

# Особенности проявления внутренних волн на поверхности океана по данным мульти-сенсорных спутниковых измерений SWOT и Sentinel-1A PCA и моделирования

Чешим 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**

## **Актуальность**

- Внутренние волны (ВВ) играют ключевую роль в процессах перемешивания и переноса энергии в океане.
- Их проявления можно фиксировать радиолокационными спутниковыми средствами.
- Моря Индонезии — один из наиболее активных регионов генерации ВВ благодаря сложной батиметрии и сильным приливным течениям.

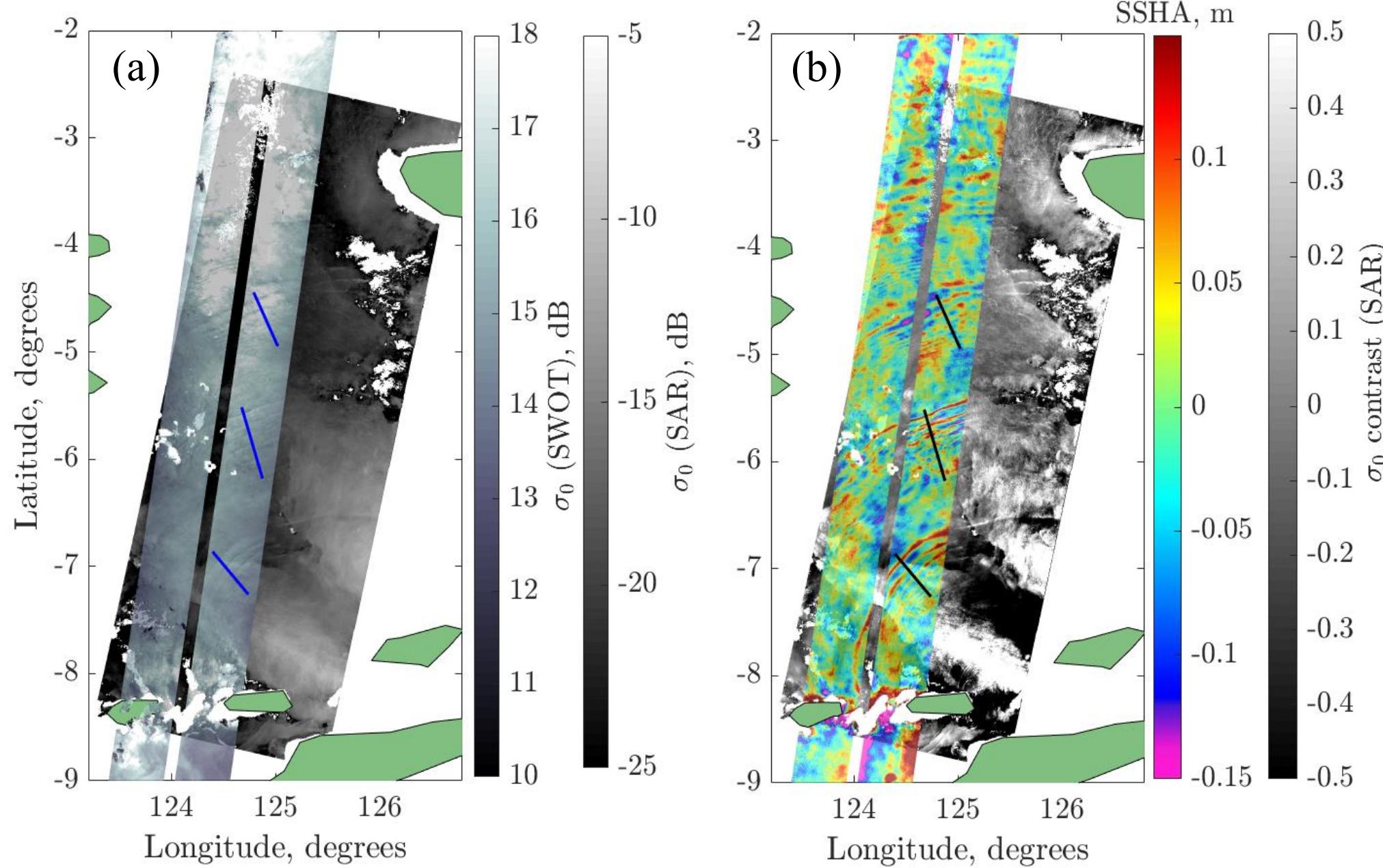
**Цель работы — Исследовать поверхностные проявления внутренних волн с использованием:**

1. **SWOT** — поля аномалий высоты поверхности океана (SSHA) и контрастов мощности отраженного сигнала (УЭПР) при малых углах падения;
  - *SWOT* предоставляет уникальную комбинацию полей УЭПР и SSHA океана, связанных с прохождением ВВ. Такая комбинация позволяет получить полное представление о физике формирования поверхностных проявлений ВВ.
2. **PCA Sentinel-1A** — наблюдения УЭПР при умеренных углах падения;
3. **Модель формирования проявления течений в PCA (Radar Imaging Model, далее RIM)** (*Kudryavtsev et al., 2005*)

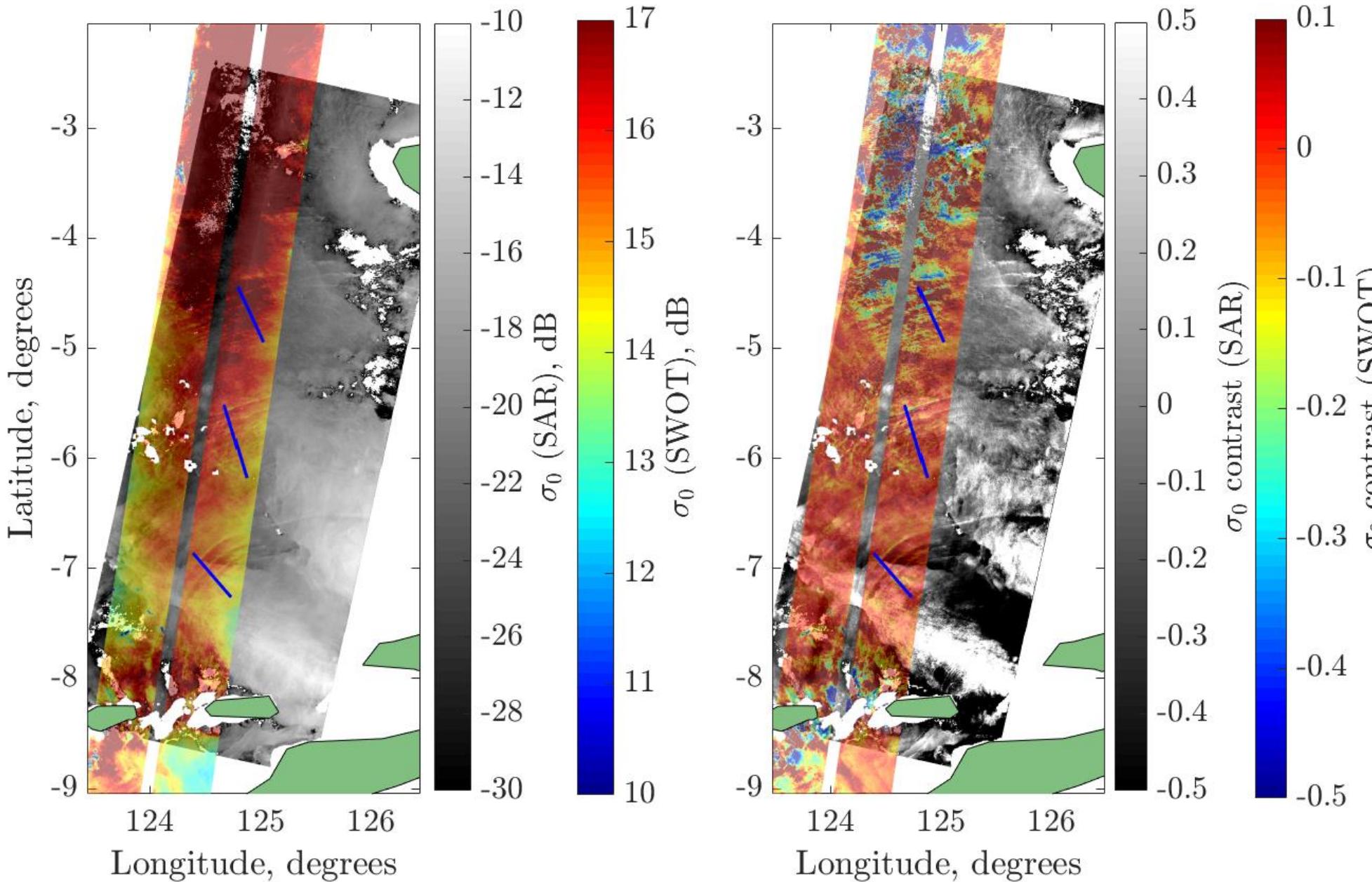
## **Основная идея**

1. SWOT предоставляет поля SSHA, которые позволяют восстановить орбитальные скорости, индуцируемые ВВ и УЭПР ( $\sigma_0$ ), .
2. Через примерно 12,3 часов этот же район наблюдался Sentinel-1A, где проявились аналогичные пакеты ВВ.

# Наблюдения SWOT и S1A PCA ВВ 09 мая 2023



# Наблюдения SWOT и S1A PCA ВВ 09 мая 2023

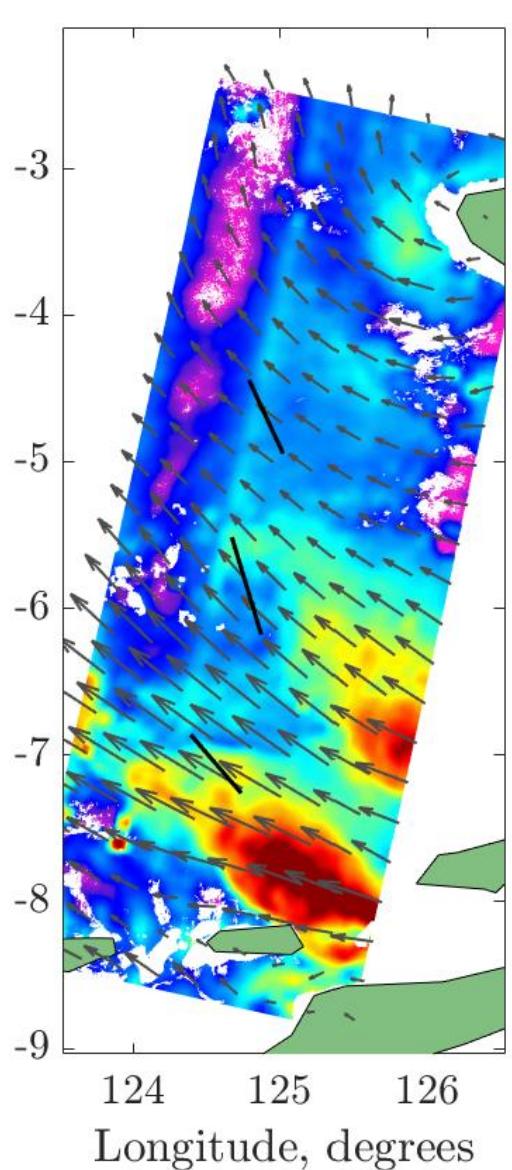


SWOT pass time:  
09 May 2023  
09:03 UTC

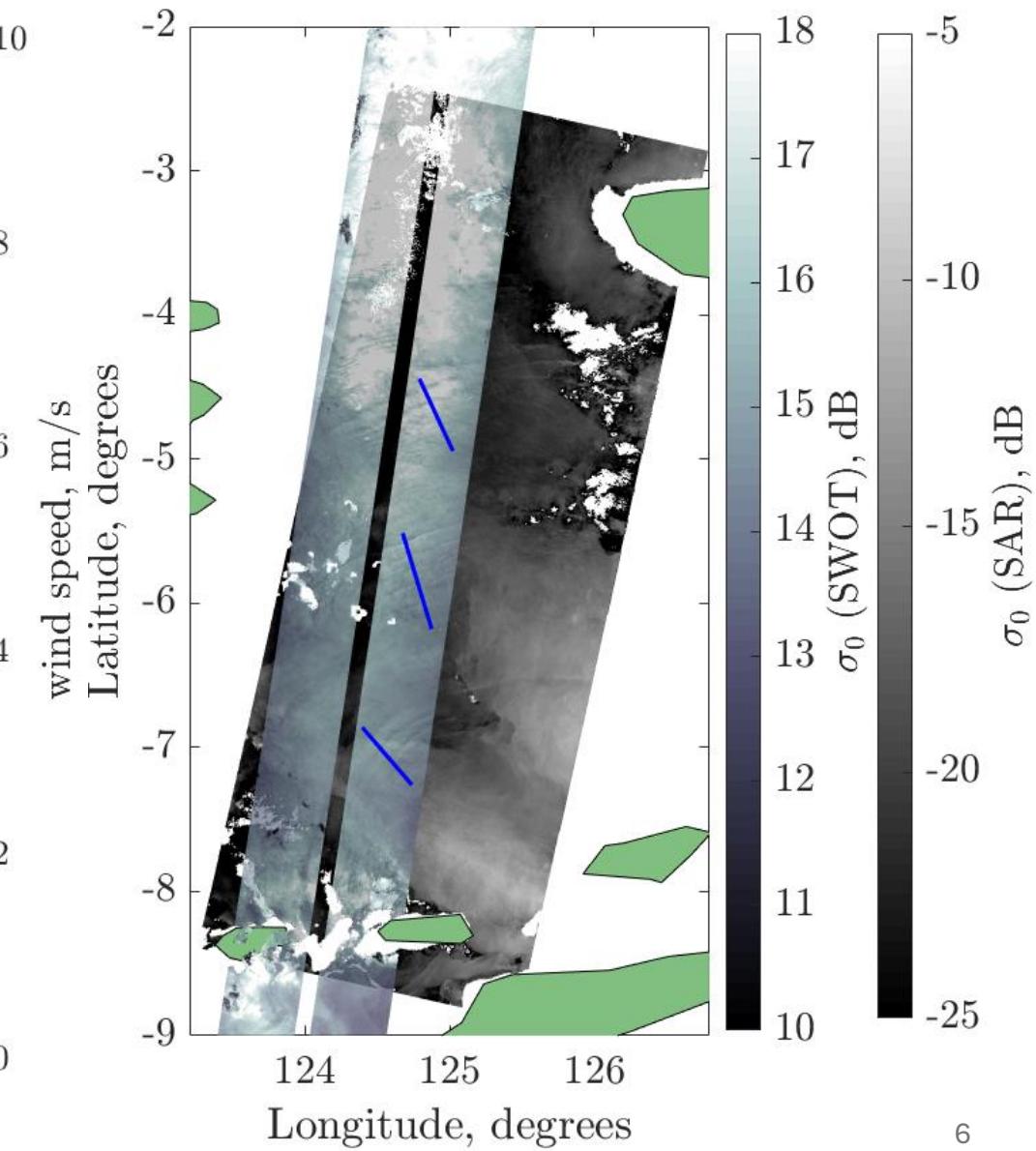
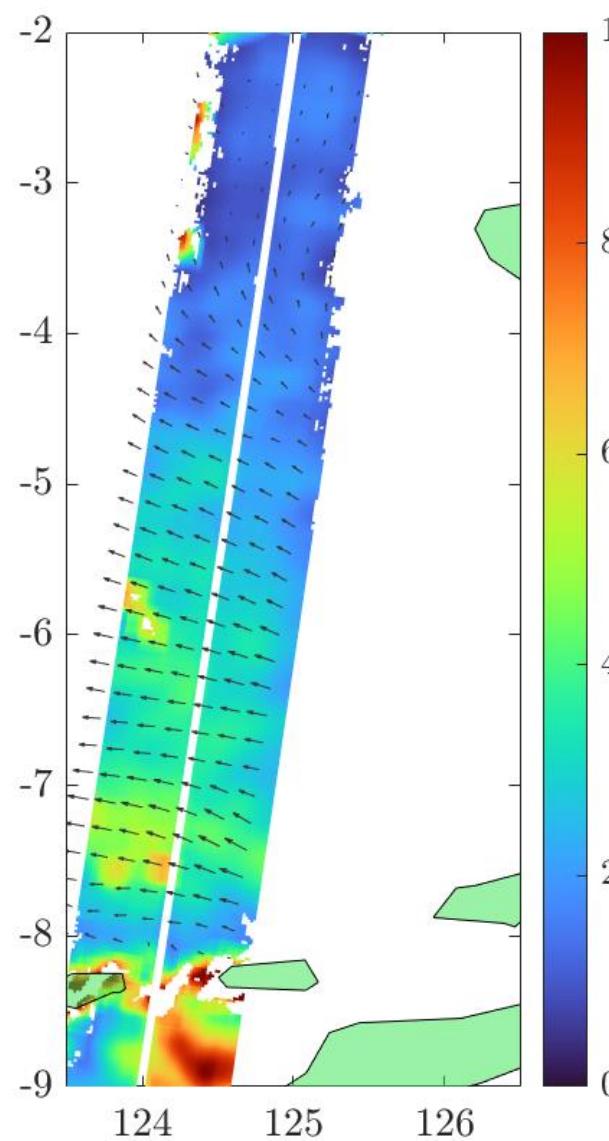
S1A pass time:  
09 May 2023  
21:20 UTC

