



# Классификация различных морских поверхностных пленок и новообразованного

# льда с использованием соосно-поляризованных данных PCA Radarsat-2 и TerraSAR-X



Ивонин Д.В., Иванов А.Ю., Кожелупова Н.Г.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[ivonin@ocean.ru](mailto:ivonin@ocean.ru)

# Содержание

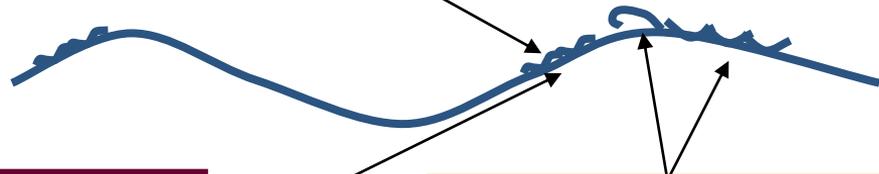
- УЭПР модель + поляризационный метод
- **распознавание различных типов пленок**  
(минеральное масло, естественные выходы нефти, биогенные пленки, растительное масло = проху для мономолекулярных пленок)
- TerraSAR-X + Radarsat-2 поляризационная диаграмма
- **распознавание начальных форм льда (TerraSAR-X, Radarsat-2)**  
(ледяное сало, нилас)



Резонансное рассеяние от ряби  $\sigma_B$

Нерезонансное рассеяние от уклонов длинных волн

Нерезонансное рассеяние от обрушений



УЭПР модель \*)

\*) Kudryavtsev et al. (2003) J. Geophys. Res., 108 (C3)

$$\sigma^V = \sigma_{sp}^{KA} + \sigma_B + \sigma_{wb}$$

$$\sigma^H = \sigma_{sp}^{KA} + P_B \sigma_B + \sigma_{wb}$$

Bragg (resonant) ripple ~3-6 cm



Sharp rough surface, breaking, microbreaking



## (капиллярно-гравитационная рябь)

Резонансное береговое рассеяние (two-scale)  $\approx$  SSA, WCA

$$\sigma_B^V = 16\pi |G_V(\theta)|^2 \left[ 1 + g_{V,\parallel} \zeta_{\parallel}^2 + g_{V,\perp} \zeta_{\perp}^2 \right] B(\bar{U}_{wind}, k_b)$$

$$\sigma_B^H = 16\pi |G_H(\theta)|^2 \left[ 1 + g_{H,\parallel} \zeta_{\parallel}^2 + g_{H,\perp} \zeta_{\perp}^2 \right] B(\bar{U}_{wind}, k_b)$$

$$k_b = 2k_r \sin \theta$$

$$B(\bar{U}_{wind}, k_b) = k_b^4 \cdot F_r(\bar{U}_{wind}, k_b)$$

## Нерезонансное рассеяние от обрушений

$$\sigma_{wb} = q \cdot \sigma_{0wb}(\theta) \quad s_{wb}^2 = 0.19$$

$$\sigma_{0wb}(\theta) = \left( \sec^4 \theta / s_{wb}^2 \right) \exp\left( -\tan^2 \theta / s_{wb}^2 \right) + \varepsilon_{wb} / s_{wb}^2$$

(обрушения)

$$q = c_q \int_{\varphi} \int_{k < k_{nb}} \frac{1}{2} k^{-2} \left( \frac{B(\mathbf{k})}{\alpha} \right)^{n_g + 1} d\mathbf{k} \sim u_*^{2+m_g}$$

# Эксперименты 2011-2012

Северное море (59°59'N, 2°27'E)

Norwegian Clean Seas Association for Operating Companies (NOFO).



Фотография с самолета слика сырой нефти

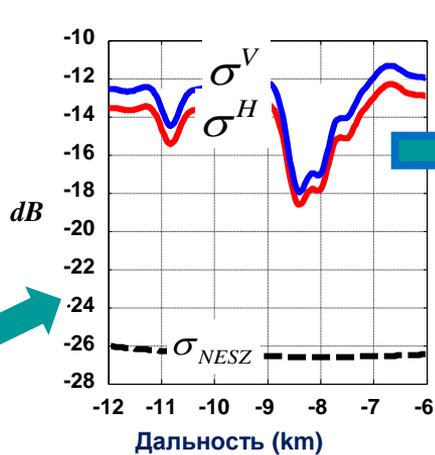
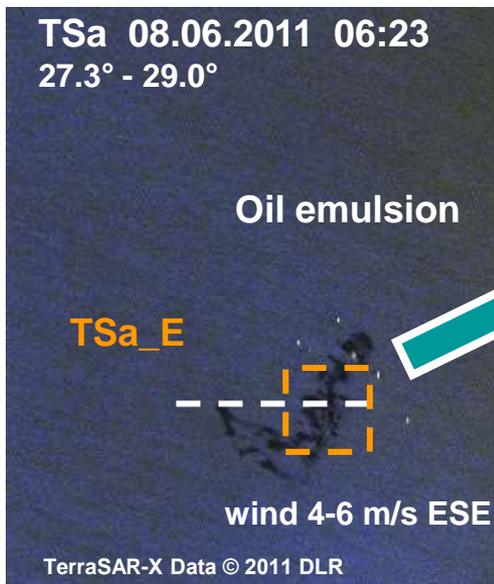
## Экспериментальные разливы:

