

Восстановление параметров внутренних волн в океане по данным наблюдений SWOT

Чеши Сиахи В.(1), Кудрявцев В.Н. (1,2), Коллар Ф. (3), Шапрон Б.(4)

1. Лаборатория спутниковой океанографии, РГГМУ, Санкт-Петербург, Россия
2. Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
3. OceanDataLab, Locmaria-Plouzané, France
4. Institut Francais de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), Plouzané, France



ifremer



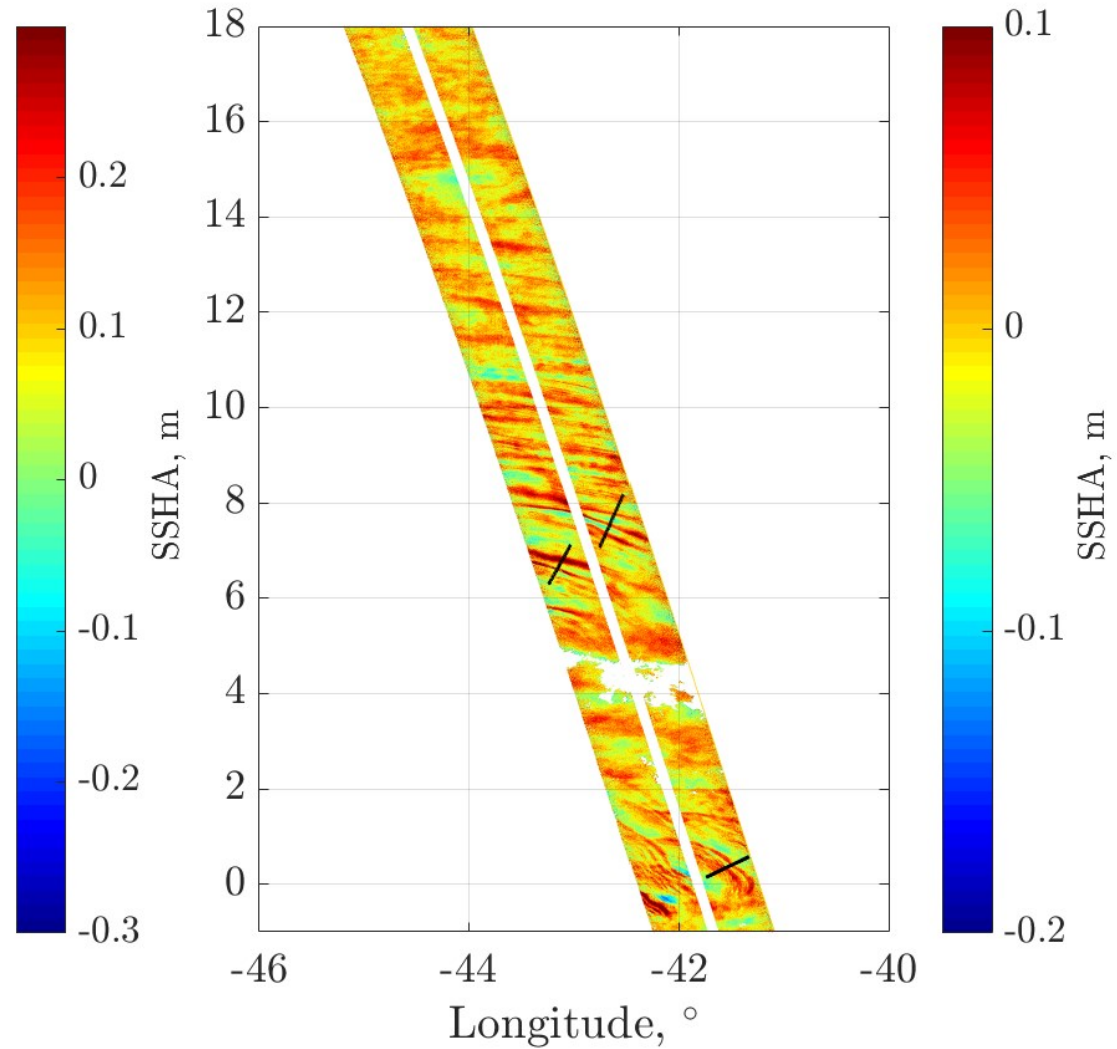
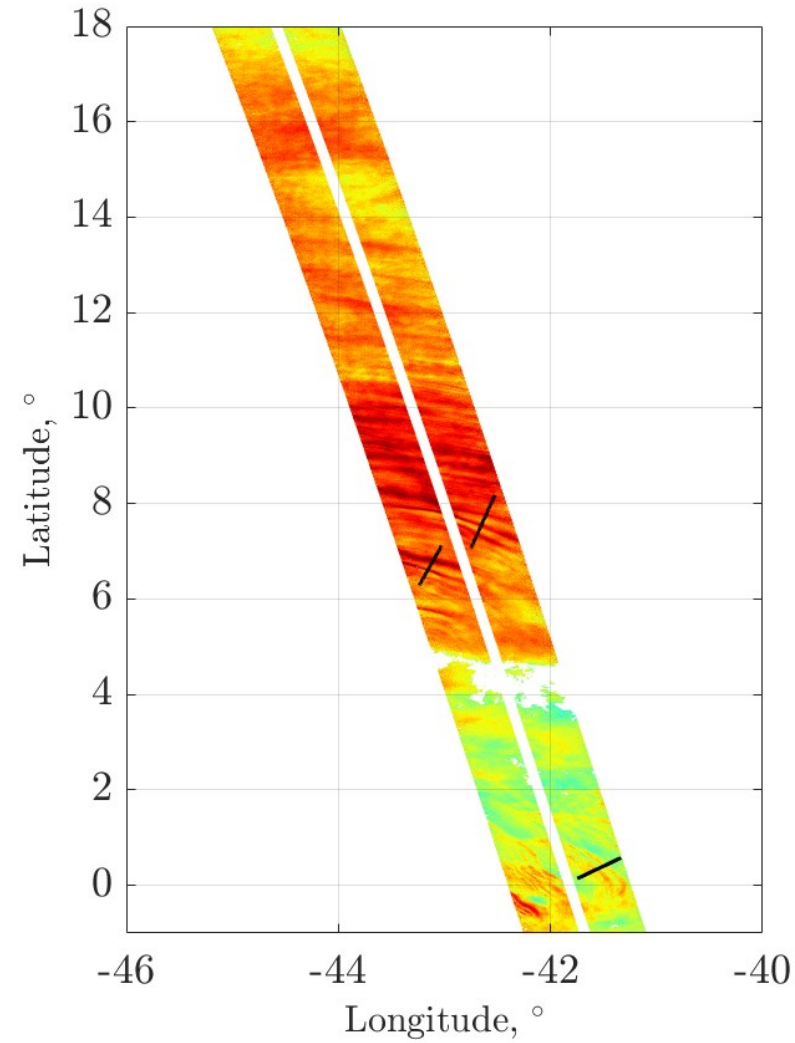
OceanDataLab

Введение

- Внутренние волны играют важную роль в перемешивании верхних слоев океана и влияют на климатическую систему. Внешние силы, например, приливы и подводные особенности, могут вызвать генерацию ВВ. Когда крупномасштабные внутренние приливы уходят от топографических препятствий, они разбиваются на более короткие ВВ которые остаются синхронизированными с приливами.
- В отличие от спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) или оптических сканерных изображений в солнечном блике, которые идентифицируют ВВ по модуляциям шероховатости поверхности, SWOT (Surface Water and Ocean Topography) обеспечивает уникальную комбинацию контрастов сигнала РСА и карт рельефа поверхности океана над внутренними волнами. Такое комбинированное изображение позволяет получить более полное представление об особенностях ВВ.
- В настоящей работе представлены результаты исследования ВВ в районе Амазонского шельфа на основе данных измерений SWOT являющимся радиолокационным интерферометром Ка-диапазона (KaRIn), наблюдающим морскую поверхность в диапазоне углов падения от -4° до $+4^\circ$ с пространственным разрешением 250м.

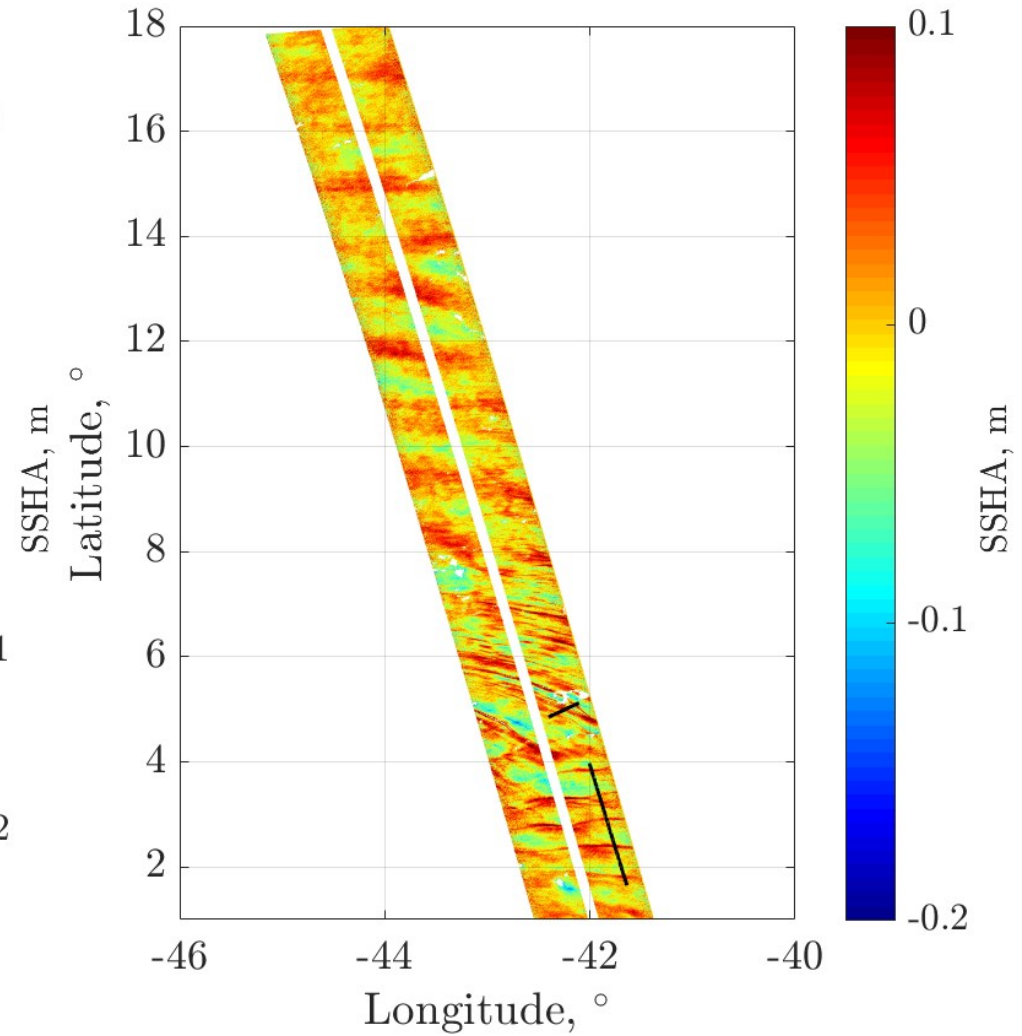
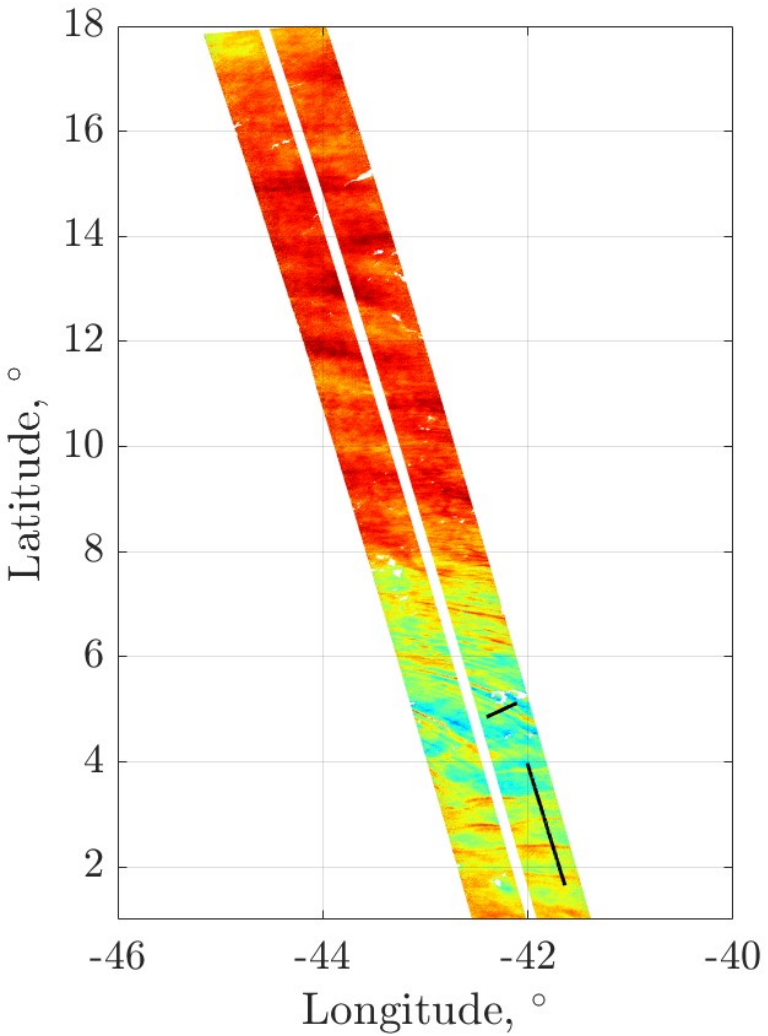
Поля аномалий высоты поверхности океана (SSHA)