# Наблюдения SWOT и S1A PCA ВВ 09 мая 2023

Wind speed from the S1A



Wind speed from the SWOT



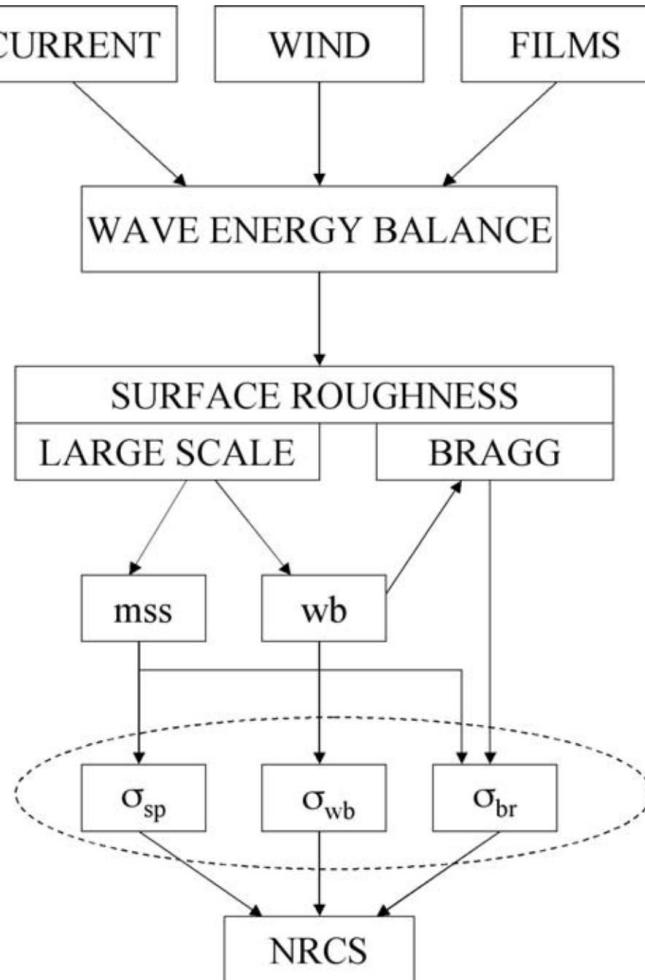
## **Основная идея**

1. SWOT предоставляет поля SSHA, которые позволяют восстановить орбитальные скорости, индуцируемые ВВ и УЭПР ( $\sigma_0$ ), .
2. Через примерно 12,3 часов этот же район наблюдался Sentinel-1A, где проявились аналогичные пакеты ВВ.
3. Совмещение данных SWOT и Sentinel-1A совместно с RIM даёт полное представление о механизмах проявлений ВВ на поверхности.

**RIM описывает проявление динамических процессов в океана на его поверхности в виде вариаций «шероховатости» и УЭПР поверхности.**

- 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.
- Ранее модель была использована для интерпретации поверхностных проявлений на спутниковых PCA и оптических изображениях.

# Модуляция УЭПР, $\sigma_0$ , в РСА S1A: RIM (Kudryavtsev et al., 2005)



$$s_j^2 = \int_{k < dk_r} \kappa_j^2 k^{-2} B(\mathbf{k}) dK,$$

среднеквадратичный наклон  
поверхностных волн (mean square slope mss)

$$\sigma_0^p = (\sigma_{br}^p + \sigma_{sp})(1 - q) + \sigma_{wb}q,$$

УЭПР

Брэгговское  
рассеяние

квази-  
зеркальный  
вклад

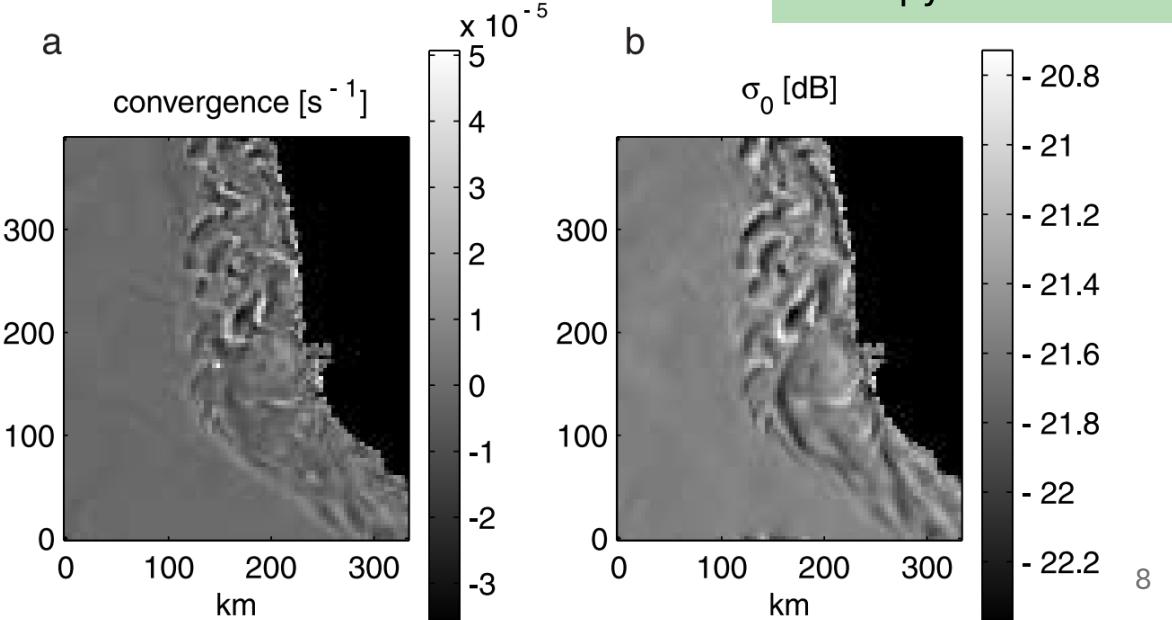
Вклад  
обрушения  
волны

$$q = c_q \int \int_{k < k_{wb}} \beta(B + (n_g + 1)\tilde{B}) d\varphi d \ln k,$$

$$\tilde{B}(\mathbf{k})/B_0(\mathbf{k}) = \tau \left( \omega^{-1} m_k^{ij} u_{i,j} + 2\beta \tilde{u}_*/u_* + \tilde{I}_{sw}/B_0 \right)$$

часть морской поверхности,  
покрытая обрушающимися  
волнами

отношение спектра  
насыщения к фоновому  
спектру



**Figure 1.** Schematic illustration of the main radar imaging model assumptions and principles. Note that the sea surface roughness is an integral from the large-scale tilt that determines mean square slope (mss) and breaking waves (wb) to the small-scale Bragg (br) wavelengths. The three terms that contribute to the normalized radar cross section (NRCS) are quasi-specular contribution  $\sigma_{sp}$ , impact from breaking waves  $\sigma_{wb}$ , and Bragg scattering  $\sigma_{br}$ .

# Модуляция УЭПР, $\sigma_0$ в SWOT

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

Приближение квазизеркальных отражений  
(Valenzuela, 1978)

$s^2$  – среднеквадратичный наклон поверхностных волн (mean square slope of the sea surface MSS) в диапазоне волновых чисел поверхностных волн,  $K < nk_R$ ,

$R$  – коэффициент Френеля,

$\theta$  – угол падения,

$k_R$  – волновое число радара ( $k_R = 2\pi/0,008$  рад/м для SWOT),

$n$  – параметр, который можно задать как  $n = 1/4$ .

$$\frac{\delta\sigma_0}{\sigma_0} = \left( \frac{\tan^2 \theta}{s^2} - 1 \right) \frac{\delta s^2}{s^2} \approx -\frac{\delta s^2}{s^2}, \quad K_{\sigma 0} = \delta\sigma_0/\overline{\sigma_0}$$

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

$$\hat{D}(K) = \frac{iu_s}{C} = -i \frac{g}{C^2} \hat{h}(K)$$

Отношение горизонтальной поверхности скорости ВВ,  $\hat{u}_s$ , к их фазовой скорости,  $C$ .  $\hat{D}(K)$  характеризует интенсивность ВВ.

$$\hat{K}_s(K) = M_s(K) \hat{D}(K) = -i M_s(K) \frac{g}{C^2} \hat{h}(K)$$

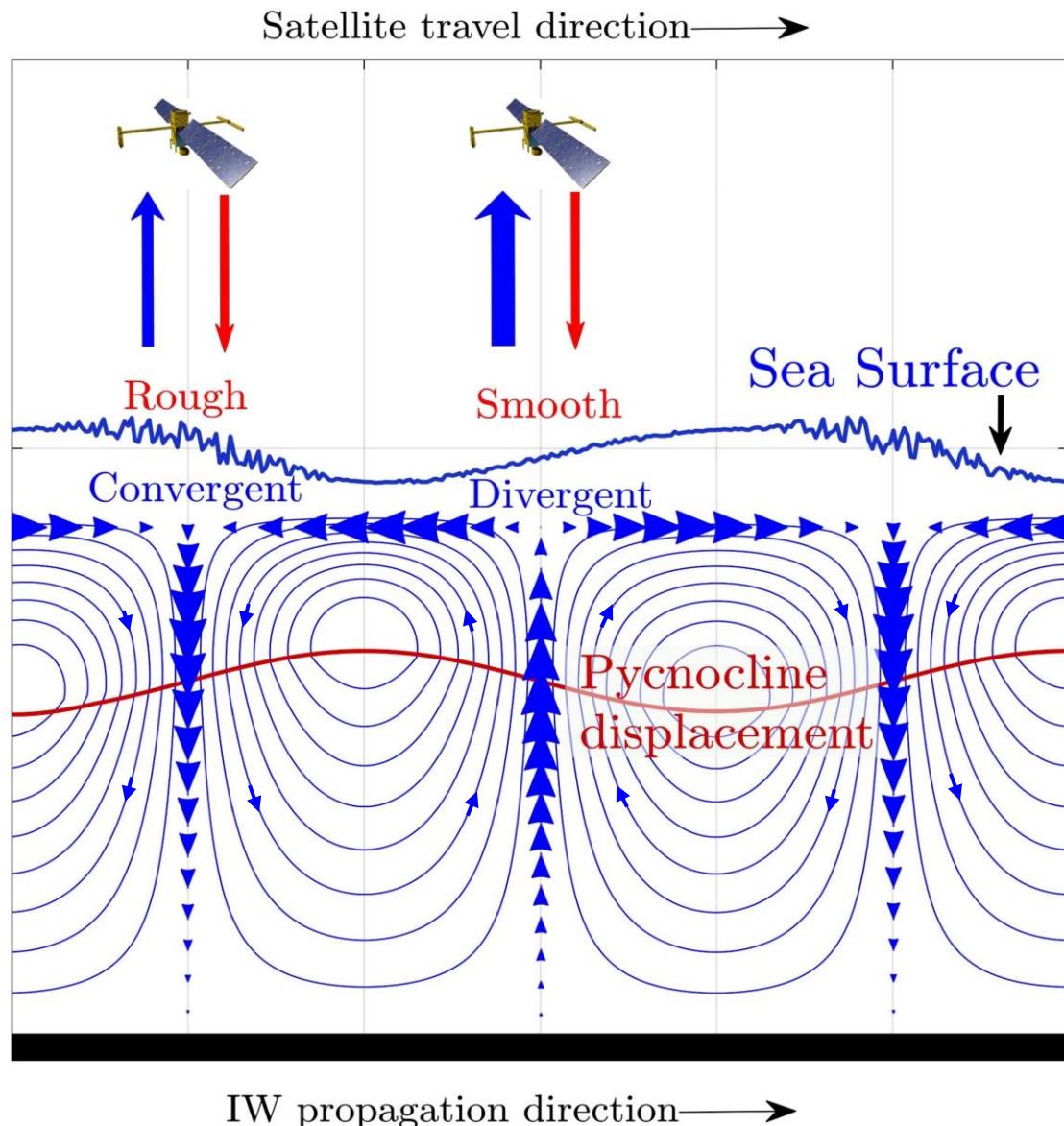
$$\hat{K}_{\sigma 0}(K) = -i M_s(K) \left( \frac{\tan^2 \theta}{s^2} - 1 \right) \frac{g}{C^2} \hat{h}(K)$$

$$K_q(x) = \int \hat{K}_q(K) \exp [i(Kx - \Omega t)] dK$$

$$D(x) = -i \int \frac{g}{C^2} \hat{h}(K) \exp [i(Kx - \Omega t)] dK$$

$K_{\sigma 0}$  – контраст  $\sigma_0$   
 $K_s$  – контраст  $s^2$   
 $M_s$  – Модуляционная передаточная функция (МПФ)

