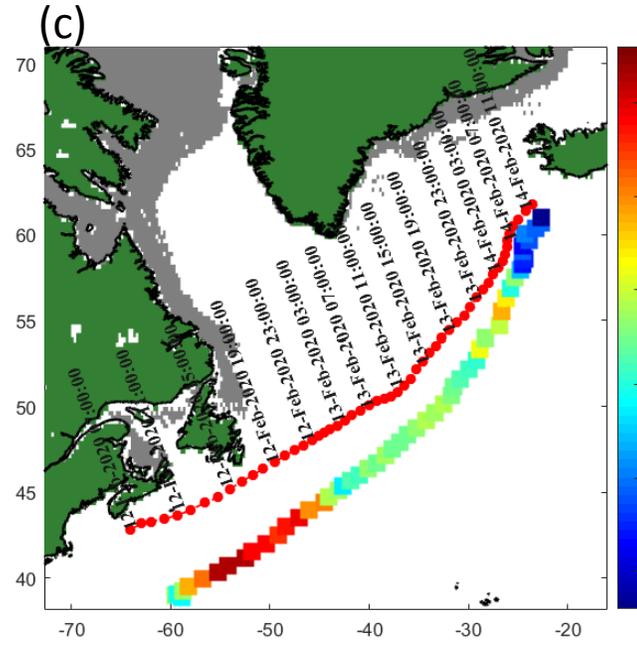
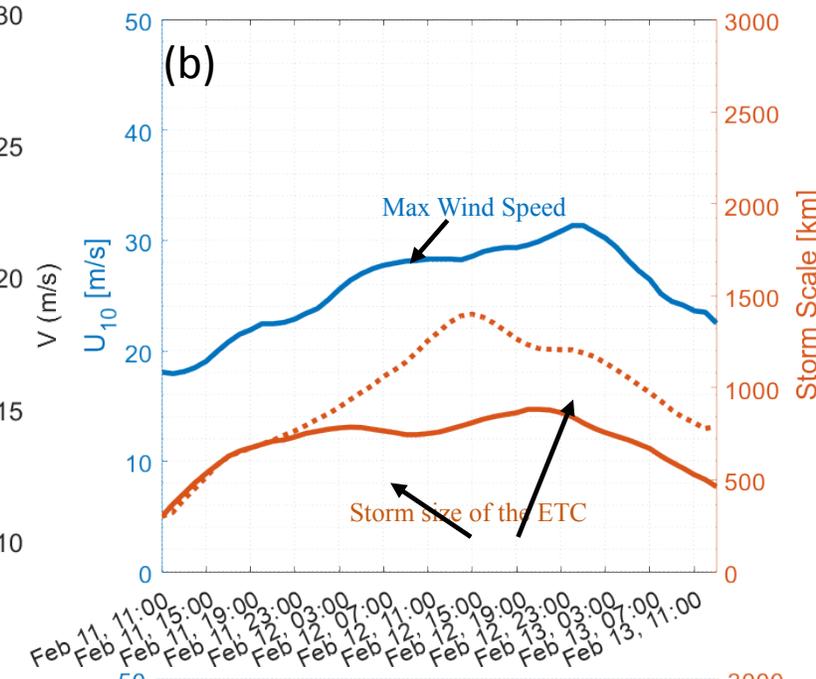
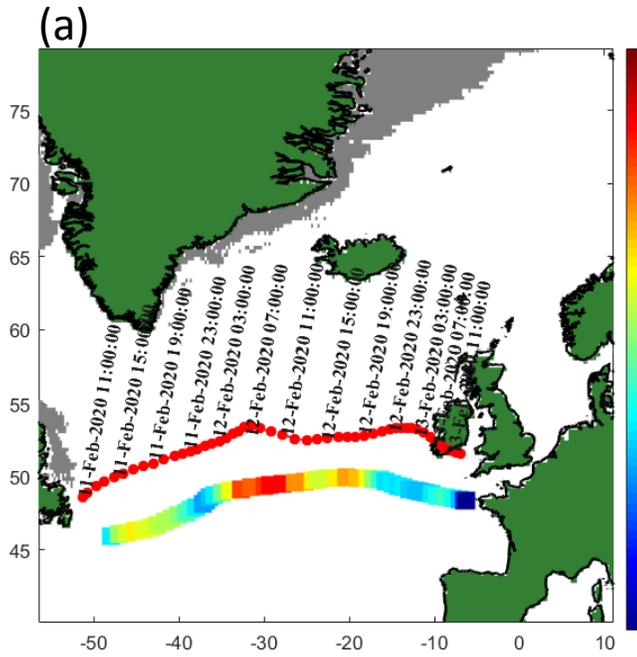
# Случаи Внетропических Циклонов (ВЦ)

Для исследования выбраны **два ВЦ**, которые наблюдались в период **с 11 по 14 февраля 2020** года. Центры циклонов и их траектории определялись по ежечасным полям приземного давления. Первый циклон (**ВЦ №1**) появился **утром 11 февраля 2020** года на западе бассейна и двигался на восток, пока утром 13 февраля 2020 не достиг Ирландии. Второй циклон (**ВЦ №2**) также появился на западе бассейна в **полдень 12 февраля 2020** года и далее двигался на северо-восток. Достигнув в полдень 14 февраля 2020 года 60-ого градуса с.ш., ВЦ №2 потерял форму циклона и превратился в струйный поток вдоль юго-восточного побережья Гренландии.



# Траектории ВЦ и Их Параметры

В контексте генерации волн, ВЦ (в отличие от тропических) и, в частности, **ВЦ№1** и **ВЦ№2**, являются **быстродвижущимися циклонами, т.е. выполнение условий резонанса между групповой скоростью генерируемых волн и скоростью движения циклона – невозможно** (Kudryavtsev et al. 2021; Bowyer and MacAfee 2005; Dysthe and Harbitz 1987; Young 1988; Young and Vinoth 2013; Hell et al. 2021).



# ЭФФЕКТ ГРУППОВОГО РЕЗОНАНСА (ЗАХВАТ ВОЛН)

При совпадении групповой скорости волн и скорости перемещения циклона, волны находятся под воздействием ветра «неограниченно» долго, в результате их энергия принимает максимально возможно значение.

В этом случае расстояние от начальной точки генерации до точки поворота (где групповая скорость волн равна скорости перемещения циклона):

$$L_{cr} = \frac{-c_{\alpha}^{-\frac{1}{q}} q}{1+q} \left( \frac{U_{10}}{2V_t} \right)^{\frac{1}{q}} \frac{U_{10}^2}{g}$$

должно быть равно радиусу циклона. Формально это выражается:

$$\frac{R_m}{L_{cr}} \rightarrow 1$$



Резонанс групповой скорости волн может возникнуть в правом секторе

$$\frac{R_m}{L_{cr}} \gg 1$$

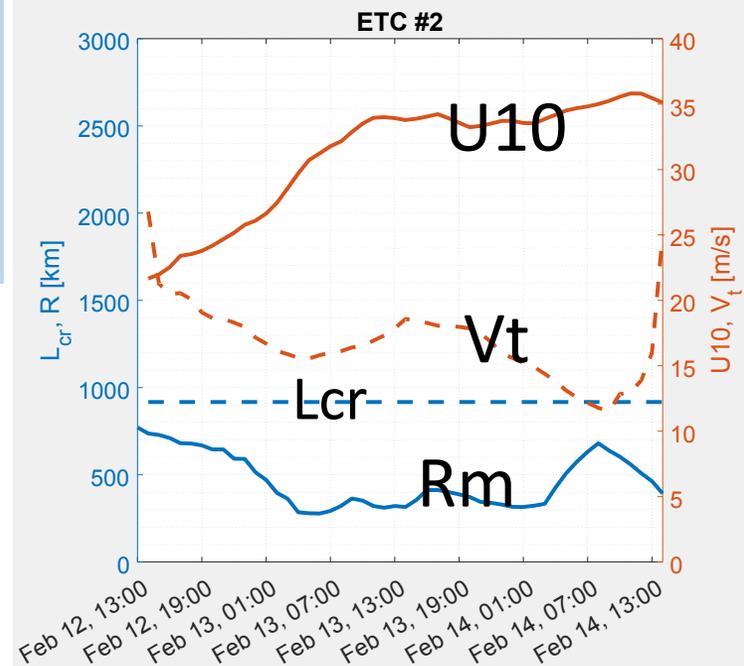
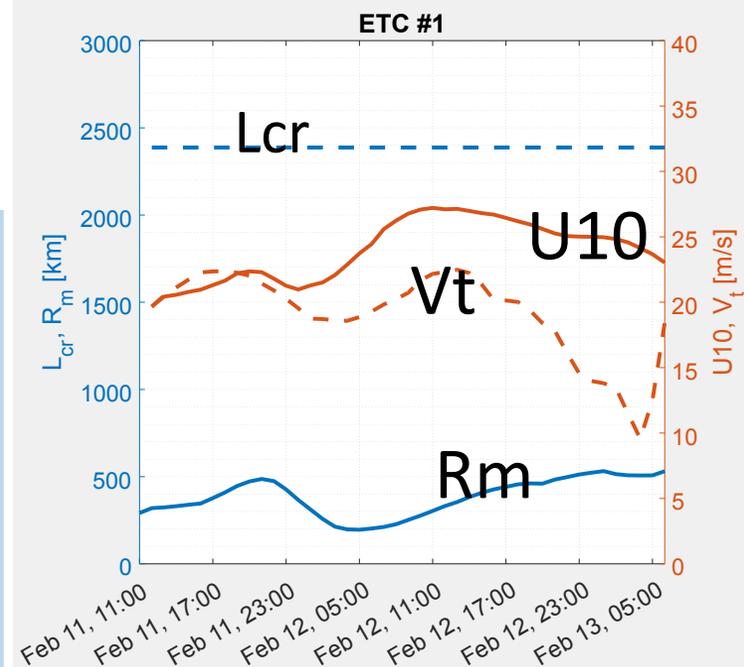