09 мая 2023 г.



Поля аномалий высоты поверхности океана (SSHA)

23 июня 2023 г.



Реконструкция параметров ВВ

SSHA, измеренная SWOT, дает прямую оценку вертикального градиента скорости ВВ ниже поверхности, что следует из непрерывности давления через поверхность океана:

$$\hat{h}(\omega) = i \frac{c^2}{g} \frac{1}{\omega} \hat{W}'_z \Big|_{z=0}$$

шляпка обозначает амплитуду любого параметра гармоника ВВ с частотой ВВ ω

c - фазовая скорость ВВ

g - ускорение силы тяжести

W'_z - вертикальный градиент вертикальной скорости ВВ, взятой ниже поверхности

i - комплексная единица

Основное уравнение для описания динамики внутреннего слоя

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + k^2 \frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2} W = 0$$

Решение этого уравнения дает профили вертикальной скорости W , и дисперсионное соотношение между волновым числом k , частотой ω ВВ, и N частотой Вайсяля-Брента. Чтобы получить аналитическое решение этого уравнения, мы используем трехслойное приближение.

Стратификация и трехслойное приближение

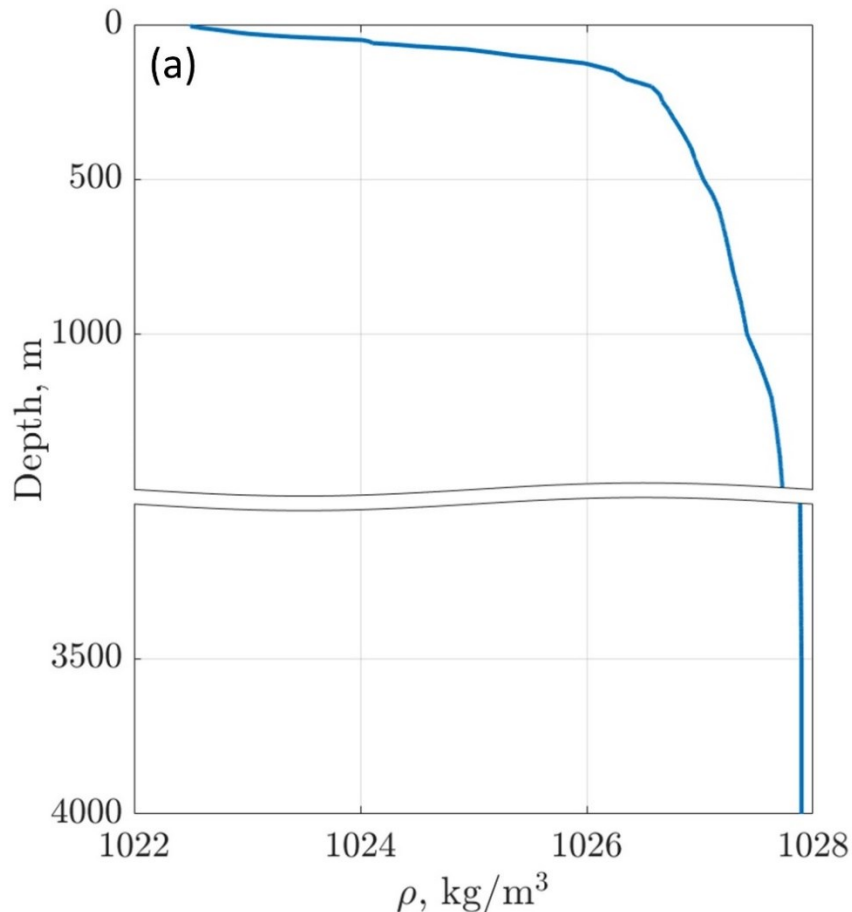
Соленость и температура воды:

Multi Observation Global Ocean 3D Temperature Salinity ...

<https://data.marine.copernicus.eu/>

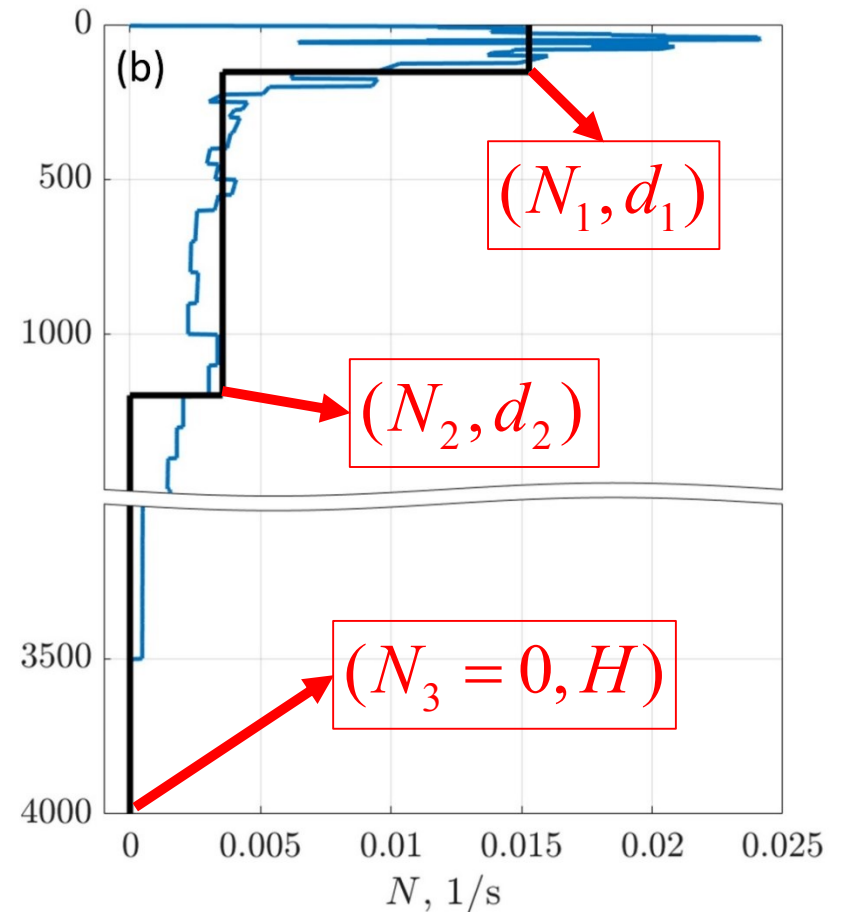
Плотность (ρ):

Gibbs Sea Water (GSW) oceanographic toolbox of TEOS-10



Частота
Вяйсяля-Брента

$$N = \sqrt{\frac{-g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$$



Вертикальная скорость W

общее решение $W = C_1 \exp\left(ik \frac{\sqrt{N^2 - \omega^2}}{\omega} z\right) + C_2 \exp\left(-ik \frac{\sqrt{N^2 - \omega^2}}{\omega} z\right)$

граничные условия,
обеспечивающие
непрерывность вертикальной
скорости и давления через
границы слоев

$$\left\{ \begin{array}{ll} W_1 = 0, & \text{at } z = 0 \\ W_1 = W_2 \text{ and } \frac{\partial W_1}{\partial z} = \frac{\partial W_2}{\partial z}, & \text{at } z = d_1 \\ W_2 = W_3 \text{ and } \frac{\partial W_2}{\partial z} = \frac{\partial W_3}{\partial z}, & \text{at } z = d_2 \\ W_3 = 0, & \text{at } z = H \end{array} \right.$$

$$\frac{W_1}{A} = \sin(\phi_1 k z)$$

$$\begin{array}{l} \theta_i = \sqrt{\omega^2 - N_i^2}/\omega \\ \phi_i = \sqrt{N_i^2 - \omega^2}/\omega \end{array}$$

$$\frac{W_2}{A} = \begin{cases} \sqrt{\sin^2(k\phi_1 d_1) + \frac{\phi_1^2}{\phi_2^2} \cos^2(k\phi_1 d_1)} \sin(k\phi_2(z - d_1) + \varphi_1), & \text{if } \omega^2 \leq N_2^2 \\ \sqrt{\frac{\phi_1^2}{\theta_2^2} \cos^2(k\phi_1 d_1) - \sin^2(k\phi_1 d_1)} \sinh(k\theta_2(z - d_1) + \varphi_4), & \text{if } \omega^2 > N_2^2 \end{cases}$$

$$\frac{W_3}{A} = W_2(d_2) \frac{\sinh[k(H - z)]}{\sinh[k(H - d_2)]}$$

$$A = \frac{hg}{c} \frac{\omega}{\sqrt{N_1^2 - \omega^2}}$$

Дисперсионное соотношение ВВ

$$\begin{cases} \sin(k\phi_1 d_1 + \varphi_2) = 0, & \text{if } \omega^2 \leq N_2^2 \\ \sin(k\phi_1 d_1 + \varphi_3) = 0, & \text{if } \omega^2 > N_2^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} k\phi_1 d_1 + \varphi_2 = n\pi, & \text{if } \omega^2 \leq N_2^2 \\ k\phi_1 d_1 + \varphi_3 = n\pi, & \text{if } \omega^2 > N_2^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Phi = \phi_2 & \text{if } \omega \leq N_2 \\ \Phi = \theta_2 & \text{if } \omega > N_2 \end{cases}$$