- 1) сырая нефть (crude oil)
- 2) эмульсия 40-60% (emulsion)
- 3) растительное масло (plant oil)

(Radiagreen EBO plant oil)

# Пример обработки РЛИ TerraSAR-X

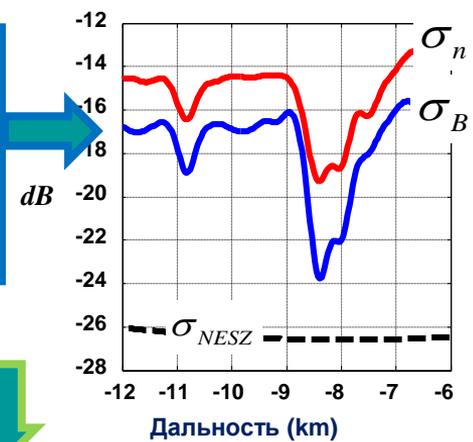
NOFO 2011 oil-spill exercise



**Шаг 1**

$$\sigma_B \approx \frac{\sigma^V - \sigma^H}{1 - P_{0B}(\theta)}$$

$$\sigma_n \approx \frac{\sigma^H - P_{0B}\sigma^V}{1 - P_{0B}(\theta)}$$



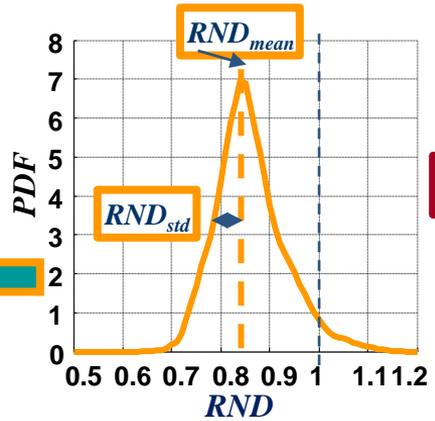
**Шаг 2**

$$\bar{\sigma}_B = \frac{\sigma_{B,slick}}{\sigma_{B,water}}$$

$$\bar{\sigma}_n = \frac{\sigma_{n,slick}}{\sigma_{n,water}}$$

**Шаг 3**

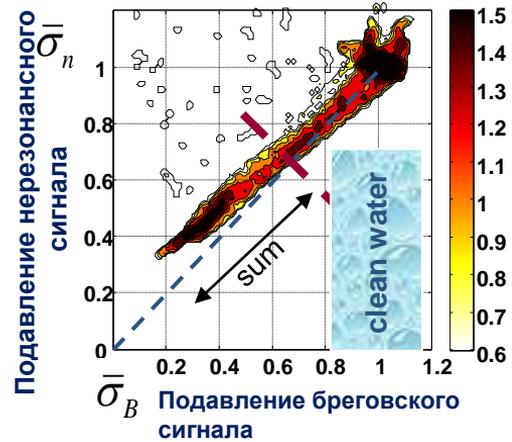
$$RND = \frac{\Delta \bar{\sigma}_n}{\Delta \tilde{\sigma}_B}$$