# Схематическое Представление Наблюдений ВВ по SWOT



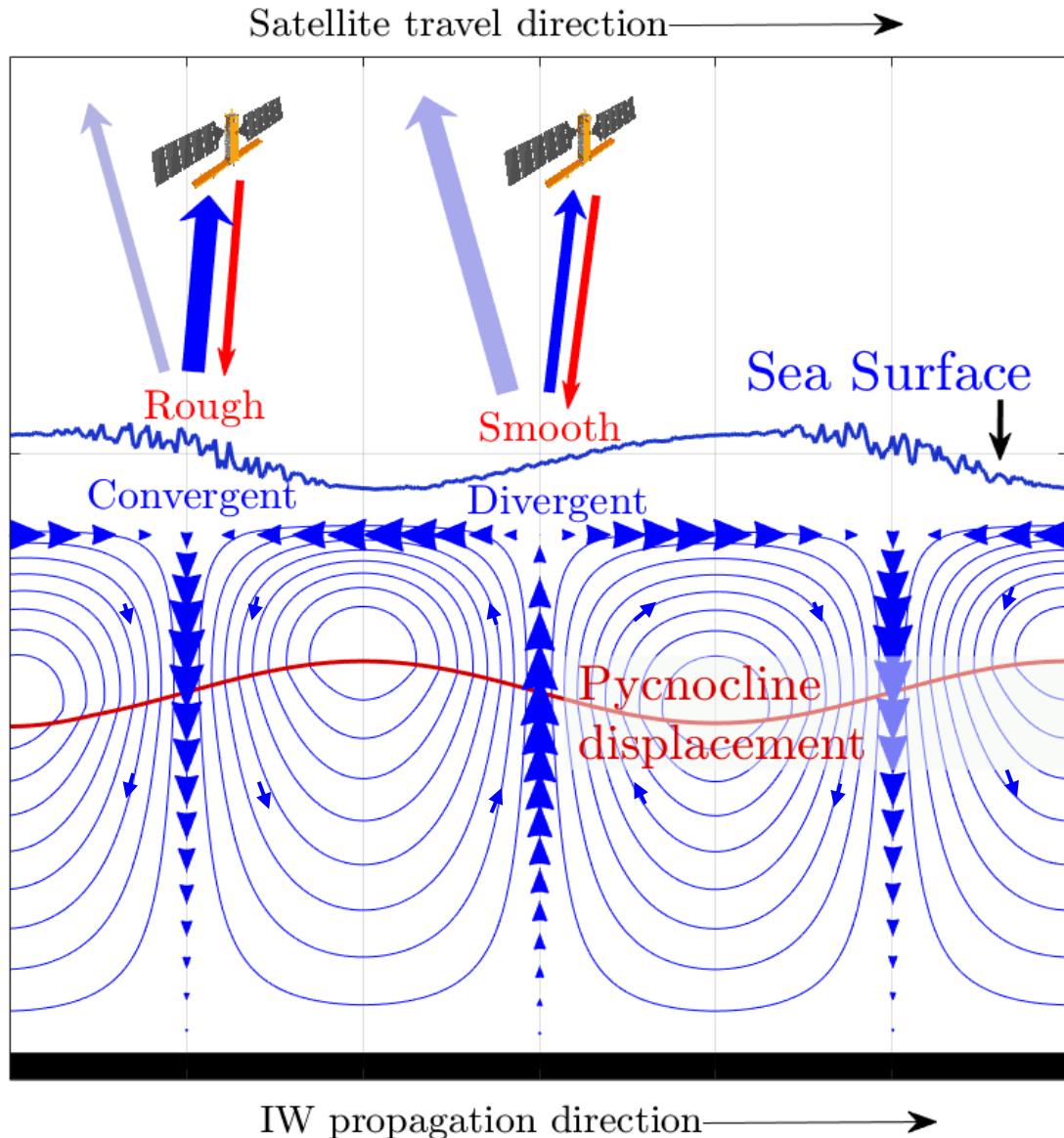
SWOT наблюдает за поверхностью  
Земли в углах падения, близких к надиру  
(от  $-4^\circ$  до  $+4^\circ$ )



В этом случае УЭПР поверхности  
описывается механизмом «квази-  
зеркальных отражений» от морской  
поверхности, которая обратно  
пропорционально среднеквадратичному  
наклону поверхности (MSS)

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

# Схематическое Представление Наблюдений ВВ по РСА



PCA Sentinel-1A наблюдает за поверхностью Земли в умеренных углах падения ( $30^\circ - 40^\circ$ )



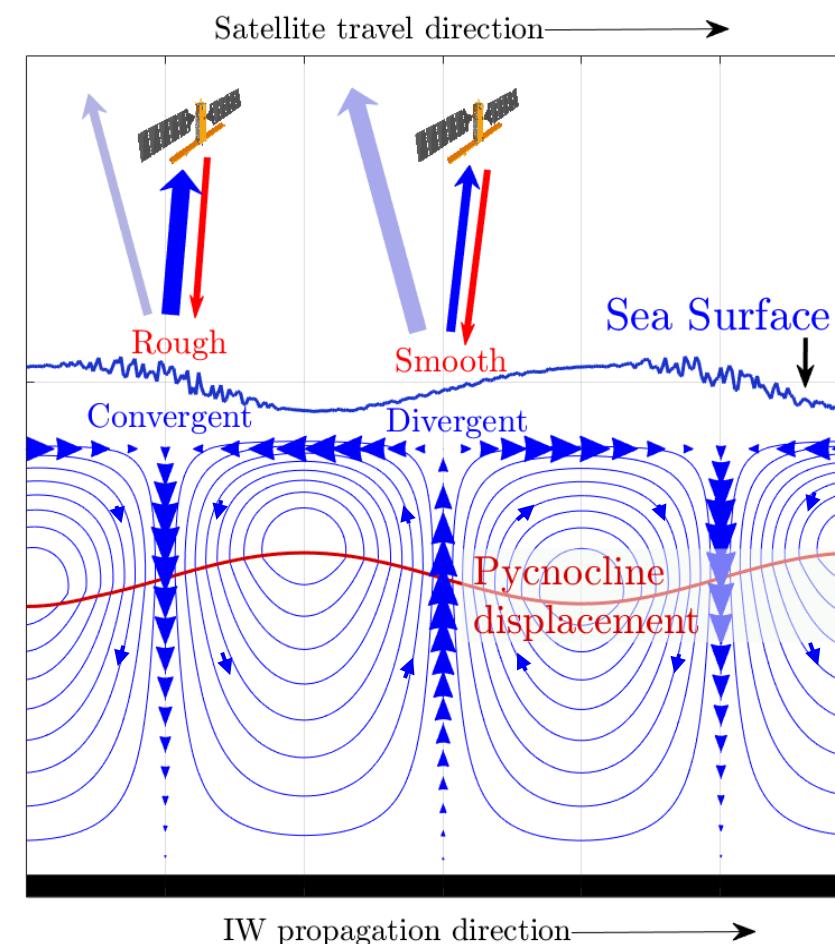
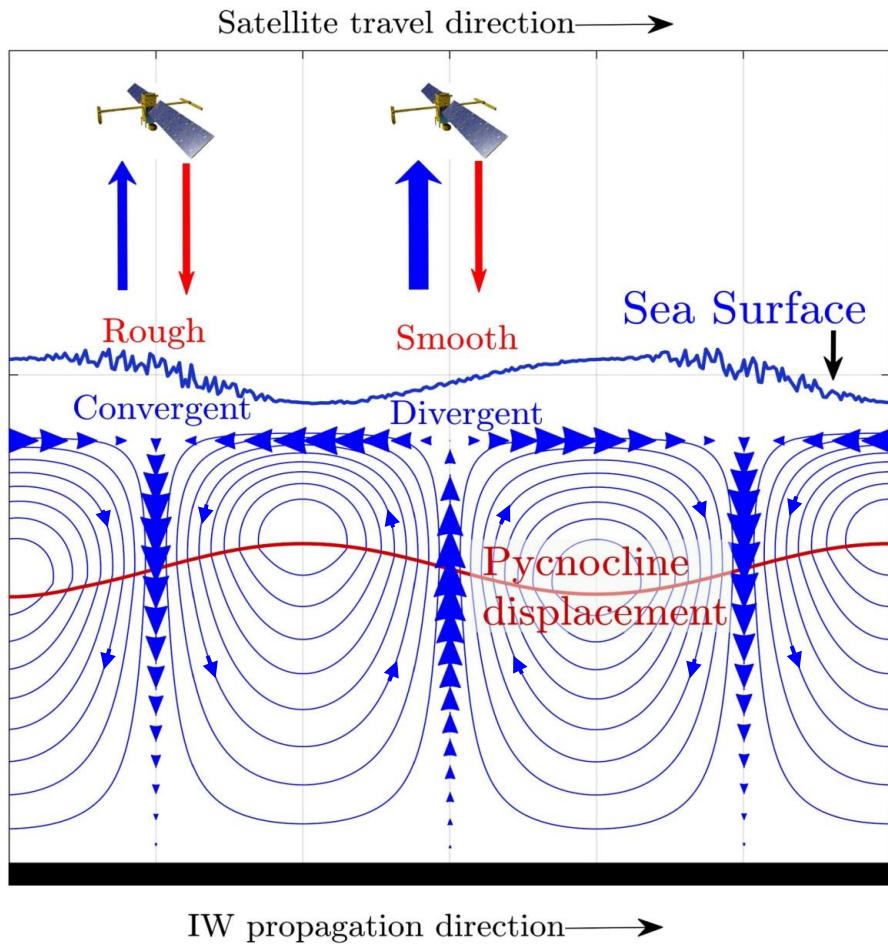
В этом случае УЭПР описывается суперпозицией Брэгговского рассеяния на ветровой ряби и радиолокационными отражениями от обрушений ветровых волн

$$\sigma_0^p = (\sigma_{br}^p + \sigma_{sp})(1 - q) + \sigma_{wb}q,$$

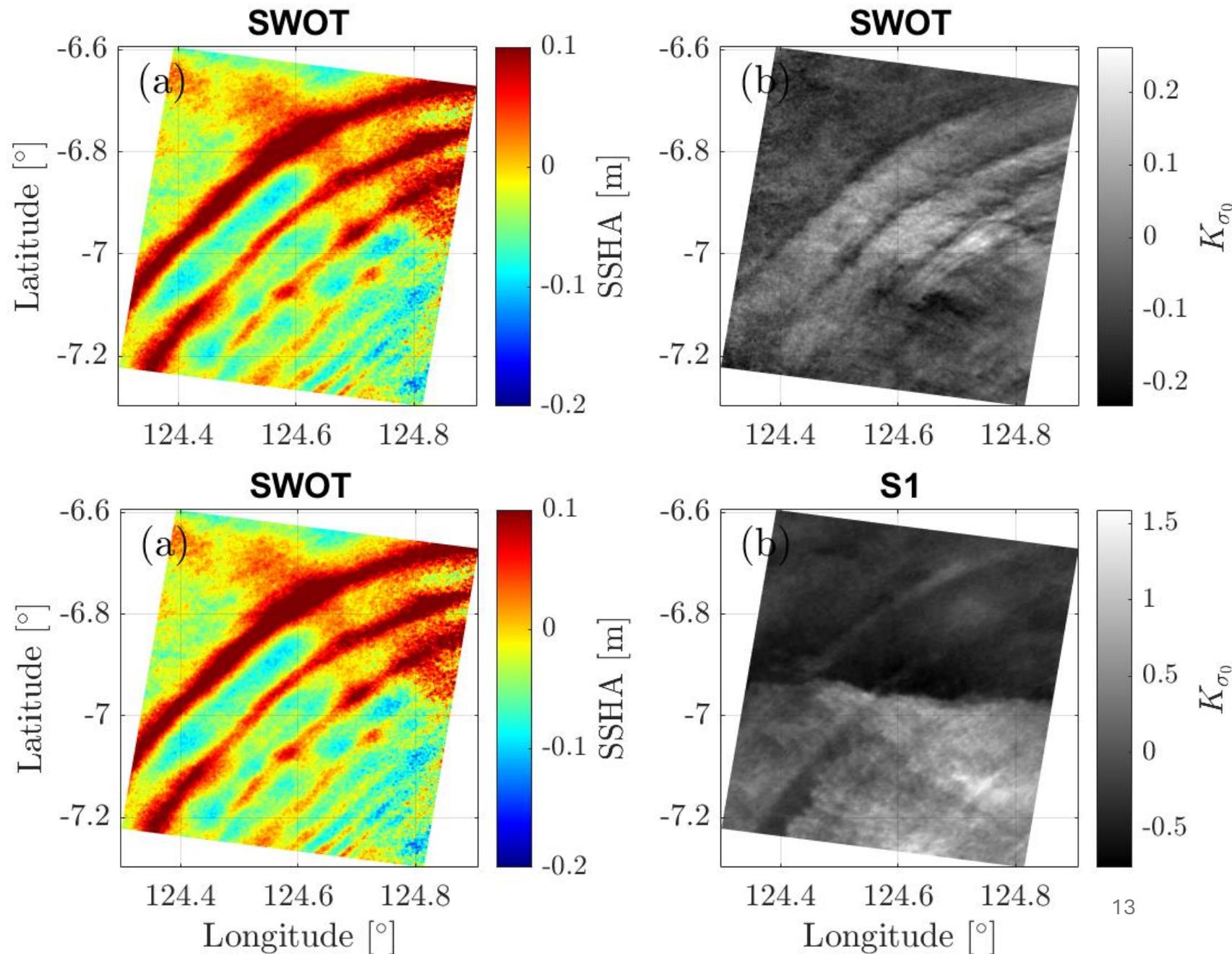
Несмотря на это различие, пространственная конфигурация проявлений ВВ в SWOT и PCA Sentinel-1A изображениях подобна, однако поля их контрастов – инверсны,