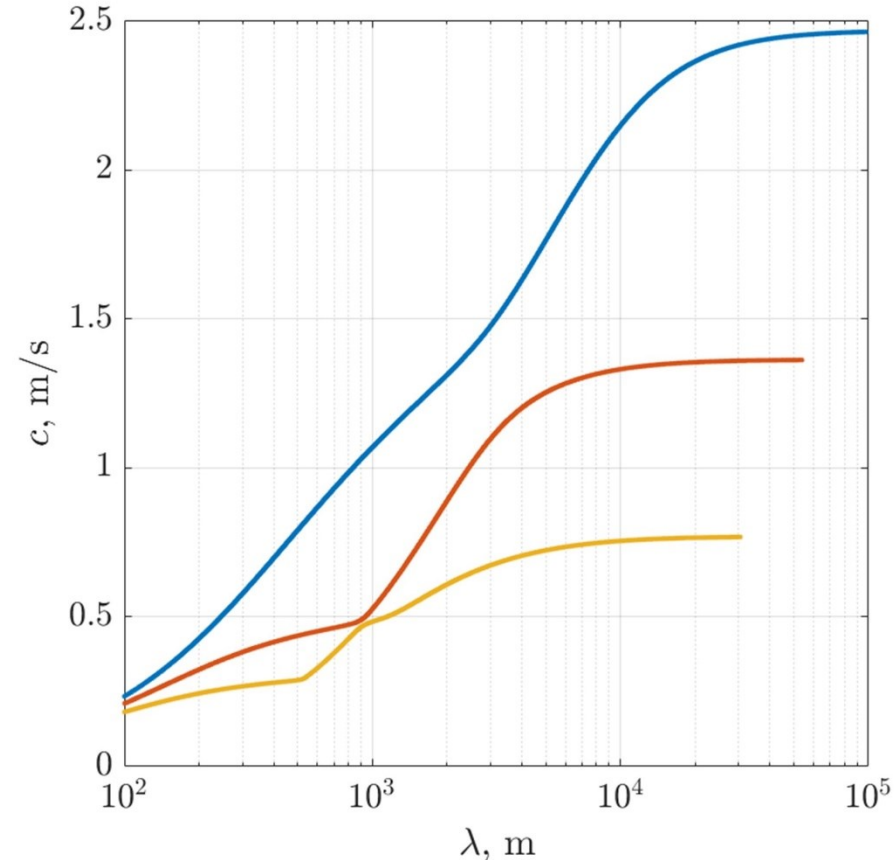
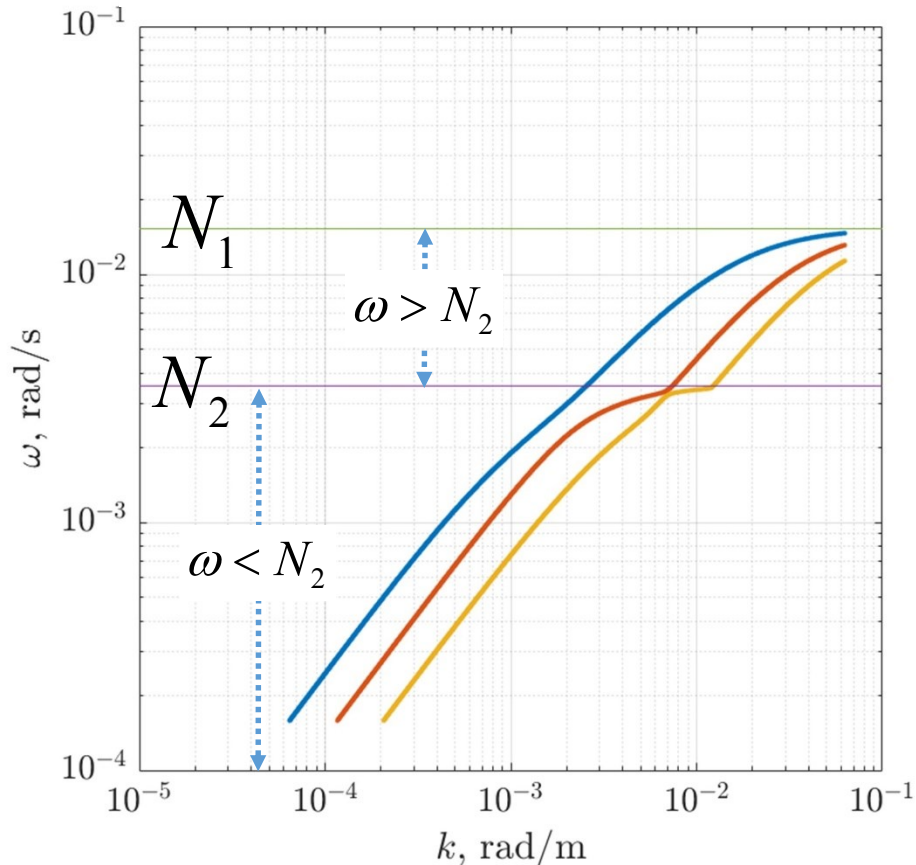
$$\tan \varphi_1 = \frac{\phi_2 \sin(\phi_1 k d_1)}{\phi_1 \sin(\phi_1 k d_1)},$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{\phi_1 \sin[\phi_2 k (d_2 - d_1) + \varphi]}{\phi_2 \cos[\phi_2 k (d_2 - d_1) + \varphi]},$$

$$\tanh \varphi_3 = \frac{\phi_1 \sinh[\theta_2 k (d_2 - d_1) + \varphi]}{\theta_2 \cosh[\theta_2 k (d_2 - d_1) + \varphi]},$$

$$\tanh \varphi_4 = -\frac{\theta_2 \sin(\phi_1 k d_1)}{\phi_1 \sin(\phi_1 k d_1)},$$

$$\tan \varphi = \Phi \frac{\sinh[k(H - d_2)]}{\cosh[k(H - d_2)]},$$



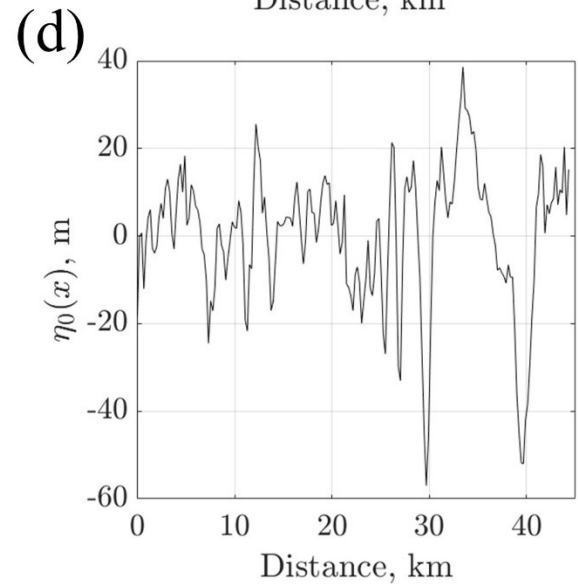
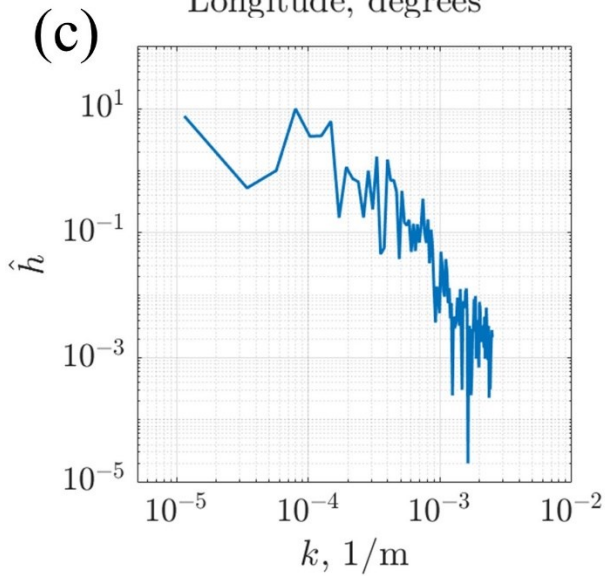
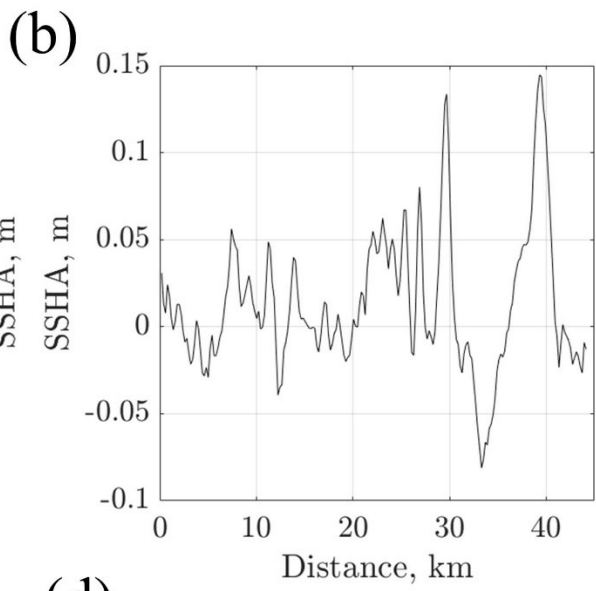
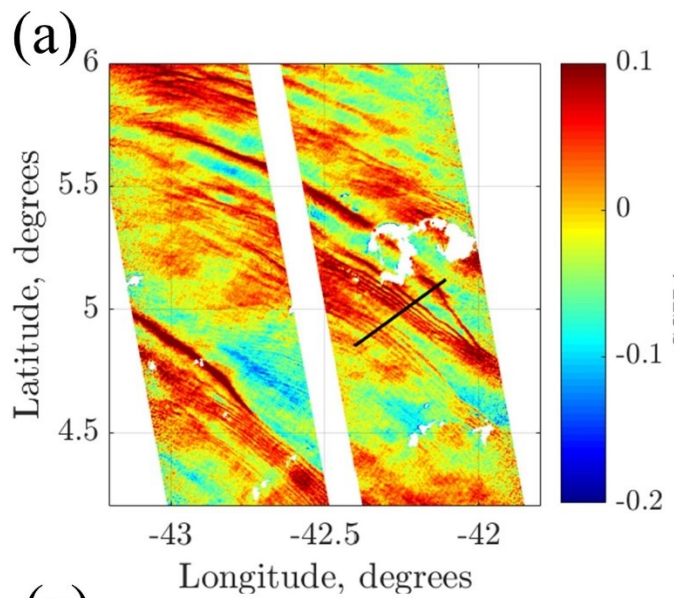
Смещения термоклина