**Шаг 4**  
TSa\_E характеристики

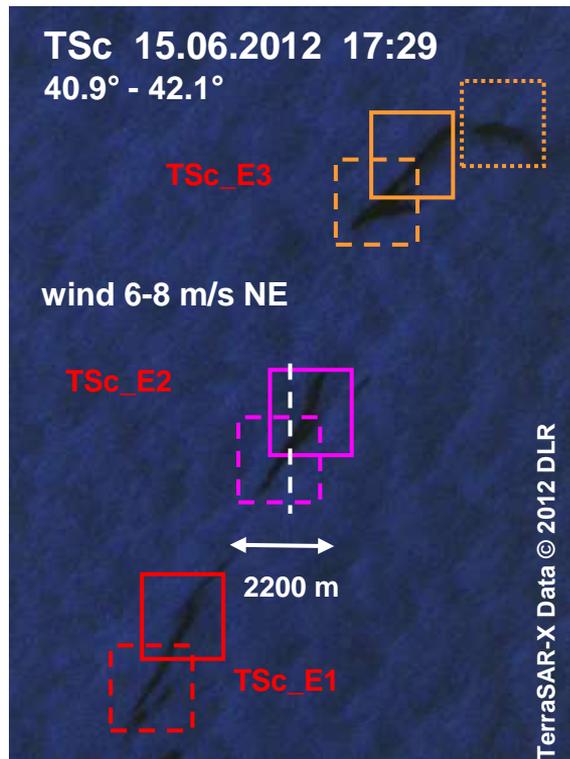
$RND_{mean} = 0.84$

$RND_{std} = 0.023$

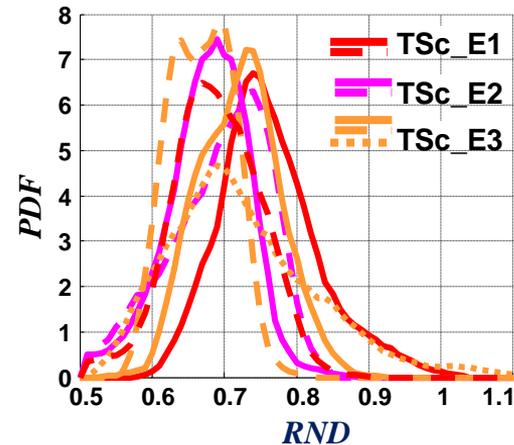
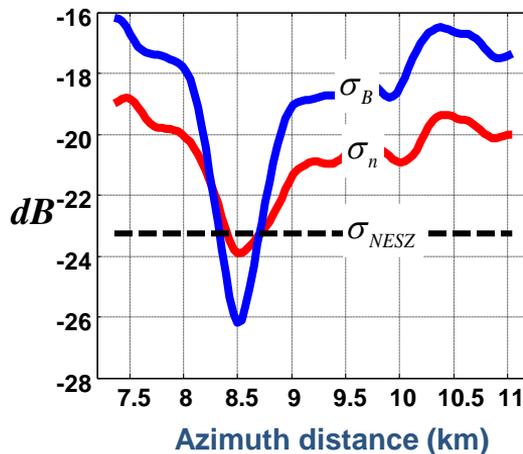


# Пример обработки зашумленного РЛИ TerraSAR-X

NOFO 2012 oil-spill exercise



Подавление сигнала в TSc\_E2 слике

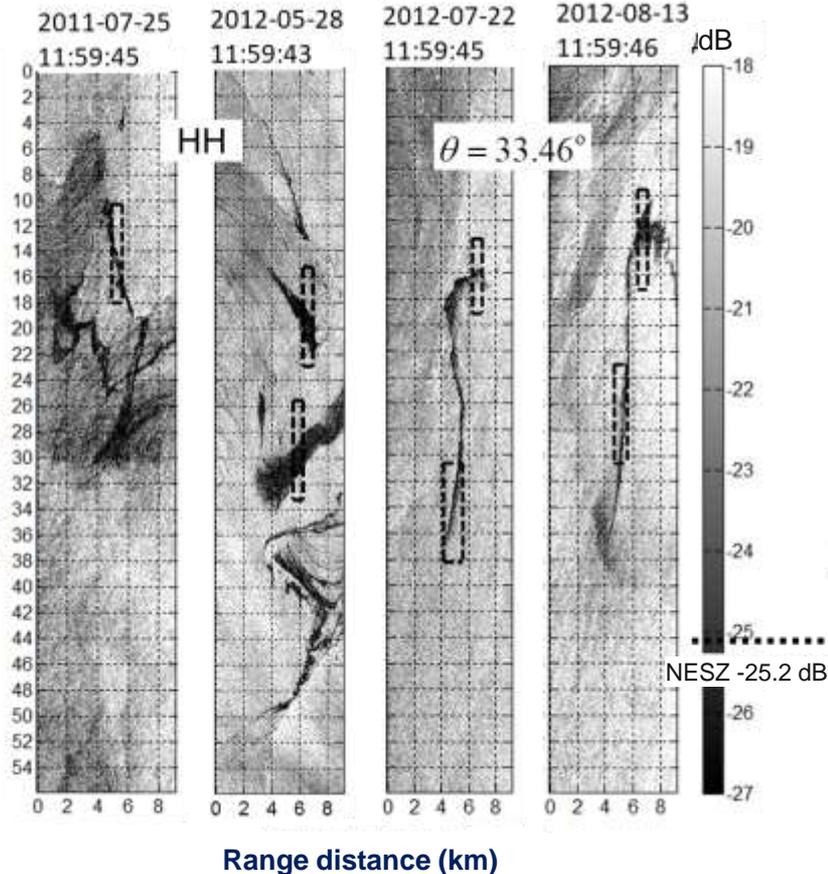
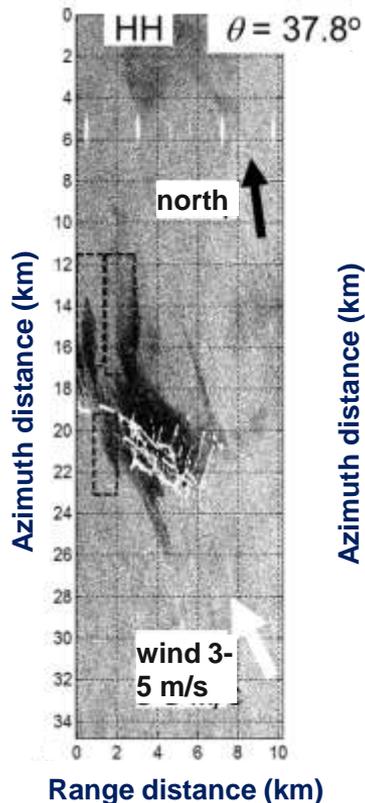
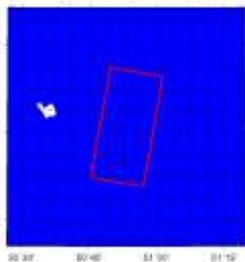
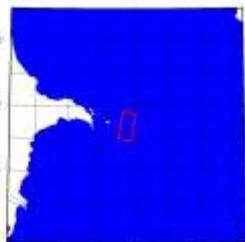