**Стационарный**

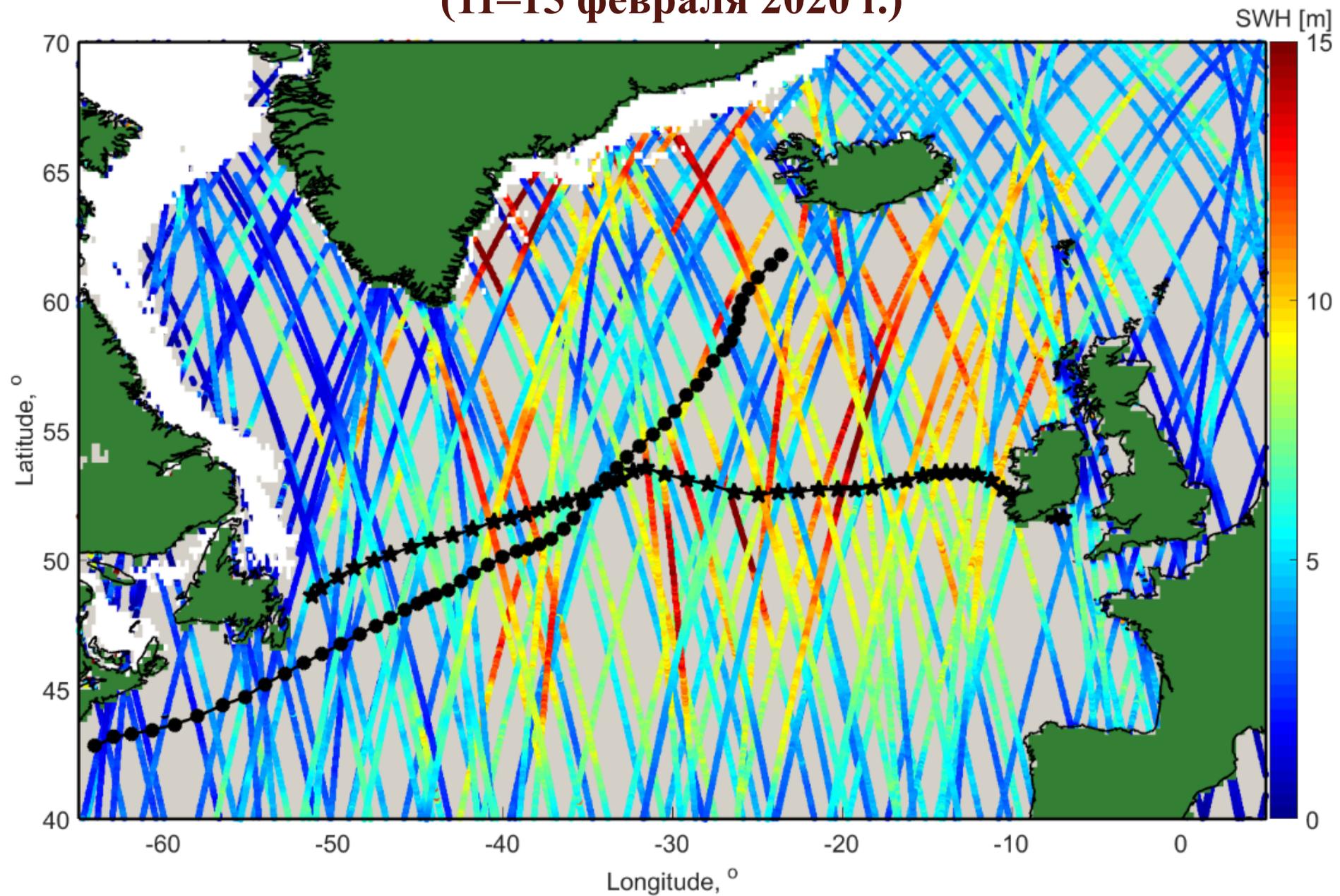
$$\frac{R_m}{L_{cr}} \ll 1$$



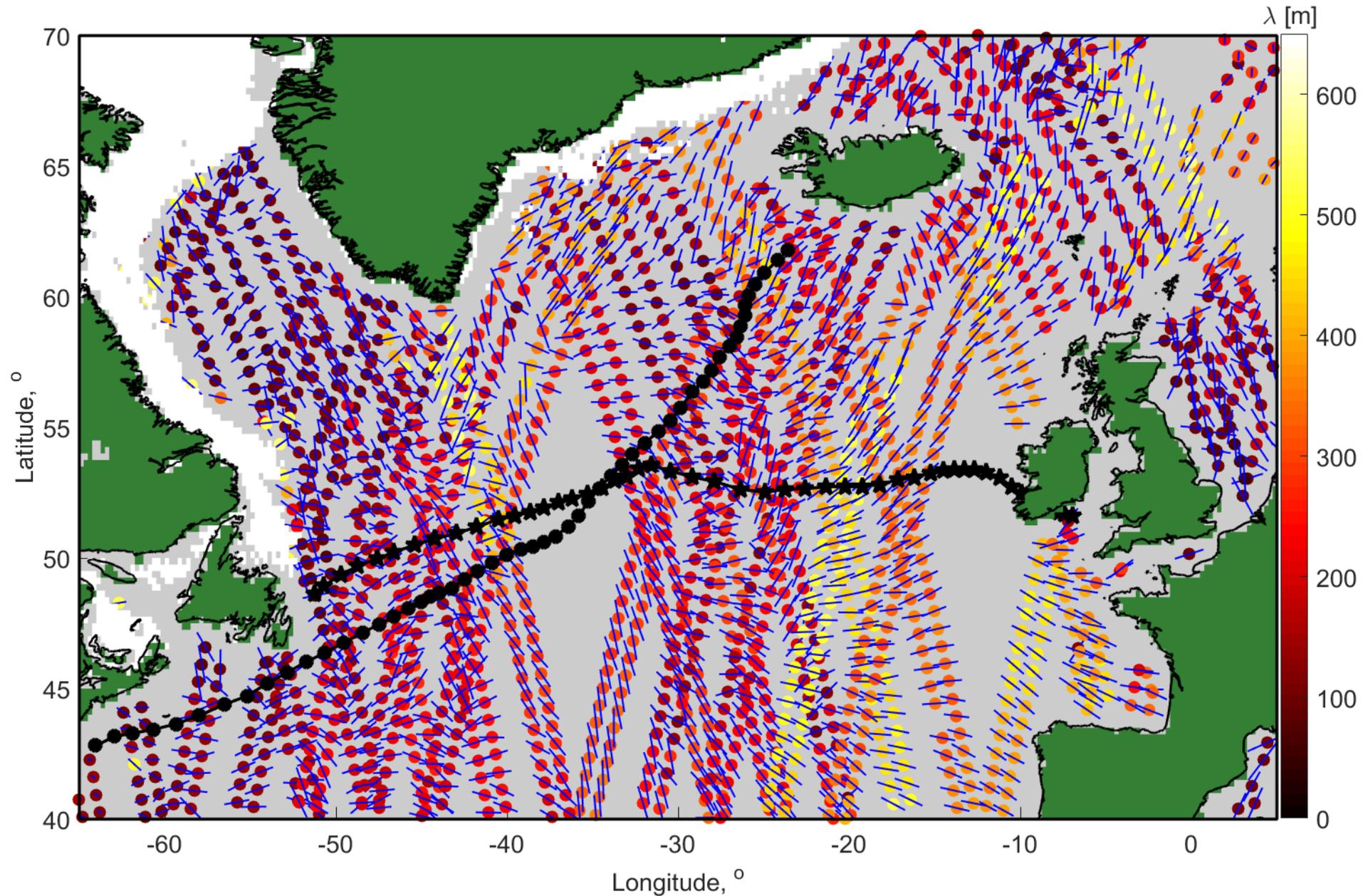
**Очень быстрый**



# Измерения Альтиметров SWH в северной части Атлантического океана (11–15 февраля 2020 г.)



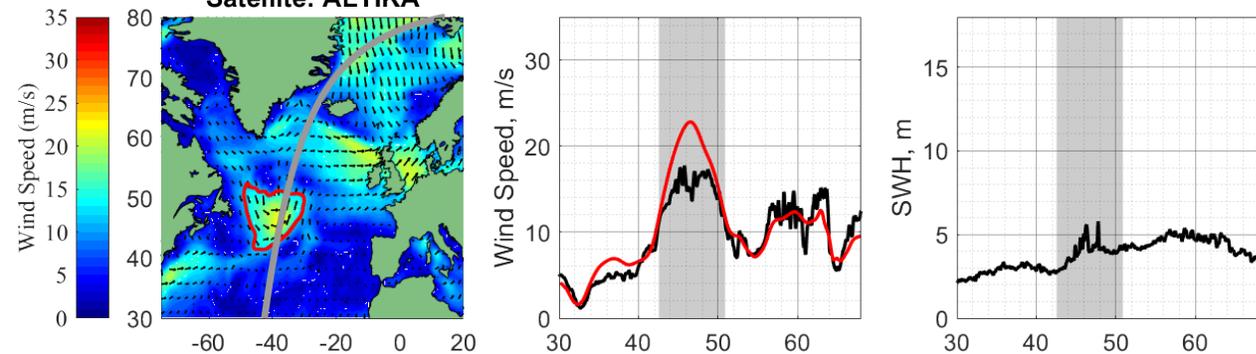
# Измерения Длины Волн ( $\lambda$ ) CFOSAT-SWIM (11–15 февраля 2020 г.)