$$\hat{h}(\omega) = i \frac{c}{g} \frac{\sqrt{N_1^2 - \omega^2}}{\omega} A(\omega)$$

$$w = d\eta/dt$$

$$\hat{\eta}(\omega) = -\frac{g\hat{h}(\omega)}{c} (N_1^2 - \omega^2)^{-1/2}$$

$$\eta_0(x) = \int \hat{\eta} \exp i(kx) dk$$

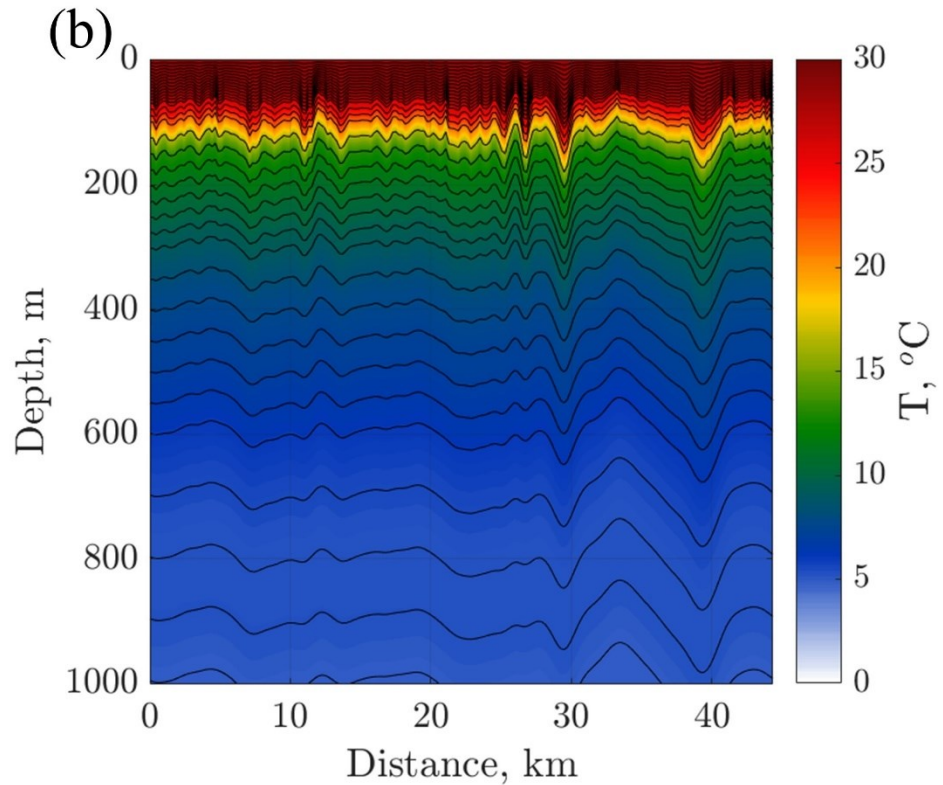
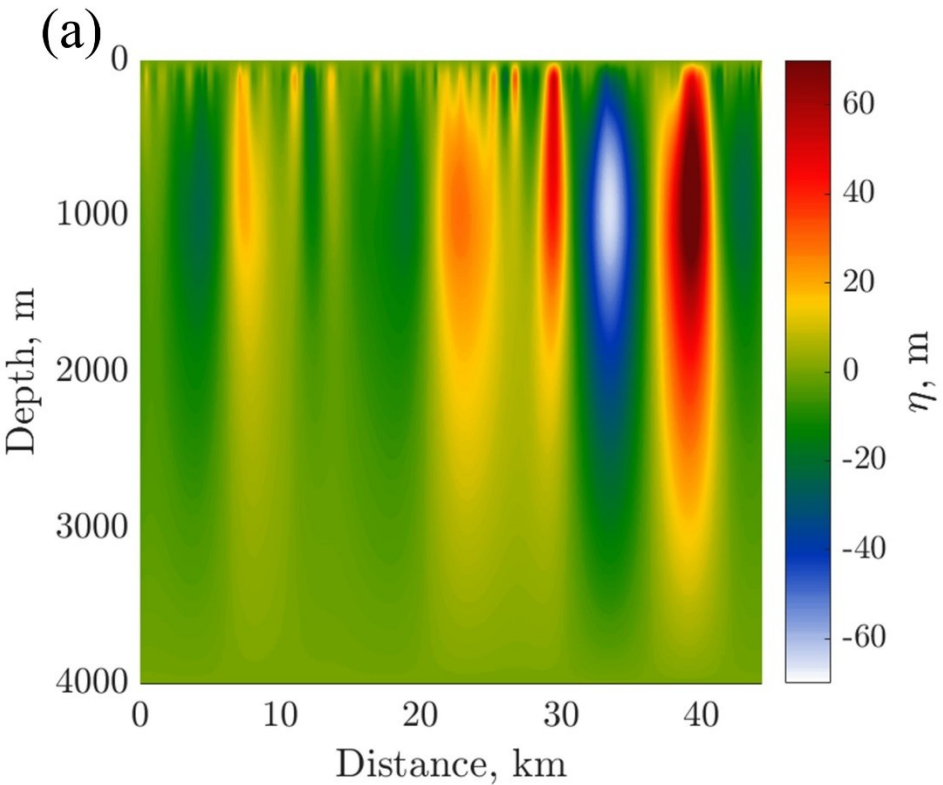


↓
 смещение
 главного
 термоклина

Смещения термоклина

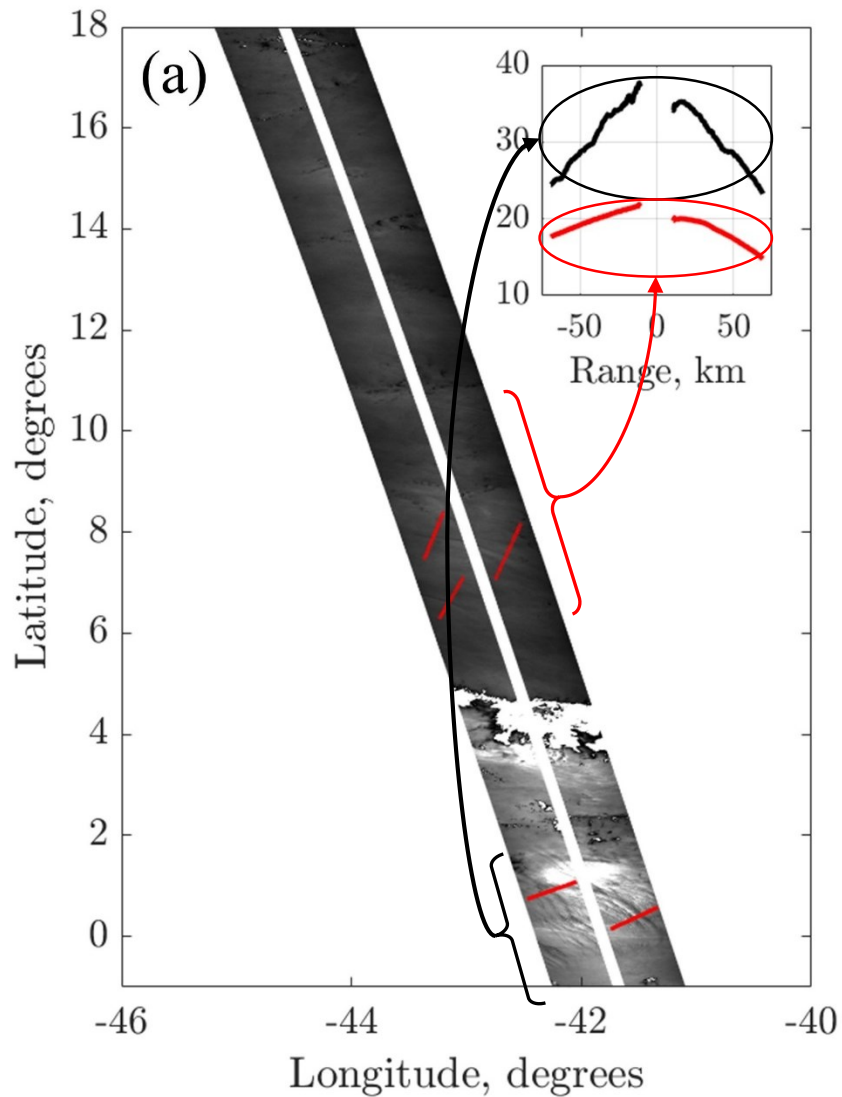
$$\eta(t, x, z) = \int \hat{\eta}(\omega) W(\omega, z) \exp i(kx - \omega t) d\omega$$

$$T(z, x) = T_0(z - \eta(z, x))$$

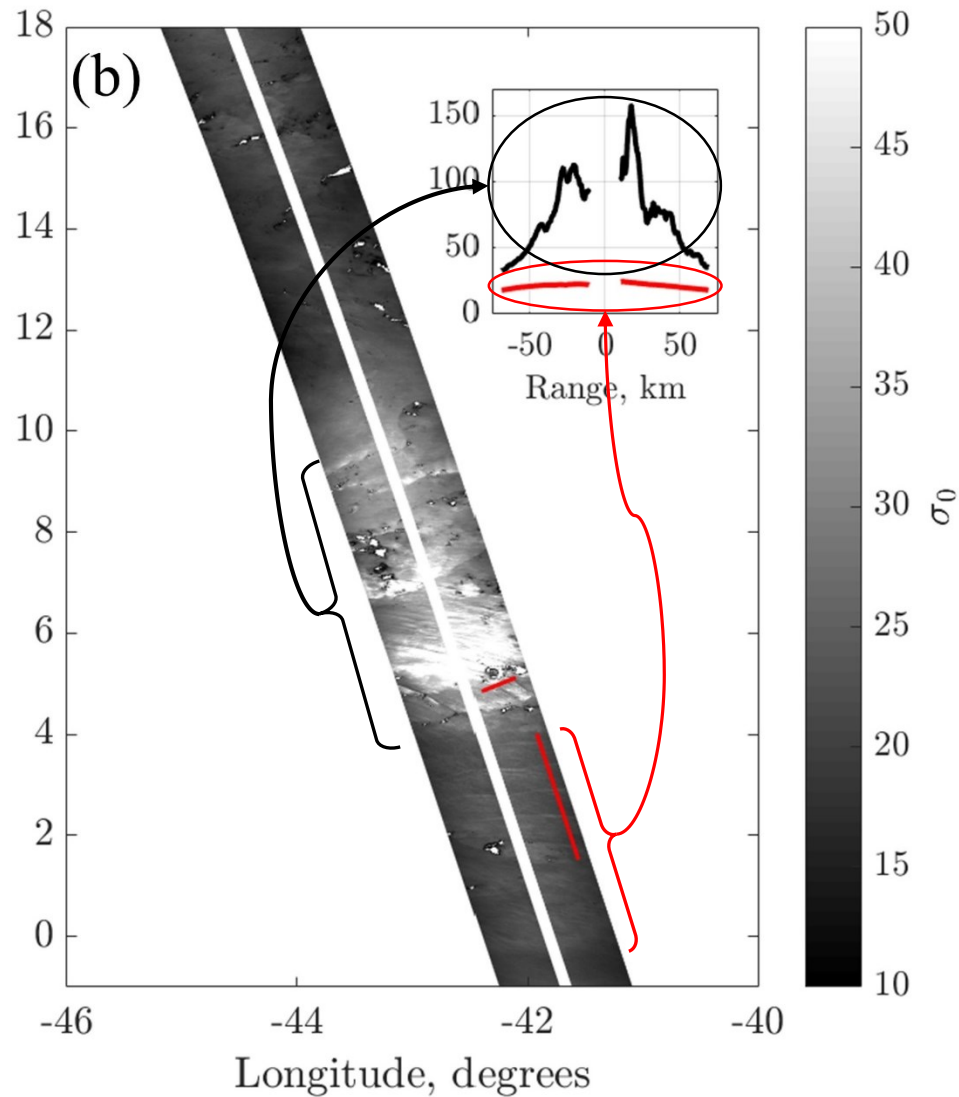


Удельная Эффективная Площадь Рассеяния (УЭПР)

09 мая 2023 г.



