Институт космических исследований Российской академии наук

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ЕЖЕГОДНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов)

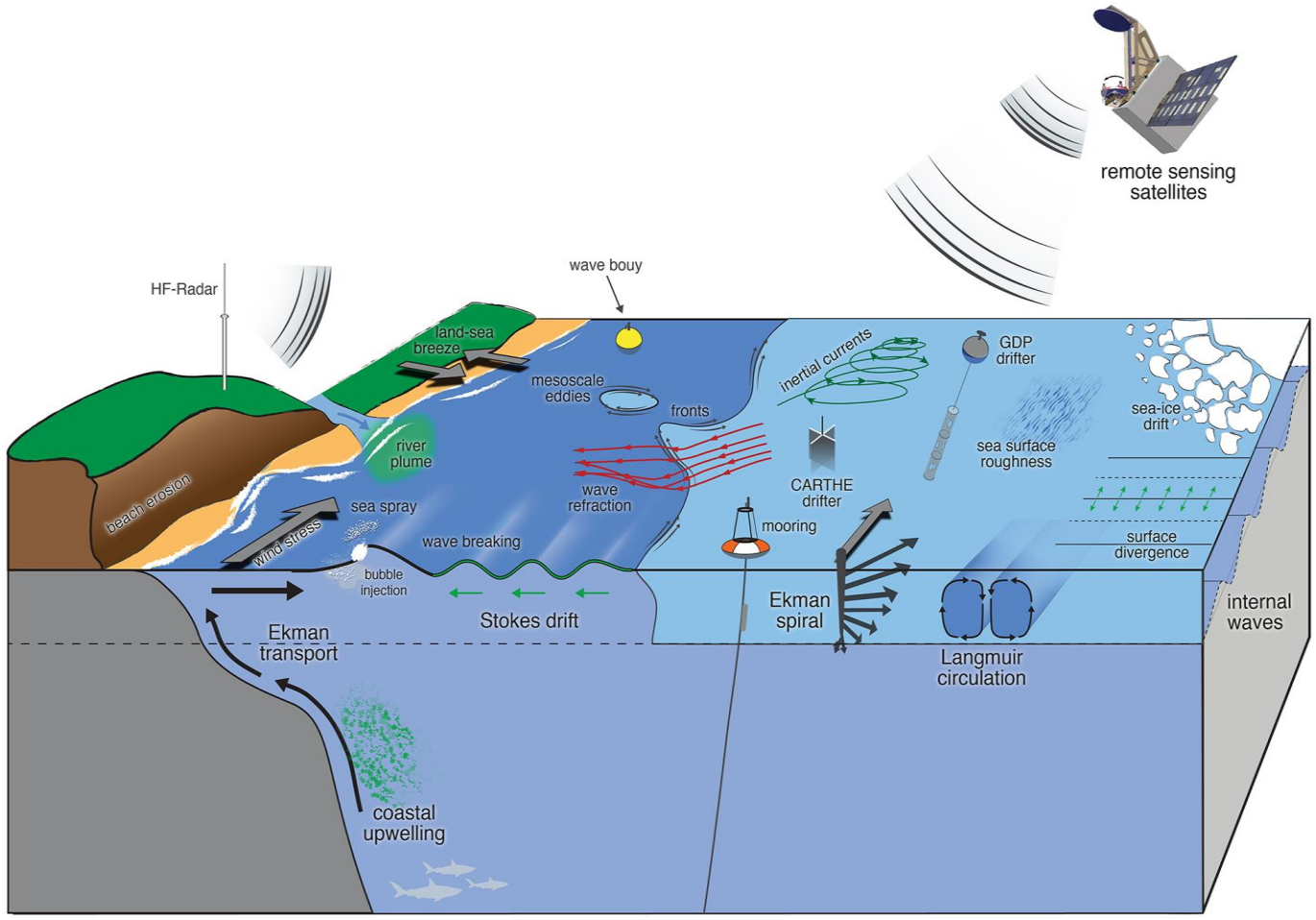
Особенности проявления мезомасштабных течений в поле ветровых волн: мультисенсорные спутниковые наблюдения и моделирование

Чешм Сиахи В. (1), Кудрявцев В.Н. (1,2)

(1) Лаборатория спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия
(2) Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Введение

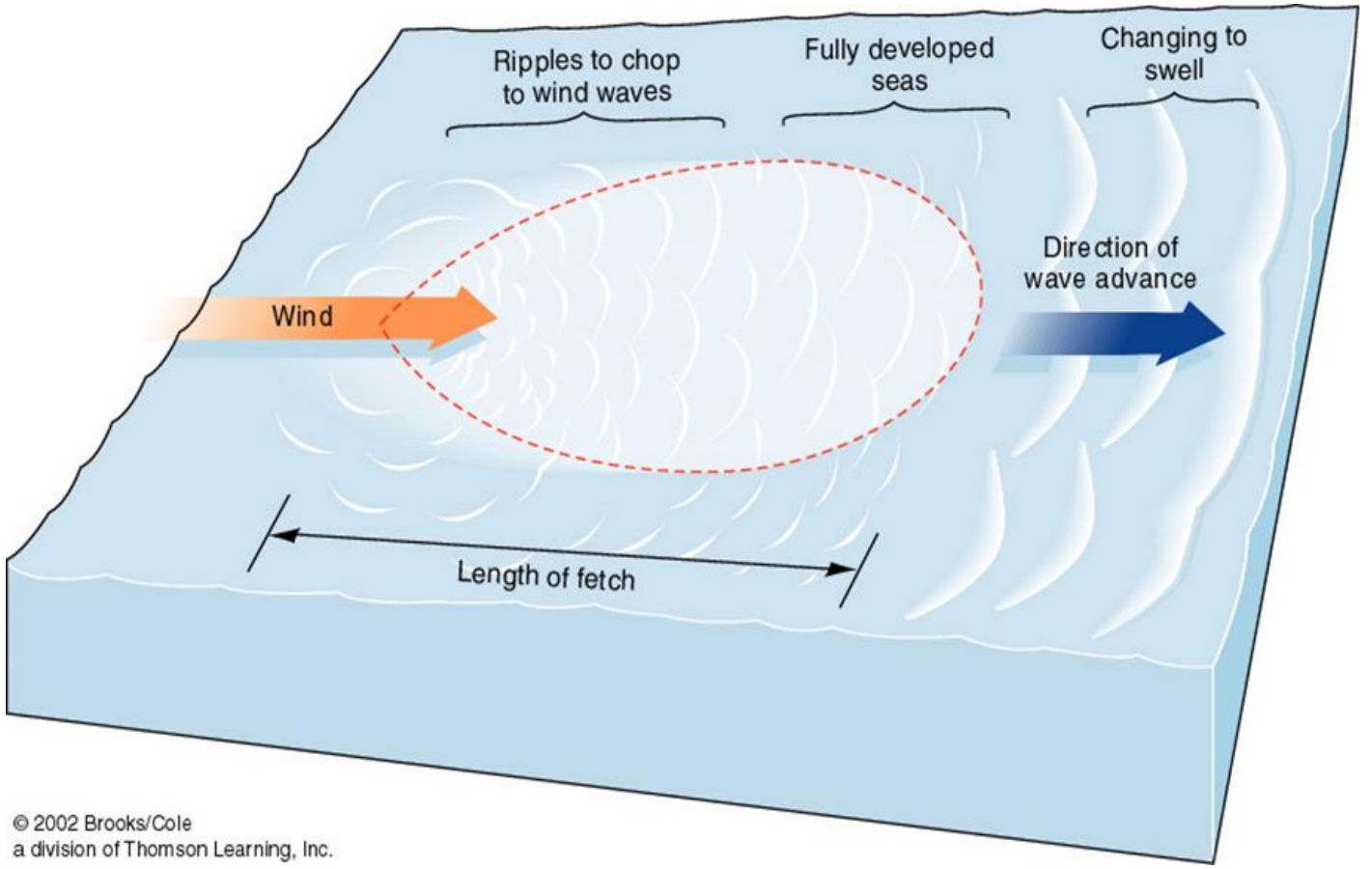
- **Поверхностные гравитационные ветровые волны играют важную роль в переносе тепла, импульса и энергии, а также в перемешивании верхнего слоя океана.**
- Их генерация определяется атмосферным воздействием.
- Их распространение и трансформация существенно зависят от пространственно-временной структуры поверхностных течений.



Schematic representation of upper-ocean processes that are coupled through the interaction between surface winds, currents, and waves (Villas Bôas et al., 2019)

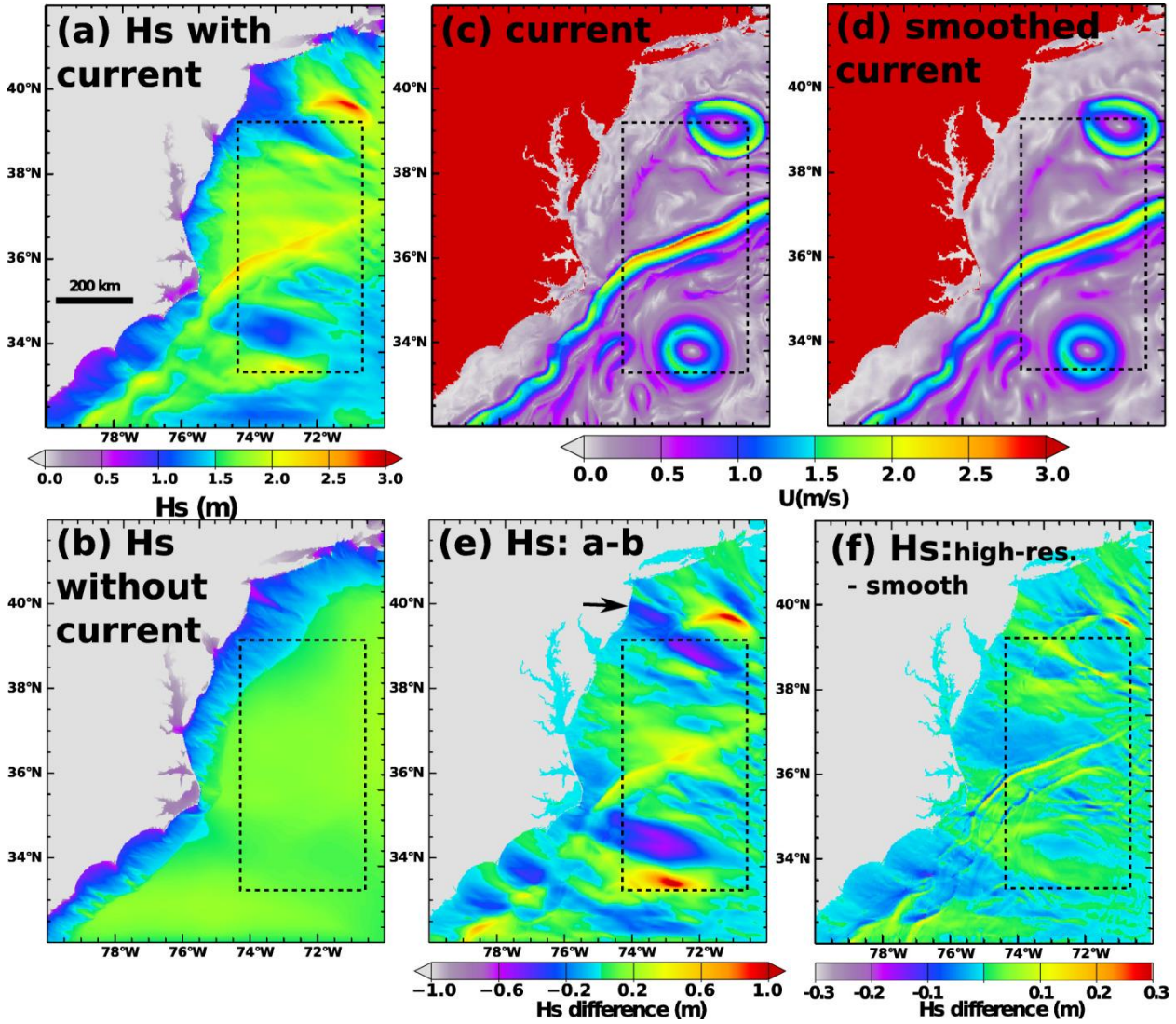
Введение

- Поверхностные гравитационные ветровые волны играют важную роль в переносе тепла, импульса и энергии, а также в перемешивании верхнего слоя океана.
- **Их генерация определяется атмосферным воздействием.**
- Их распространение и трансформация существенно зависят от пространственно-временной структуры поверхностных течений.