**темные/яркие проявлений в SWOT изображениях соответствуют**

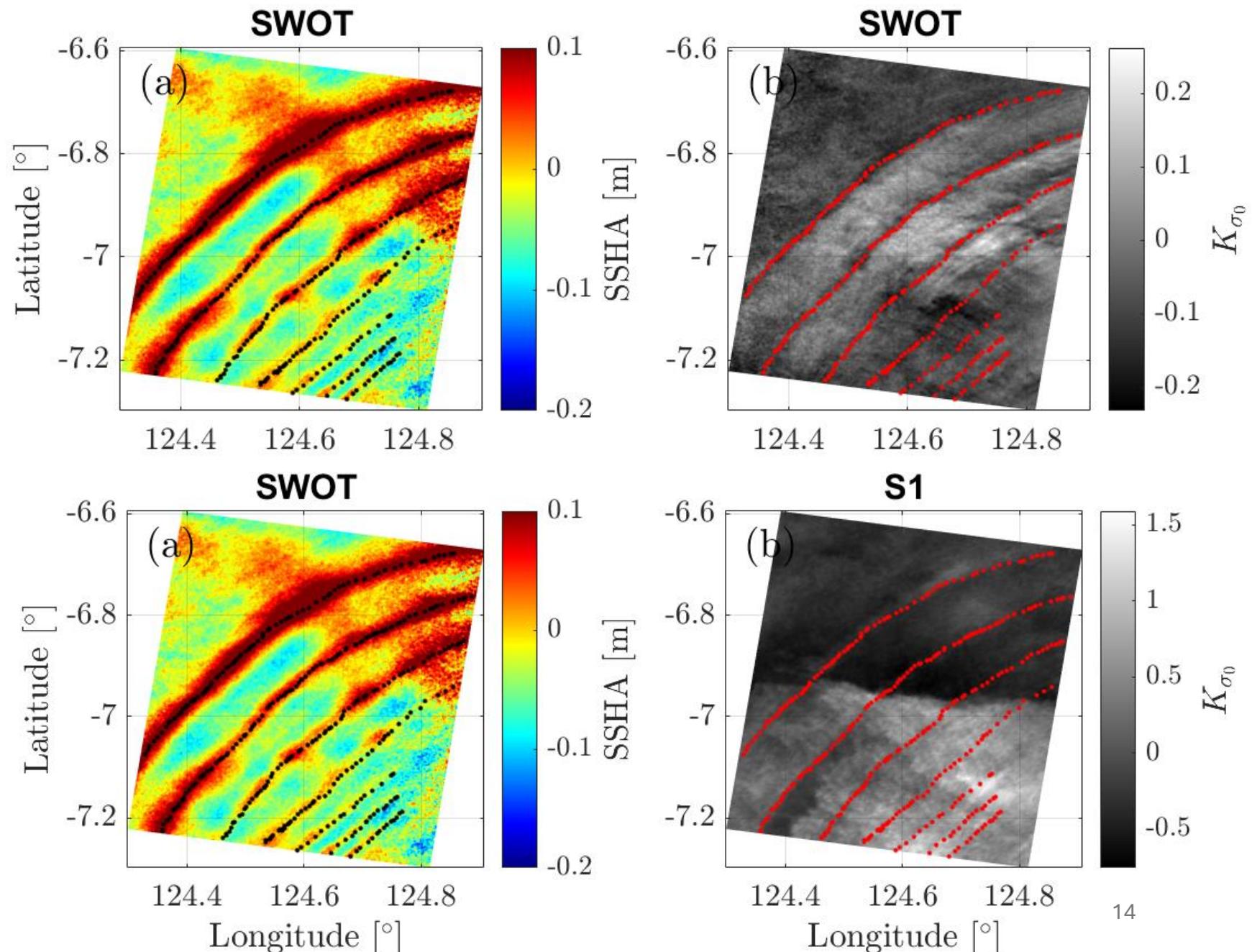
**ярким/темным контрастам в PCA изображениях**



SWOT observations on  
09 May 2023 09:03 UTC



SWOT observations on  
09 May 2023 09:03 UTC



S1A observations on  
09 May 2023 21:20 UTC

$\sigma_0$  contrast from SWOT

Spectrum of  $\sigma_0$  contrast

3-layerd stratification model using temperature and salinity data

SSHA ( $h$ ) from SWOT

$\sigma_0$  contrast from S1A

cross-spectrum, coherence and MTF for SWOT

Wavenumber to  $C$  – IW phase speed using dispersion relation from 3-layer model

Spectrum of  $h$

Spectrum of  $\sigma_0$  contrast

cross-spectrum, coherence and MTF for S1A

$\sigma_0$  contrast by RIM using  $C$ , current field, and wind field from SWOT/ERA5 for radar parameters of SWOT

Surface current field

$$\widehat{u_x} = \frac{g}{c} \widehat{h} \frac{K_x}{|K|},$$

$$\widehat{u_y} = \frac{g}{c} \widehat{h} \frac{K_y}{|K|}$$

$\sigma_0$  contrast by RIM using  $C$ , current field, and wind field from S1A /ERA5 for radar parameters of S1A

# Стратификация и трехслойное приближение

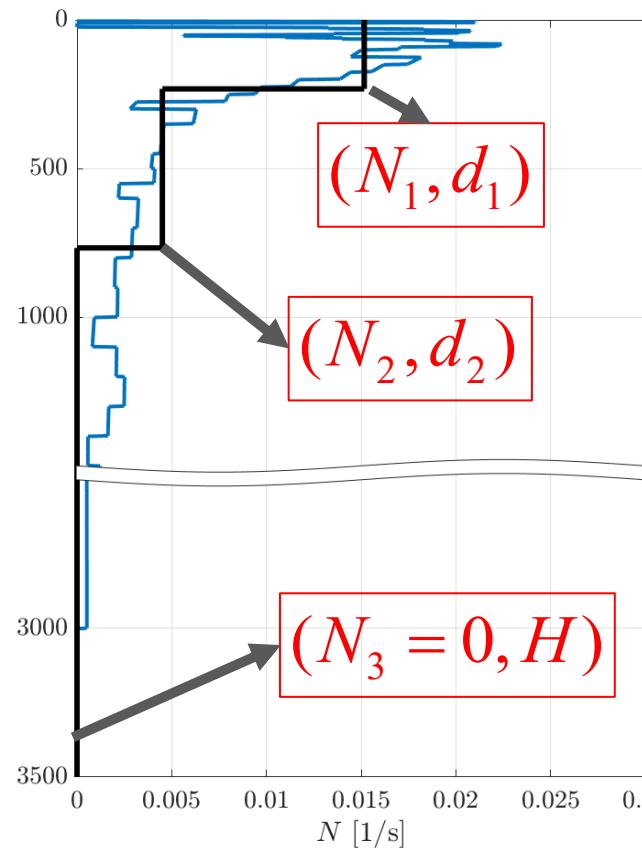
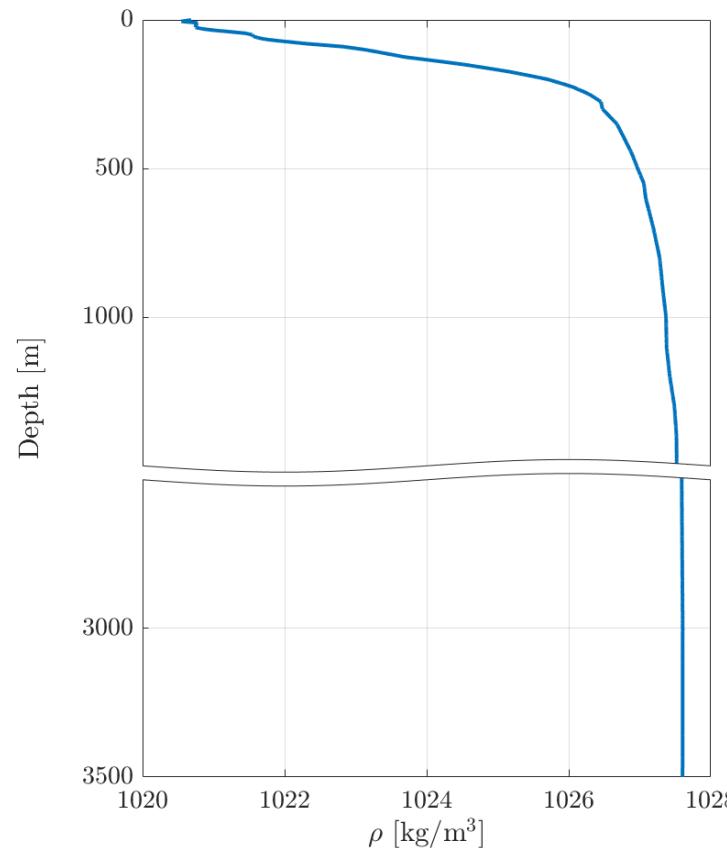
Соленость и температура воды:

Multi Observation Global Ocean 3D Temperature Salinity ...

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

Плотность ( $\rho$ ):

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



Частота  
Вяйсяля-Брента

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

# Дисперсионное соотношение ВВ

Общее решение  $\frac{\partial^2 \hat{W}}{\partial z^2} + K^2 \frac{N^2 - \Omega^2}{\Omega^2} \hat{W} = 0$ ,

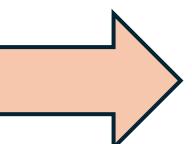
$$\hat{W}_j(z) = A_{1j} \exp\left(iK \frac{\sqrt{N_j^2 - \Omega^2}}{\Omega} z\right) + A_{2j} \exp\left(-iK \frac{\sqrt{N_j^2 - \Omega^2}}{\Omega} z\right)$$

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

$$\begin{cases} \hat{W}_1 = 0, & \text{at } z = 0 \\ \hat{W}_1 = \hat{W}_2 \quad \text{and} \quad \partial \hat{W}_1 / \partial z = \partial \hat{W}_2 / \partial z, & \text{at } z = d_1 \\ \hat{W}_2 = \hat{W}_3 \quad \text{and} \quad \partial \hat{W}_2 / \partial z = \partial \hat{W}_3 / \partial z, & \text{at } z = d_2 \\ \hat{W}_3 = 0, & \text{at } z = H \end{cases}$$

получим систему шести уравнений. Нетривиальное решение этой системы существует, когда детерминант системы равен нулю, что дает дисперсионное соотношение для  $n$ -й моды ВВ:

$$\begin{aligned} \sin(K\mu_1 d_1 + \varphi_3) &= 0, \\ \sin(K\mu_1 d_1 + \varphi_4) &= 0, \end{aligned}$$



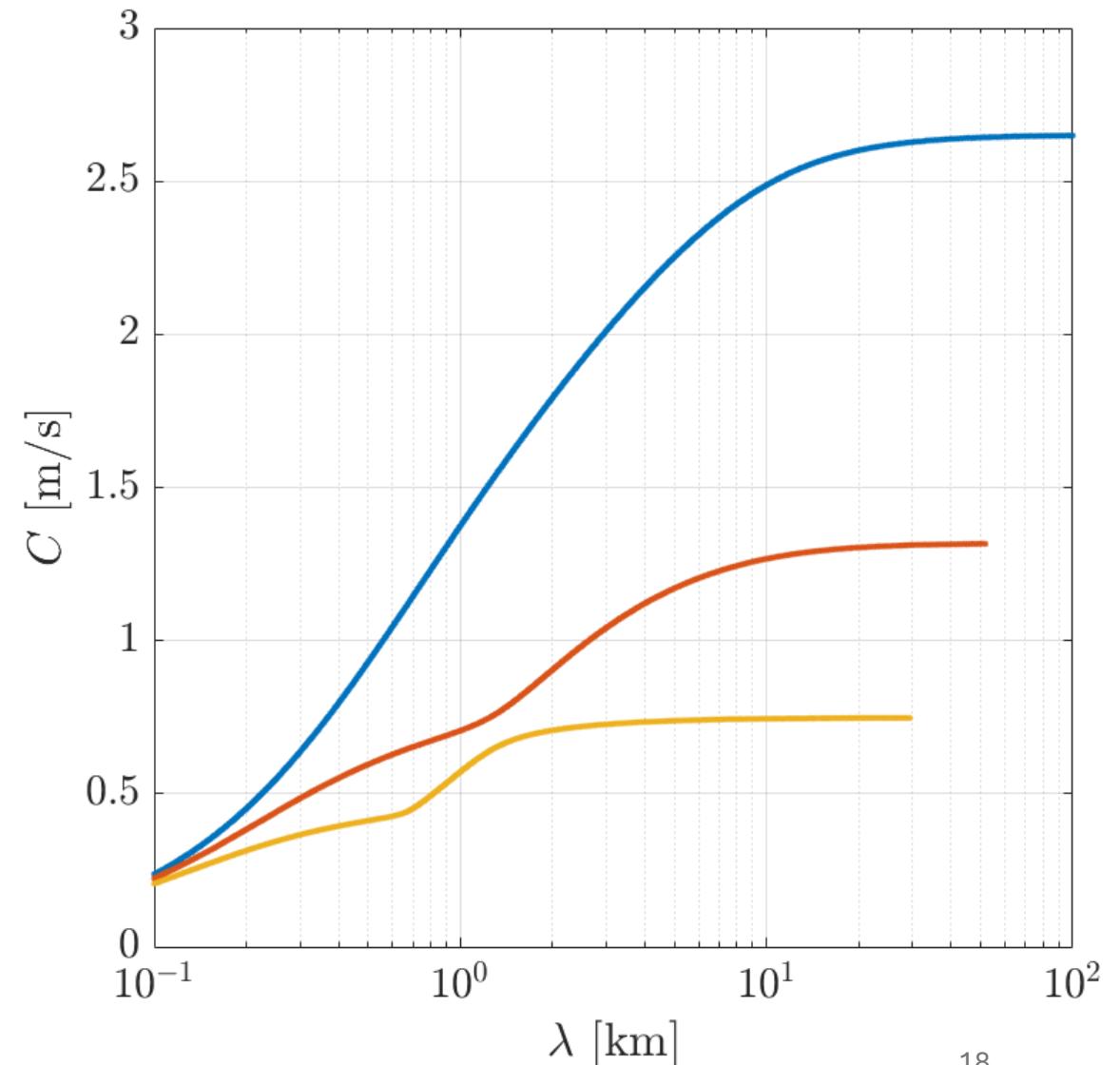
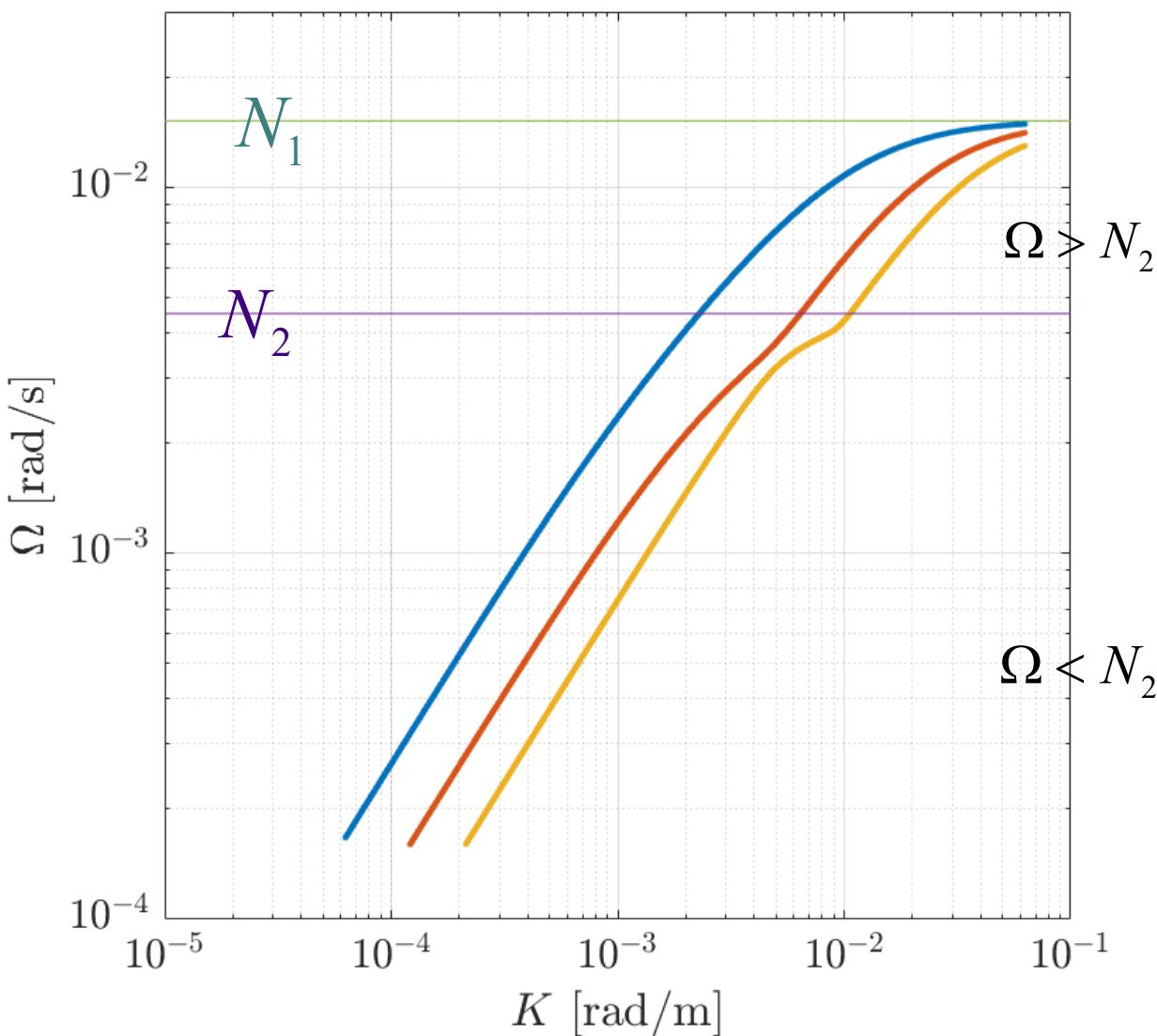
$$\begin{aligned} K\mu_1 d_1 + \varphi_3 &= n\pi, & \text{if } \Omega^2 \geq N_2^2, \\ K\mu_1 d_1 + \varphi_4 &= n\pi, & \text{if } \Omega^2 < N_2^2. \end{aligned}$$