23 июня 2023 г.



Модуляция УЭПР

$$\sigma_0 = (R^2 \sec^4 \theta / s^2) \exp [-\tan^2 \theta / s^2]$$

R — коэффициент Френеля,

θ — угол падения,

s^2 — среднеквадратичный наклон поверхностных волн (MSS) в диапазоне волновых чисел поверхностных волн, $k < nk_R$,

k_R — волновое число радара ($k_R = 2\pi/0,08$ рад/м для SWOT),

n — параметр, который можно задать как $n = 1/3$.

$$\frac{\delta\sigma_0}{\bar{\sigma}_0} = \left(\frac{\tan^2 \theta}{s^2} - 1 \right) \frac{\delta s^2}{s^2}$$

$$K_{\sigma_0} = \delta\sigma_0 / \bar{\sigma}_0$$

$$K_s = \delta s^2 / \bar{s}^2$$

$$\hat{K}_s(\omega) = -iM(\omega) \frac{g}{c^2} \hat{h}(\omega)$$

$$\hat{K}_{\sigma_0}(\omega) = -iM(\omega) \left(\frac{\tan^2 \theta}{s^2} - 1 \right) \frac{g}{c^2} \hat{h}(\omega)$$

$$K_q(x) = \int \hat{K}_q(\omega) \exp(ikx) dk$$

K_{σ_0} — контраст σ_0

K_s — контраст s^2

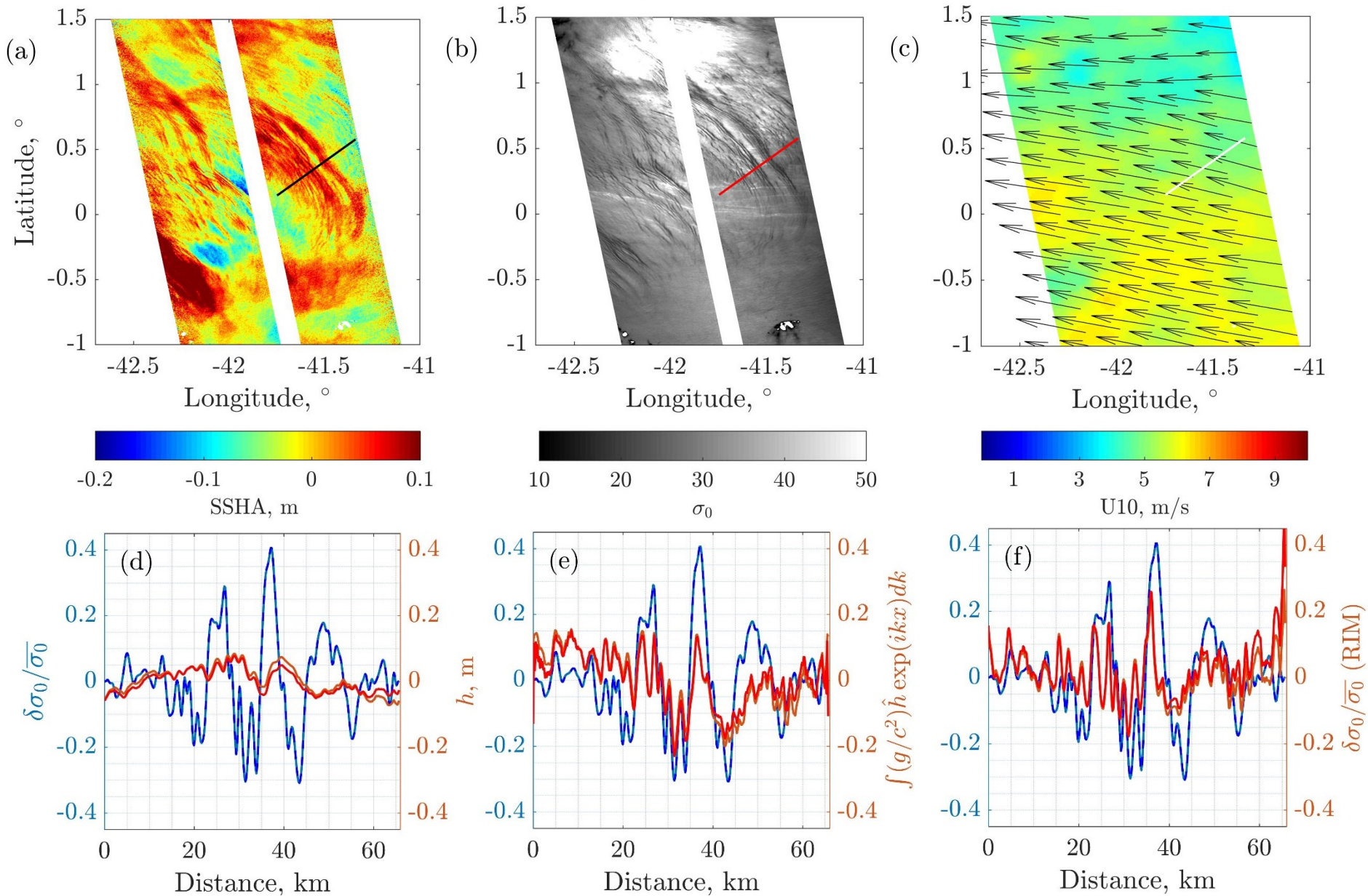
M — Модуляционная передаточная функция (MTF)

Модель формирования проявления течений в РСА (RIM) (Kudryavtsev et al., 2005)

- RIM описывает проявление динамических процессов в верхнем слое океана на РСА изображениях.
- Параметры поверхности океана определяются из решения уравнение баланса энергии волн, в котором учитываются ветровое воздействие, вязкая диссипация и диссипация при обрушении волн, нелинейное взаимодействие волн и генерация коротких волн при обрушении длинных волн.
- Модель УЭПР учитывает РЛ рассеяние от «обычных» ветровых волн и их обрушений.
- Ранее модель была использована для интерпретации поверхностных проявлений на спутниковых РСА изображениях.
- В данной работе RIM применен для анализа данных альтиметра SWOT, и показал удовлетворительное соответствие.

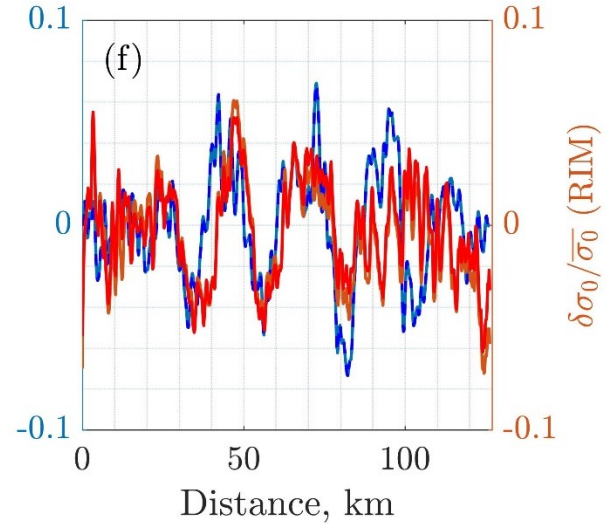
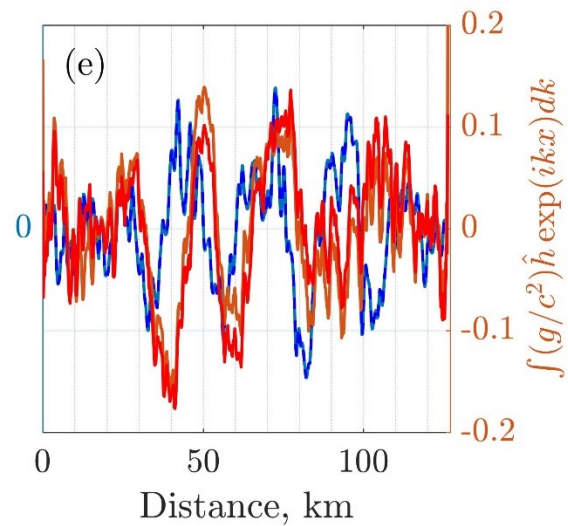
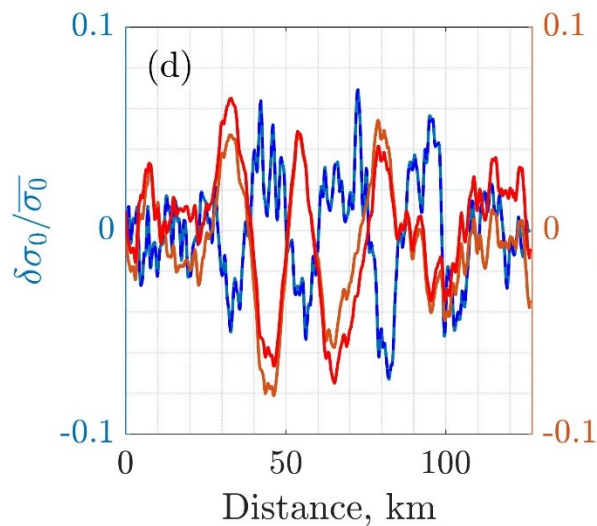
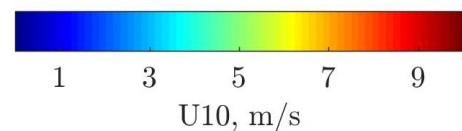
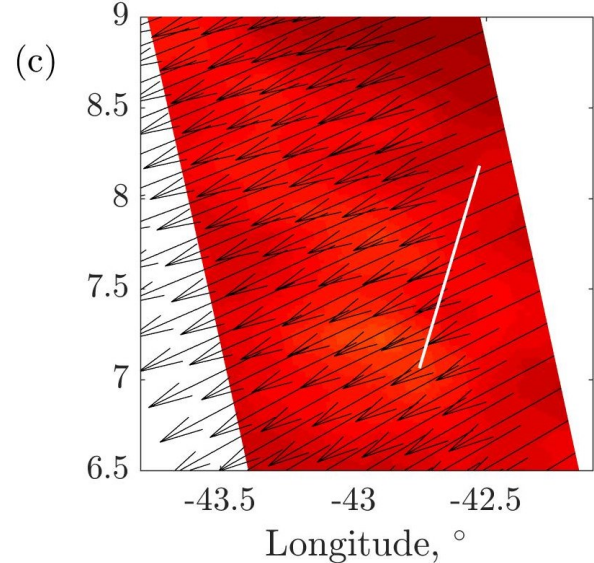
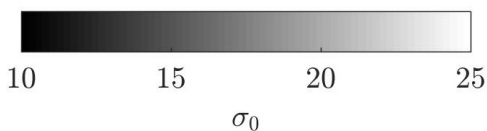
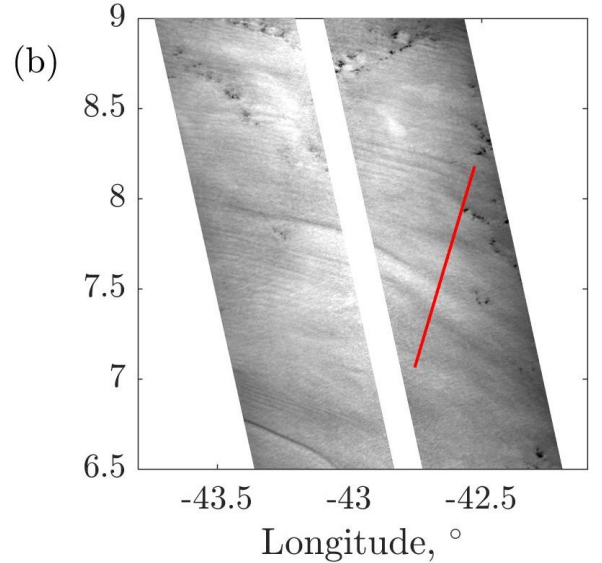
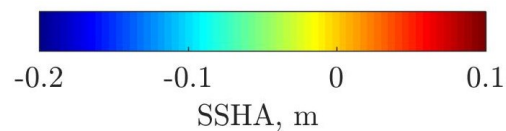
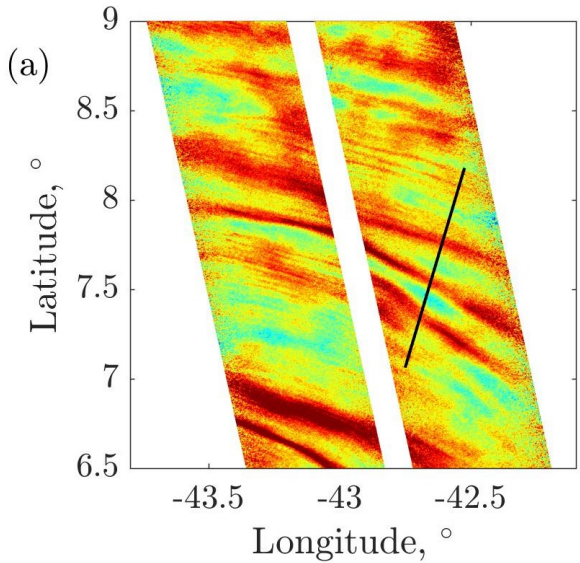
Профили SSHA и $K_{\sigma 0}$ для ВВ