Введение

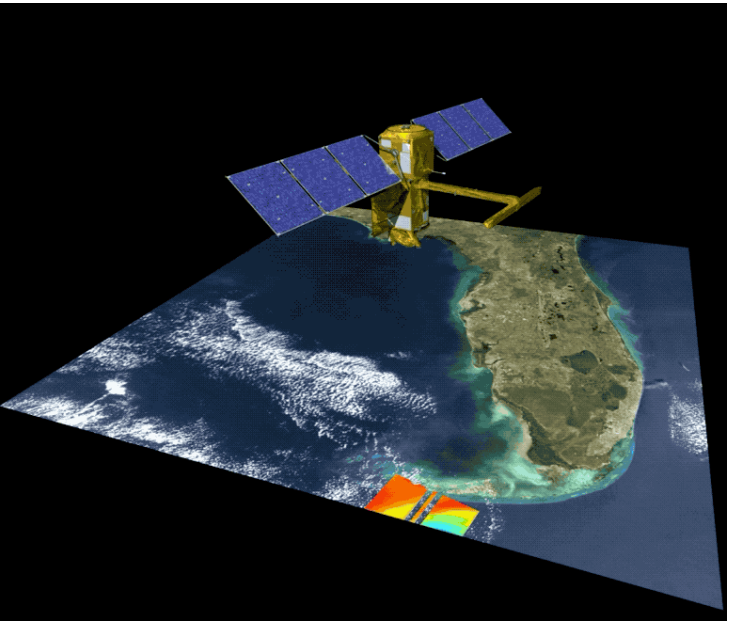
- Поверхностные гравитационные ветровые волны играют важную роль в переносе тепла, импульса и энергии, а также в перемешивании верхнего слоя океана.
- Их генерация определяется атмосферным воздействием.
- **Их распространение и трансформация существенно зависят от пространственно-временной структуры поверхностных течений.**

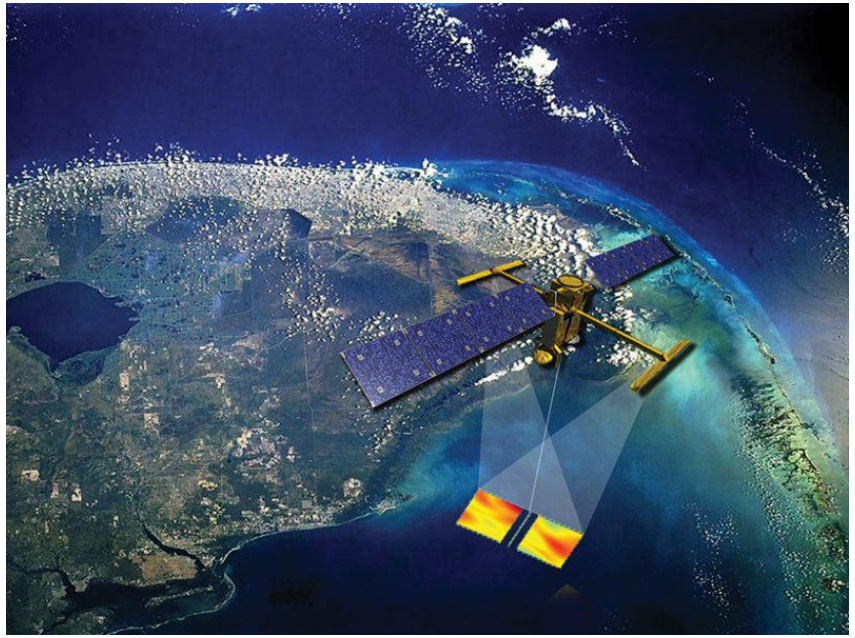


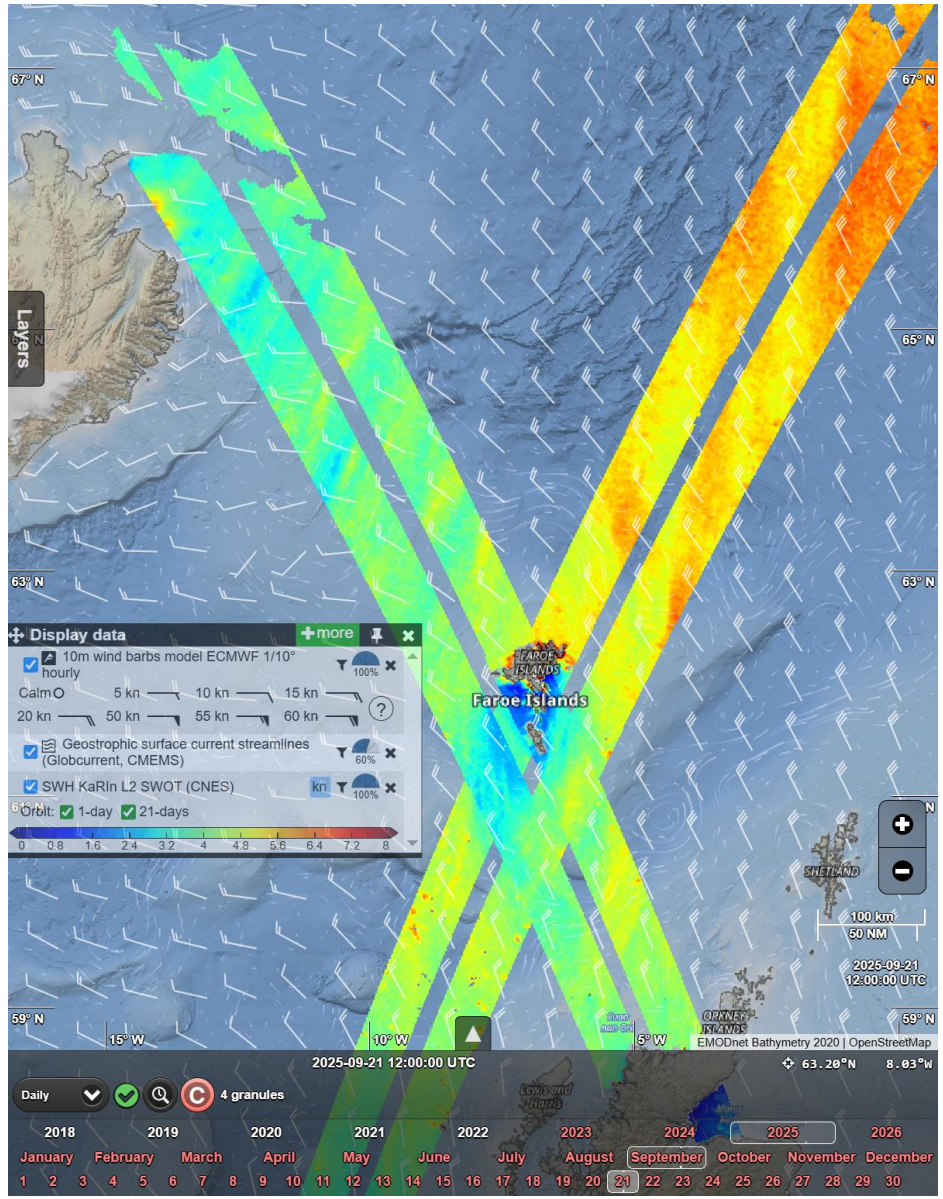
Impact of current on swells across the Gulf Stream on 18 September 2014, 6:00 UTC (Ardhuin et al., 2017).

Мотивация

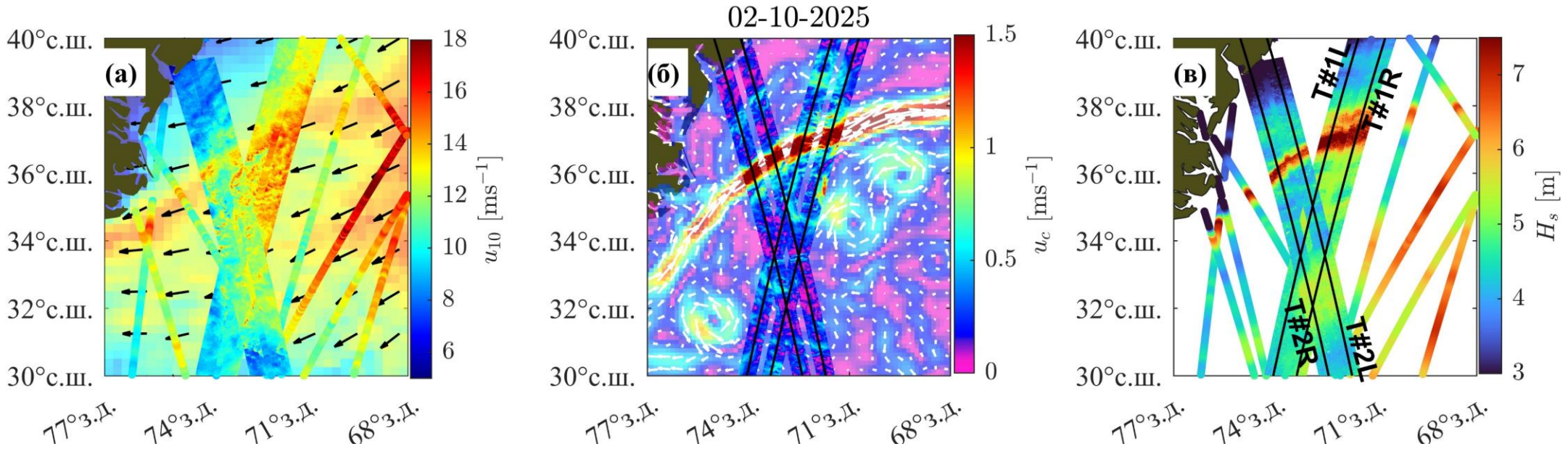
- В полях значительных высот волн (H_s), зафиксированных интерферометром высокого разрешения SWOT, вблизи сильных океанических течений и вихрей, наблюдались аномалии H_s.
- H_s и ветер из L2, а течение из L3 с пространственном разрешением ~ 2 км



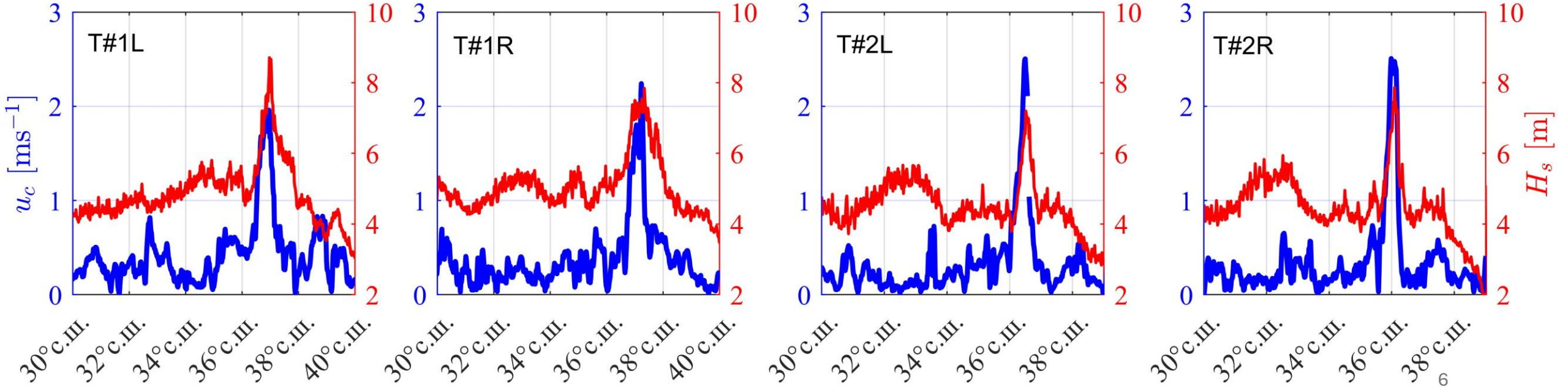




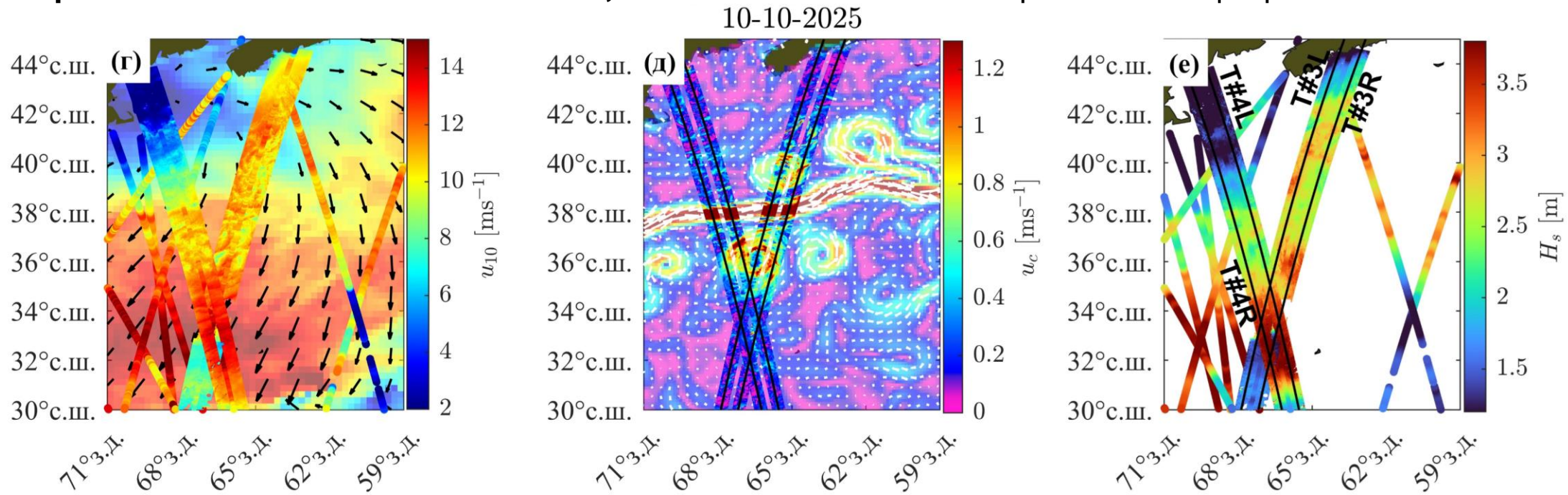
Примеры полей волн и их изменчивости, вызванных течениями в районе Гольфстрима