# Примеры Измерений Высоты Значительных Волн и Скорости Ветра для ВЦ № 1

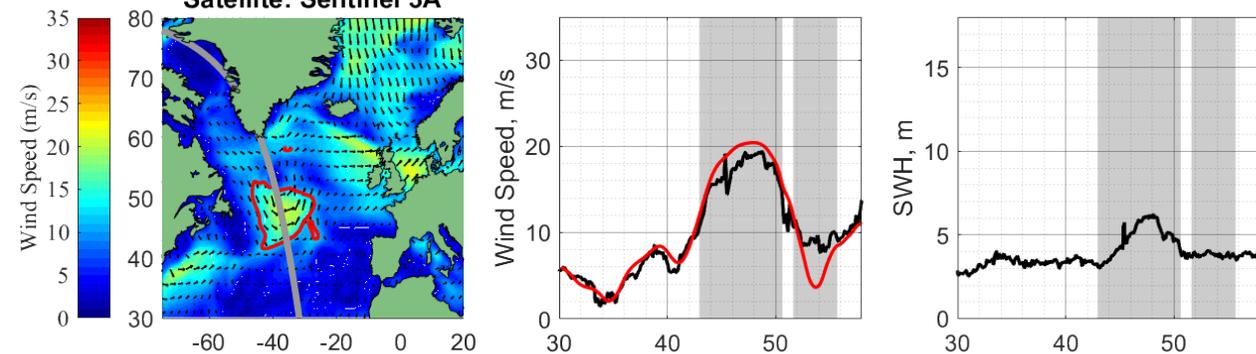
NCEP Wind Field 11-Feb-2020 21:00:00

Satellite: ALTIKA



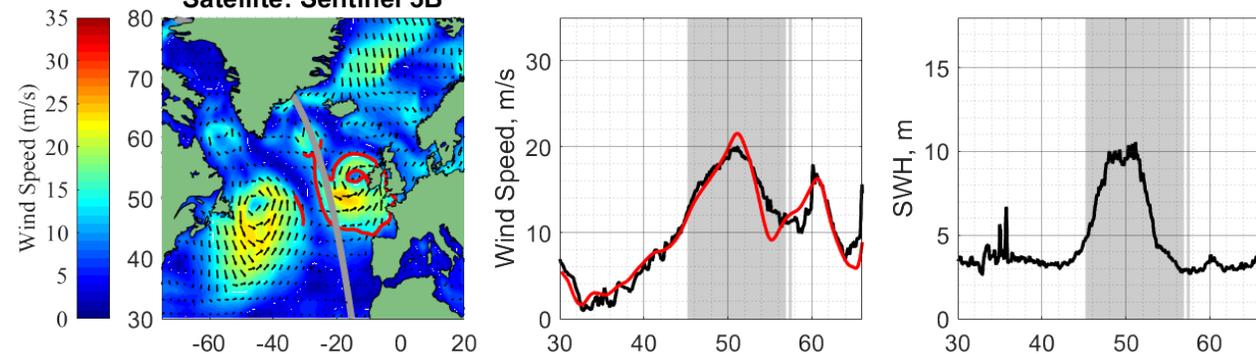
NCEP Wind Field 12-Feb-2020 00:00:00

Satellite: Sentinel 3A



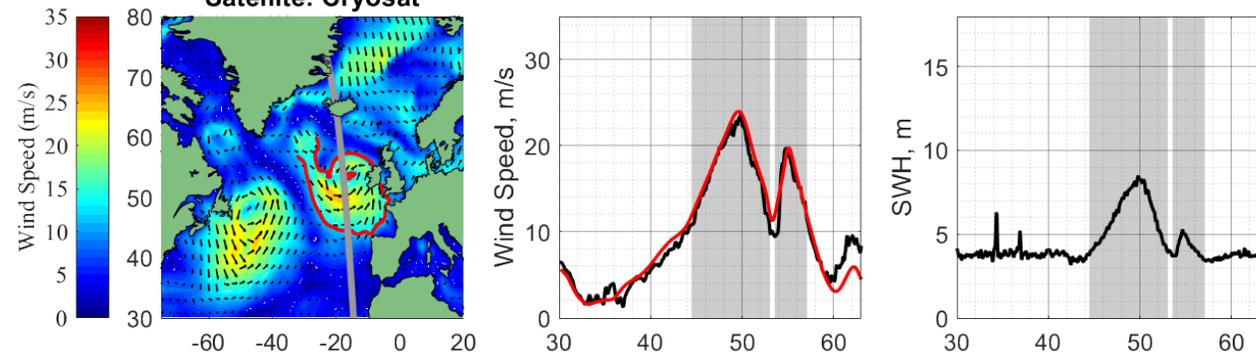
NCEP Wind Field 12-Feb-2020 23:00:00

Satellite: Sentinel 3B



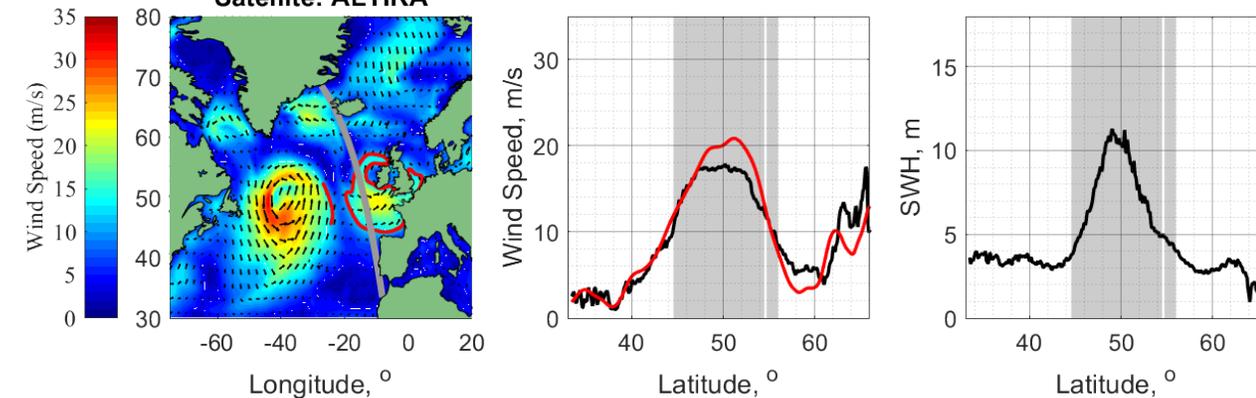
NCEP Wind Field 12-Feb-2020 21:00:00

Satellite: Cryosat



NCEP Wind Field 13-Feb-2020 06:00:00

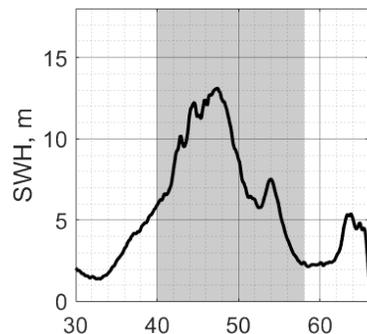
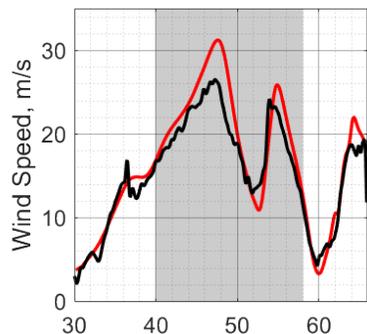
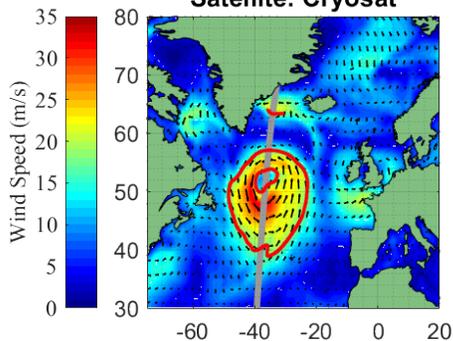
Satellite: ALTIKA



# Примеры Измерений Высоты Значительных Волн и Скорости Ветра для ВЦ № 2

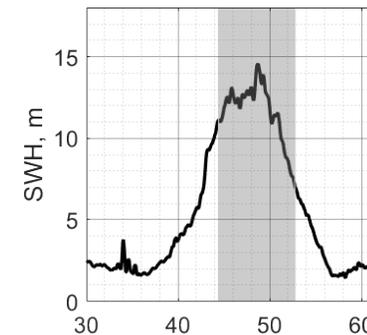
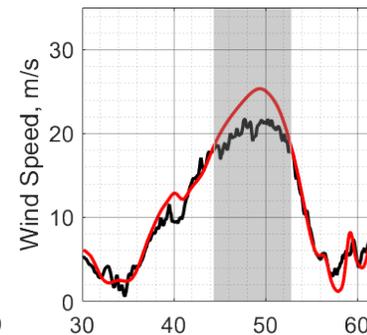
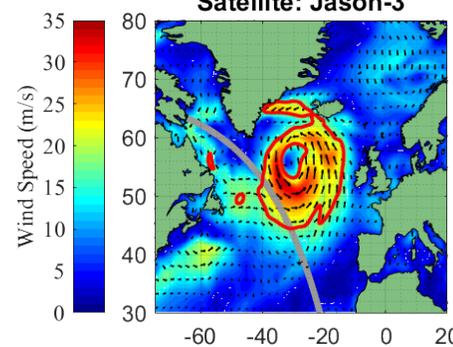
NCEP Wind Field 13-Feb-2020 10:00:00

Satellite: Cryosat



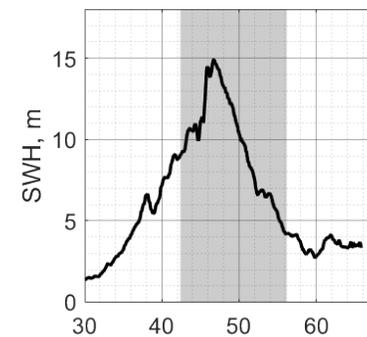
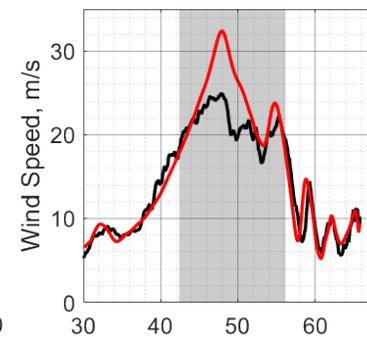
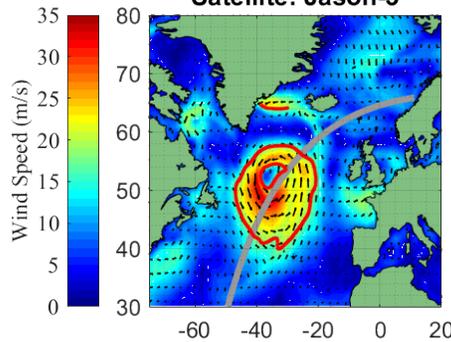
NCEP Wind Field 13-Feb-2020 20:00:00

Satellite: Jason-3



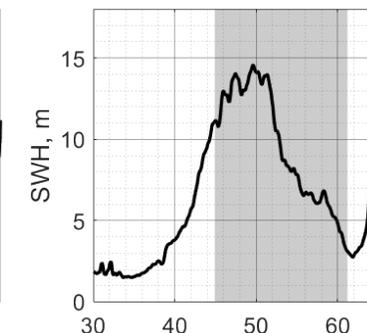
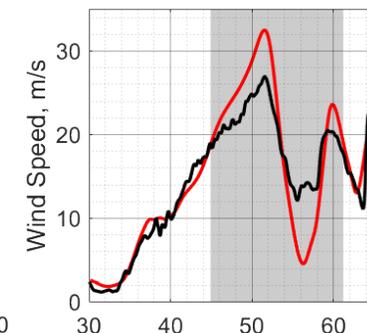
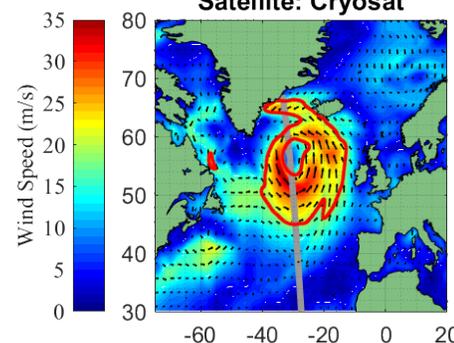
NCEP Wind Field 13-Feb-2020 12:00:00

Satellite: Jason-3



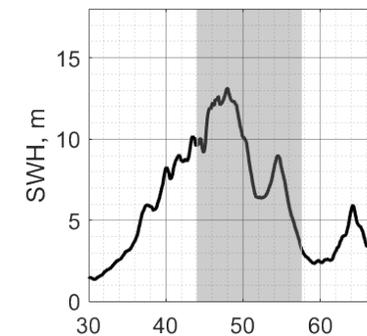
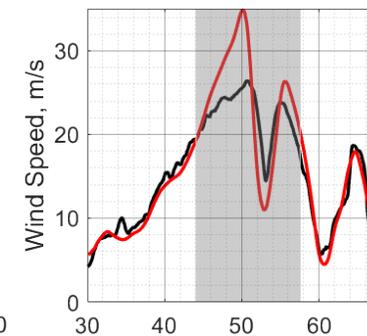
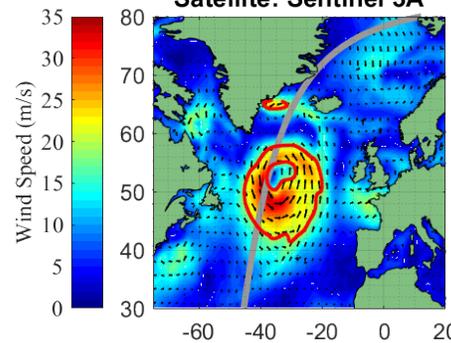
NCEP Wind Field 13-Feb-2020 21:00:00

Satellite: Cryosat



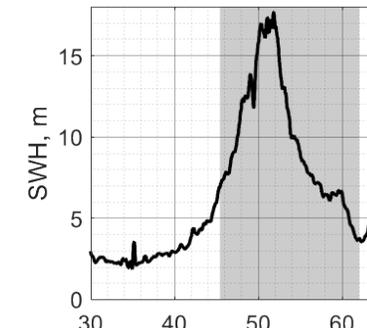
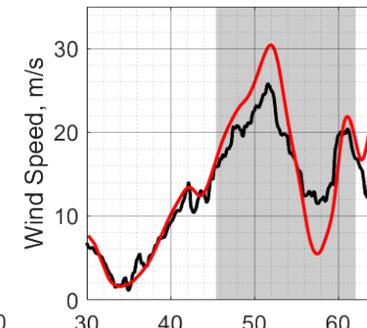
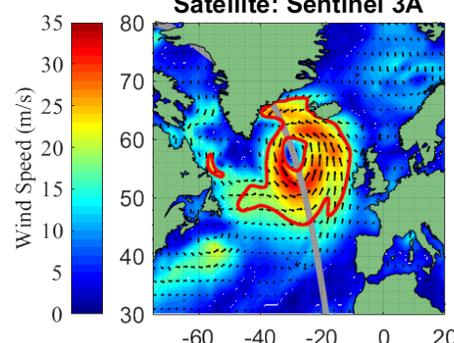
NCEP Wind Field 13-Feb-2020 13:00:00