где,

$$\begin{aligned} \tan \varphi_3 &= (\mu_1 / \mu_{22}) \tanh [K\mu_{22}(d_2 - d_1) + \varphi], \\ \tan \varphi_4 &= (\mu_1 / \mu_{21}) \tan [K\mu_{21}(d_2 - d_1) + \varphi], \\ \begin{cases} \tanh \varphi = \mu_{22} \tanh [K(H - d_2)], & \text{if } \Omega^2 \geq N_2^2, \\ \tan \varphi = \mu_{21} \tanh [K(H - d_2)], & \text{if } \Omega^2 < N_2^2. \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_1^2 &= (N_1^2 - \Omega^2) / \Omega^2 \\ \mu_{21}^2 &= (N_2^2 - \Omega^2) / \Omega^2 \\ \mu_{22}^2 &= (\Omega^2 - N_2^2) / \Omega^2 \end{aligned}$$

# Дисперсионное соотношение ВВ

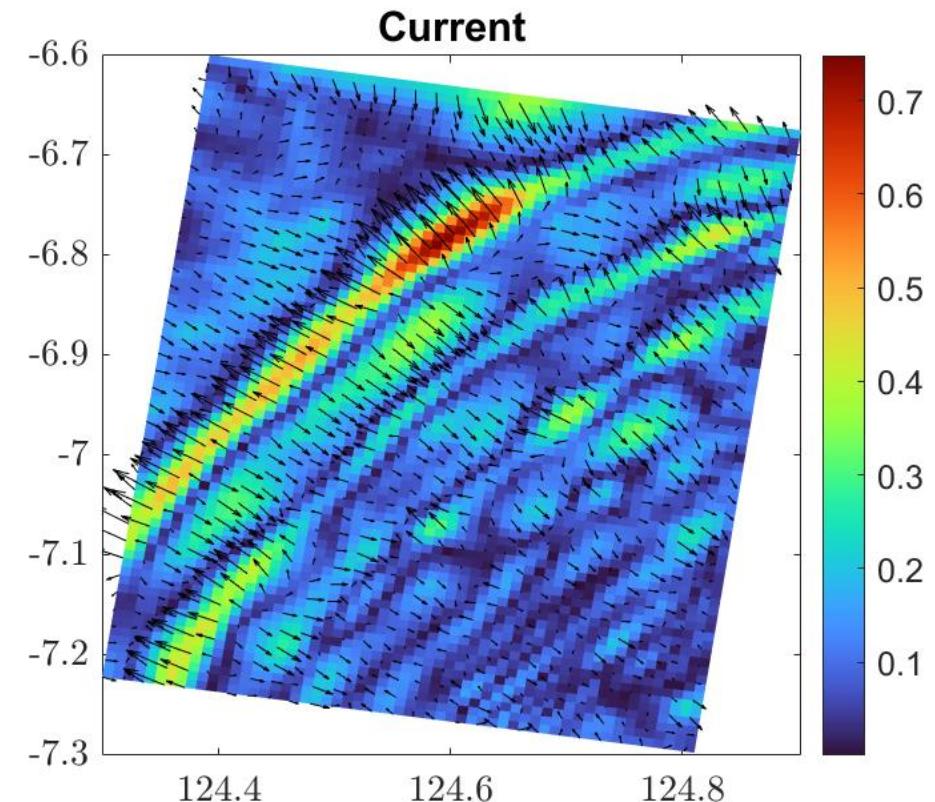
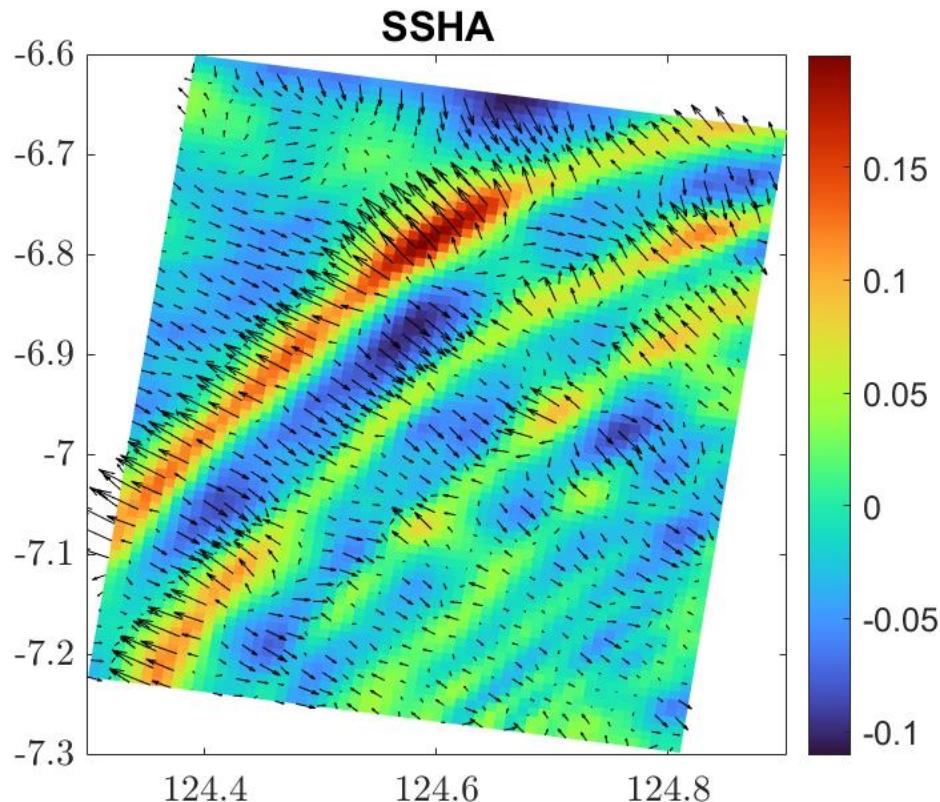


# Поверхностное течение индуцированное ВВ

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = g \frac{\partial h}{\partial x},$$
$$\frac{\partial u_y}{\partial t} = g \frac{\partial h}{\partial y},$$

$$h(\mathbf{x}, t) = \hat{h} e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{x} - \Omega t)},$$
$$u(\mathbf{x}, t) = \hat{u} e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{x} - \Omega t)},$$

$$\widehat{u}_x = \frac{g}{C} \hat{h} \frac{K_x}{|K|},$$
$$\widehat{u}_y = \frac{g}{C} \hat{h} \frac{K_y}{|K|}.$$



# Когерентность, фазовая сдвиг и МПФ (SSHA и УЭПР SWOT)

$S_D$  — Спектр  $u_s/C$

$S_h$  — Спектр  $h$

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

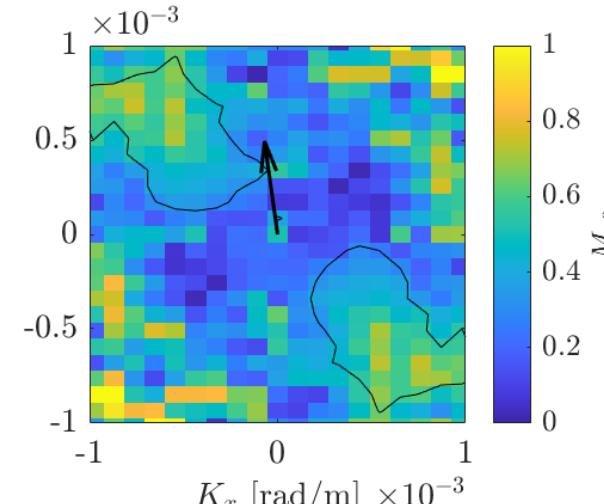
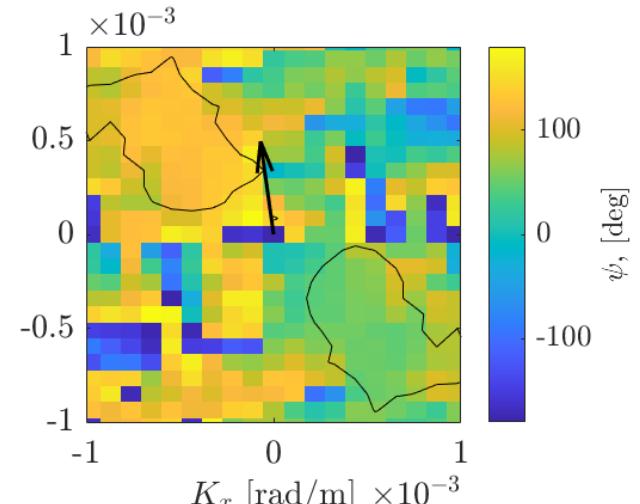
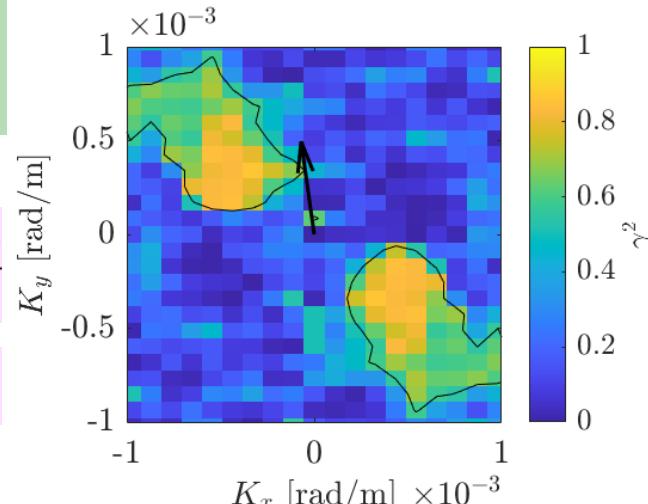
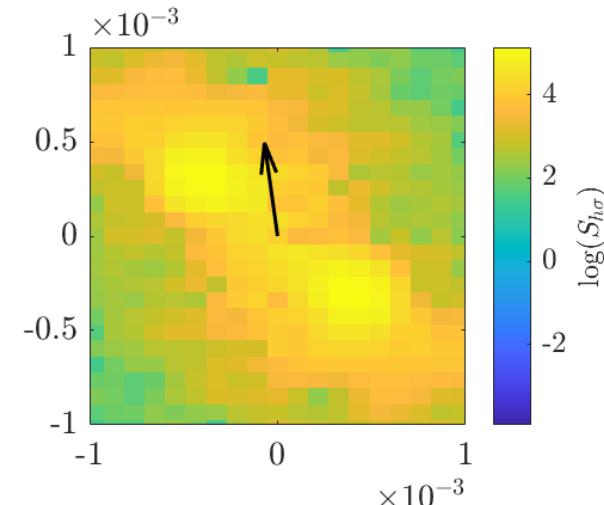
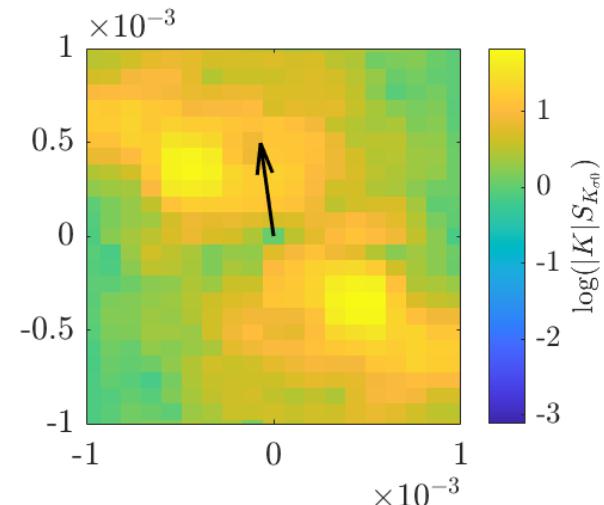
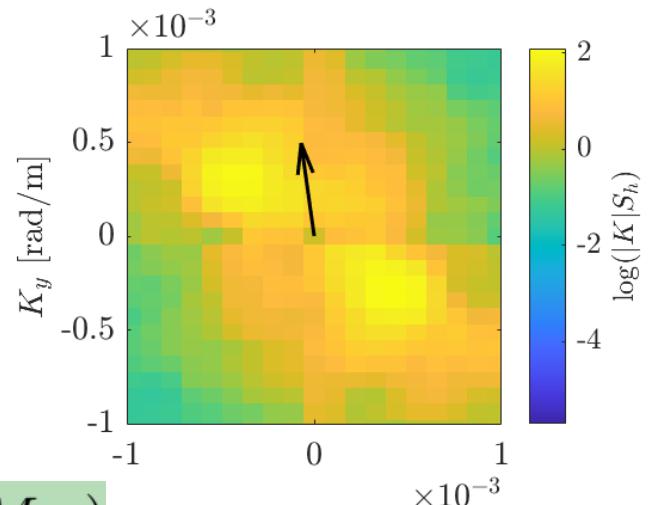
$$\gamma^2 = \frac{|S_{D\sigma}|^2}{S_D S_\sigma} = \frac{|S_{h\sigma}|^2}{S_h S_\sigma}$$

$$\tan(\psi) = \text{Im}(M_{\sigma 0})/\text{Re}(M_{\sigma 0})$$

$\psi$  — фазовый сдвиг между  $\hat{K}_{\sigma 0}(K)$  и  $\hat{D}(K)$

$$M_{\sigma 0}(K) = \frac{S_{D\sigma}}{S_D} = -i \frac{C^2}{g} \frac{S_{h\sigma}}{S_h}$$