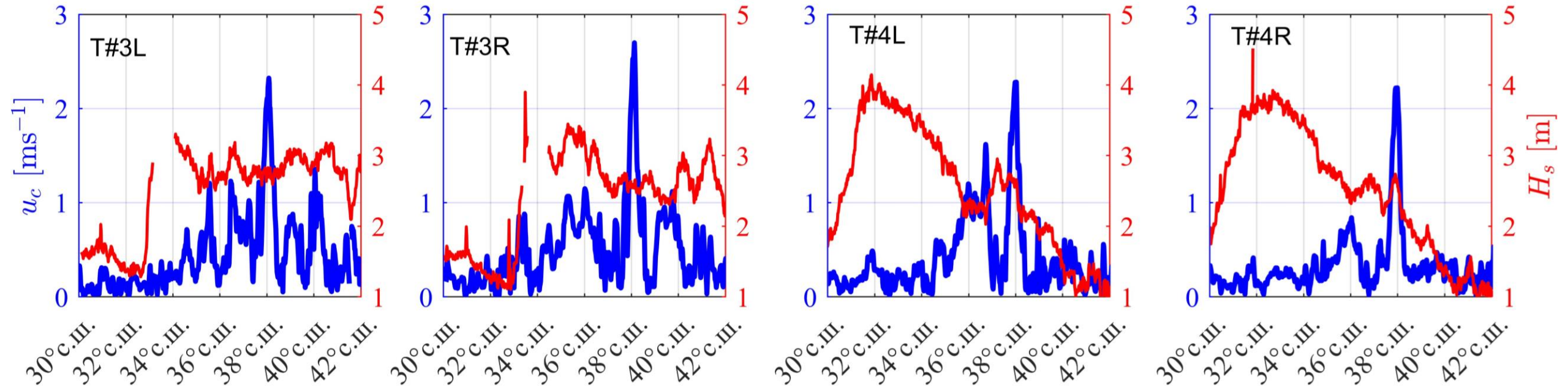
Поле Ветра | Поле Течения | Высота волны (наблюдения)



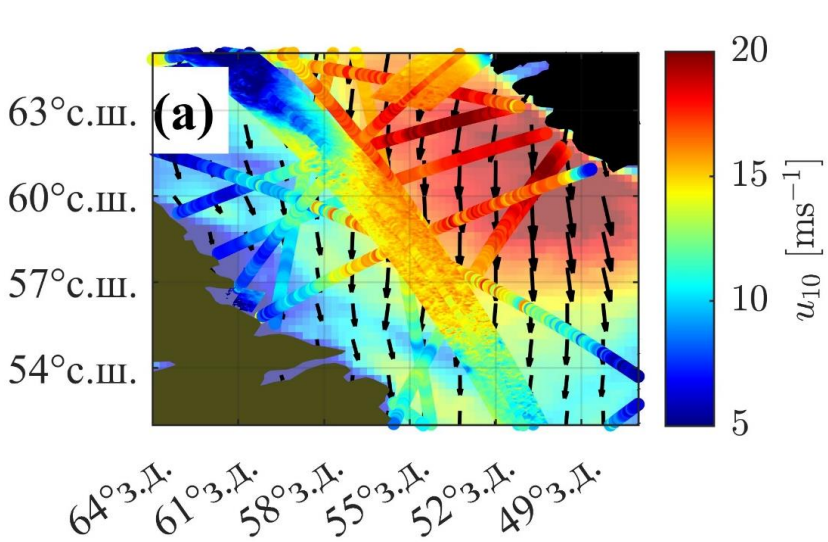
Примеры полей волн и их изменчивости, вызванных течениями в районе Гольфстрима



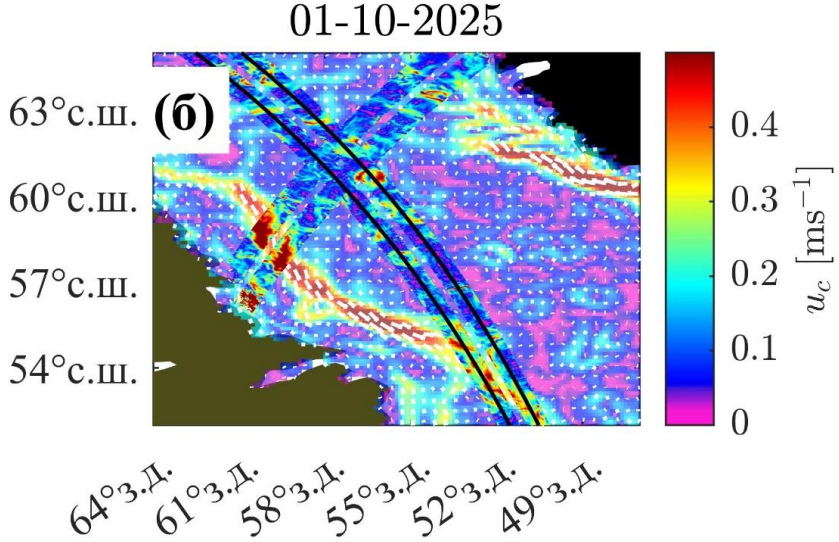
Поле Ветра Поле Течения Высота волны (наблюдения)



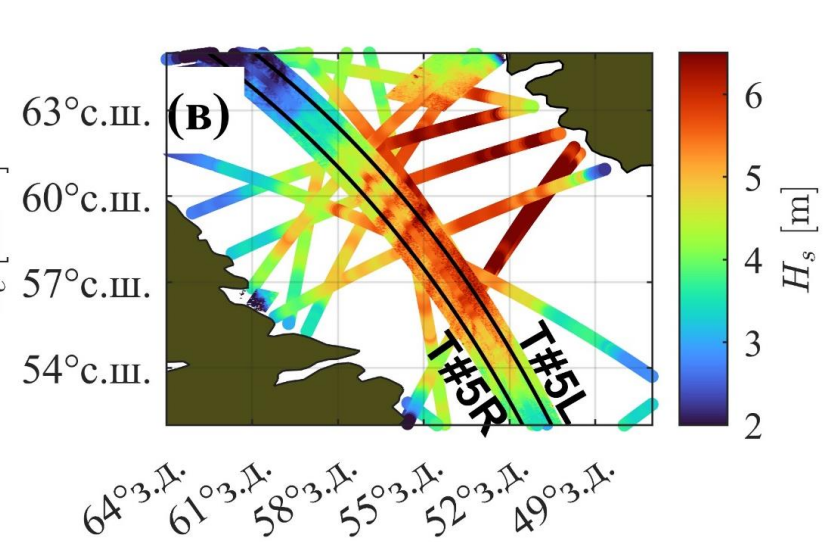
Примеры полей волн и их изменчивости, вызванных течениями в Лабрадорском море



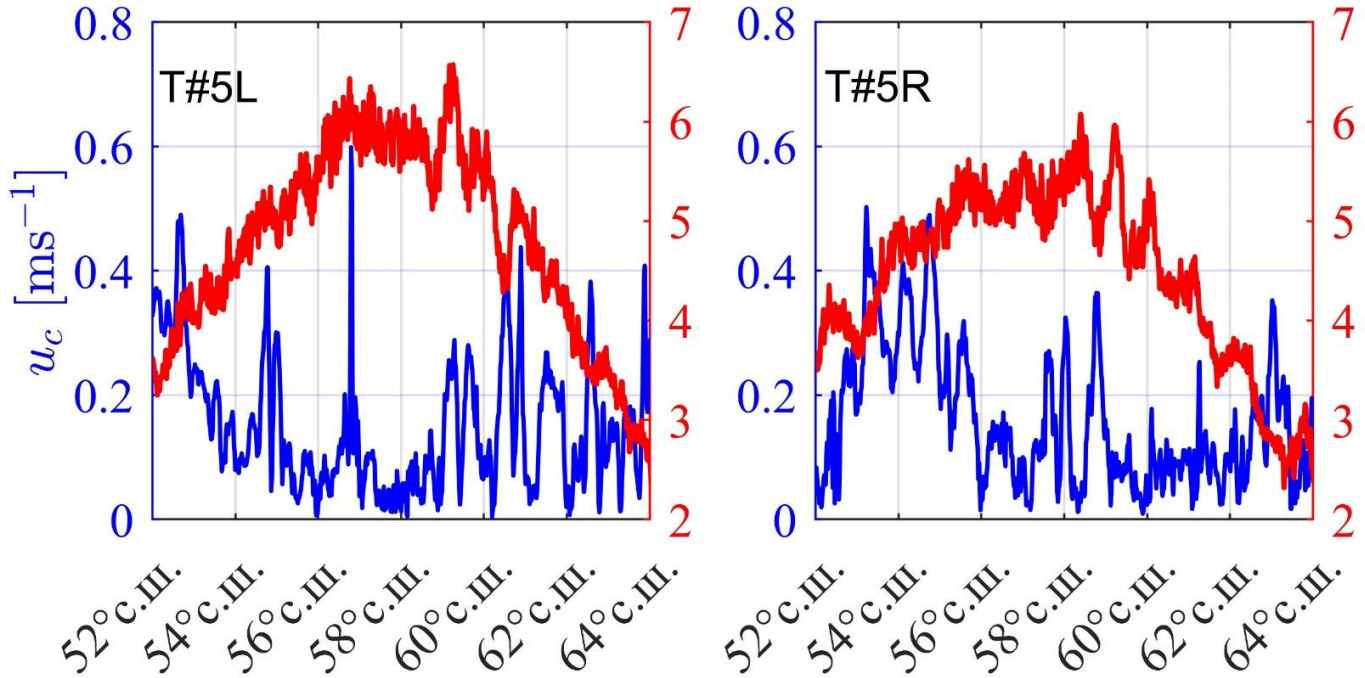
Поле Ветра



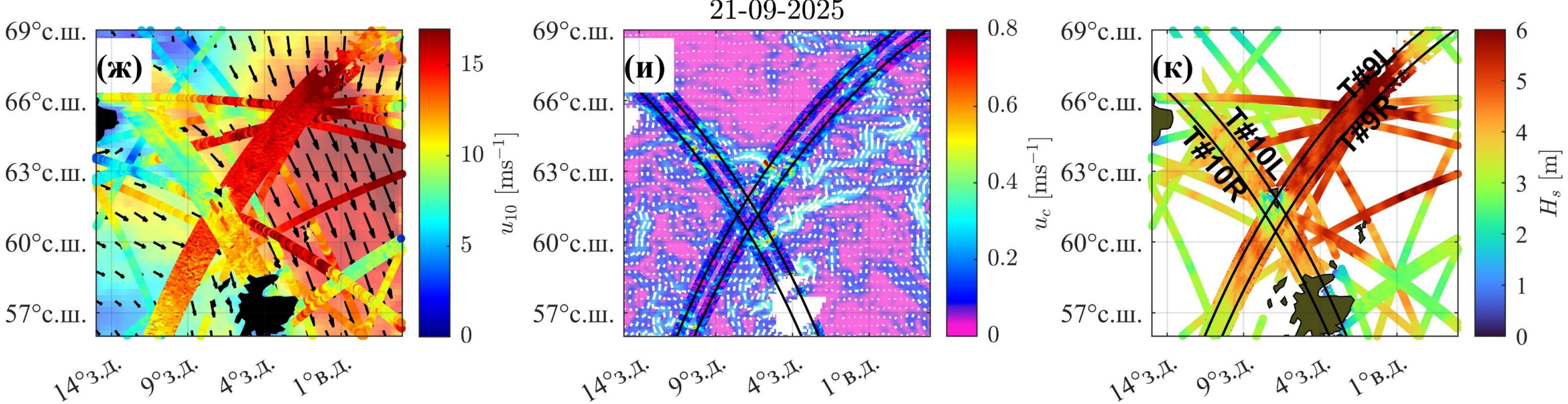
Поле Течения



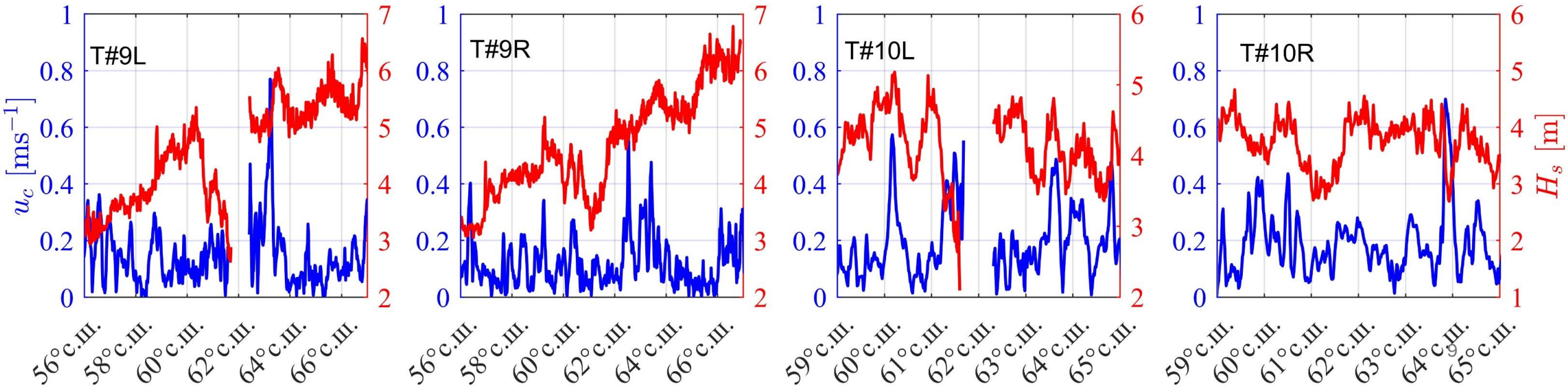
Высота волны (наблюдения)



Примеры полей волн и их изменчивости, вызванных течениями в Норвежском море



Поле Ветра | Поле Течения | Высота волны (наблюдения)



Цель

- В данной работе приводится анализ **ПРОЯВЛЕНИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОЛЕ ВЕТРОВЫХ ВОЛН**, в районе **Гольфстрима**, а так же в **Гренландском, Норвежском и в Лабрадорском морях**, полученных по данным измерений спутниковых **альтиметрии** и **SWOT (Surface Water Ocean Topography)**.
- Для интерпретации наблюдаемых аномалий H_s и выявления их физических механизмов применялось численное моделирование с использованием **ДВУМЕРНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ВОЛНОВОЙ МОДЕЛИ (Kudryavtsev et al., 2021), обобщенной для учета влияния пространственно-неоднородных течений на эволюцию волн**.