Satellite: Sentinel 3A



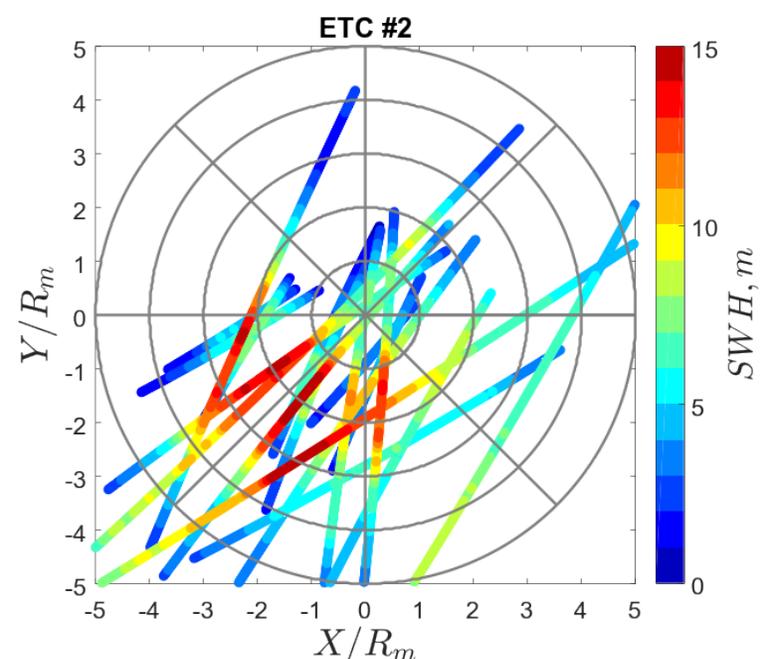
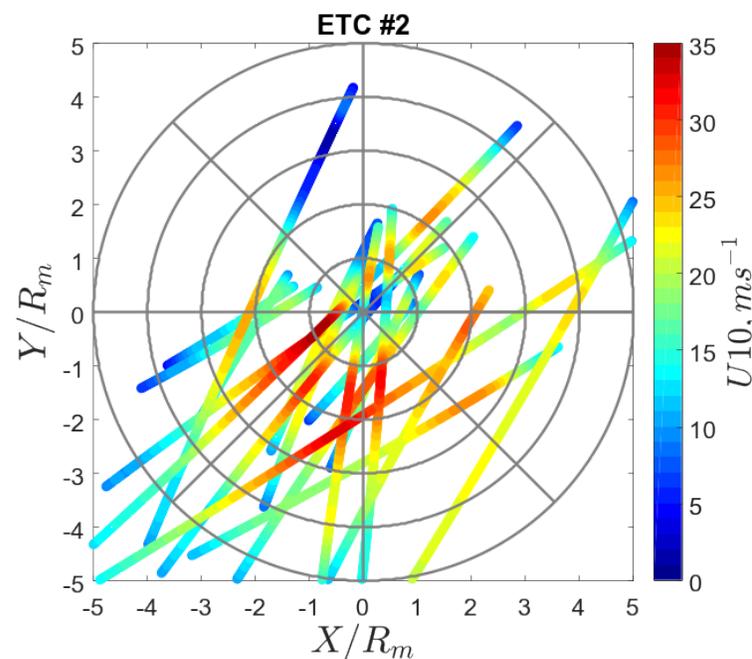
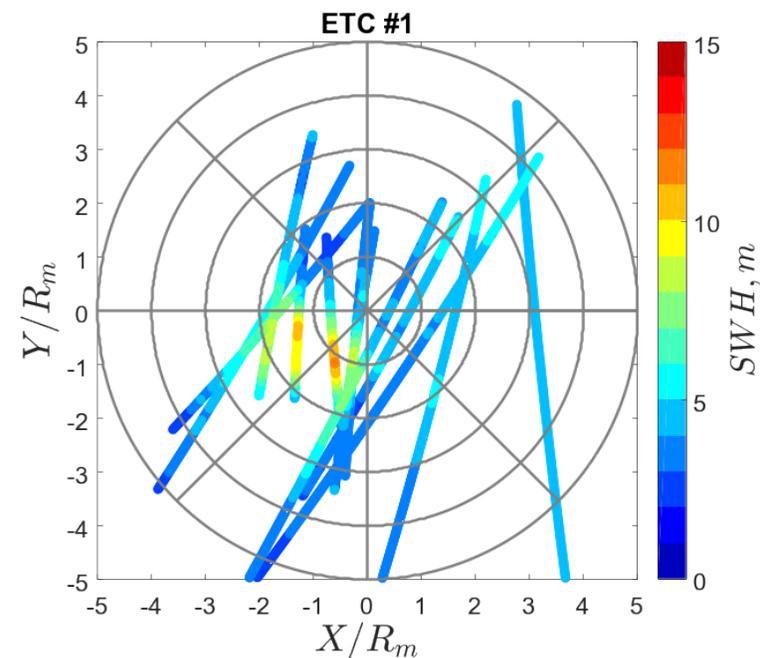
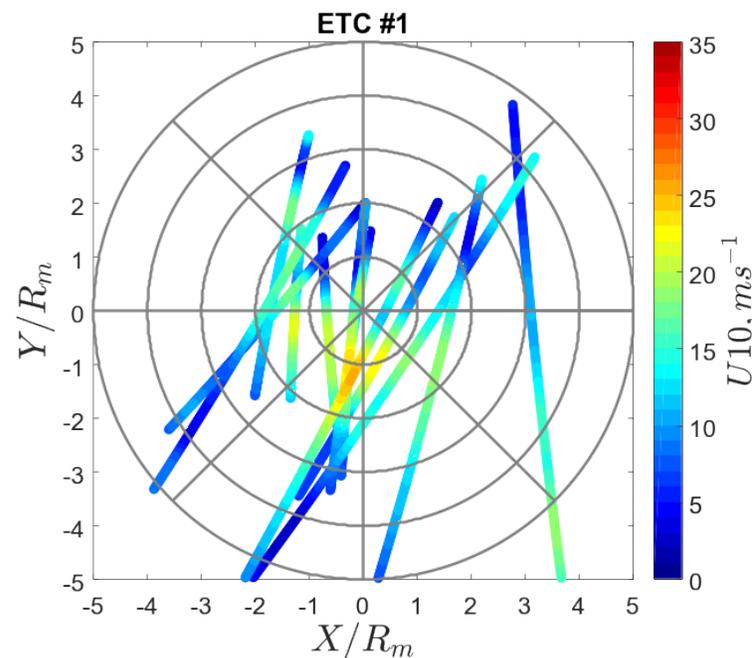
NCEP Wind Field 13-Feb-2020 23:00:00

Satellite: Sentinel 3A

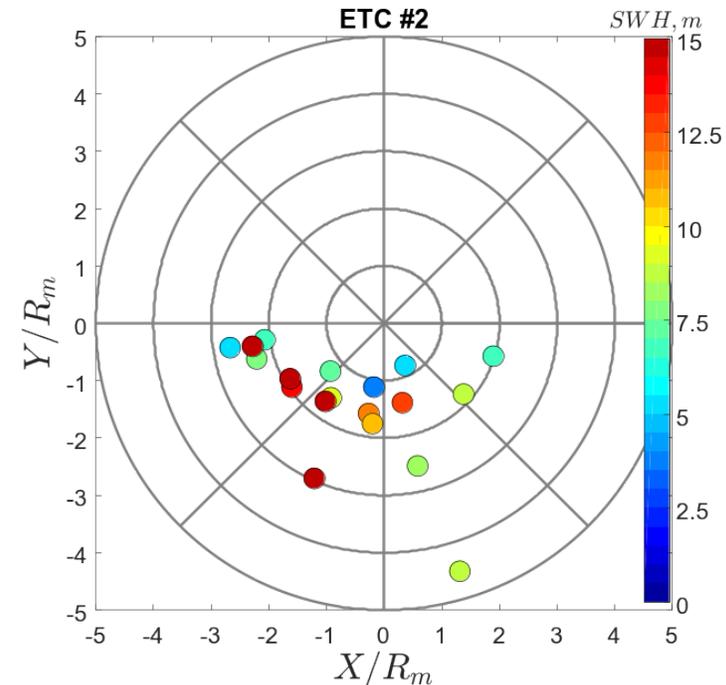
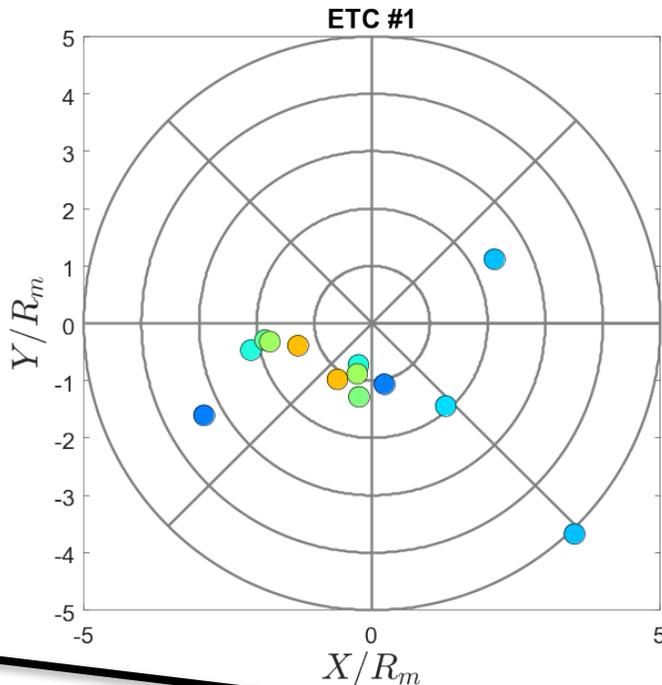


# Измерения Высоты Значительных Волн и Скорости Ветра Внутри Шторма

Измерения SWH внутри  
циклона в системе  
координат, связанной с  
циклоном. Циклоны  
движутся на восток.



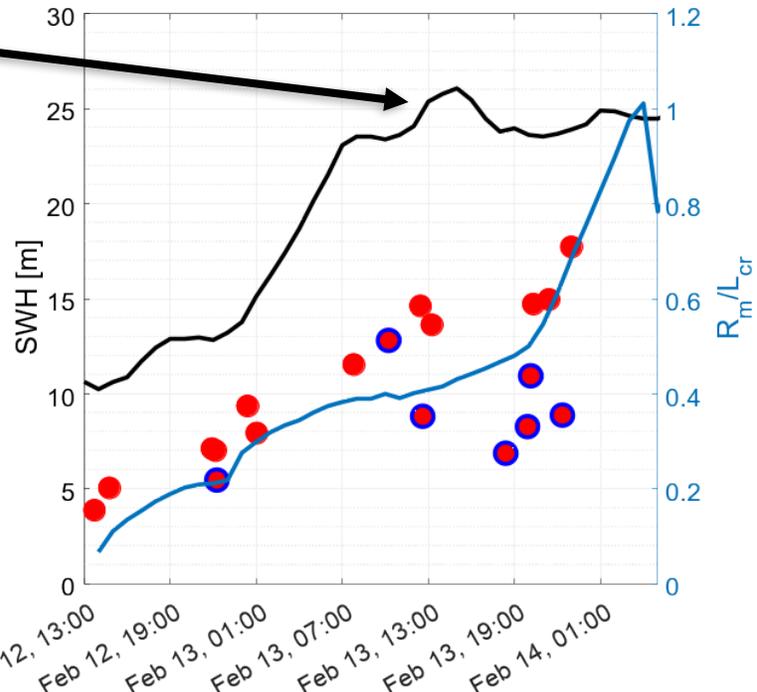
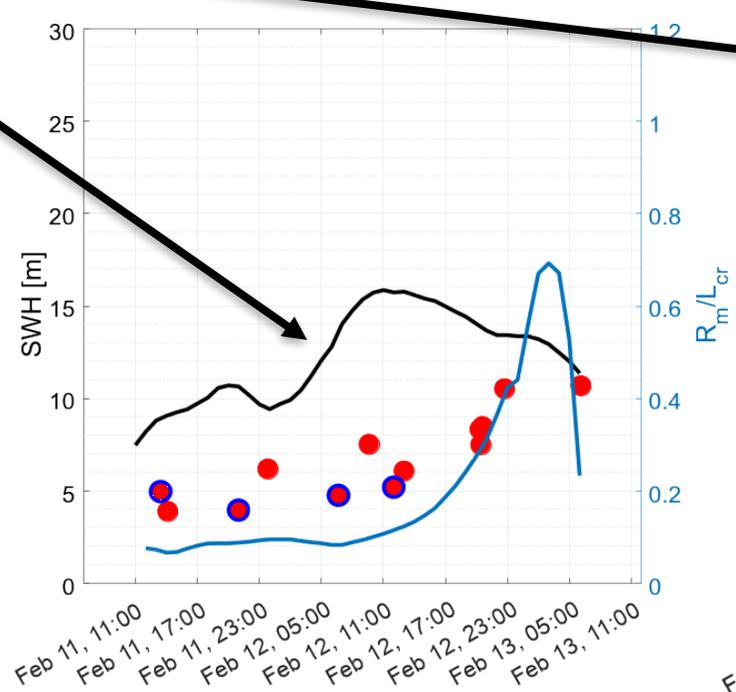
# Положение максимальных значений SWH



$H_s = 0.21 u_m^2 / g$   
полностью развитых волн  
(Pierson and Moskowitz 1964)