$M_{\sigma 0}(K)$  — величина МПФ



стрелки направлены на север

Контуры показывают область, где когерентность больше 0,55

# Когерентность, фазовая сдвиг и МПФ (SSHA SWOT и УЭПР S1A)

$S_D$  — Спектр  $u_s/C$   
 $S_h$  — Спектр  $h$   
 $S_{\sigma}$  — Спектр  $K_{\sigma 0}$   
 $\gamma^2$  — Когерентность

$$\gamma^2 = \frac{|S_{D\sigma}|^2}{S_D S_\sigma} = \frac{|S_{h\sigma}|^2}{S_h S_\sigma}$$

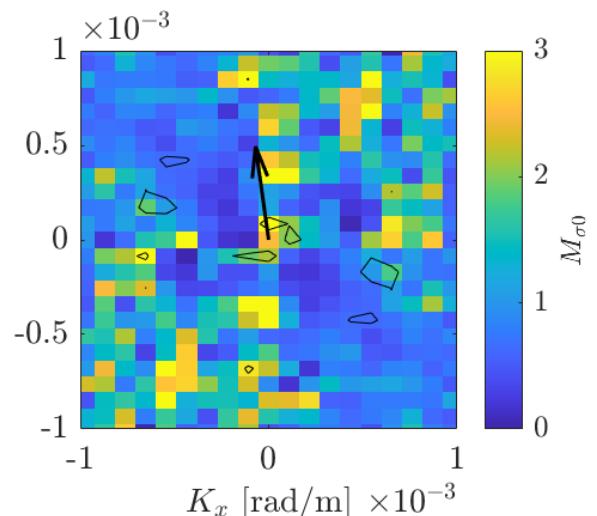
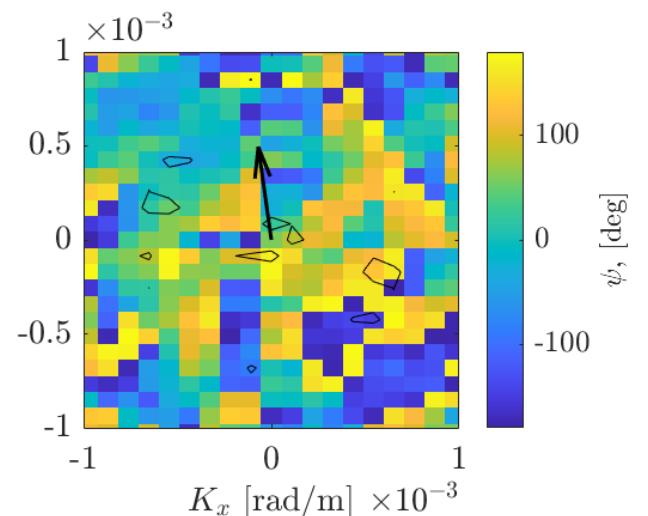
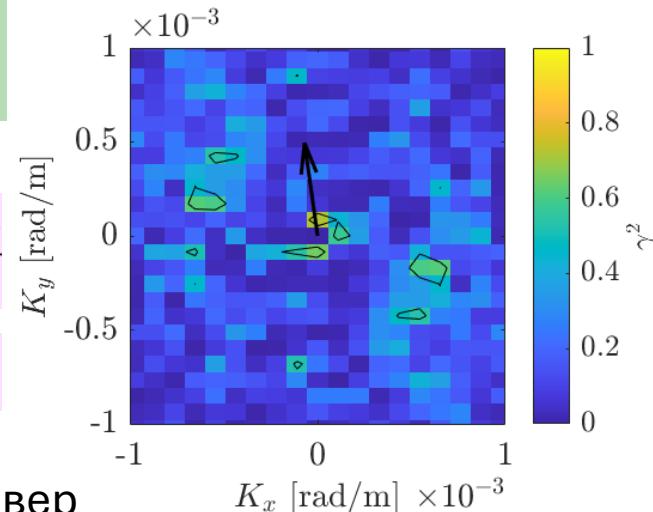
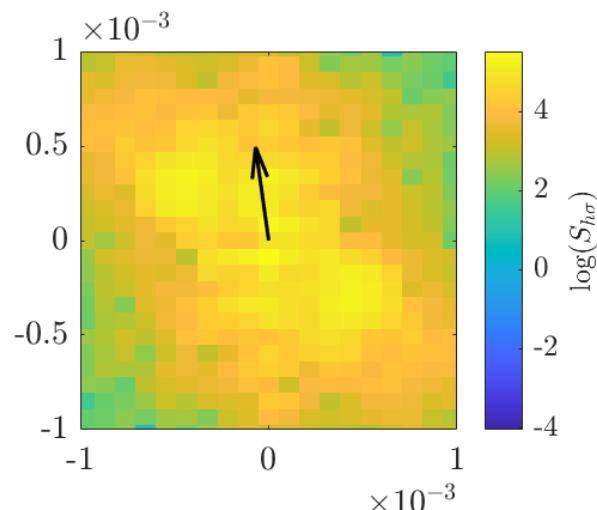
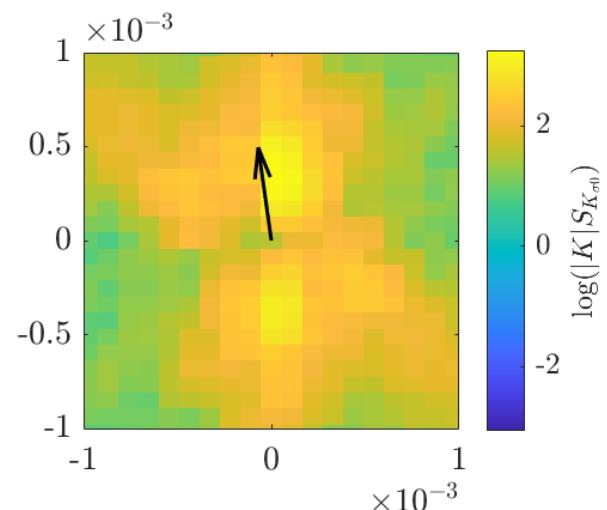
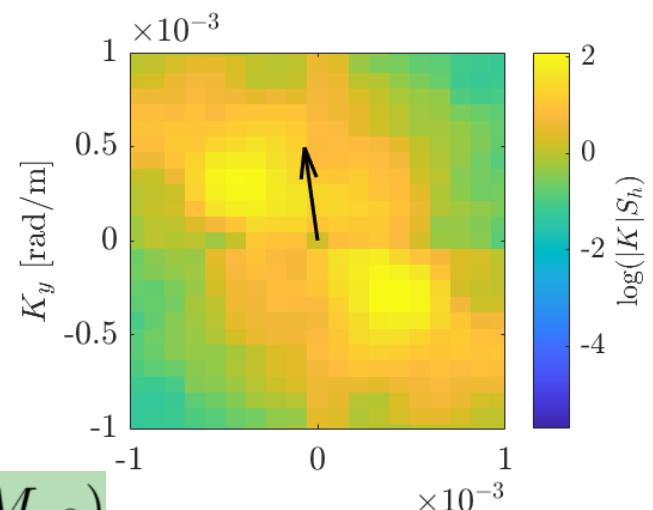
$$\tan(\psi) = \text{Im}(M_{\sigma 0})/\text{Re}(M_{\sigma 0})$$

$\psi$  — фазовый сдвиг между  
 $\hat{K}_{\sigma 0}(K)$  и  $\hat{D}(K)$

$$M_{\sigma 0}(K) = \frac{S_{D\sigma}}{S_D} = -i \frac{C^2}{g} \frac{S_{h\sigma}}{S_h}$$

$M_{\sigma 0}(K)$  — величина МПФ

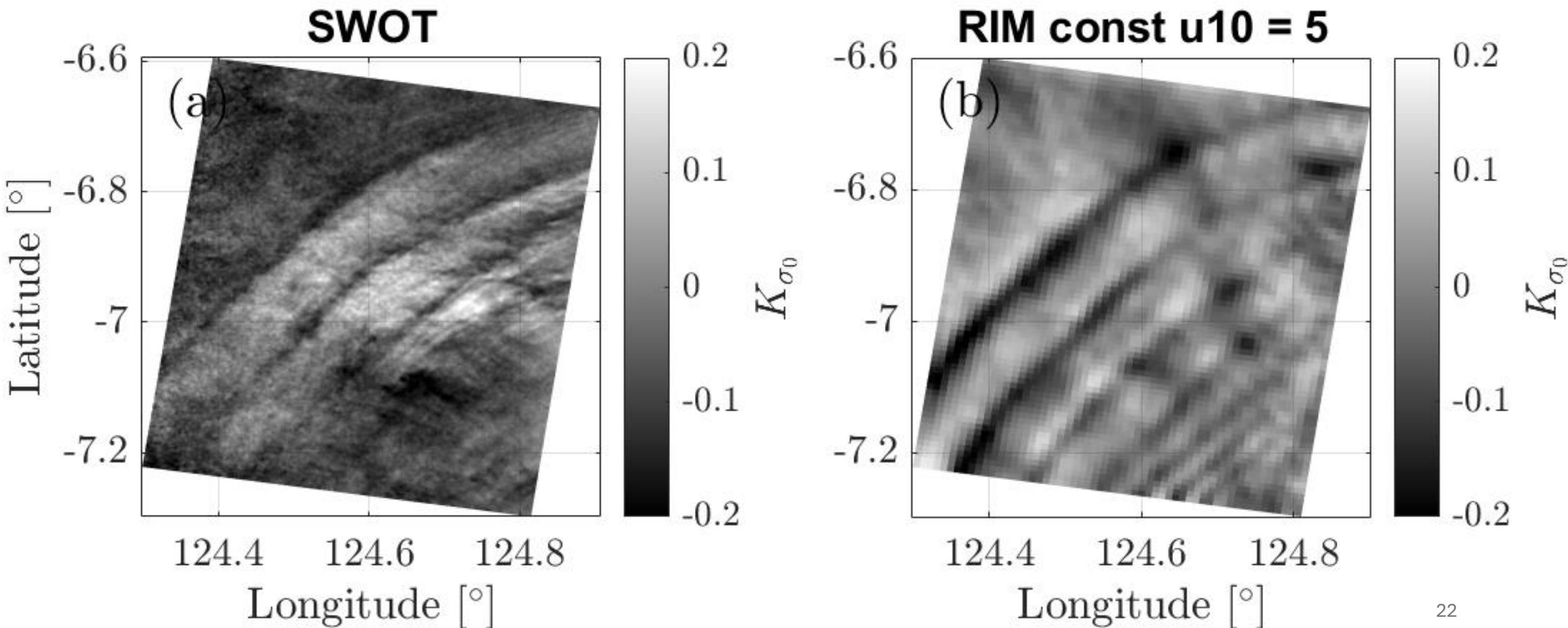
стрелки направлены на север



Контуры показывают область, где когерентность больше 0,55

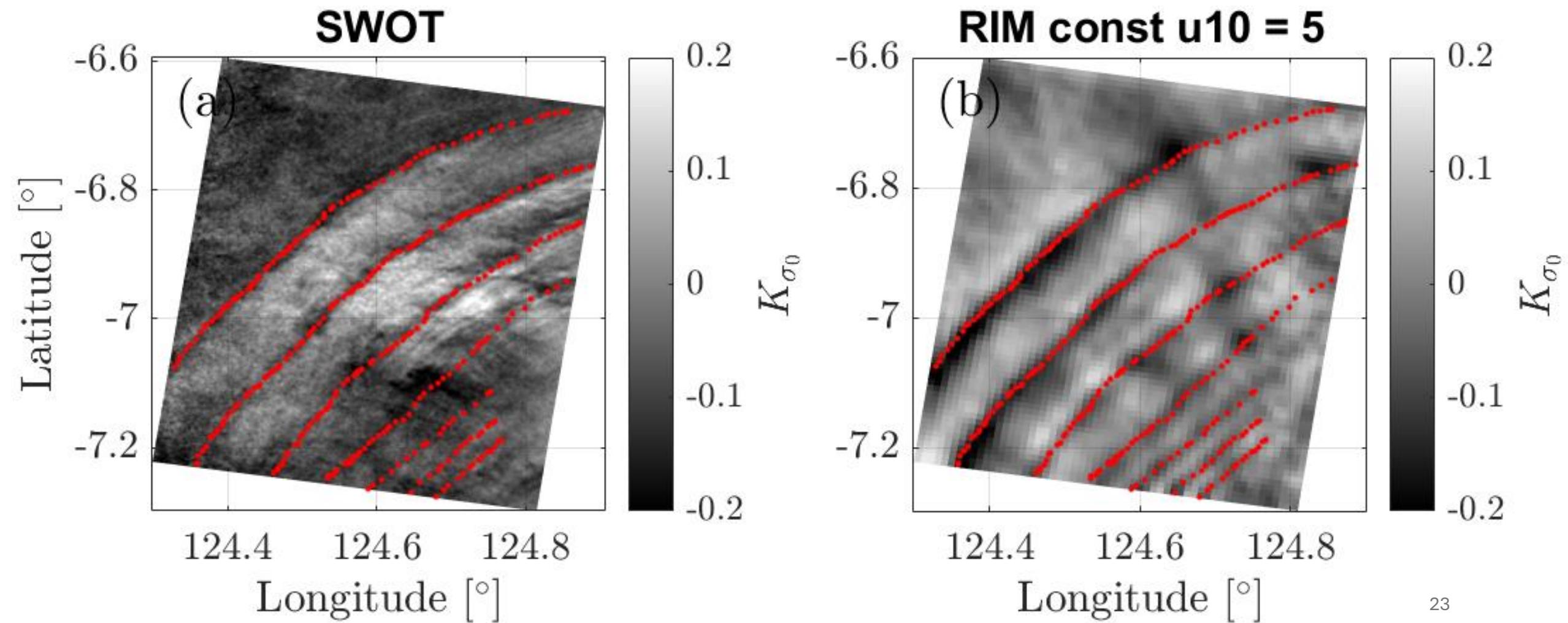
# Результаты

Применение RIM при угла падения  $2^\circ$  (для SWOT) и постоянной скорости ветра для оценки влияния поверхностного течения, полученного из измеренного SSHA SWOT