Двумерная параметрическая модель (с учетом течения $\vec{u} = (u_l, u_n)$)

$$\frac{d}{dt}\ln(c_{gp}e) = \omega_p S_e\left(\alpha, k_p^2 e\right) - c_{gp}\Gamma_n - \left\{(3/2)\frac{\partial u_l}{\partial l}\right\}$$

$$\frac{dc_{gp}}{dt} = gS_{cg}\left(k_p^2 e\right) + \left\{\frac{1}{2}c_{gp}\frac{\partial u_l}{\partial l}\right\}$$

$$\frac{d\varphi_R}{dt} = \omega_p S_\varphi\left(\alpha, \varphi_w - \varphi_p\right) + \{R\}$$

$$\frac{d}{dt}x_j = \kappa_j^p \overline{c}_g + \{u_j\}$$

$$\Gamma_n = \partial\varphi_R / \partial n$$

(l, n): координаты вдоль траектории волны и по нормали к ней

S_e — безразмерный источник энергии, обусловленный **энергией ветра**, за вычетом **диссипации энергии** при обрушении волны;

$c_g\Gamma_n$ — скорость изменения энергии из-за схождения или расхождения волновых лучей;

S_g — источник сдвига частоты спектрального пика в области низких частот вследствие нелинейных волновых взаимодействий;

S_φ — источник изменения направления спектрального пика, φ_p, обусловленный изменением направления ветра, φ_w;

$\overline{c_g}$ — средняя групповая скорость, усредненная по спектру волновых пакетов, и связанная с c_{gp} как $\overline{c_g} = 0,9c_{gp}$;

κ_i — единичный вектор волнового числа;

x_i — координата волнового пакета, и индекс i принимает значения $i = 1$ и 2.

T – время релаксации

R – завихренность течений $R = \partial u_n/\partial l - \partial u_l/\partial n$, а $\partial R/\partial n$ ее градиент в направлении перпендикулярном траектории пакета, а $d\varphi_R/dt = d\varphi_p/dt + \partial u_n/\partial l$

Процедура модельных расчетов

Начальные граничные условия

Случаи с ежечасными данными о ветре ERA5:

Коррекция:

$$u_{10} = \begin{cases} u_{ERA5} & u_{ERA5} \le 10 \\ 10\exp\left[0.8\left(\frac{u_{ERA5}}{10} - 1\right)\right] & u_{ERA5} > 10 \end{cases},$$ (Cheshm Siyahi et al., 2024)

Закон развития волн при ограниченном времени действия ветра:

$$\omega_p = c_{\alpha_t}(t_0 g/u_{10})^{q_t}(g/u_{10}),$$

$$e = c_{e_t}(t_0 g/u_{10})^{p_t}(u_{10}^4/g^2)$$

$t_0 = 5$ мин,

$p_t = 1, q_t = -\frac{1}{3}, c_{\alpha_t} = 37.25, c_{e_t} = 4.13 \times 10^{-8}$ (Dulov et al., 2020)

Идеализированные тесты (закон развития волн в ограниченном разгоне):

$$\omega_p = \alpha\frac{g}{u_{10}},$$

$$e = 2.1 \times 10^{-3}\alpha^{-3}\frac{u_{10}^4}{g^2}$$

$\alpha = 1$ (обратный возраст волны для развивающихся волн)

Поверхностные течении: L4-Altimetry (http://marine.copernicus.eu)

Шаг по времени:

$$\Delta t = \begin{cases} 0{,}01 t_{nom}, & \alpha \ge 0{,}85 \\ 1800\ c, & \alpha < 0{,}85 \end{cases}$$

$$t_{nom} = \left(\frac{\alpha}{c_{\alpha_t}}\right)^{1/q_t}\frac{u_{10}}{g}$$

Решение уравнений модели: методом Рунге-Кутта 4-го порядка.

Ежечасные поля волновых параметров

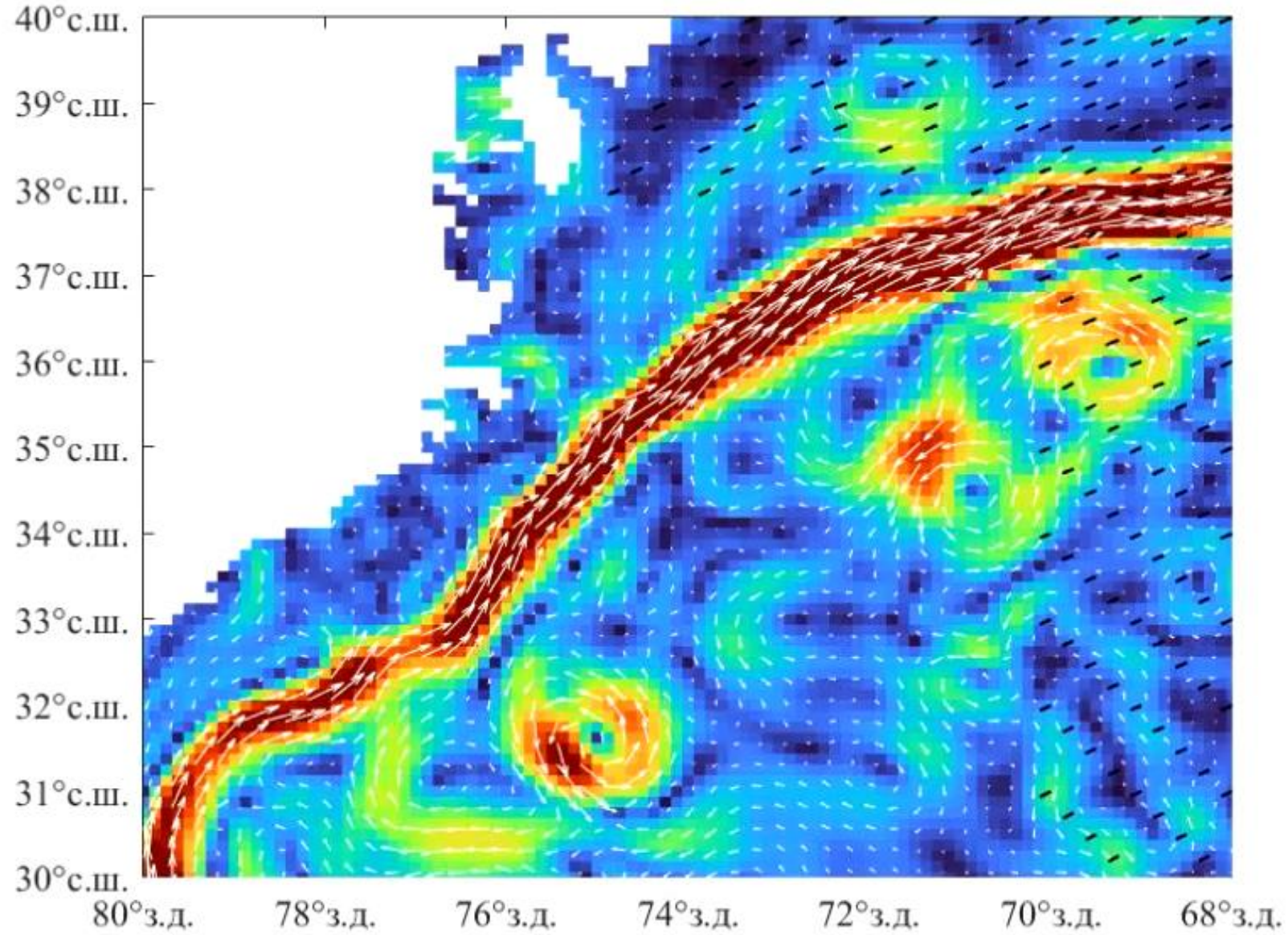
$H_s = 4\sqrt{e}$,

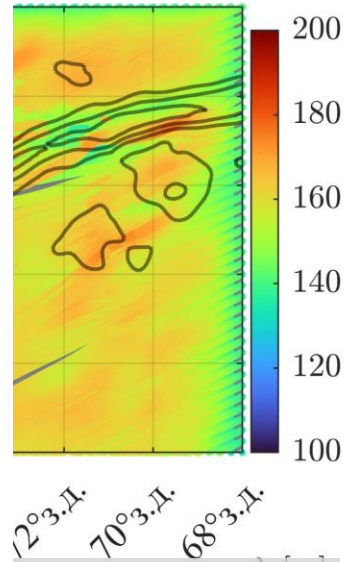
$\lambda_p = c_{gp}^2 8\pi/g,\ \varphi_p.$