# Эволюция во времени максимальных значений SWH и

$$R_m / L_{cr}$$

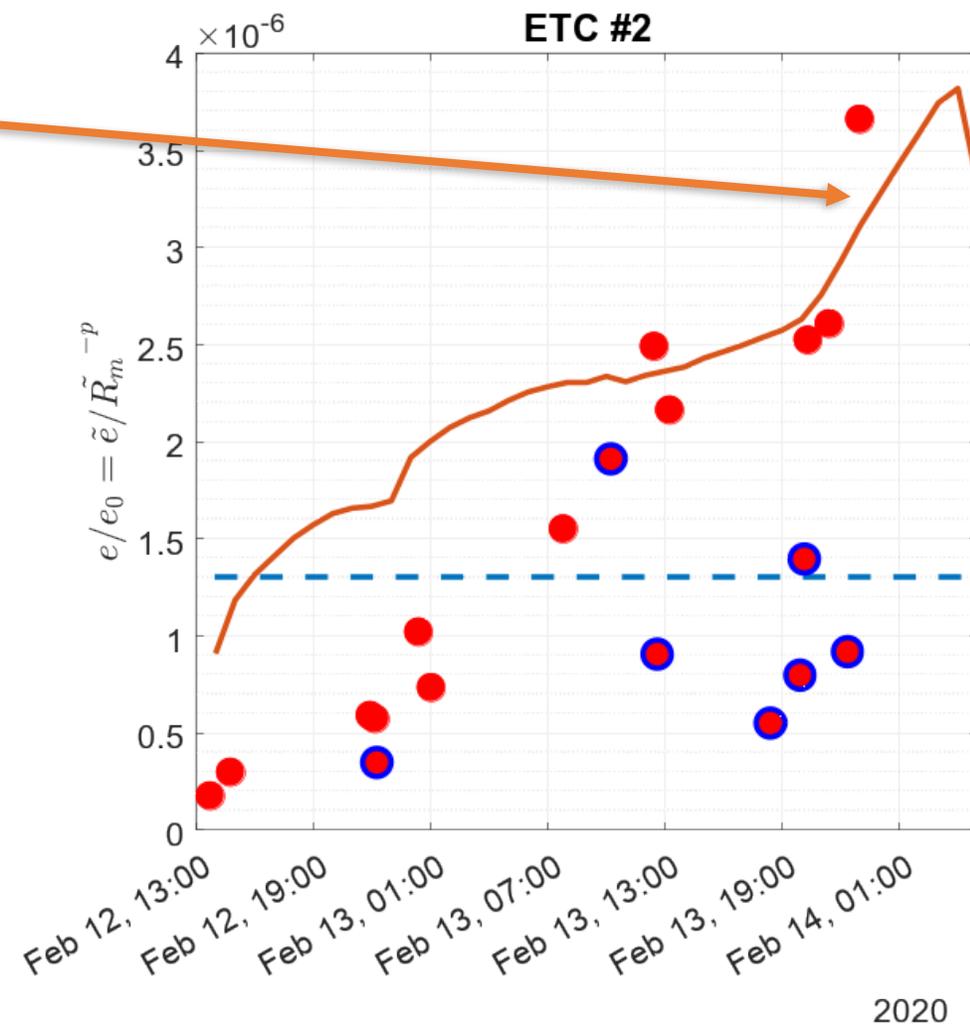
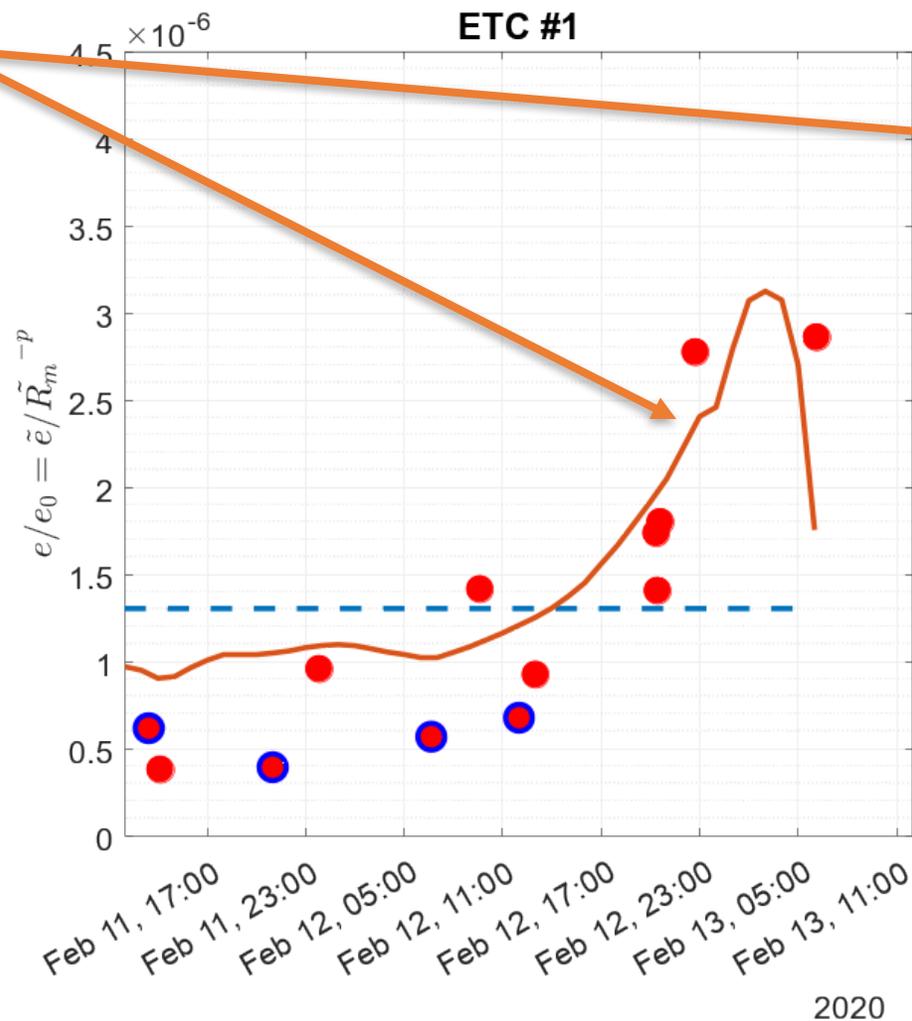


# Автомодельные Решения Генерации Волн

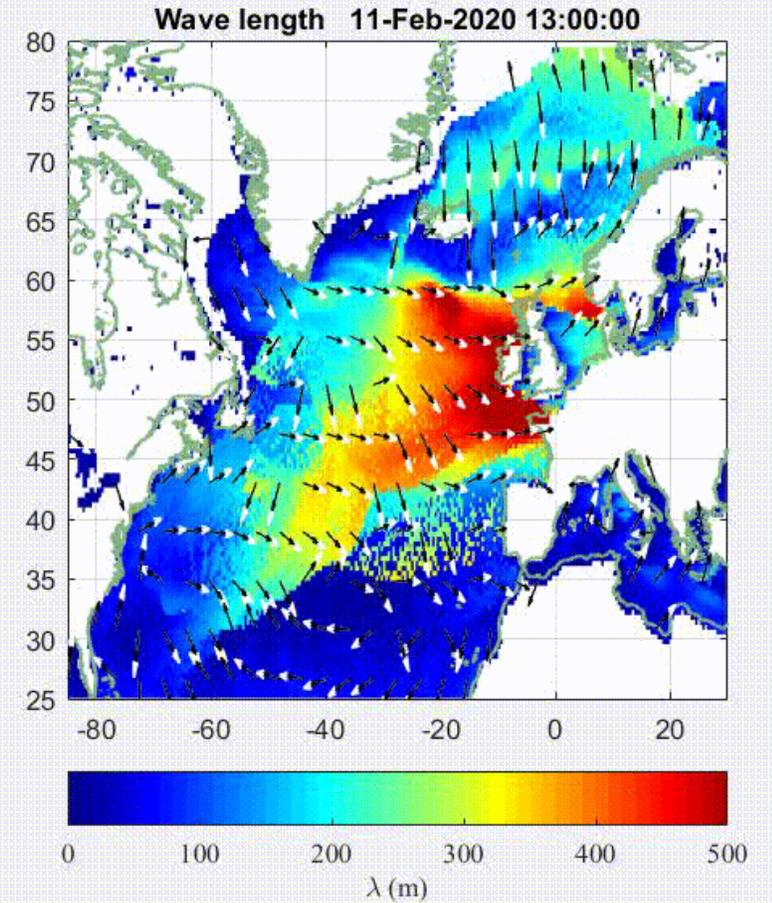
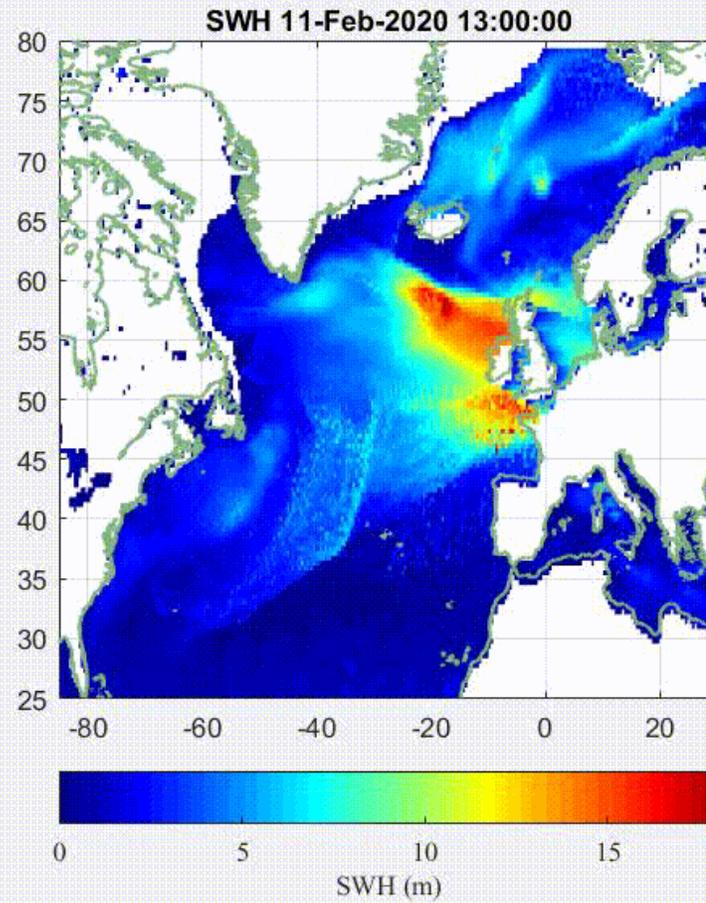
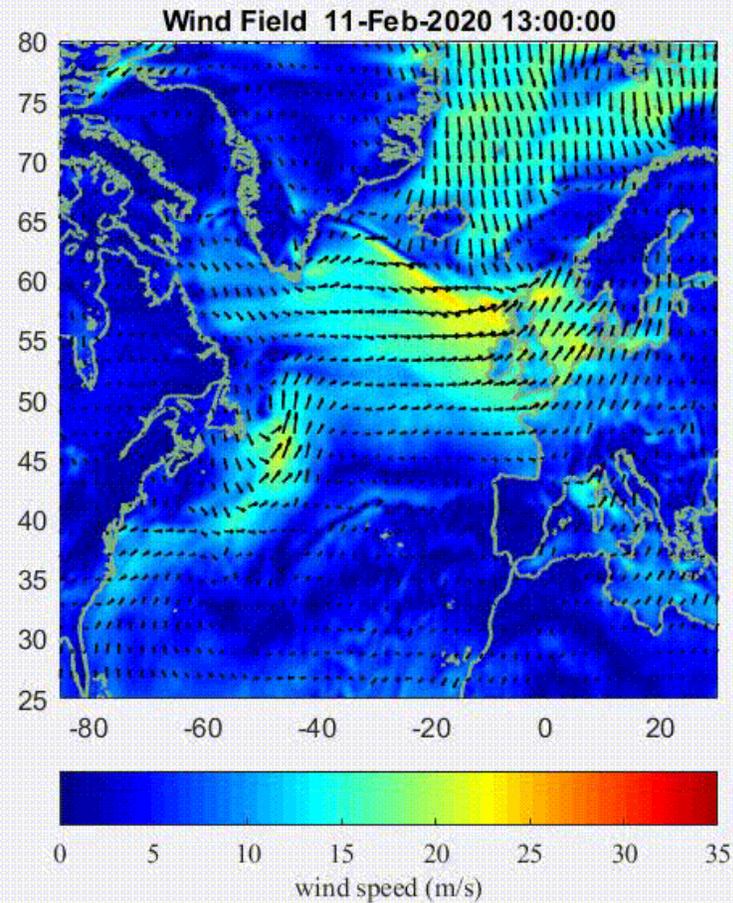
$$\frac{\tilde{e}_{\max}}{\tilde{e}_0} = 2,92 \left( \frac{\tilde{R}_m}{\tilde{L}_{cr}} \right)^{0,53}$$