Oil film type (coding)	Incidence angle <sup>a</sup>	NESZ, dB	Slick / clean water max contrast <sup>b</sup> , dB	$SNR_{n, slick} / (SNR_{n, water})^a$ , dB	RND <sup>a</sup> (mean $\pm$ std)
emulsion (TSc_E1)	41.26°	-23.2	-5.4 / -3.1	-0.3 / 2.8	0.753 $\pm$ 0.032
	41.28°			0.5 / 2.7	0.689 $\pm$ 0.040
emulsion (TSc_E2)	41.52°	-23.3	-7.0 / -3.4	-0.7 / 2.7	0.686 $\pm$ 0.032
	41.44°			-0.7 / 3.0	0.714 $\pm$ 0.040
emulsion (TSc_E3)	41.72°	-23.0	-8.4 / -4.1	-0.9 / 3.2	0.717 $\pm$ 0.037
	41.64°			-1.2 / 3.2	0.670 $\pm$ 0.035
	41.89°			-0.6 / 2.7	0.698 $\pm$ 0.050

# Разливы нефти на РЛИ TerraSAR-X

## Каспийское море 2013

## Мексиканский залив 2011-2012



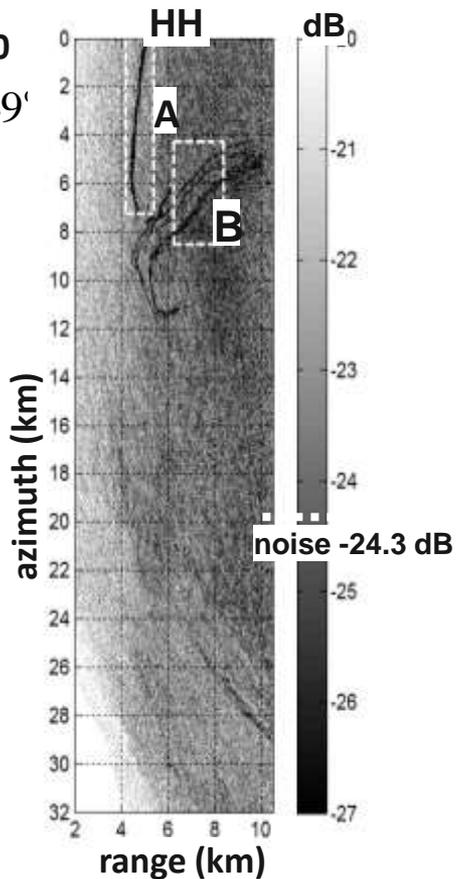
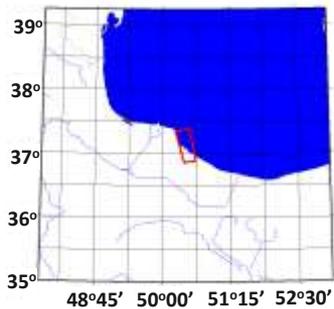
# Природные явления: Каспийское море

## Естественные выходы нефти

## Июль: биогенные пленки

2012-08-08 14:30

$\theta = 34.49^\circ$



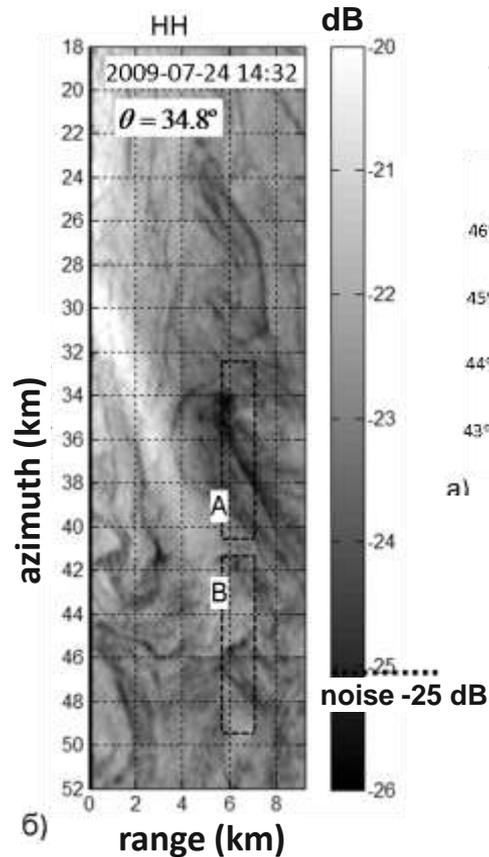
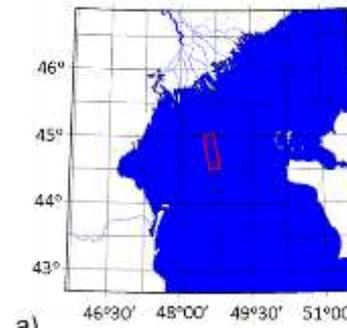
HH