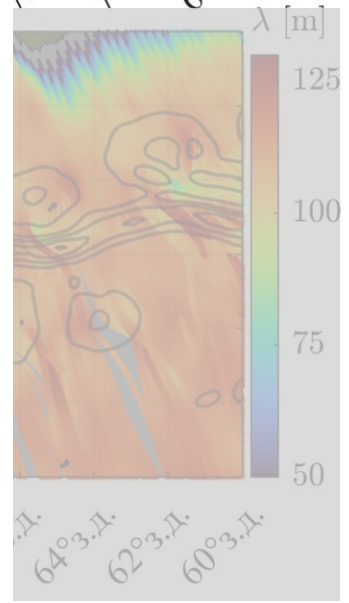
Результаты: Идеализированные тесты

$u_{10} = 15$ м / с,

$\varphi_w = 220°$





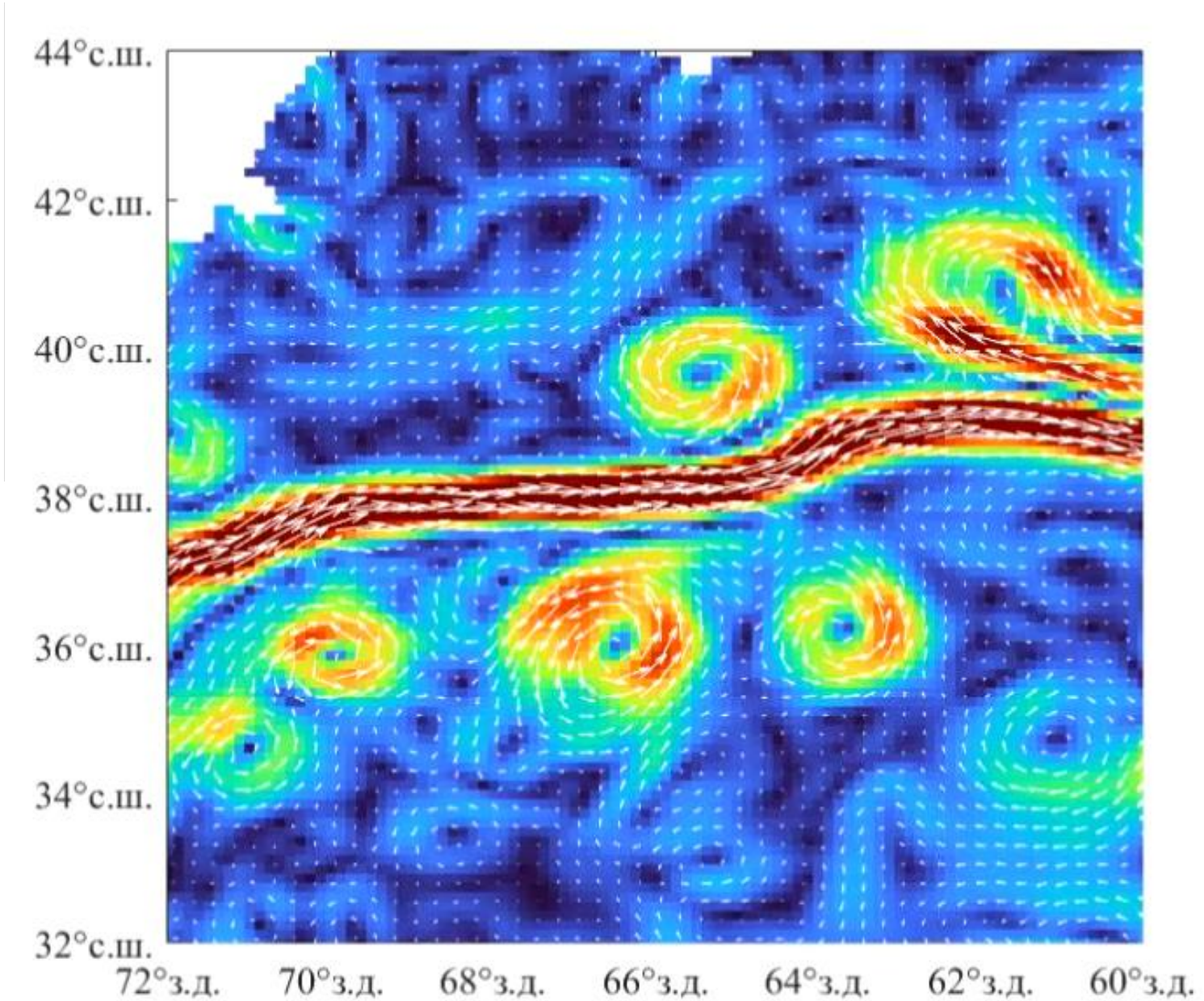


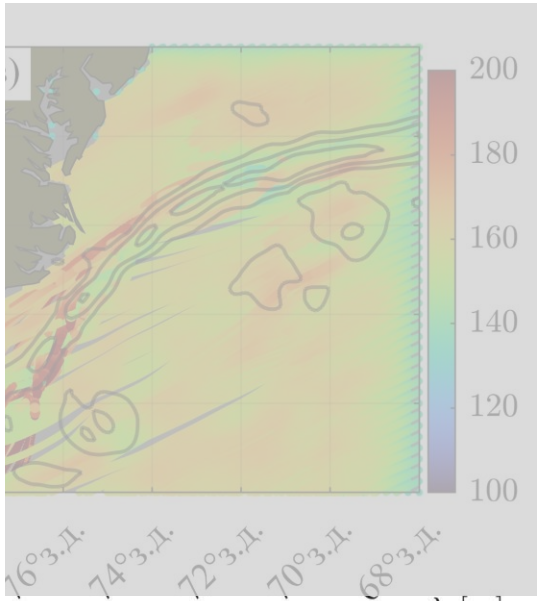
на волны
новых лучах

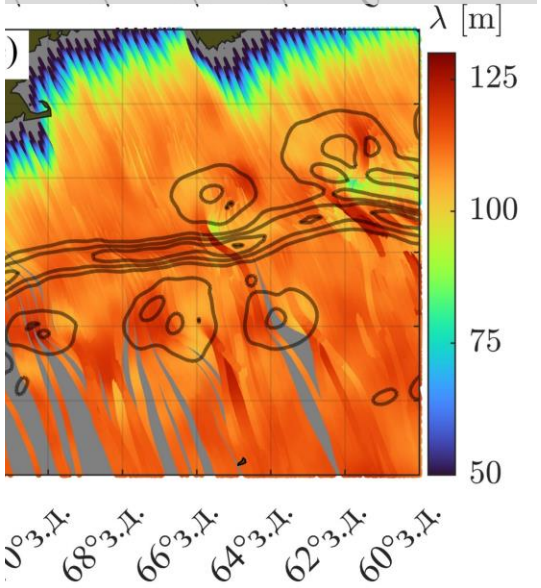
Результаты: Идеализированные тесты

$u_{10} = 12$ м / с,

$\varphi_w = 280°$





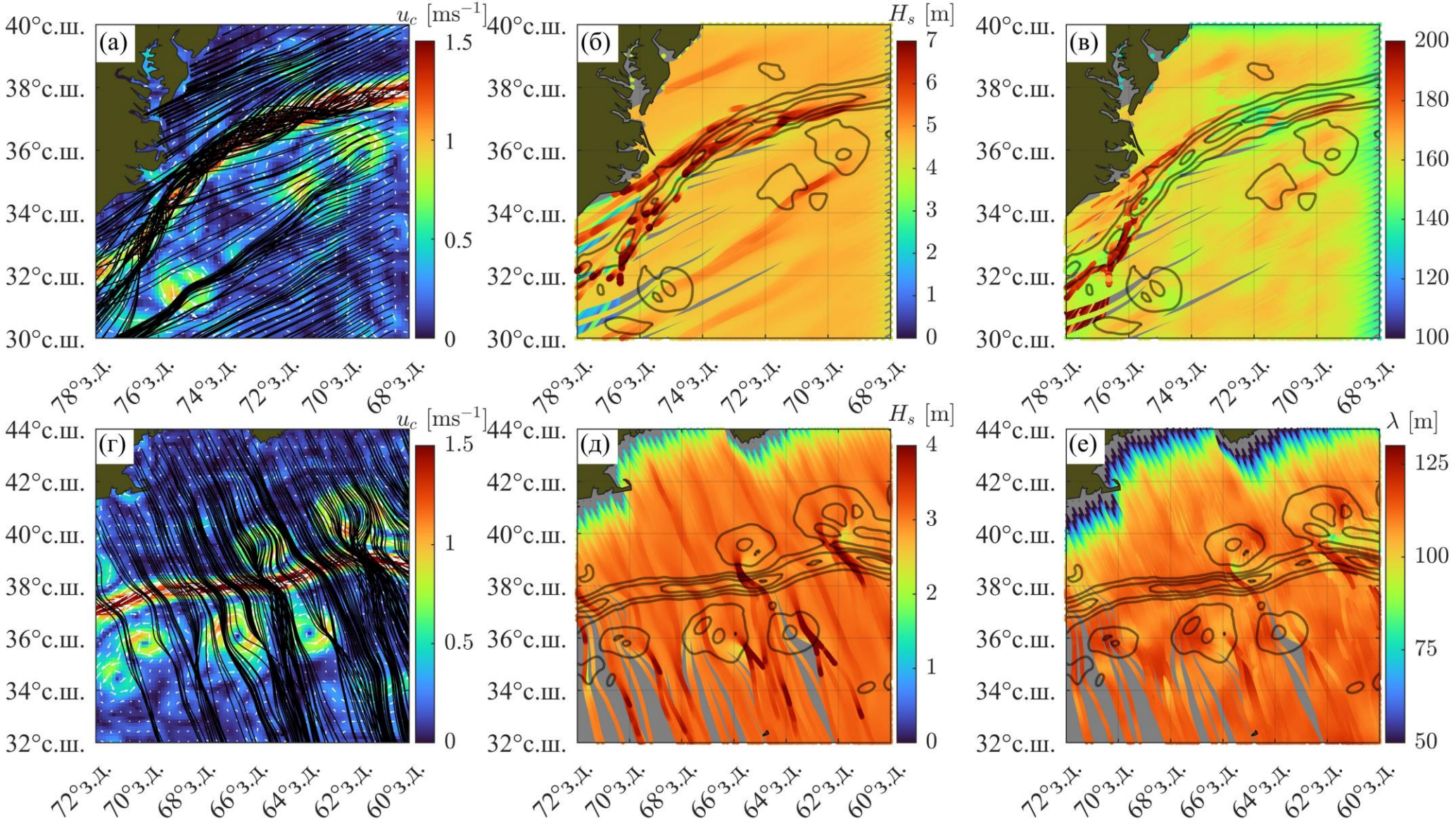


длина волны
на волновых лучах

Результаты: Идеализированные тесты

$u_{10} = 15$ м / с,
$\varphi_w = 220°$

$u_{10} = 12$ м / с,
$\varphi_w = 280°$



траектория волновых лучей на фоне геострофического течения

Высота волны на волновых лучах

длина волны на волновых лучах

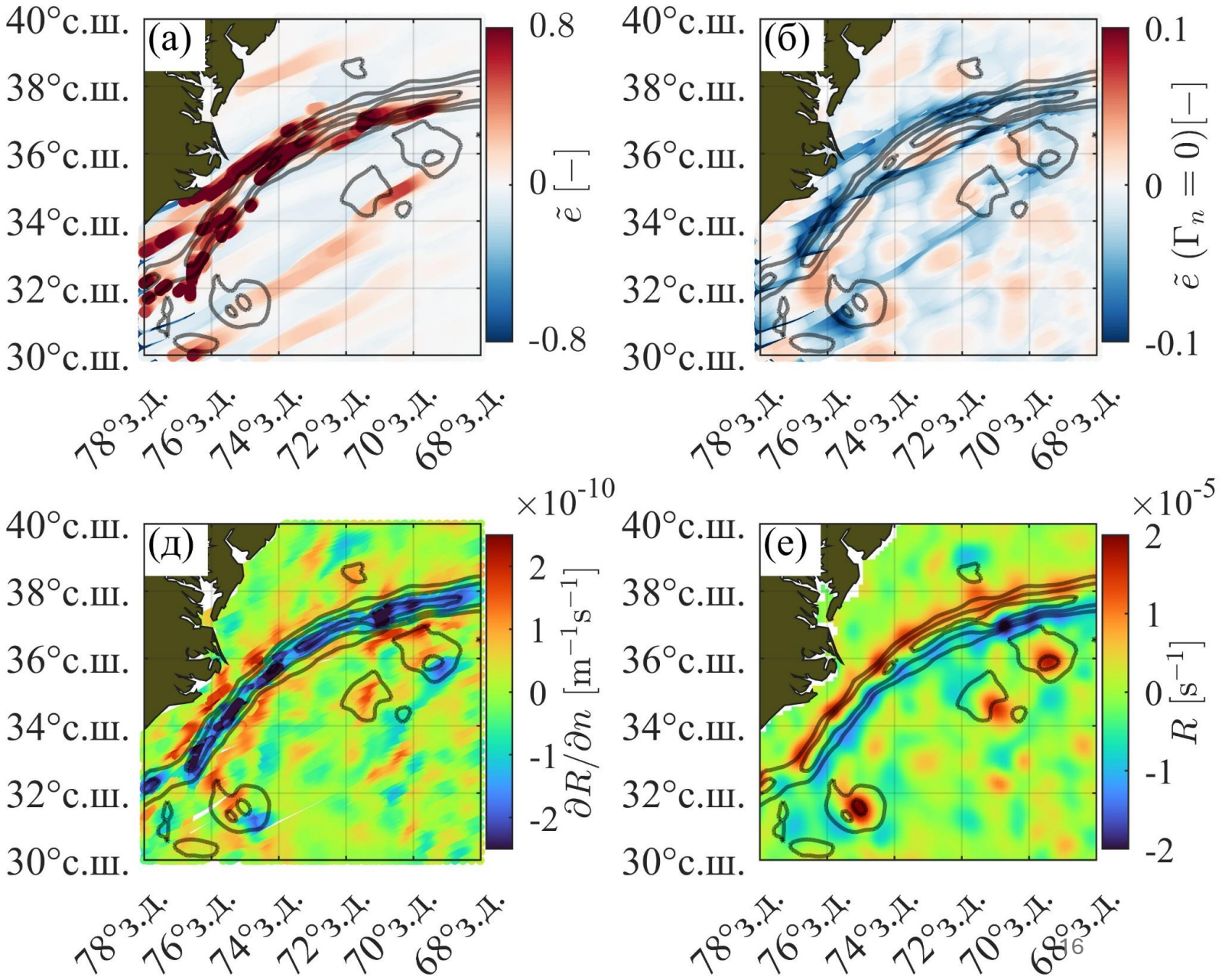
Результаты: Идеализированные тесты

Параметры ветра:

$$u_{10} = 15 \text{ м/с}, \ \varphi_w = 220°$$

Вариация энергии $\tilde{e} = \dfrac{e_c - e_w}{e_w}$

«***c***» и «***w***» обозначают расчеты по сценариям, где наряду с ветром учитывались течения (**c**urrent) и, – не учитывались (**w**ind)



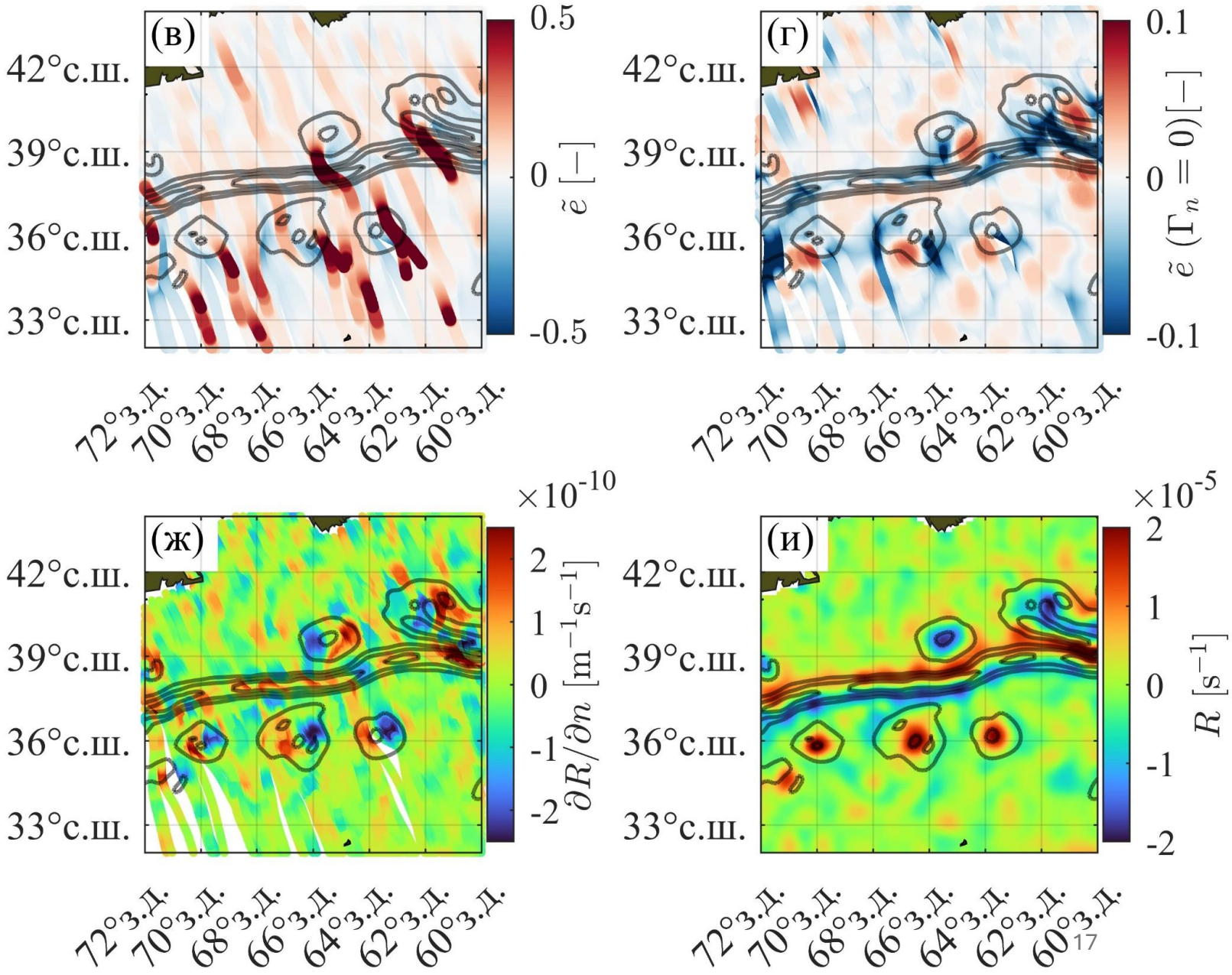
Результаты: Идеализированные тесты

Параметры ветра:

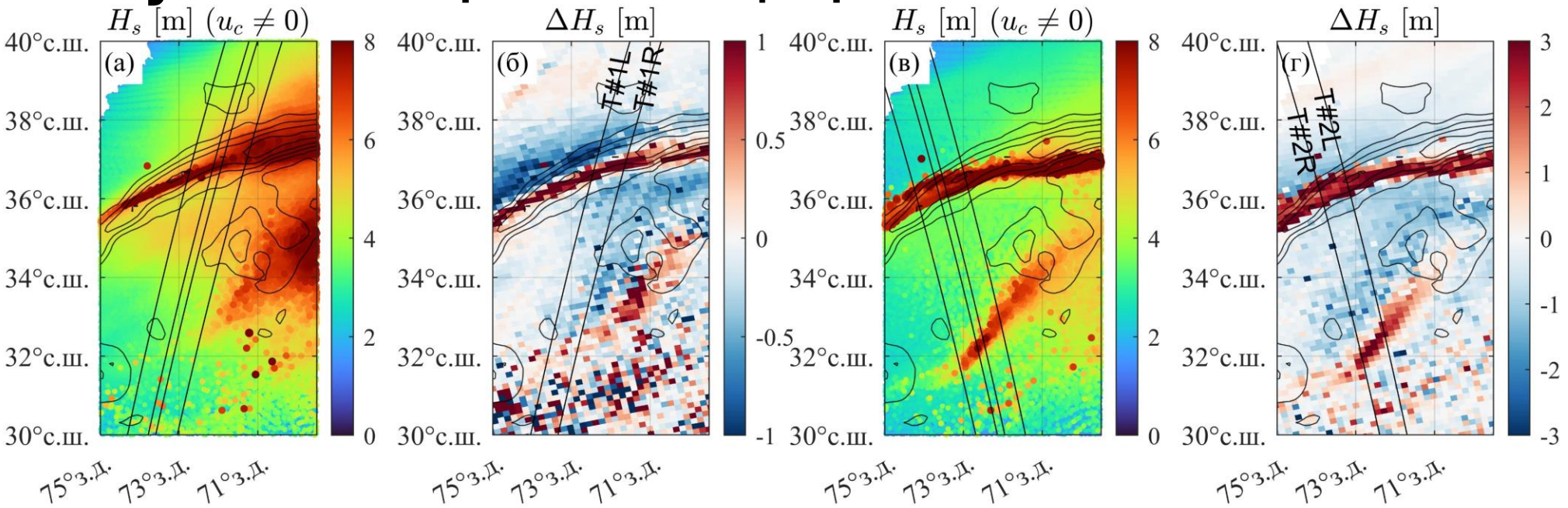
$$u_{10} = 12 \text{ м/с}, \ \varphi_w = 280°$$

Вариация энергии $$\tilde{e} = \frac{e_c - e_w}{e_w}$$

«**c**» и «***w***» обозначают расчеты по сценариям, где наряду с ветром учитывались течения (**c**urrent) и, – не учитывались (**w**ind)



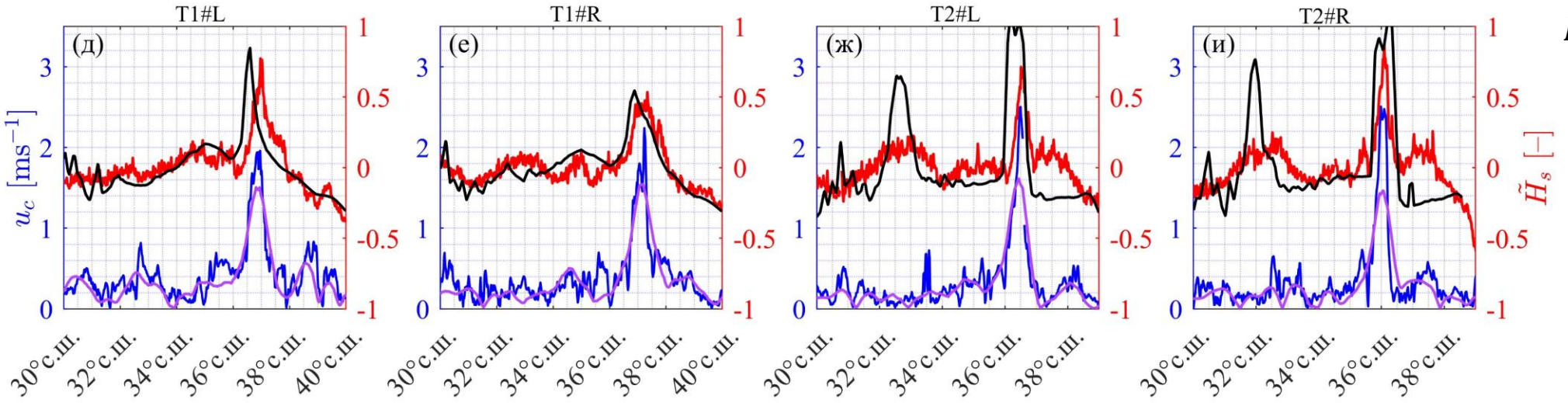
Результаты: в районе Гольфстрима



$$\Delta H_s = H_s^c - H_s^w$$

H_s^c — с учетом

H_s^w — без учета поверхностных течений



$$\widetilde{H_s} = (H_s - H_{sl})/H_{sl}$$

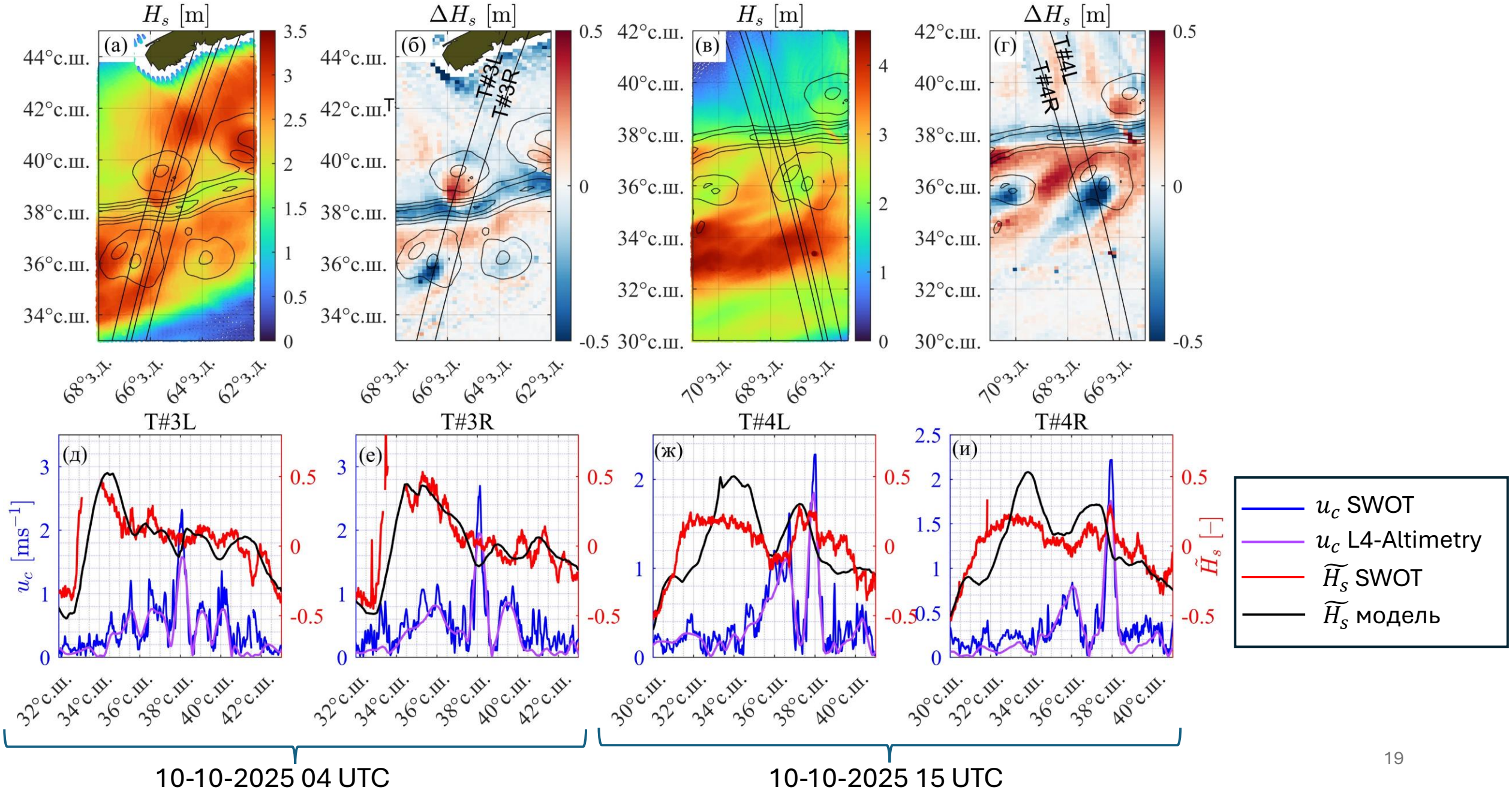
H_{sl} - линейный тренд H_s

- u_c SWOT
- u_c L4-Altimetry
- $\widetilde{H_s}$ SWOT
- $\widetilde{H_s}$ модель