09-May-2023 08:11:41



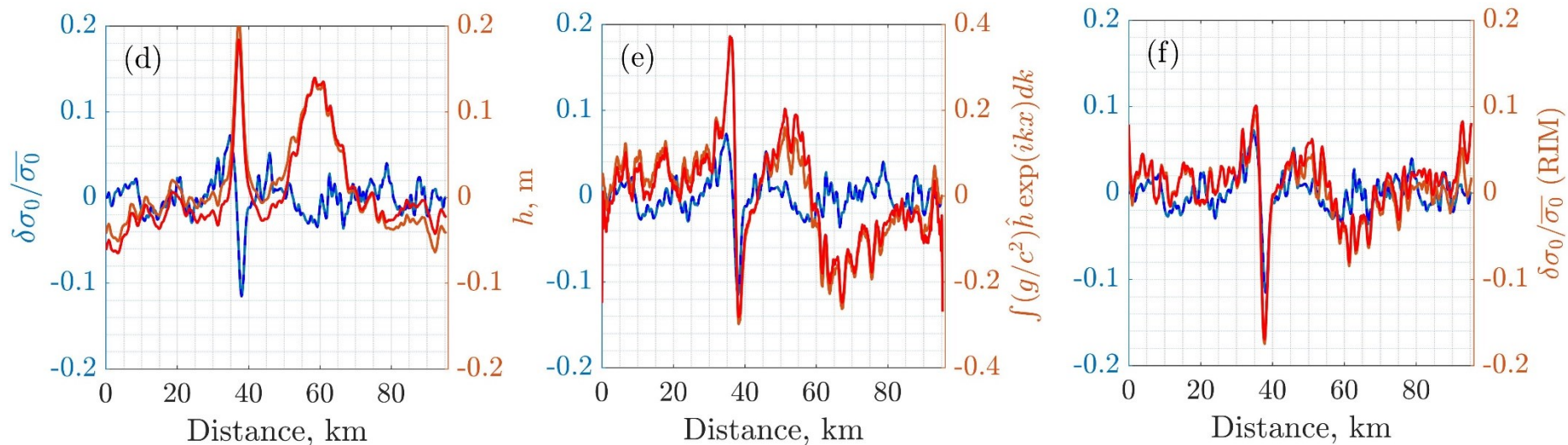
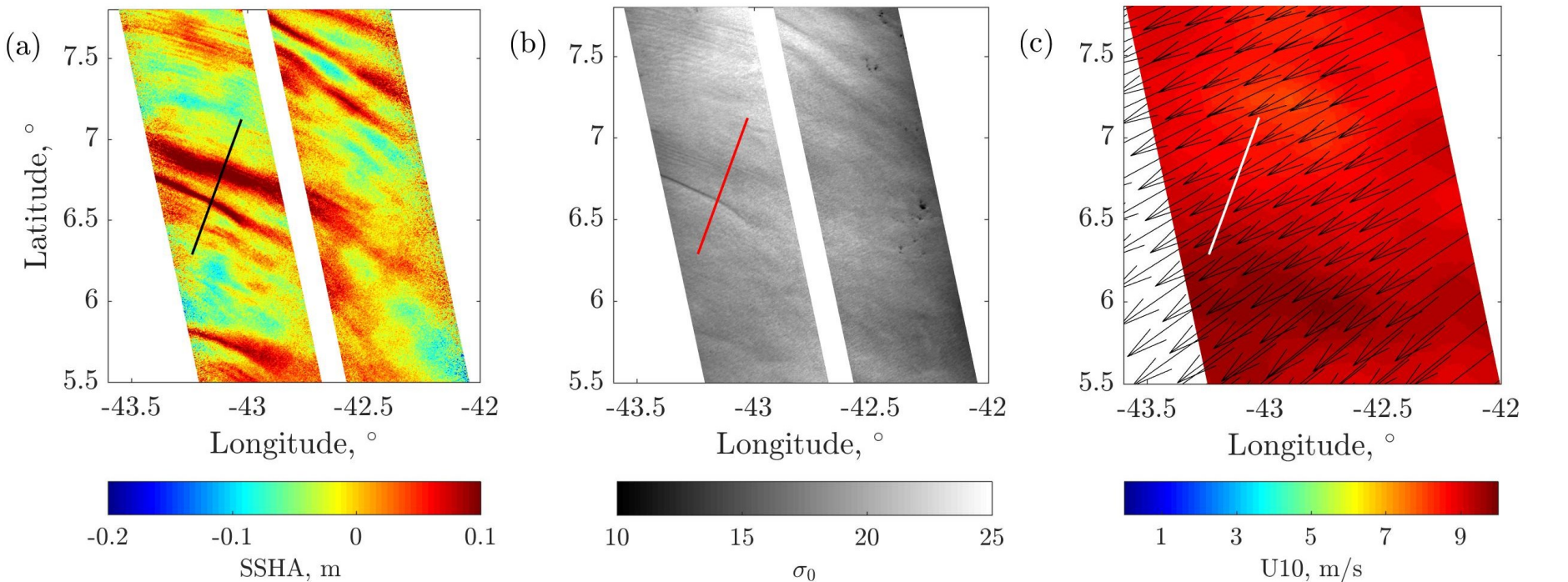
Профили SSHA и $K_{\sigma 0}$ для ВВ