Kudryavtsev et al. (2021)

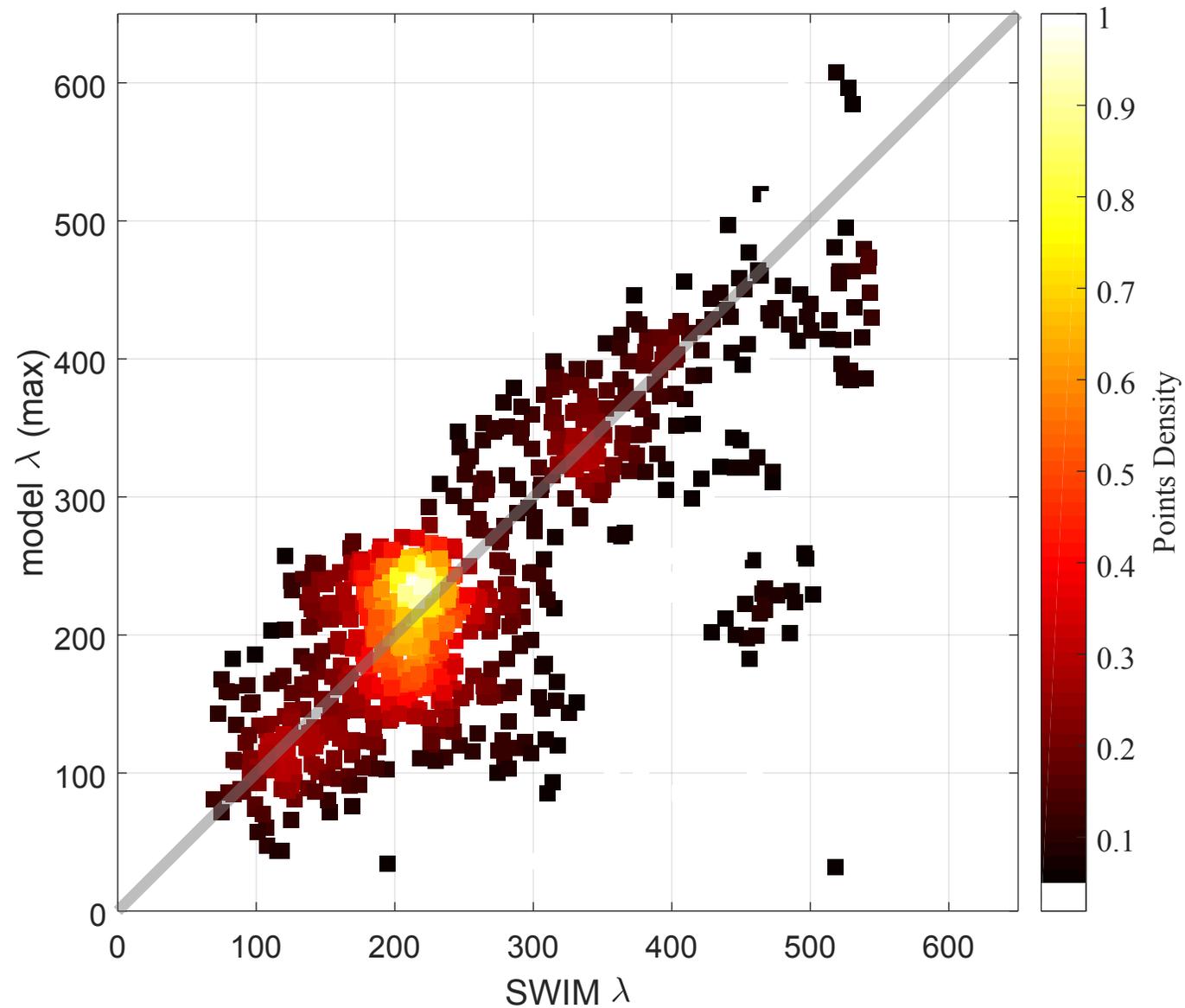
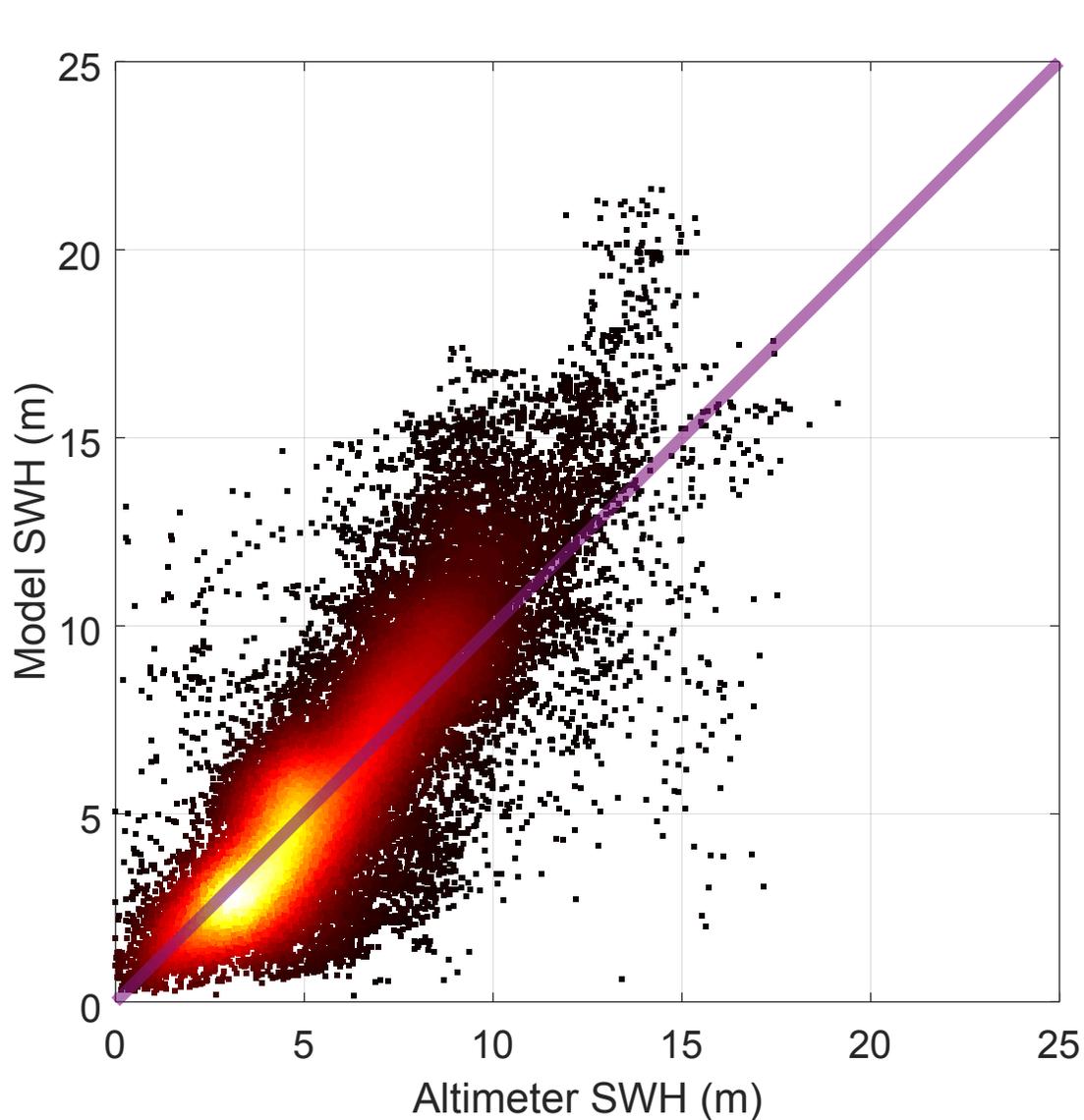
- Альтиметрические измерения где  $1,5 < R/R_m < 2$
- Альтиметрические измерения где  $R/R_m > 2$