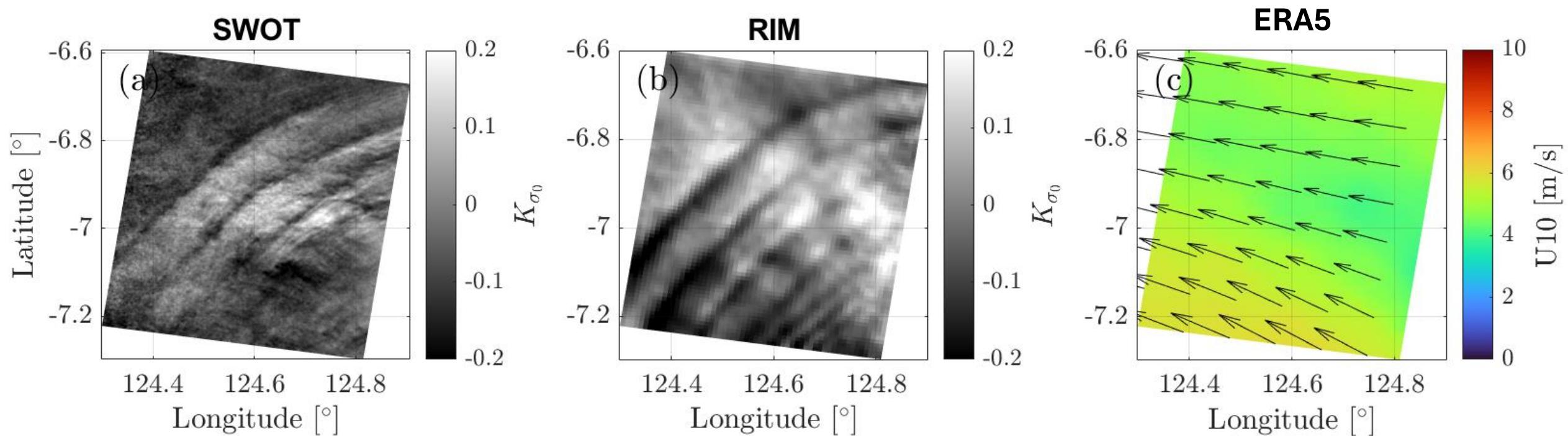
## Результаты

Применение RIM при угла падения  $2^\circ$  (для SWOT) и постоянной скорости ветра для оценки влияния поверхностного течения, полученного из измеренного SSHA SWOT



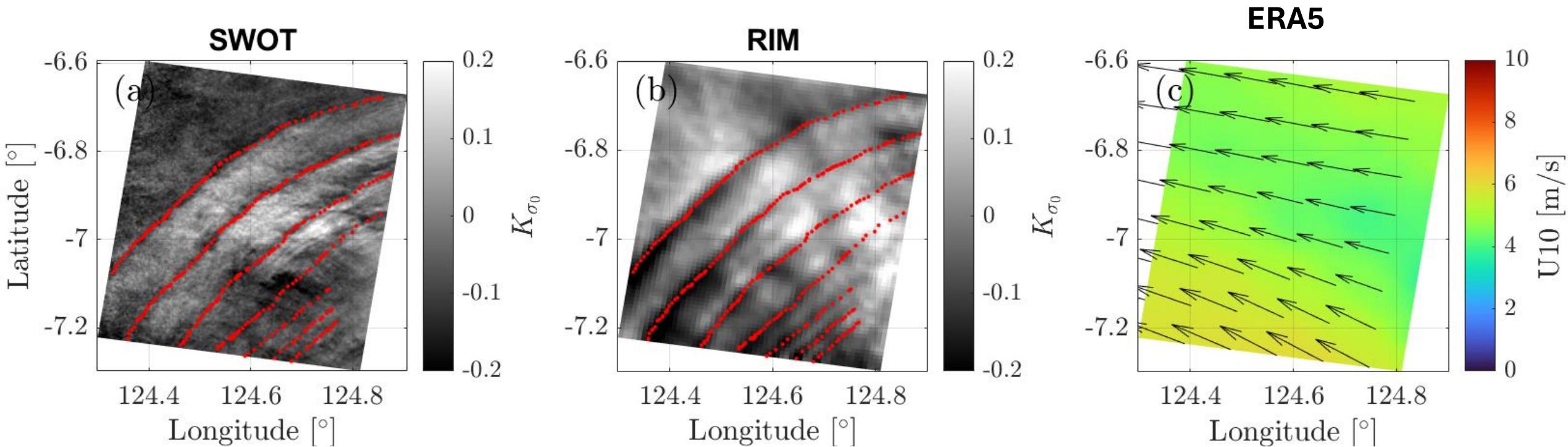
# Результаты

Применение RIM для SWOT с полем ветра ERA5, показанным на рис. (c),  
поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, и  
для углов падения и длины волны радара SWOT



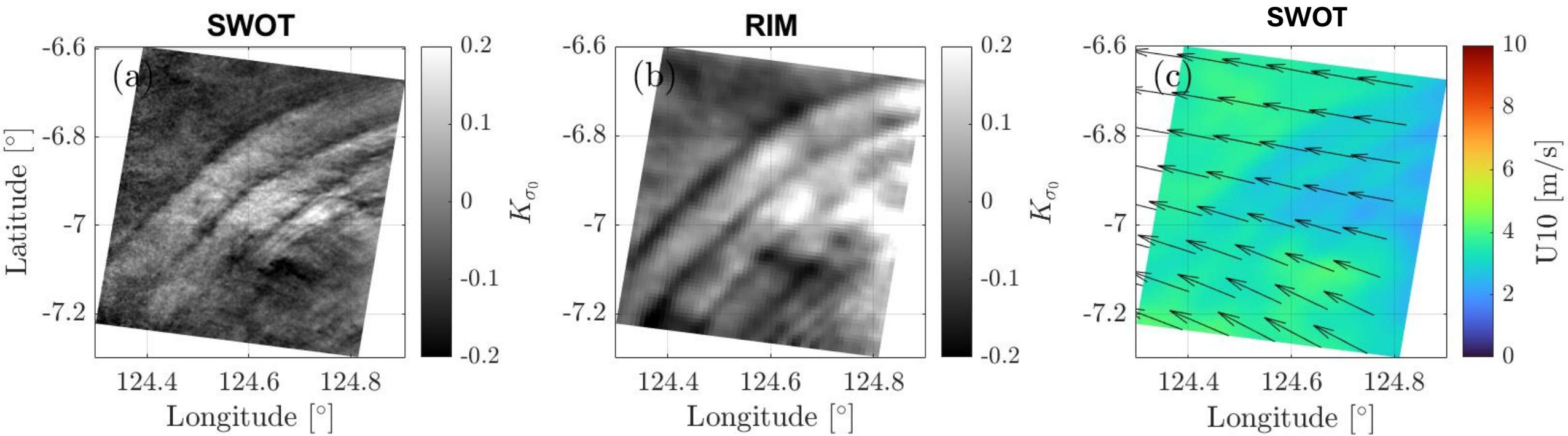
# Результаты

Применение RIM для SWOT с полем ветра ERA5, показанным на рис. (c),  
поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, и  
для углов падения и длины волны радара SWOT



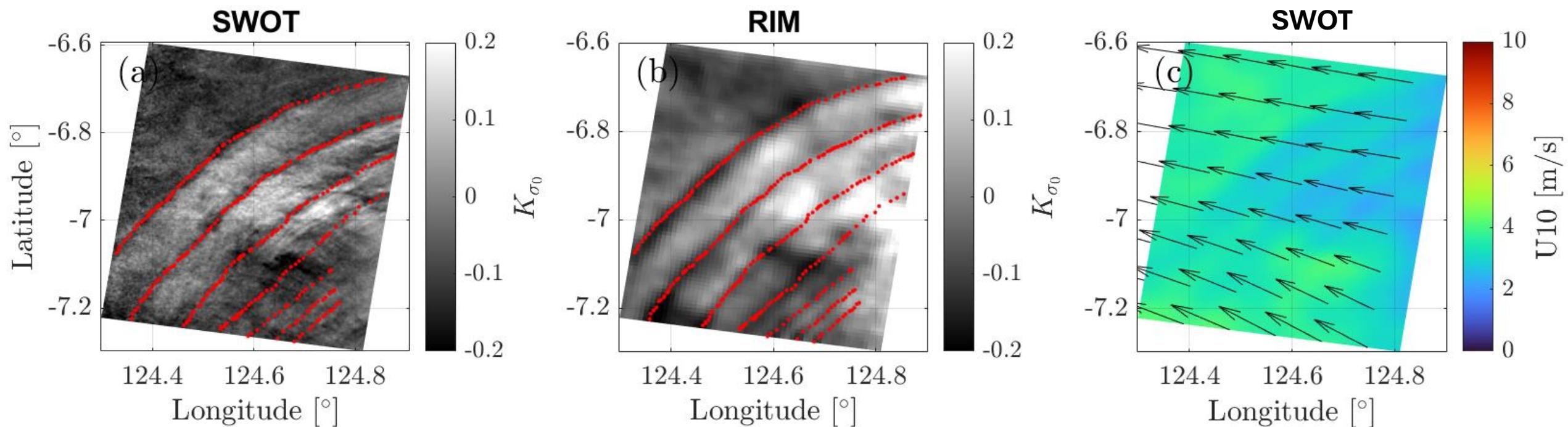
# Результаты

Применение RIM для SWOT с полем ветра SWOT, показанным на рис. (c), поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, и для углов падения и длины волны радара SWOT



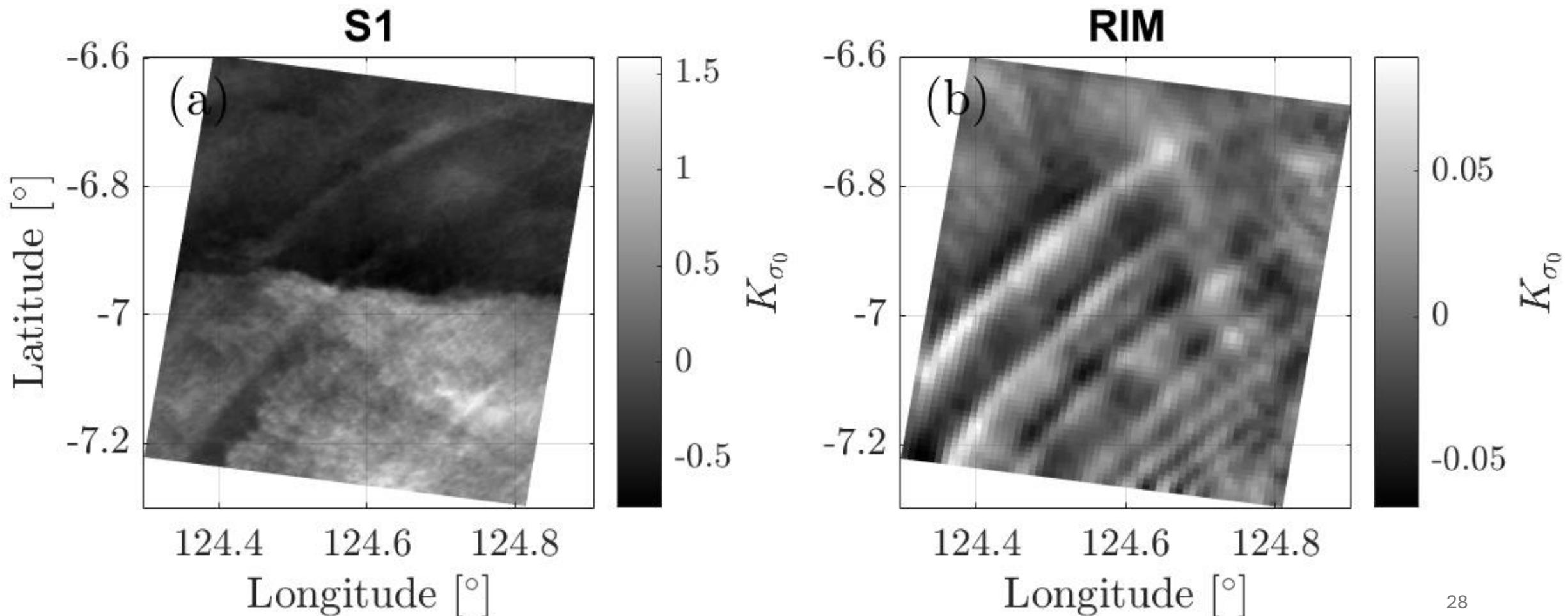
# Результаты

Применение RIM для SWOT с полем ветра SWOT, показанным на рис. (c), поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, и для углов падения и длины волны радара SWOT