09-May-2023 08:11:41



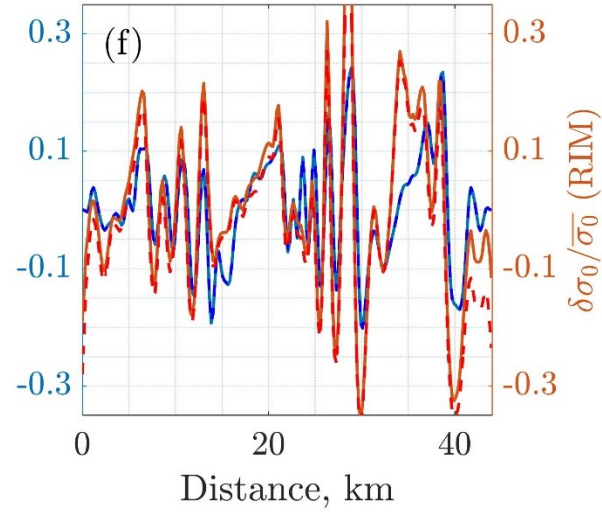
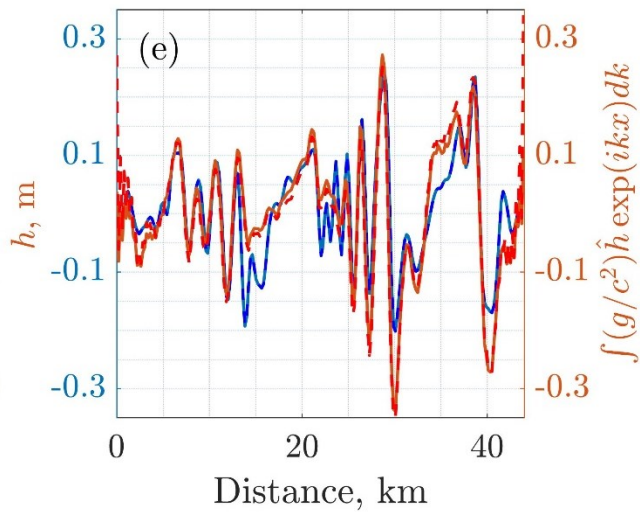
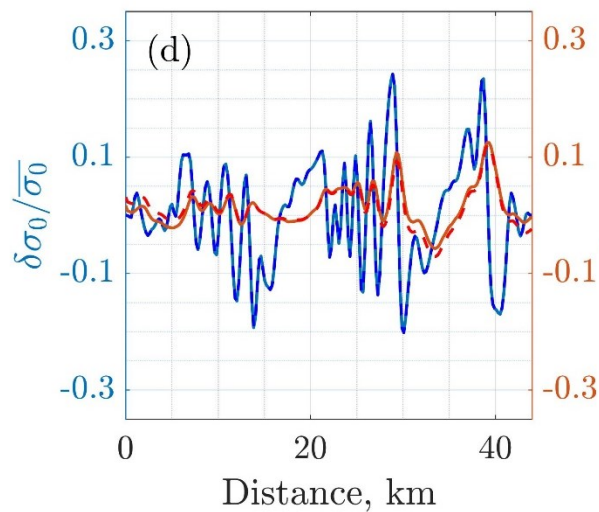
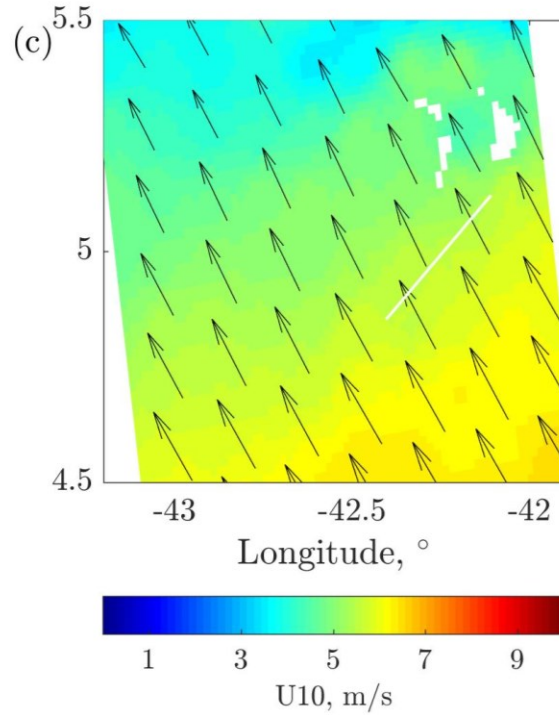
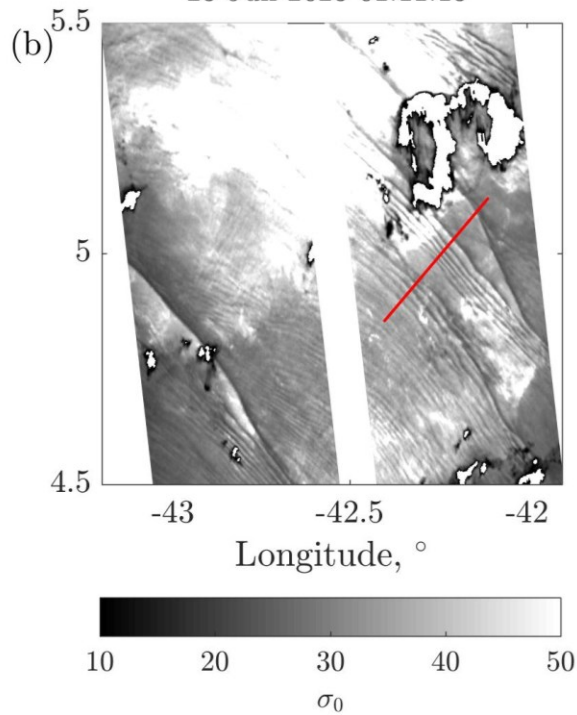
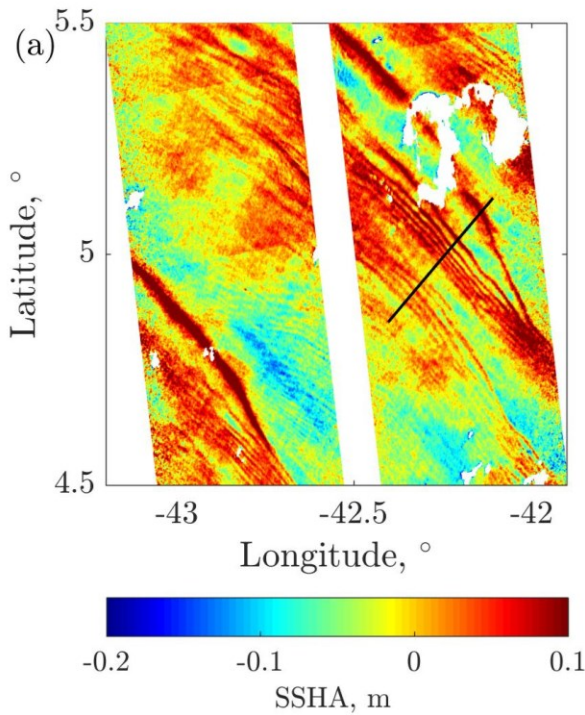
Профили SSHA и $K_{\sigma 0}$ для ВВ

09-May-2023 08:11:41



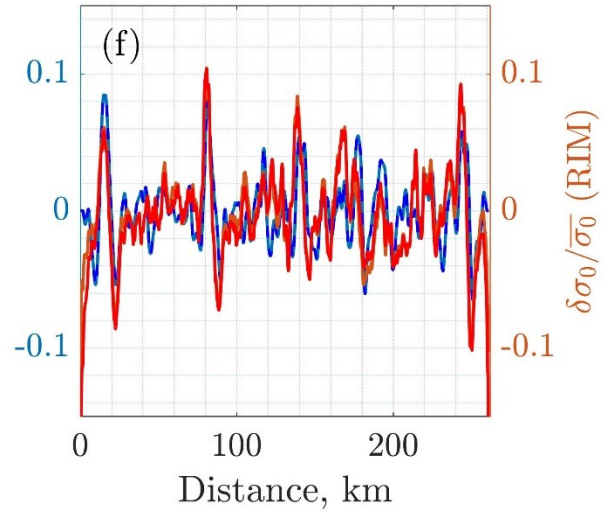
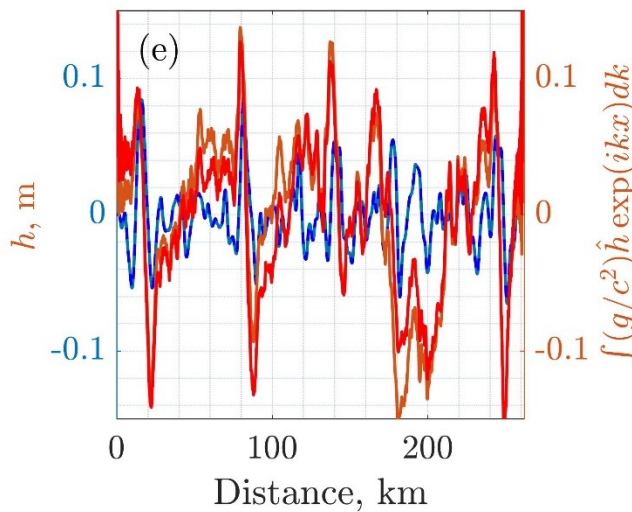
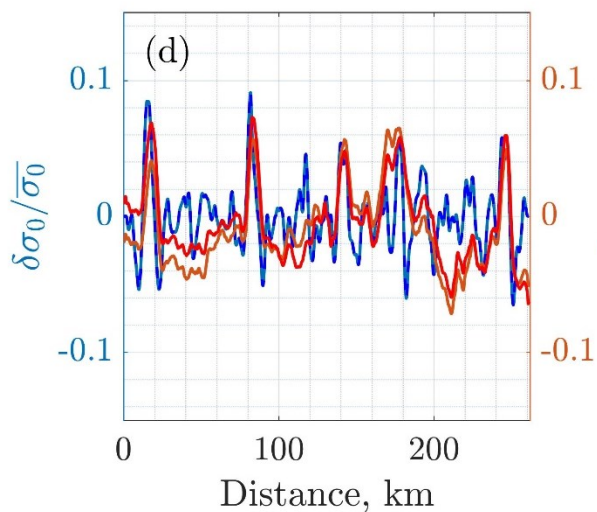
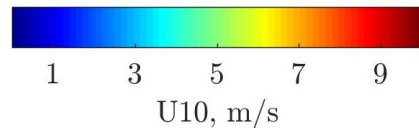
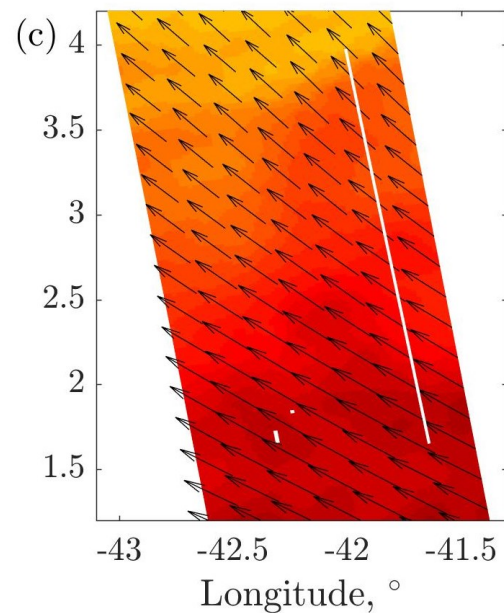
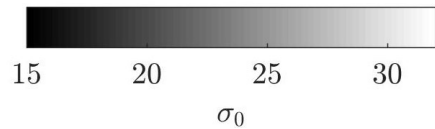
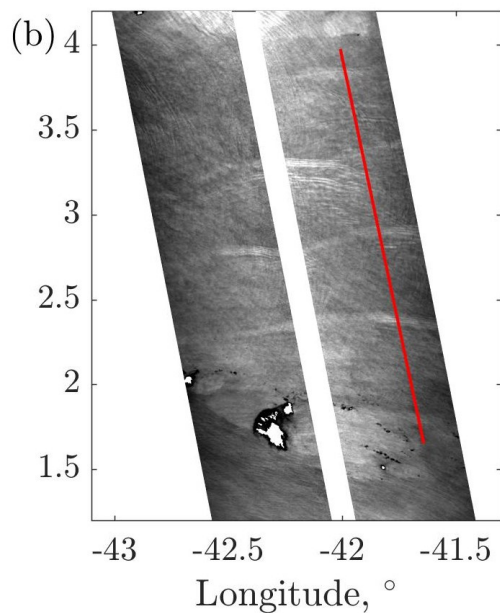
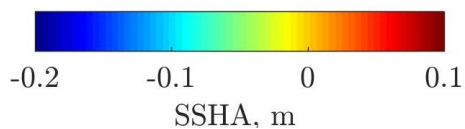
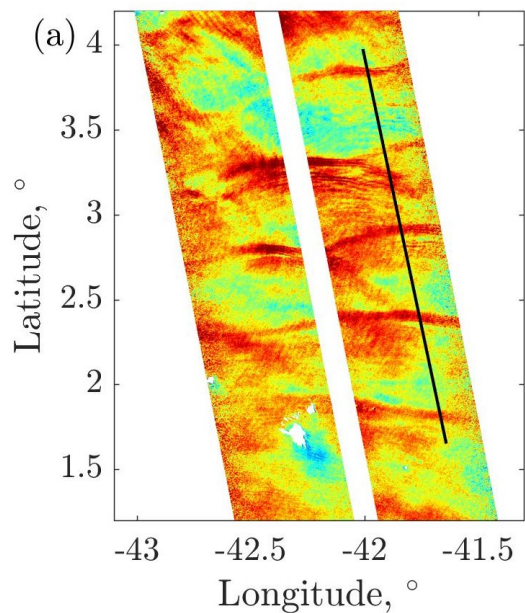
Профили SSHA и K_{σ_0} для ВВ

23-Jun-2023 01:11:13



Профили SSHA и $K_{\sigma 0}$ для ВВ

23-Jun-2023 01:11:13



Спектральный анализ SSHA и УЭПР

$$\gamma = \frac{|S_{u_m/c} S_{K_{\sigma 0}}^*|}{\sqrt{S_{u_m/c} S_{K_{\sigma 0}}}}$$