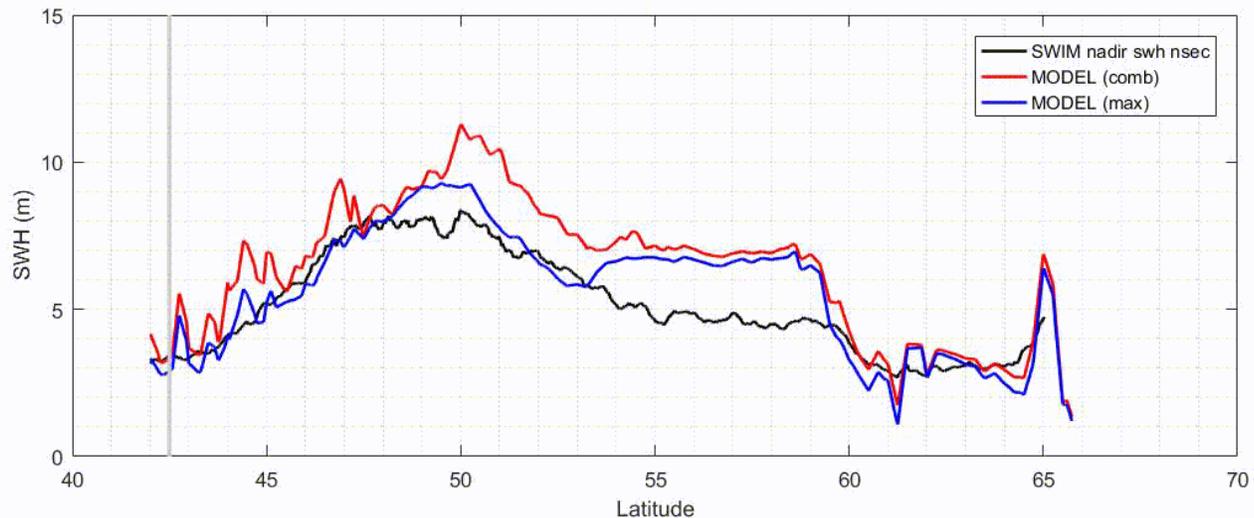
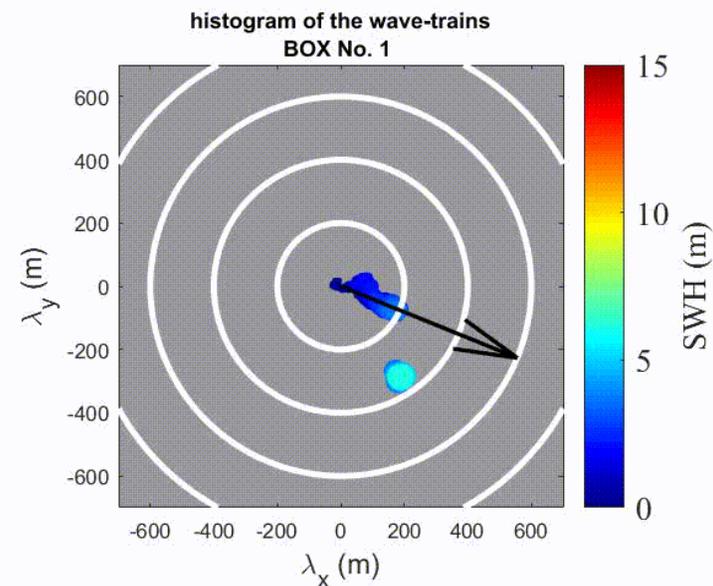
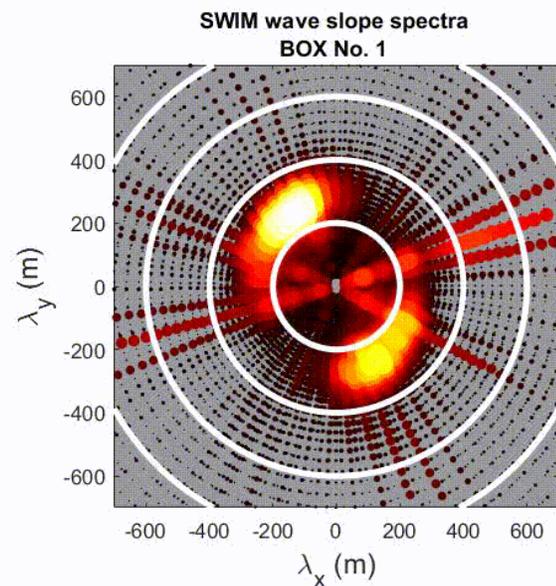
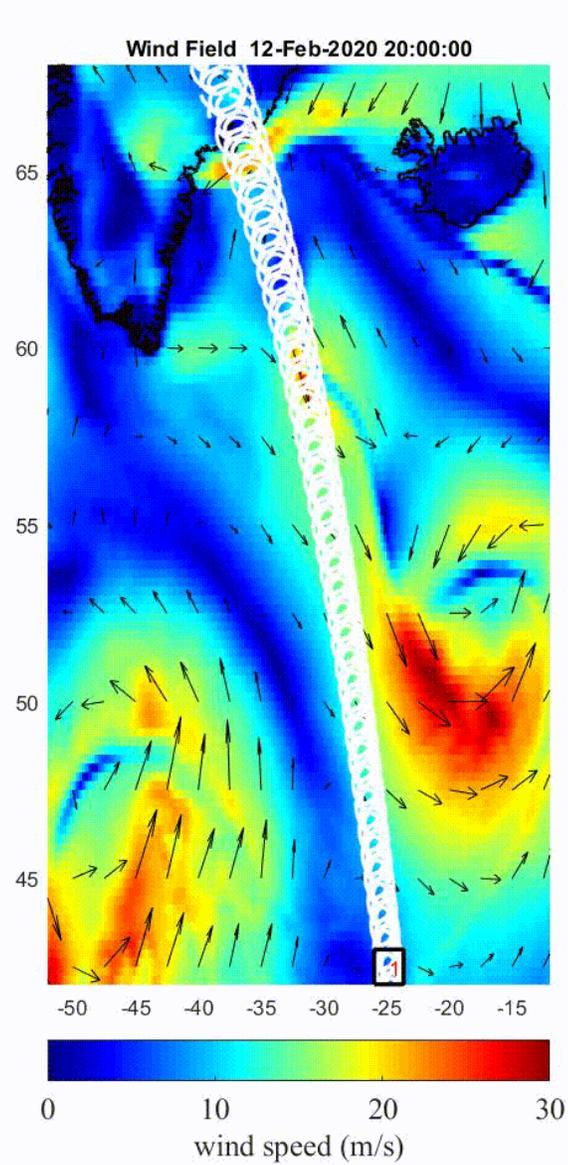
# Анимация Смоделированного Волнового Поля 11-15 Января 2020 Года в Северной Части Атлантического Океана с Использованием 2D Параметрической Модели (Kudryavtsev et al. 2021)



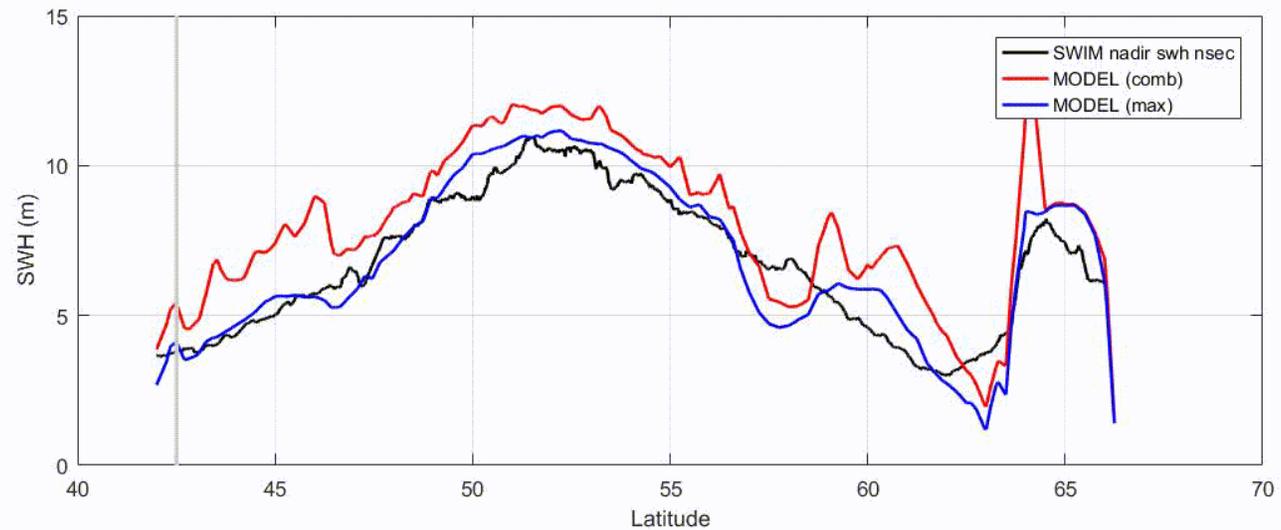
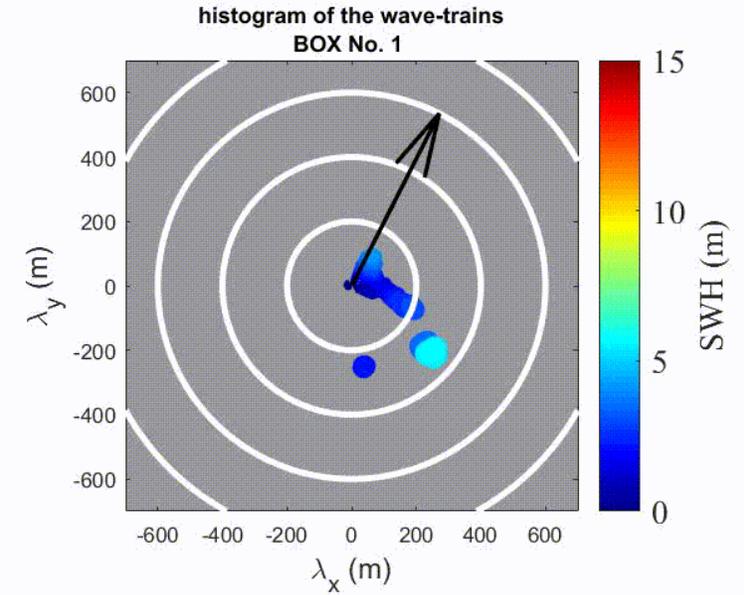
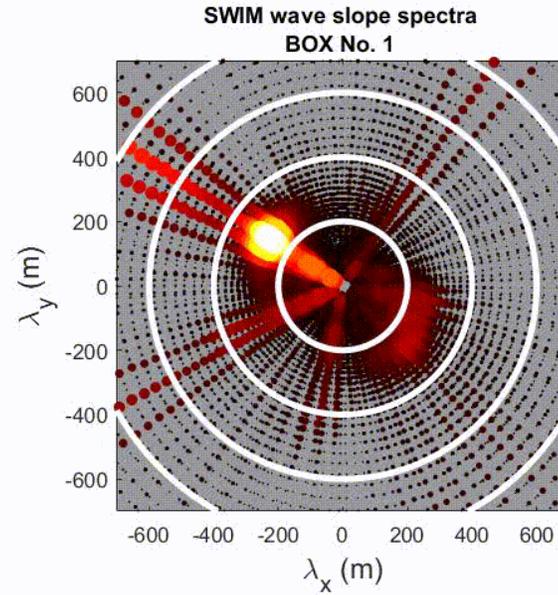
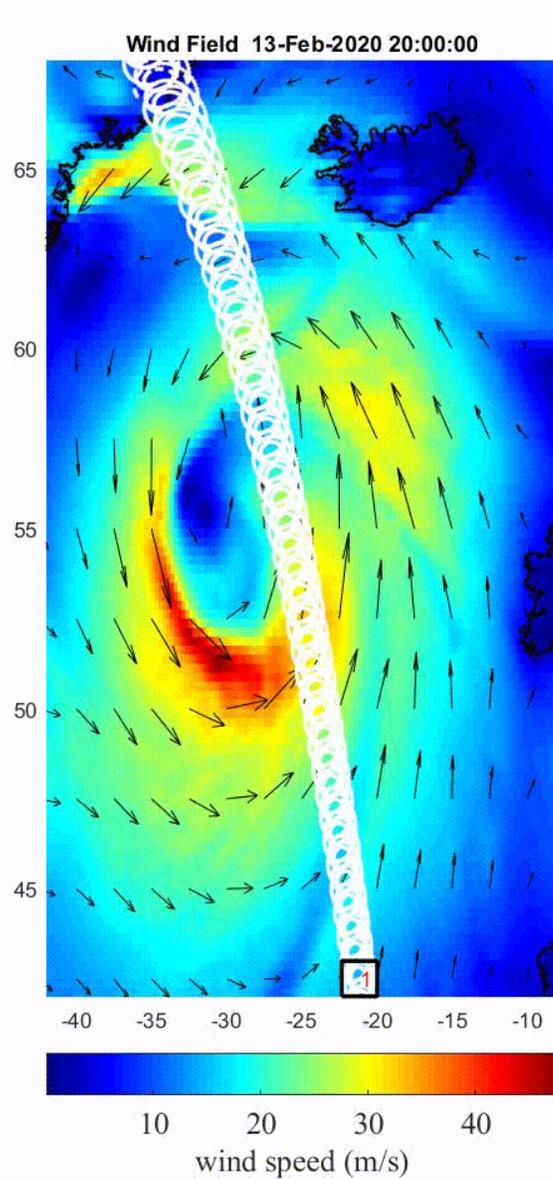
# Сравнение Результатов Моделирования SWH и $\lambda$ с Спутниковыми Измерениями