02-10-2025 06 UTC

02-10-2025 15 UTC

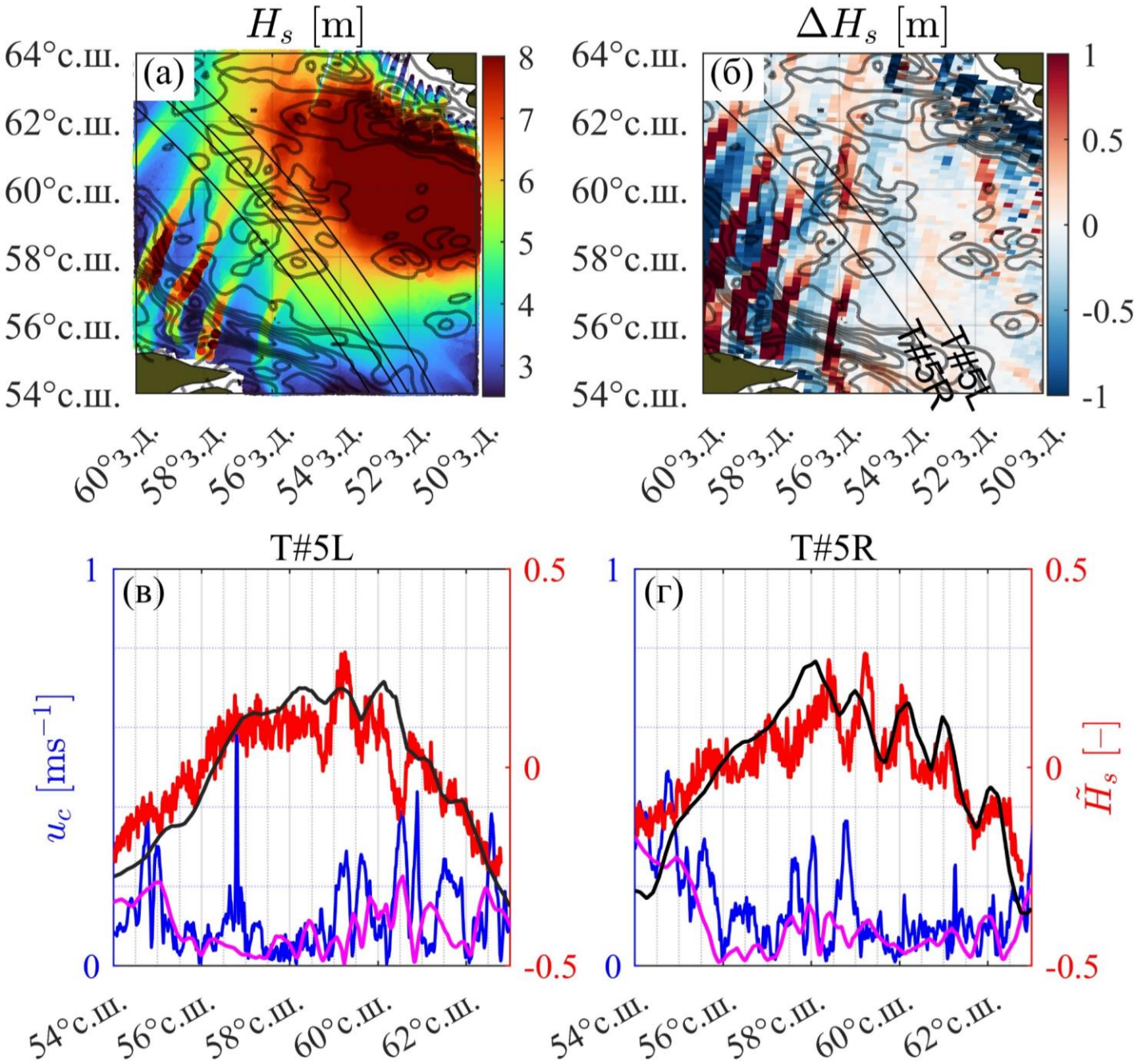
Результаты: в районе Гольфстрима



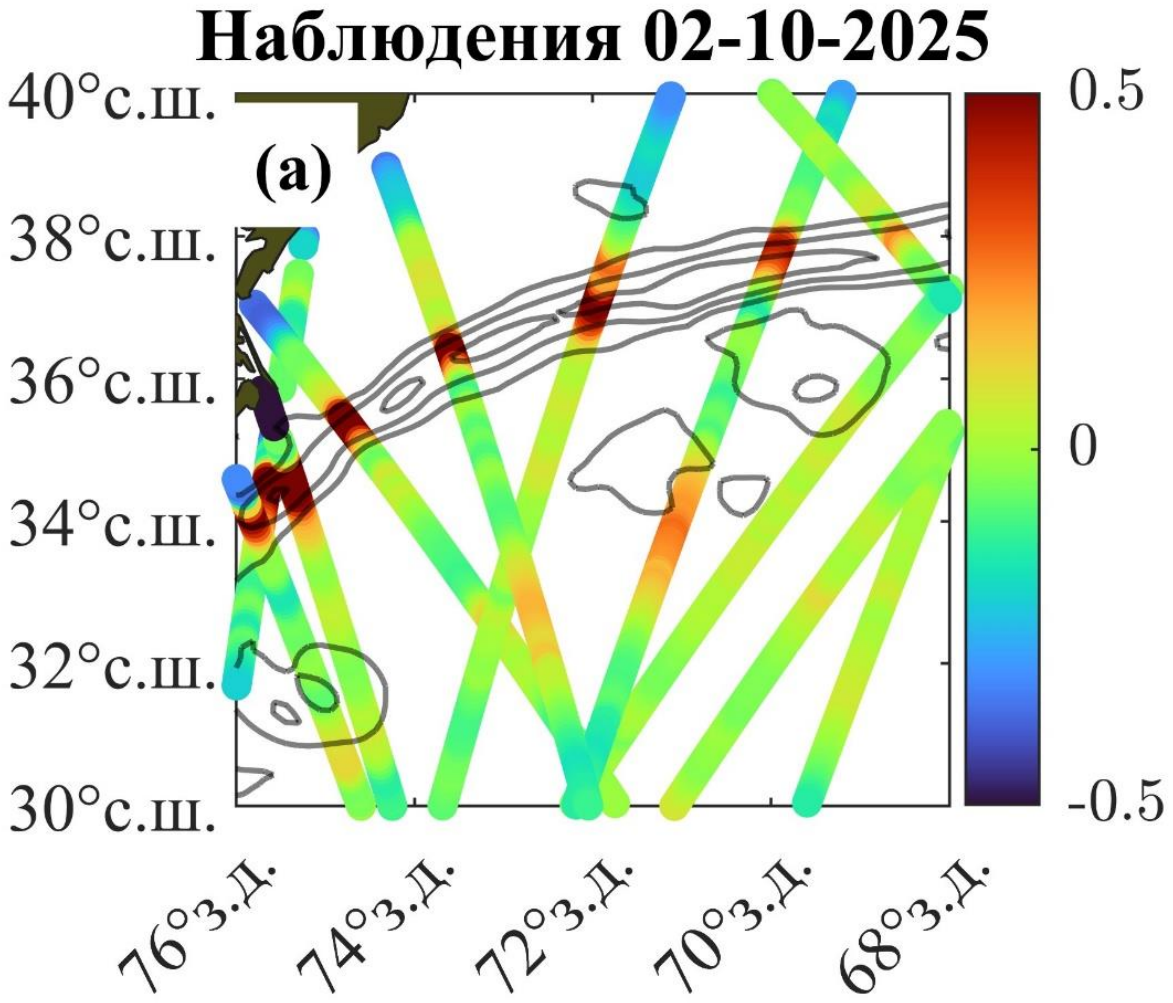
Результаты:

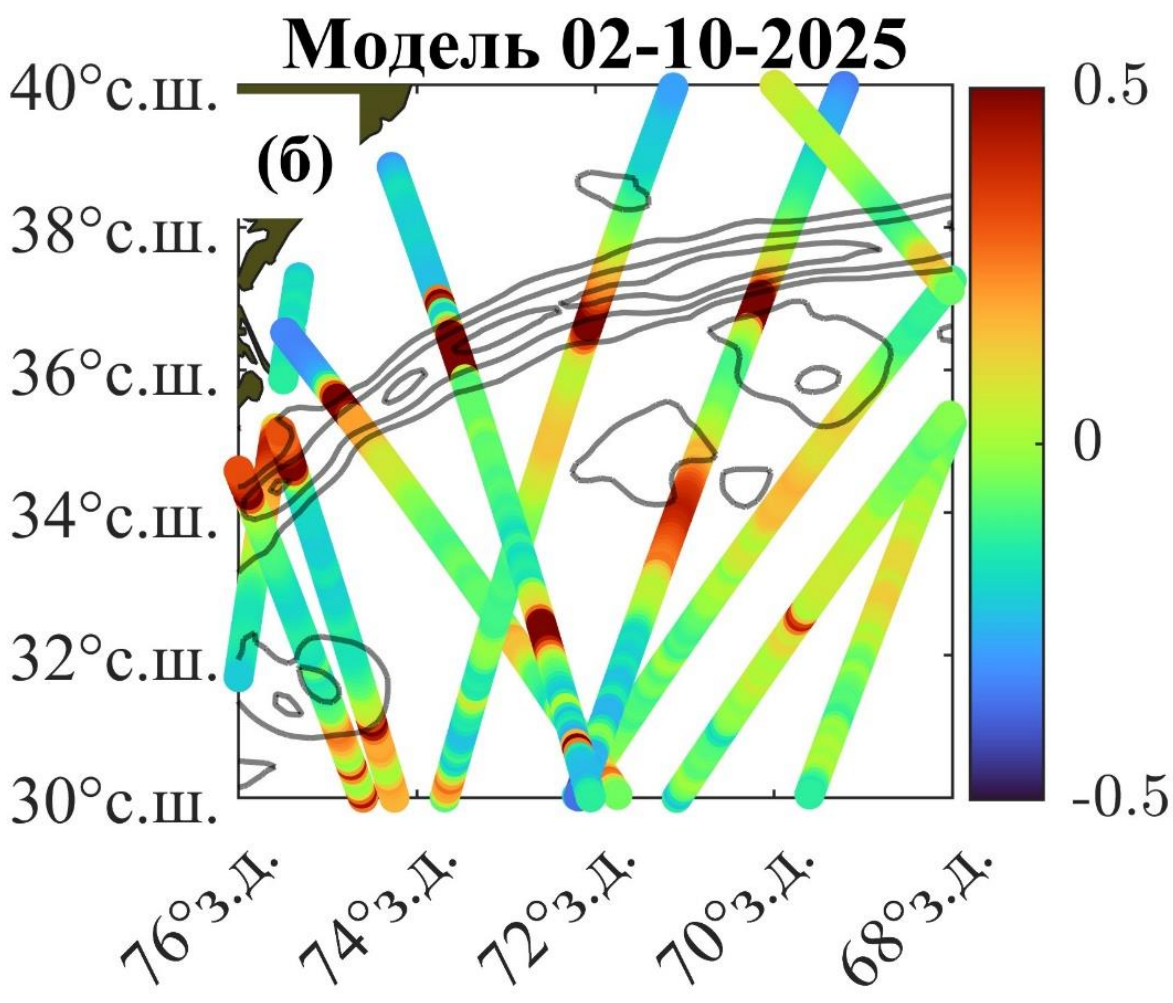
в Лабрадорском море

01-Oct-2025 15 UTC

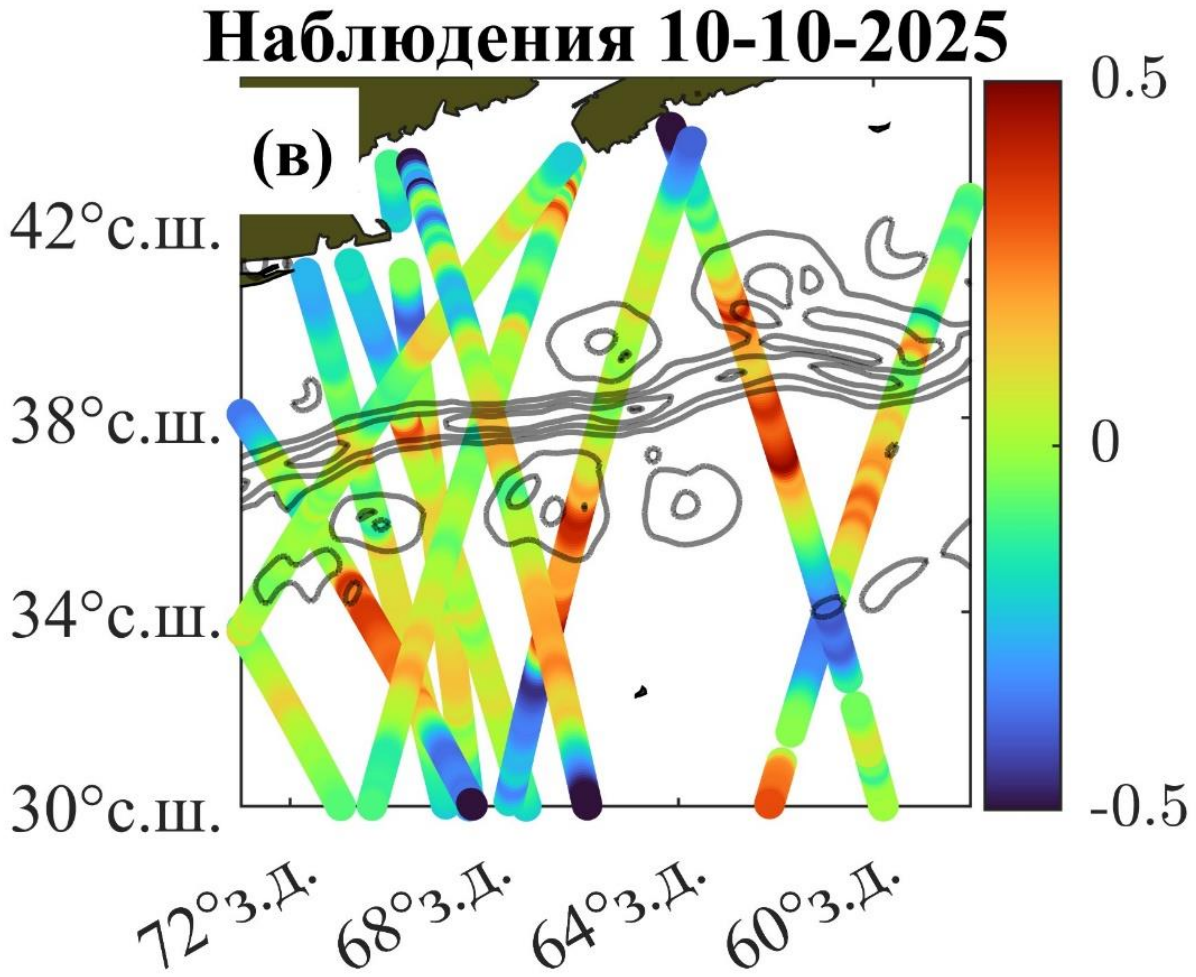


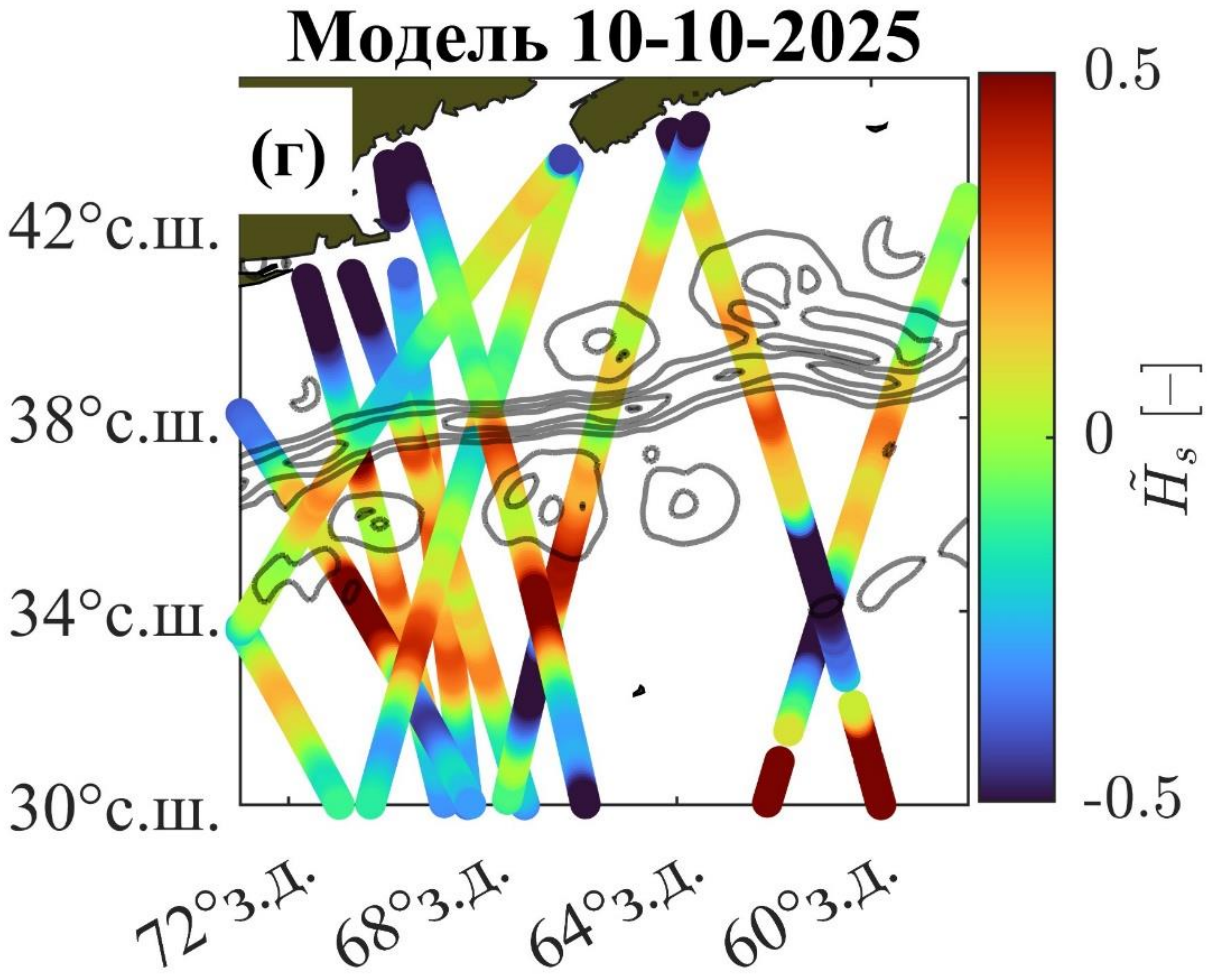
Сравнение результатов моделирования с данными альтиметрических наблюдений $\widetilde{H_s} = (H_s - H_{sl})/H_{sl}$