dB

2009-07-24 14:32

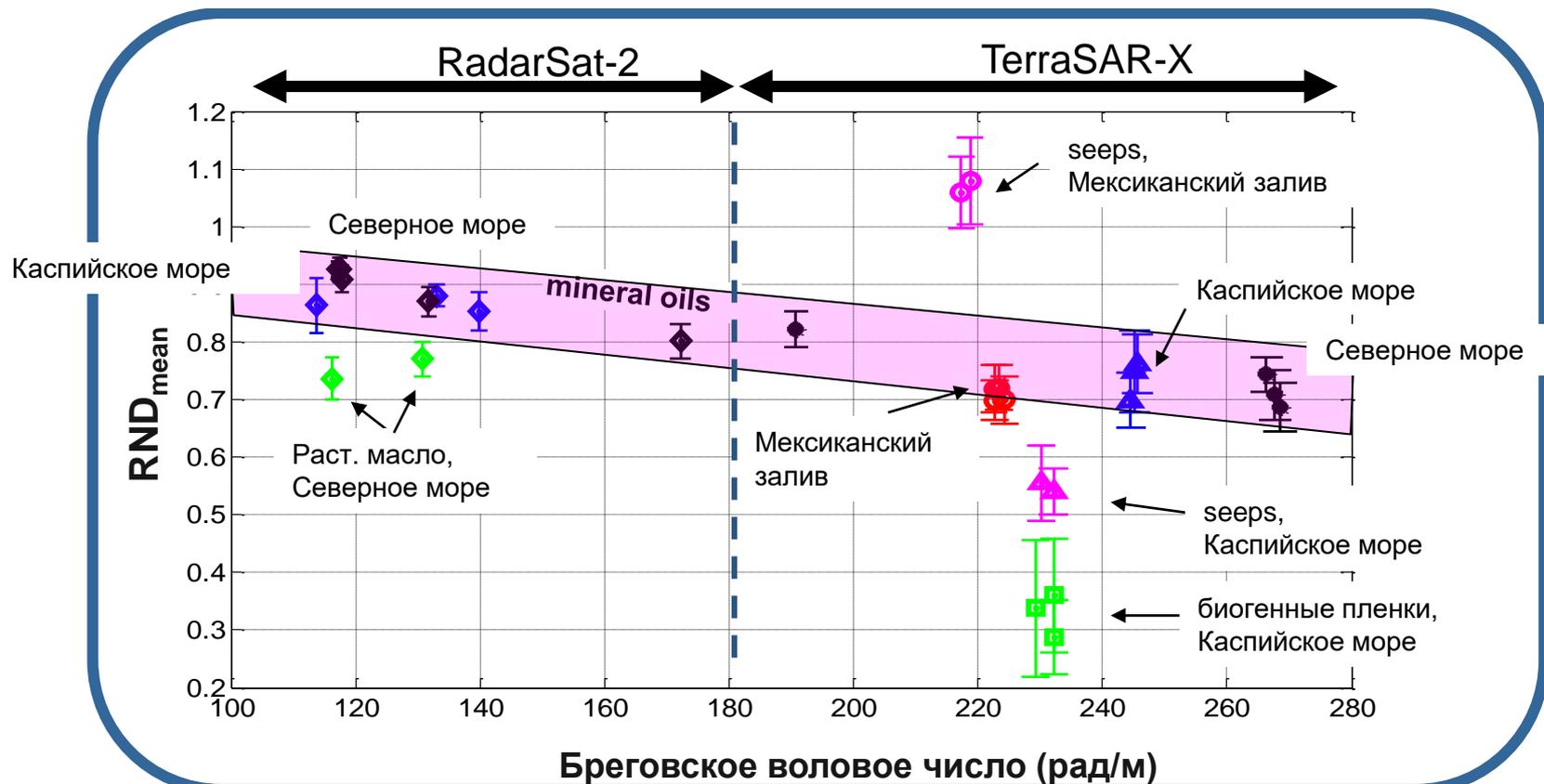
$\theta = 34.8^\circ$

2009-07-24 14:32



# TerraSAR-X + Radarsat-2: диаграмма минеральных масел

## mineral oil diagram

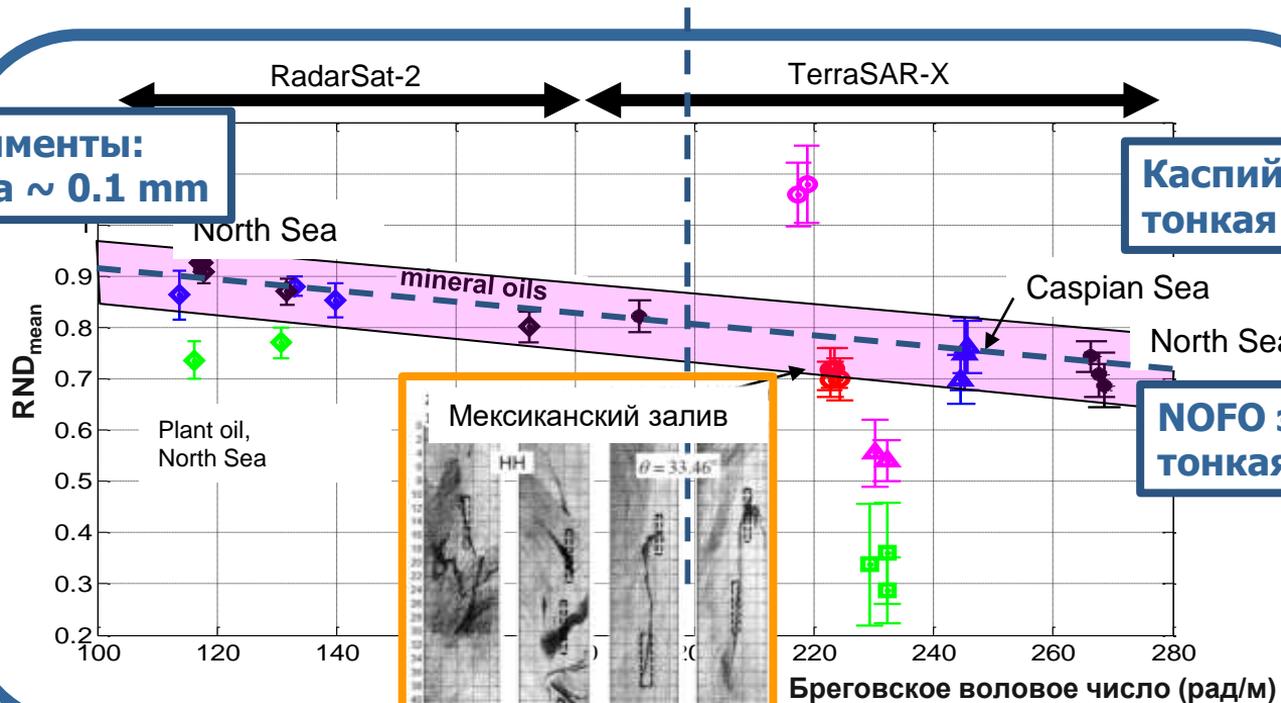