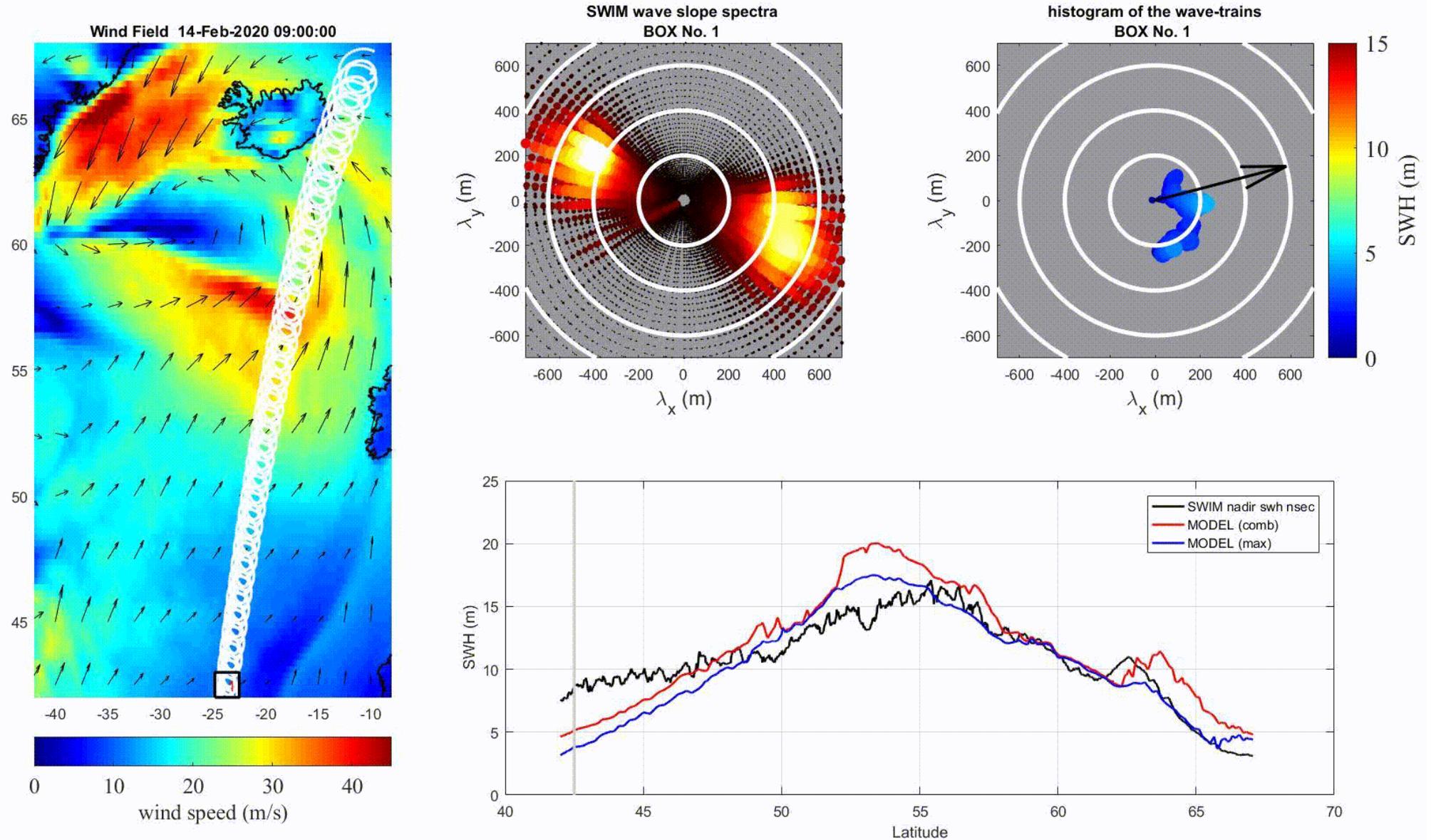
# Угловые распределения волн по сравнению со спектральными измерениями CFOSAT-SWIM (12 Февраля 2020 г.)



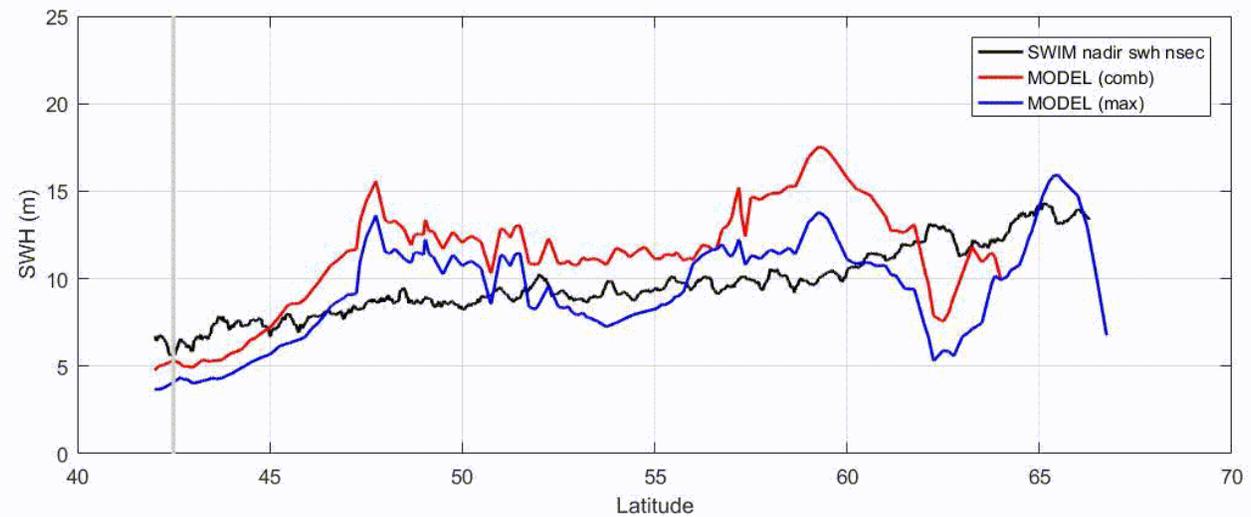
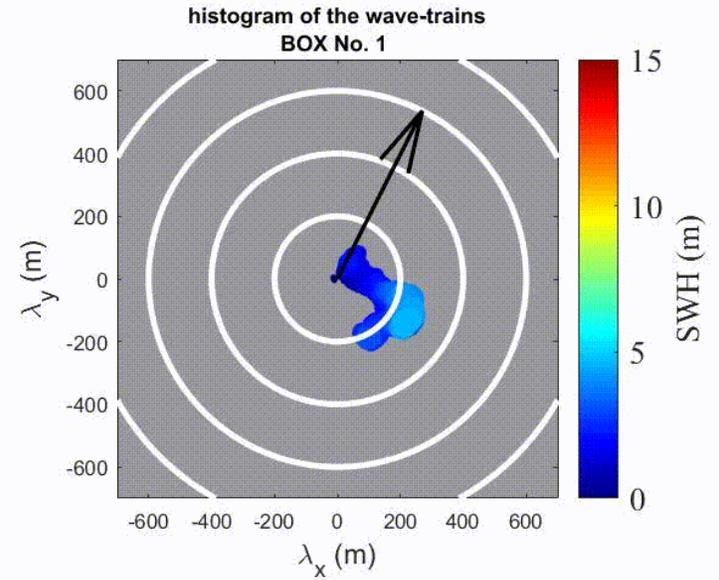
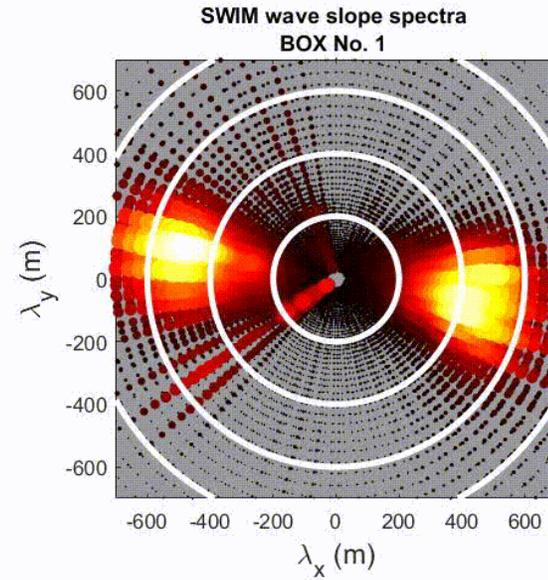
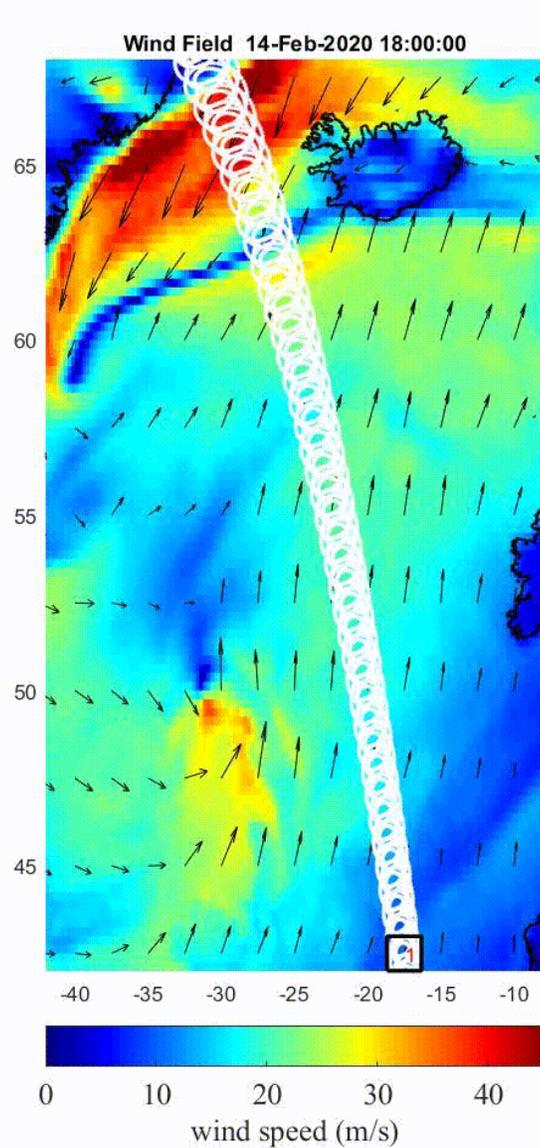
# Угловые распределения волн по сравнению со спектральными измерениями CFOSAT-SWIM (13 Февраля 2020 г.)



# Угловые распределения волн по сравнению со спектральными измерениями CFOSAT-SWIM (14 Февраля 2020 г.)



# Угловые распределения волн по сравнению со спектральными измерениями CFOSAT-SWIM (14 Февраля 2020 г.)



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В данной работе приводятся результаты моделирования поля волн в северной части атлантического океана в условиях внетропических циклонов. Для исследования использована 2D параметрическая модель генерации и эволюции волн, предложенная в работе [Kudryavtsev et al. \(2021\)](#), которая адаптирована для универсальных условий воздуха и моря. В качестве входных параметров использовались ежечасные поля ветра по данным реанализа NCEP/CFSv2. Результаты моделирования сравниваются со спутниковыми измерениями.

## ВЫВОДЫ

- Результаты моделирования позволили глубже понять механизмы и особенности генерации поля волн движущимися циклонами, и определить критерии формирования аномально высоких волн.
- В северной части Атлантического океана при ВЦ ситуация с волнением становится опасна и сложна:
  1. радиус ВЦ может достигать более 1000 км, а максимальная скорость ветра достигает 47 м/с;
  2. при этих условиях SWH становится 18 м с длиной волны 600 м;
  3. эти волны распространяются в северной части Атлантического океана под ВЦ;
- Некоторые разногласия результатов моделирования и измерений могут быть связаны с:
  1. пренебрежением взаимодействием течения и волн;
  2. неопределённостью полей ветра NCEP/CFSv2.

**Спасибо за Внимание**



## Список Литературы

1. **Bowyer P.J., MacAfee A.W.** The Theory of Trapped-Fetch Waves with Tropical Cyclones—an Operational Perspective // *Weather and Forecasting*. 2005. V. 20. P. 229–244.
2. **Dysthe K.B., Harbitz, A.** Big waves from polar lows? // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 1987. V. 39. P. 500–508. doi:10.3402/tellusa.v39i5.11776.
3. **Hell M.C., Ayet A., Chapron B.** Swell Generation under Extra-Tropical Storms // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021. V. 126. e2021JC017637, doi:https://doi.org/10.1029/2021JC017637.
4. **Kudryavtsev V., Yurovskaya M., Chapron B.** 2D Parametric Model for Surface Wave Development Under Varying Wind Field in Space and Time // *Journal of Geophysical Research (Oceans)*. 2021. V. 126. e16915. doi:10.1029/2020JC016915.
5. **Kudryavtsev V., Yurovskaya M., Chapron B.** Self-Similarity of Surface Wave Developments under Tropical Cyclones // *Journal of Geophysical Research (Oceans)*. 2021. V. 126. e16916. doi:10.1029/2020JC016916.
6. **Pierson WJJr and Moskowitz L** (1964) proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 69(24), pp. 5181– 5190. doi:10.1029/JZ069i024p05181.
7. **Young I.R.** Parametric Hurricane Wave Prediction Model // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1988. V. 114. P. 637–652. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(1988)114:5(637).
8. **Young I.R., Vinoth J.** An "extended fetch" model for the spatial distribution of tropical cyclone wind-waves as observed by altimeter // *Ocean Engineering*. 2013. V. 70. P. 14–24.