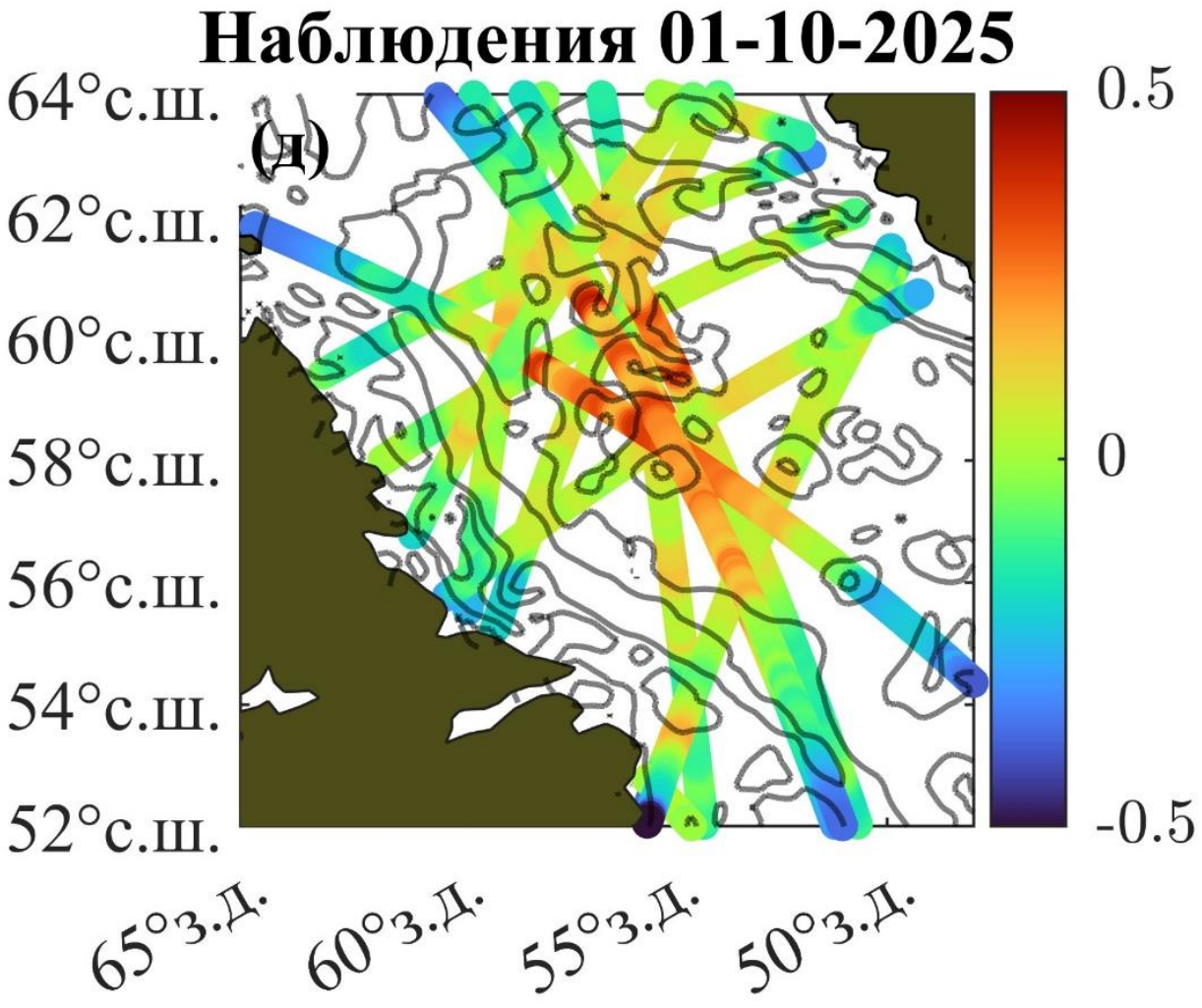


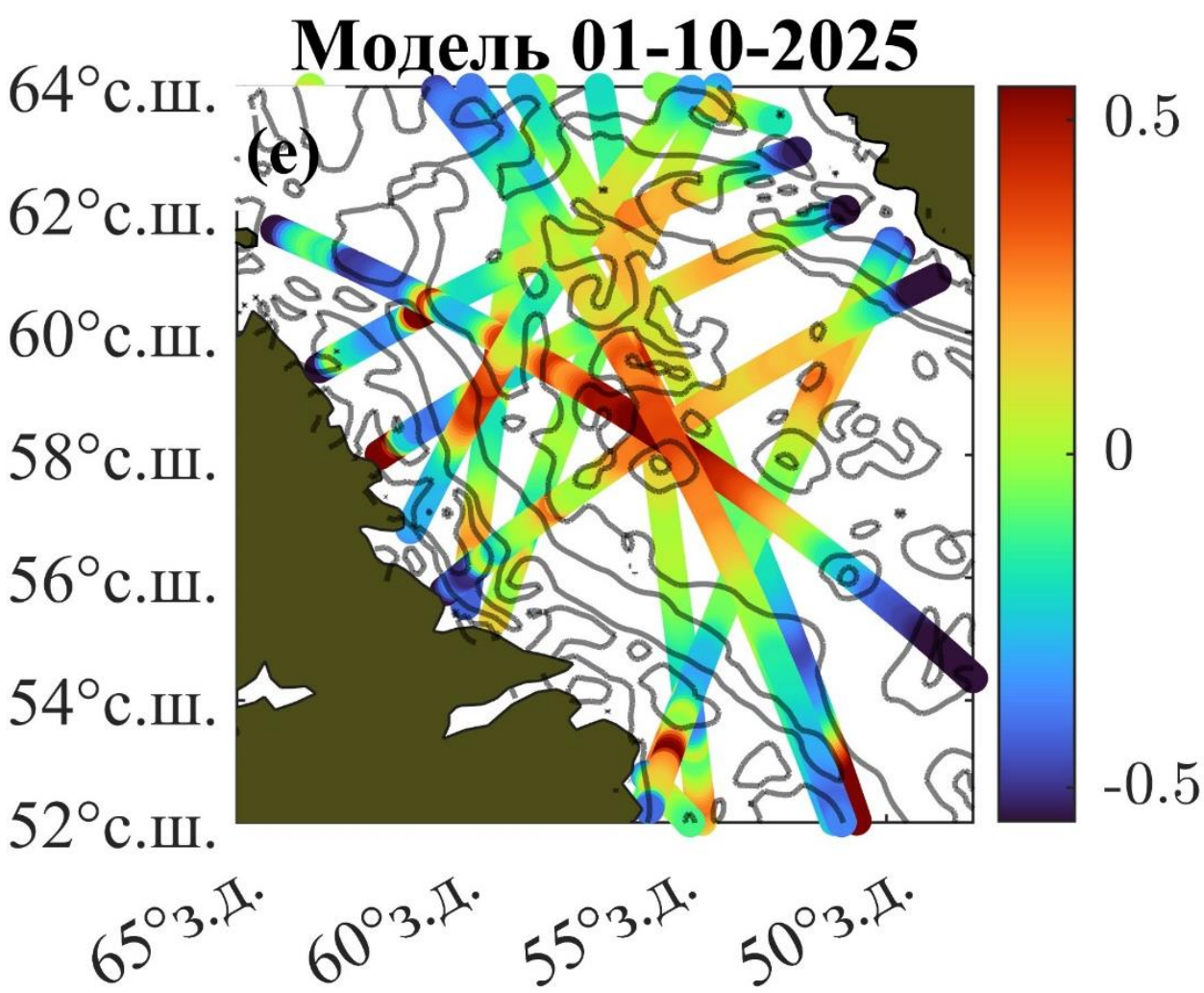
Сравнение результатов моделирования с данными альтиметрических наблюдений $\widetilde{H_s} = (H_s - H_{sl})/H_{sl}$





Сравнение результатов моделирования с данными альтиметрических наблюдений $\widetilde{H_s} = (H_s - H_{sl})/H_{sl}$





Заключение

- Спутниковые данные (включая SWOT) выявили сильную неоднородность высот волн в районе океанических фронтальных зон и мезомасштабных вихрей.
- Численное моделирование с помощью двухмерной параметрической модели подтвердило, что эти аномалии вызваны взаимодействием волн и течений.
- Выявлено три вида взаимодействия, приводящих к максимальным аномалиям высот волн:
    i. распространение волн навстречу струйному течению, при котором происходит захват волновых лучей в окрестности оси течения с резким ростом энергии,
    ii. распространение волн вдоль струйного течения, при котором высота волн уменьшается, и
    iii. распространение волн через океанические вихри, при котором происходит формирование положительных и отрицательных пространственных аномалий энергии волн за счет фокусировки и рассеяния волн после прохождения вихря.
- Возможные расхождения между смоделированными и наблюдаемыми $\widetilde{H_S}$ вызваны чувствительностью модели к точности данных о поле ветра, а также неучетом нестационарных дрейфовых (агеострофических) течений в суммарном поле векторов течений на поверхности океана.

Литература

Ardhuin F., Gille S.T., Menemenlis D., Rocha C.B., Rascle N., Chapron B., Gula J., Molemaker J. Small-scale open ocean currents have large effects on wind wave heights // Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 122, No. 6, 2017. pp. 4500-4517. https://doi.org/10.1002/2016JC012413

Cheshm Siyahi V., Zabolotskikh E.V., Kudryavtsev V.N. Evaluating and Adjusting ERA5 Wind Speed for Extratropical Cyclones and Polar Lows Using AMSR-2 Observations // Physical Oceanography, Vol. 31, No. 4, 2024. pp. 580-591.

Cheshm Siyahi V., Kudryavtsev V., Yurovskaya M., Collard F., Chapron B. On Surface Waves Generated by Extra-Tropical Cyclones—Part II: Simulations // Remote Sensing, Vol. 15, No. 9, 2023. P. 2377. https://doi.org/10.3390/rs15092377.

Dulov V, Kudryavtsev V, Skiba E (2020) On fetch- and duration-limited wind wave growth: data and parametric model. Ocean Model 153:101676. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101676

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, Vol. 126, 2021. P. e2020JC016915. https://doi.org/10.1029/2020JC016915.

Kudryavtsev V., Cheshm Siyahi V., Yurovskaya M., Chapron B. On Surface Waves in Arctic Seas // Boundary-Layer Meteorol, Vol. 187, 2023. pp. 267–294. https://doi.org/10.1007/s10546-022-00768-9

Villas Bôas A.B., Ardhuin F.A.A.A., Bourassa M.A., Brandt P., Chapron B., Cornuelle B.D., Farrar J.T., Fewings M.R., Fox-Kemper B., others. Integrated observations of global surface winds, currents, and waves: requirements and challenges for the next decade // Frontiers in Marine Scienc, Vol. 6, 2019. P. 434339. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00425.

Спасибо за Внимание

Преобразование вектора течения ($\vec{\mathbf{u}} = (u_x, u_y)$) в систему координат (l, n) ($\vec{\mathbf{u}} = (u_l, u_n)$) и его производные

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{e}}_l = \cos\varphi\hat{\mathbf{e}}_x + \sin\varphi\hat{\mathbf{e}}_y \\ \hat{\mathbf{e}}_n = -\sin\varphi\hat{\mathbf{e}}_x + \cos\varphi\hat{\mathbf{e}}_y \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_l = \mathbf{u}\cdot\hat{\mathbf{e}}_l = u_x\cos\varphi + u_y\sin\varphi \\ u_n = \mathbf{u}\cdot\hat{\mathbf{e}}_n = -u_x\sin\varphi + u_y\cos\varphi \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial l} = \cos\varphi\dfrac{\partial}{\partial x} + \sin\varphi\dfrac{\partial}{\partial y} \\ \dfrac{\partial}{\partial n} = -\sin\varphi\dfrac{\partial}{\partial x} + \cos\varphi\dfrac{\partial}{\partial y} \end{cases}$$

$$\frac{\partial u_l}{\partial l} = \cos^2\varphi\frac{\partial u_x}{\partial x} + \sin^2\varphi\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\sin 2\varphi}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}\right) + \frac{\partial\varphi}{\partial l}u_n$$

$$\frac{\partial u_n}{\partial n} = \sin^2\varphi\frac{\partial u_x}{\partial x} + \cos^2\varphi\frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{\sin 2\varphi}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}\right) - \frac{\partial\varphi}{\partial n}u_l$$

$$\frac{\partial u_n}{\partial l} = -\frac{\sin 2\varphi}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y}\right) - \sin^2\varphi\frac{\partial u_x}{\partial y} + \cos^2\varphi\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial\varphi}{\partial l}u_l$$

$$\frac{\partial u_l}{\partial n} = -\frac{\sin 2\varphi}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y}\right) + \cos^2\varphi\frac{\partial u_x}{\partial y} - \sin^2\varphi\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial\varphi}{\partial n}u_n$$