# Эффект толщины пленок

Мексиканский залив: очень толстая пленка (авария после урагана "Ivan")

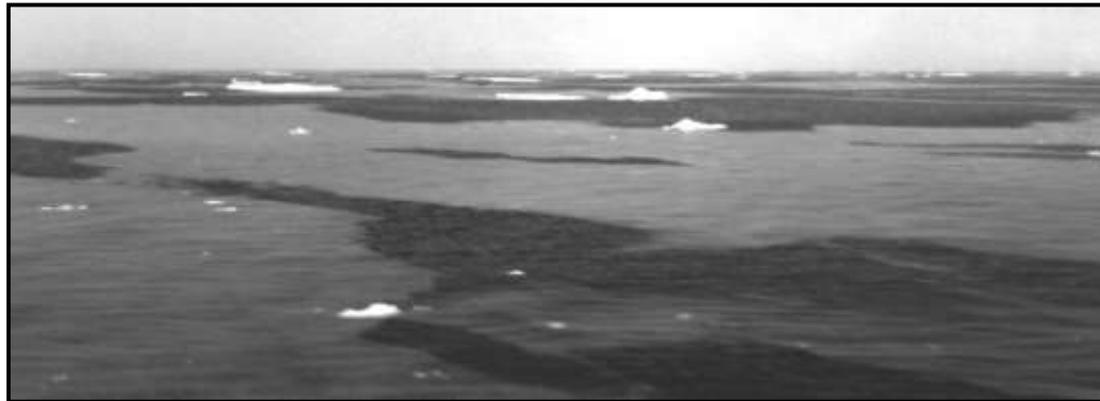
NOFO эксперименты:  
тонкая пленка  $\sim 0.1$  mm