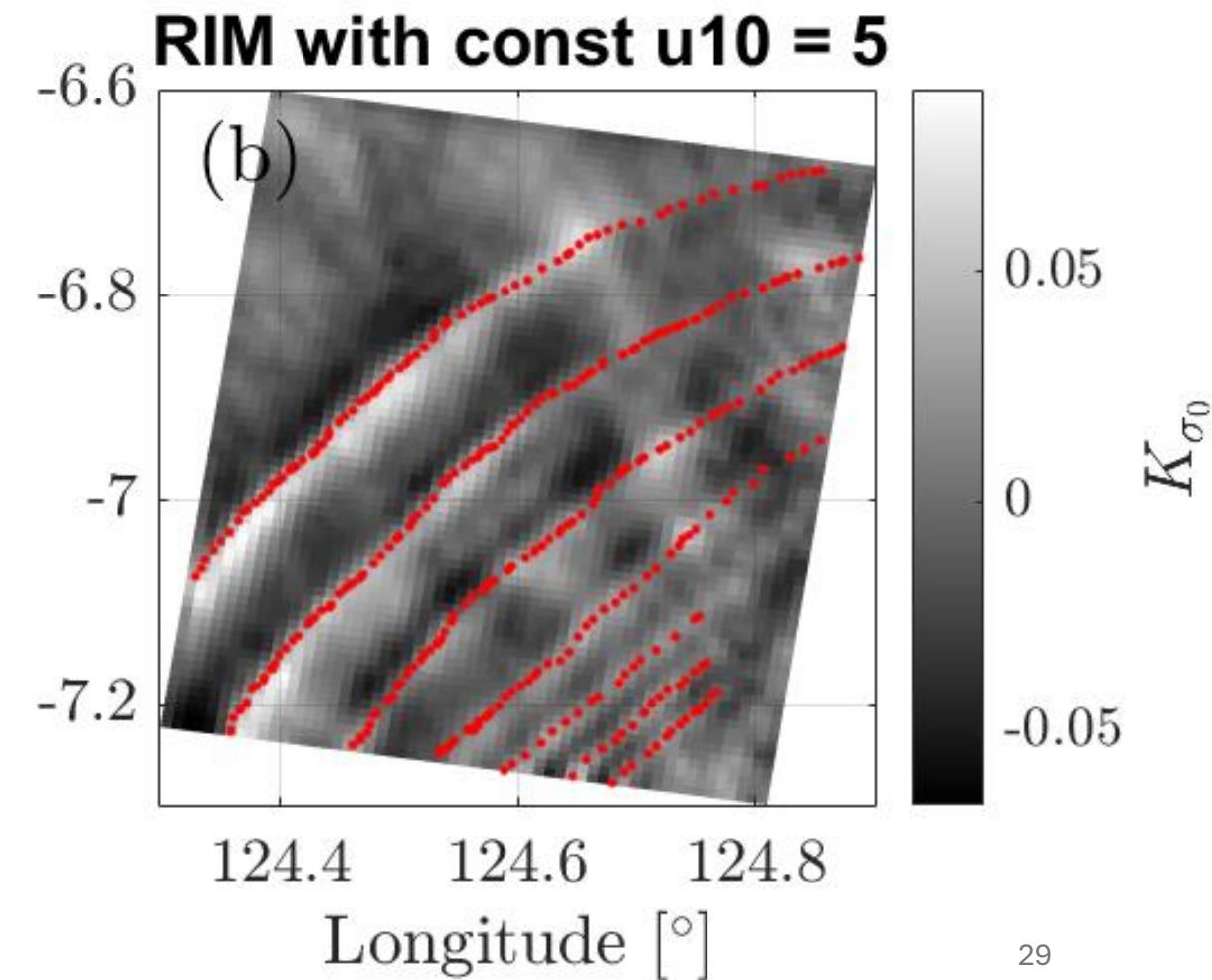
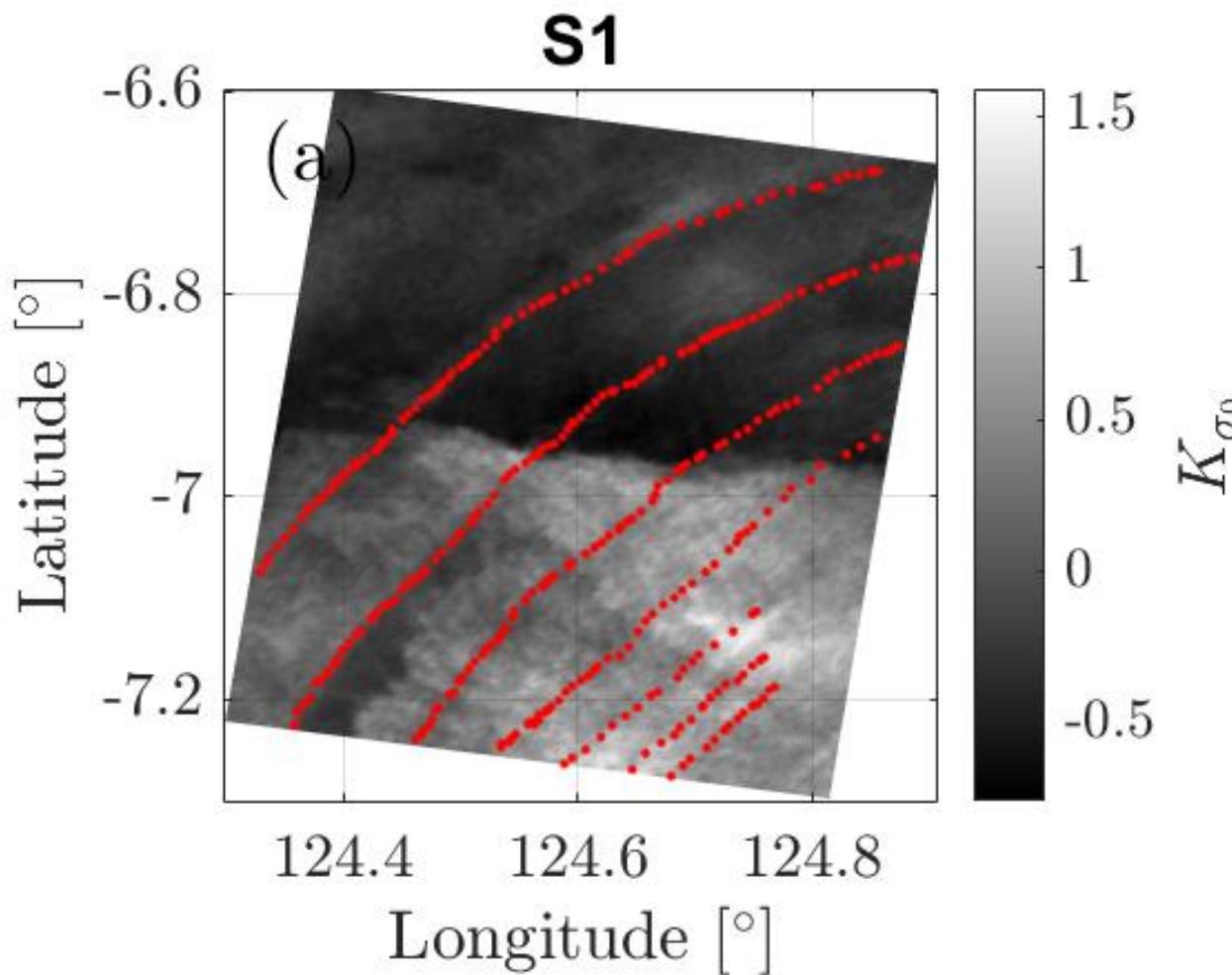
# Результаты

Применение RIM для PCA S1A при угле падения  $45^\circ$  и постоянной скорости ветра для оценки влияния поверхностного течения, полученного из измеренного SSHA SWOT



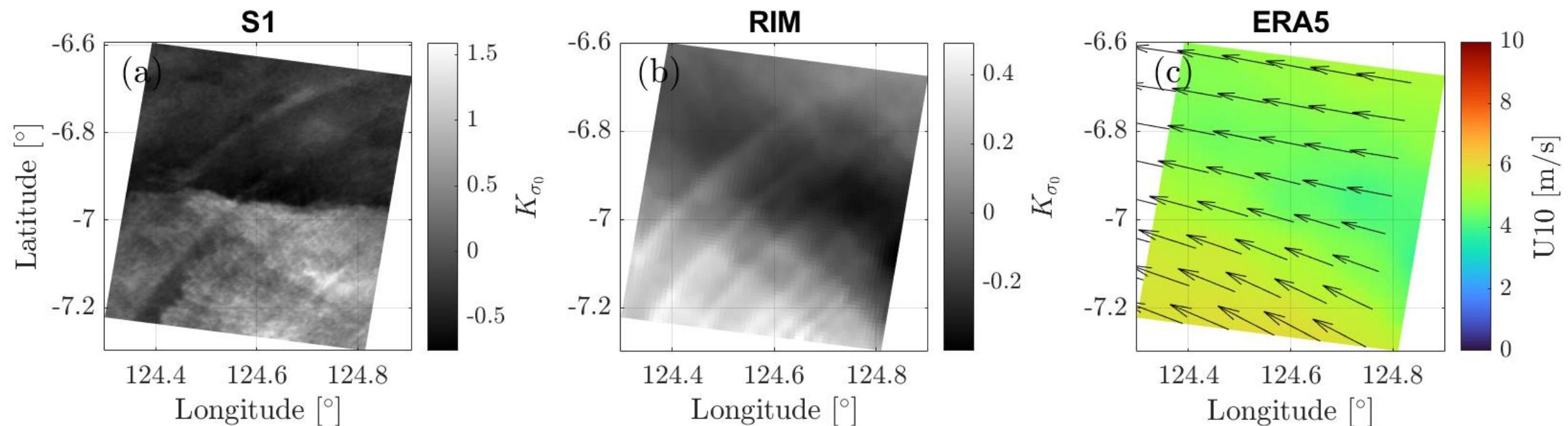
# Результаты

Применение RIM для PCA S1A при угле падения  $45^\circ$  и **постоянной скорости ветра** для оценки влияния поверхностного течения, полученного из измеренного SSHA SWOT



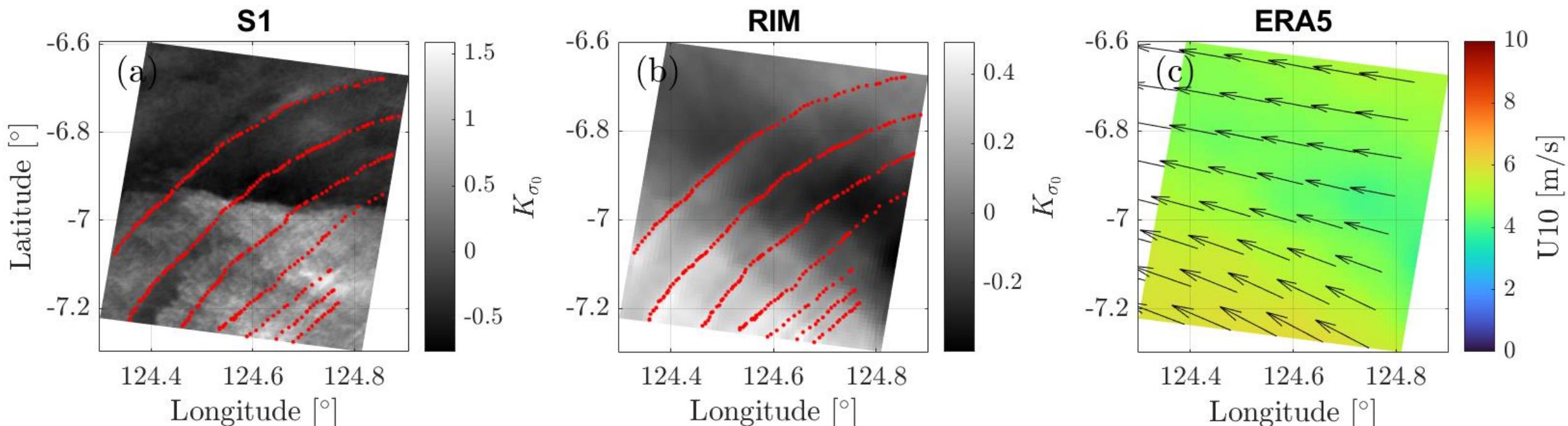
# Результаты

Применение RIM для PCA S1A с полем ветра ERA5, показанным на рис. (c), поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, с учетом углов падения и длины волны радара S1A



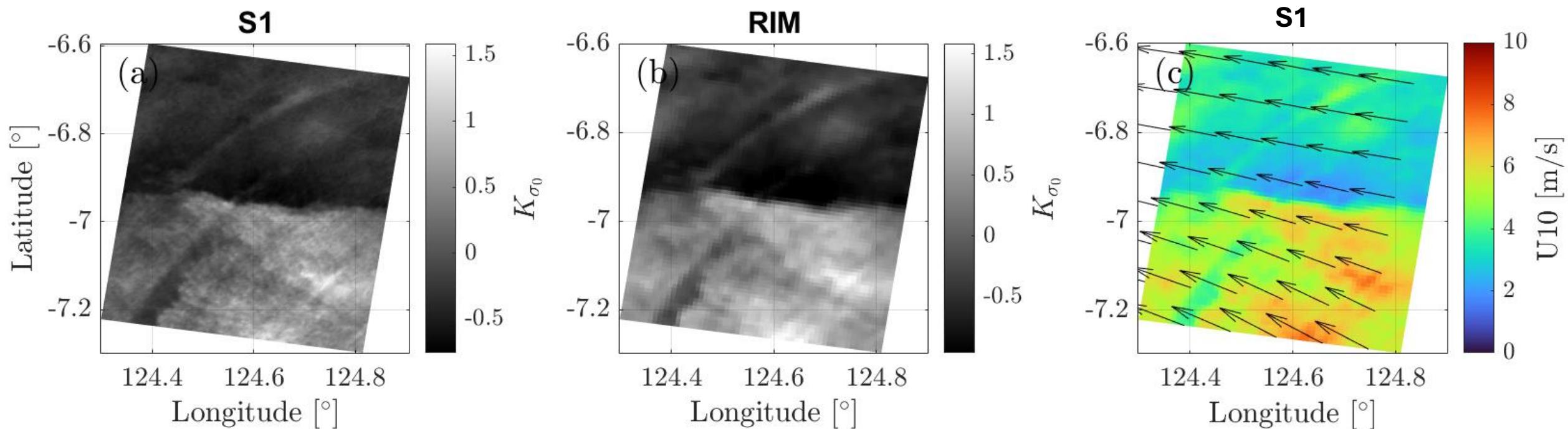
# Результаты

Применение RIM для PCA S1A с полем ветра ERA5, показанным на рис. (c), поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, с учетом углов падения и длины волны радара S1A



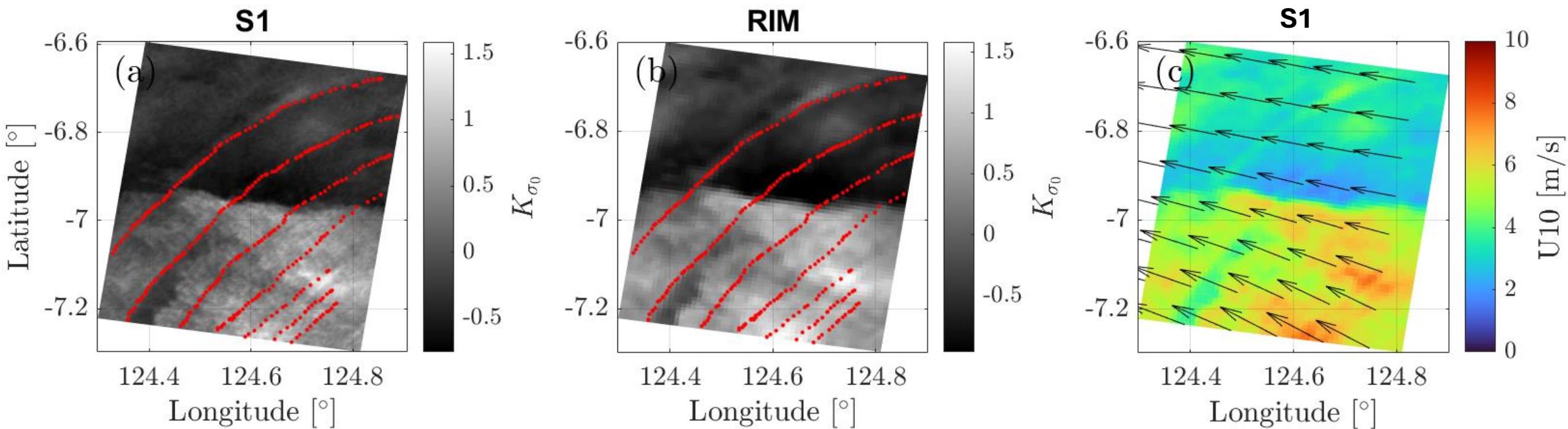
# Результаты

Применение RIM для PCA S1A с полем ветра S1A, показанным на рис. (c), поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, с учетом углов падения и длины волны радара S1A



# Результаты

Применение RIM для PCA S1A с полем ветра S1A, показанным на рис. (c), поверхностным течением, извлеченным из измеренного SSHA SWOT, и с учетом углов падения и длины волны радара S1A



## **Выводы**

- Совместный анализ данных SWOT, Sentinel-1A и модели RIM позволяет комплексно описать механизмы формирования радиолокационных проявлений внутренних волн.
- Показано, что SSHА и УЭПР, наблюдаемые SWOT, имеют хорошую когерентность ( $\gamma^2 > 0,6$ ) с фазовым сдвигом около 90 градусов (зоны конвергенции).
- Получено качественное и количественное согласие между наблюдениями и результатами моделирования.
- Подтверждена возможность использования поверхностных течений, вызванных ВВ, рассчитанных по SSHА (SWOT), для воспроизведения контрастов УЭПР для S1A PCA.
- Показано, что использование ветрового поля по данным SWOT/Sentinel-1A в качестве входного параметра модели RIM, вместо постоянной скорости ветра или данных реанализа (ERA5), обеспечивает результаты по УЭПР, более близкие к наблюдениям
- Результаты подтверждают надежность модели RIM и ее дальнейшее применение для анализа динамики ВВ по изображениям PCA.

Спасибо за  
внимание