$S_{u/c}$ — Спектр u/c , рассчитанный

$S_{K_{\sigma 0}}$ — Спектр $K_{\sigma 0}$, рассчитанный

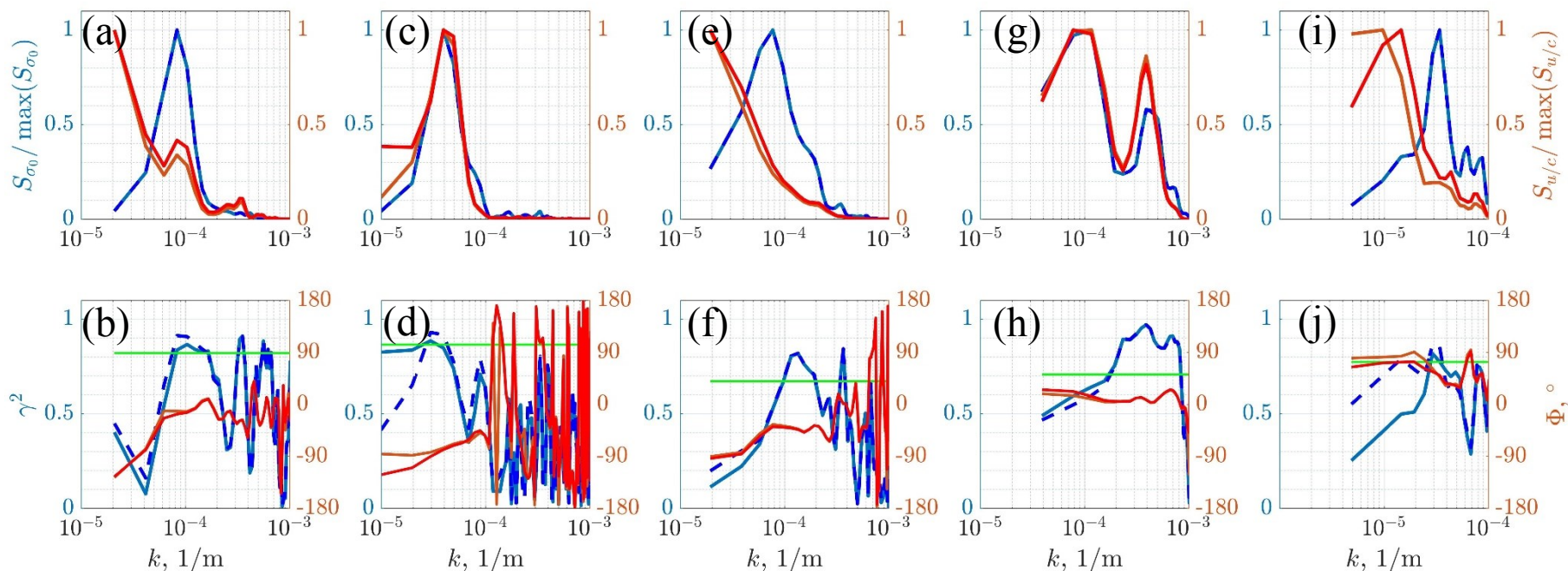
$S_{K_{\sigma 0}}^*$ — Спектр комплексных сопряжений $K_{\sigma 0}$

γ^2 — Корреляционная функция

D_f — количество независимых кросс-спектральных реализаций в каждой полосе частот

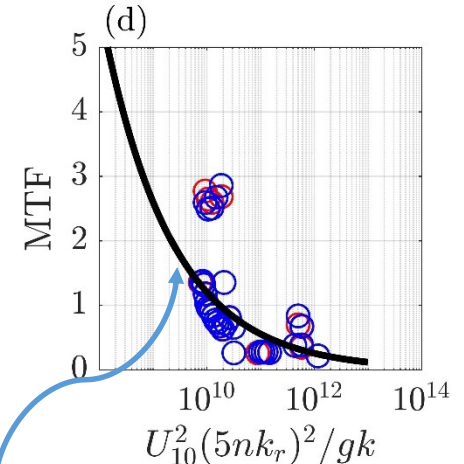
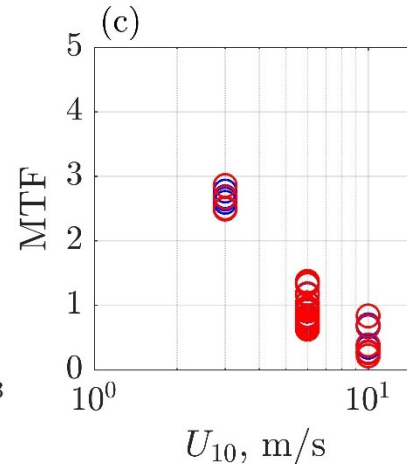
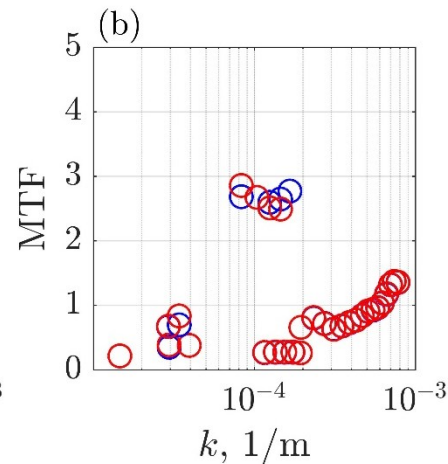
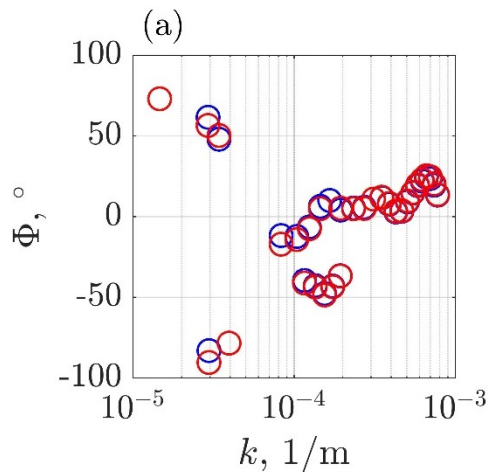
$\alpha = 0,05$ для доверительных интервалов 95%

$$\gamma_{1-\alpha}^2 = 1 - \alpha^{1/(D_f-1)}$$



Модуляционная передаточная функция (MTF)

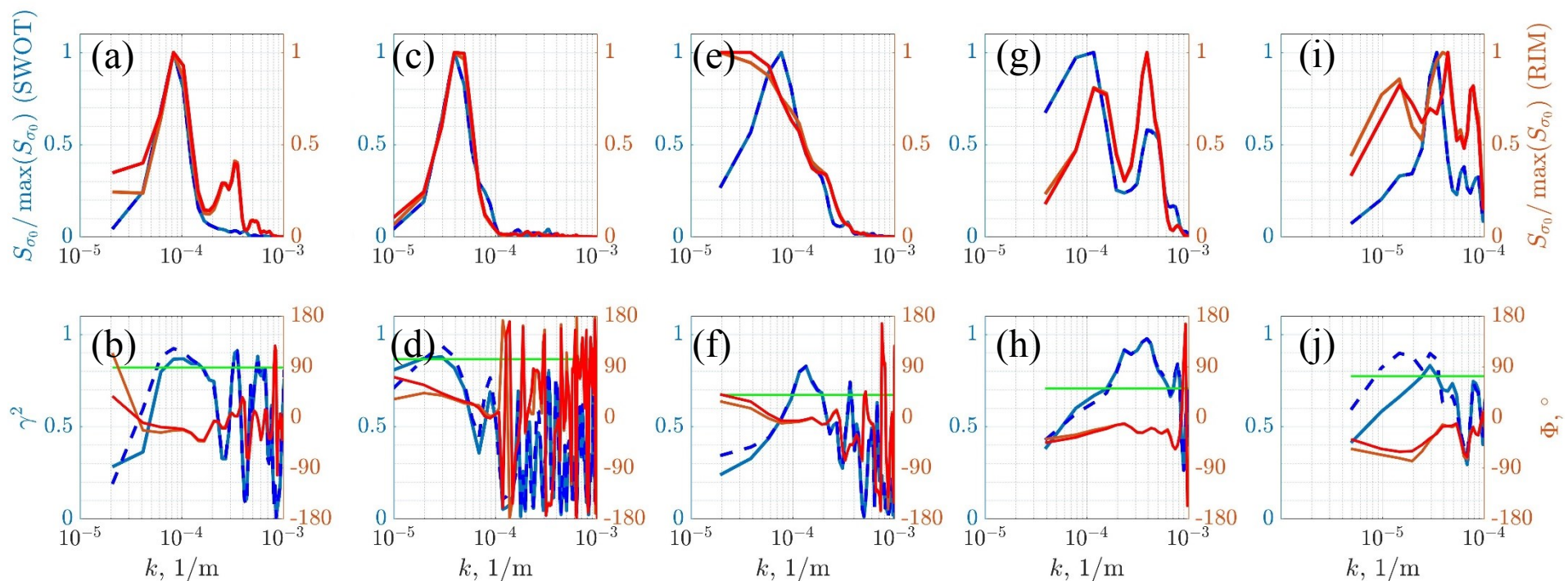
	γ_{\max}^2	wavelength (km)	Φ ($^\circ$)	MTF
TS-1	0.87	9.6	-12.4	2.65
TS-3	0.88	34	-83	0.34
TS-5	0.82	7.4	-43	0.27
TS-6	0.97	2.5	7.9	0.66
TS-7	0.81 and 0.75	34 and 12	57 and 51	0.30 and 0.71



$$M = 2.72 \times 10^3 \left[\frac{U_{10}^2 (5nk_r)}{gk} \right]^{-0.33}$$

Спектральный анализ наблюдаемых (SWOT) и смоделированных (RIM) УЭПР

	γ_{\max}^2	wavelength (km)	Φ ($^\circ$)	MTF
TS-1	0.87	12	-41	0.30
TS-3	0.87	34	39.4	0.85
TS-5	0.83	7.4	-4.6	1.27
TS-6	0.98	2.5	-27.5	2.4
TS-7	0.82 and 0.74	34 and 12	-36 and -29	1.42 and 0.87



Заключение

- Исследованы внутренние волны (ВВ) на шельфе Амазонки с использованием данных высокого разрешения миссии Surface Water and Ocean Topography (SWOT).
- Мы проанализировали данные аномалий высоты поверхности океана (SSHA) для выявления закономерностей ВВ за пределами шельфа Амазонки.
- Анализ дает отчетливые сигнатуры ВВ (с длинами волн от 3 до 50 км.) в аномалиях уровня поверхности океана, достигающих 0,15 метра.
- Для восстановления вертикальных движений, вызванных ВВ в стратифицированном океане, мы определили дисперсионное соотношение ВВ и собственную функцию для вертикальной скорости ВВ в рамках трехслойной аппроксимации реальной стратификации.
- Используя непрерывность давления на поверхности океана, мы воспроизвели смещение термоклина под действием ВВ, размах которых достигала 100м!
- Из спектрального анализа УЭПР и SSHA при различных скоростях ветра мы смогли определить модуляционную передаточную функцию, которая связывает контрасты УЭПР SWOT с амплитудой и волновым числом ВВ и скоростью ветра.