Каспийское море:  
тонкая пленка  $< 0.1$  mm



NOFO эксперименты:  
тонкая пленка  $\sim 0.1$  mm

# Новообразованный лед

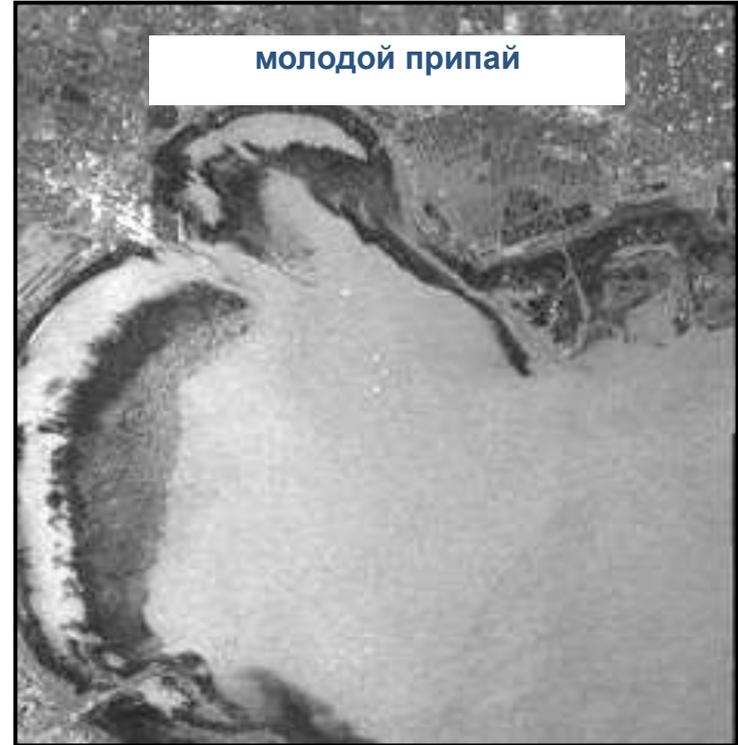


# Новообразованный лед на РЛИ: темные пятна

РСА



РСА



# Классификация начальных видов льдов

ледяное сало



нилас



нилас



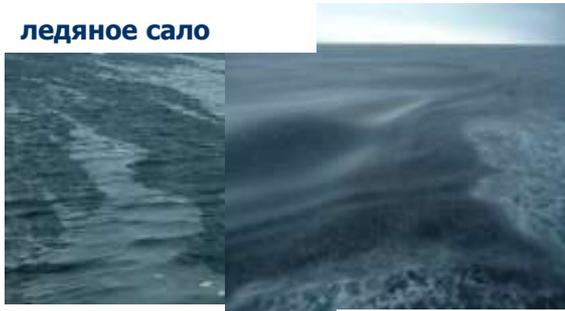
блинчатый лед



Начальные виды льдов	Описание
ледяные иглы	<b>кристаллы</b> льда в виде тонких игл или пластинок, образующихся на поверхности воды или в ее толще
ледяное сало	скопления (смерзшихся) кристаллов льда на поверхности воды в виде пятен или тонкого сплошного слоя <b>серовато-свинцового цвета</b> , придающих водной поверхности <b>матово-маслянистый вид</b>
снежура	вязкая, кашеобразная масса, образующаяся при обильном снегопаде на охлажденную воду
шуга	скопление рыхлых белесоватых комков льда диаметром в несколько сантиметров, образующихся из ледяного сала, снежуры и донного льда
темный (dark) нилас	Тонкая <b>эластичная</b> ледяная корка; <b>до 5 см</b> толщиной, легко прогибающаяся на волне и зыби; <b>имеет матовую поверхность</b>
склянка	тонкий прозрачный лед в виде блестящей хрупкой корки толщиной <b>до 5 см</b> , образующийся из ледяных кристаллов или ледяного сала при спокойном состоянии моря; легко ломается при ветре или волне
легкий (light) нилас	Тонкая эластичная ледяная корка; <b>до 10 см</b> толщиной
блинчатый лед	лед, преимущественно круглой формы от 30 см до 3 м в диаметре и толщиной <b>до 10 см</b> , с приподнятыми белыми краями вследствие удара льдин одна о другую

# УЭПР различных видов льдов

ледяное сало



нилас

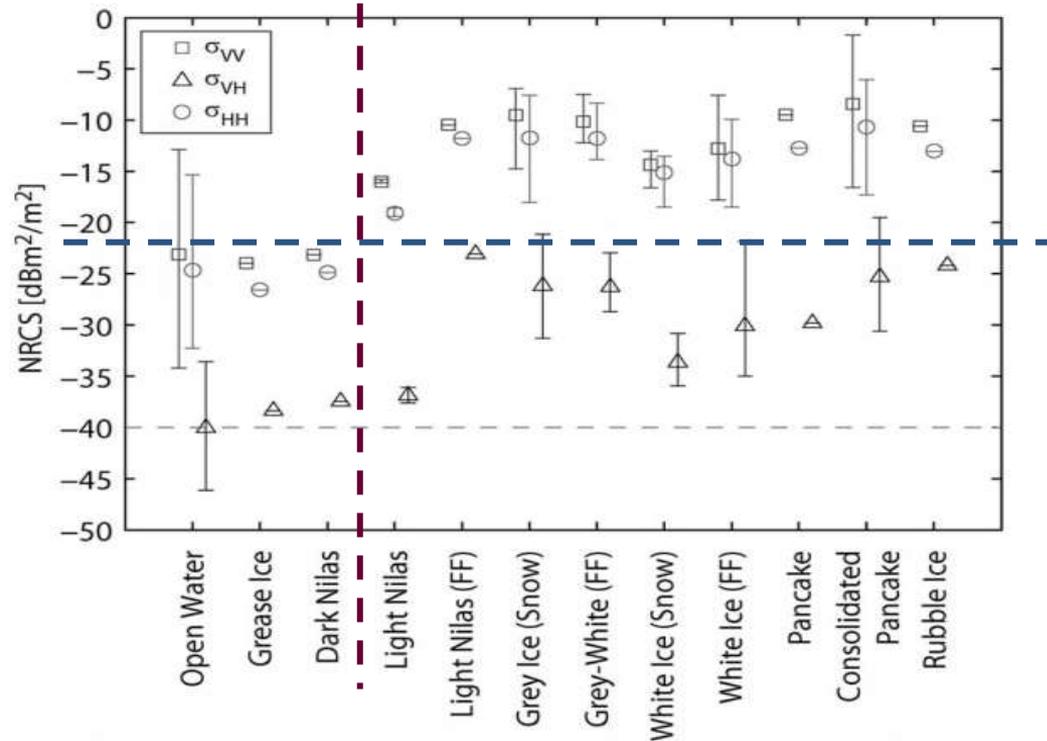


нилас



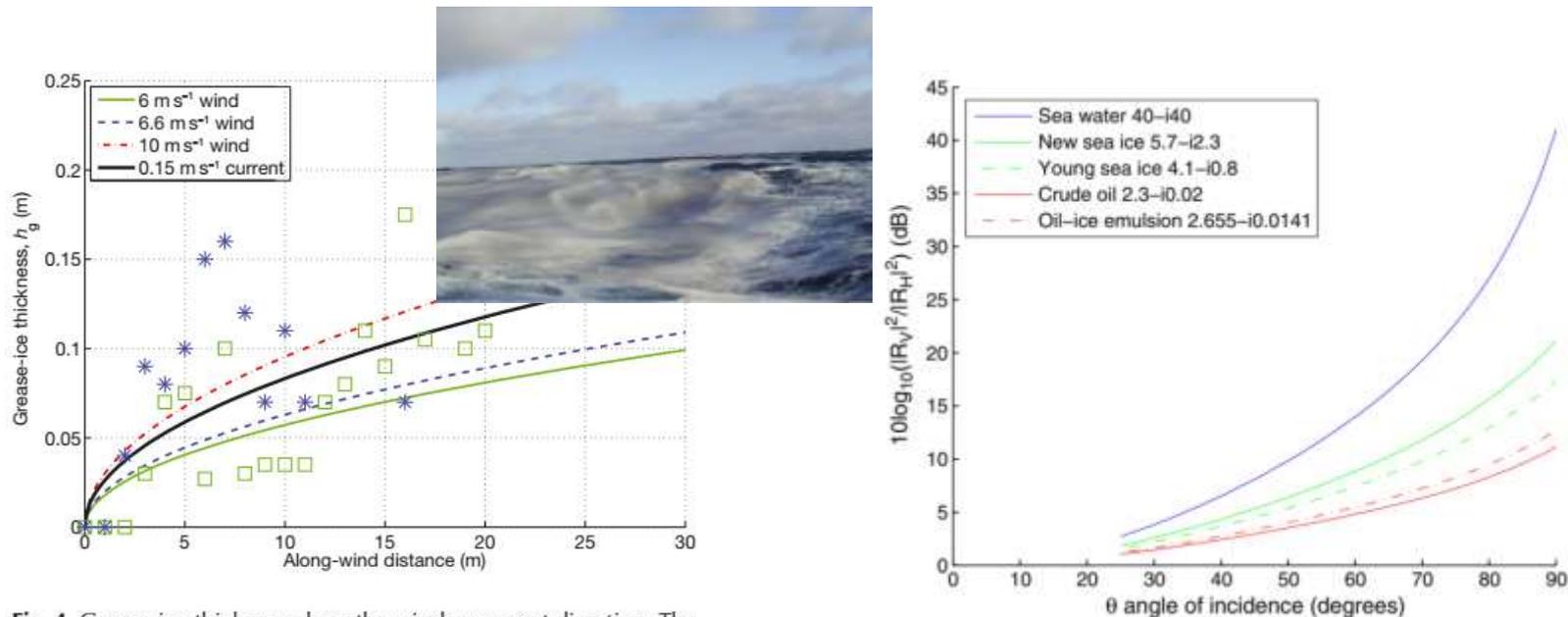
блинчатый лед

УЭПР \*) как функция типа льда при угле падения 30°.



\*) Isleifson D. et al. C-band polarimetric backscattering signatures of newly formed sea ice during fall freeze-up //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.–2010.–T.48. –№.8. –С.3256-3267.

# Толщина ледяного сала, диэлектрические свойства

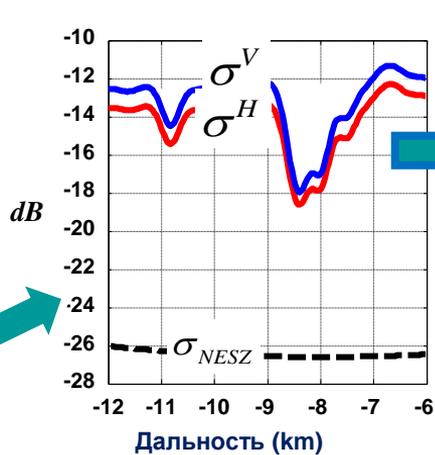
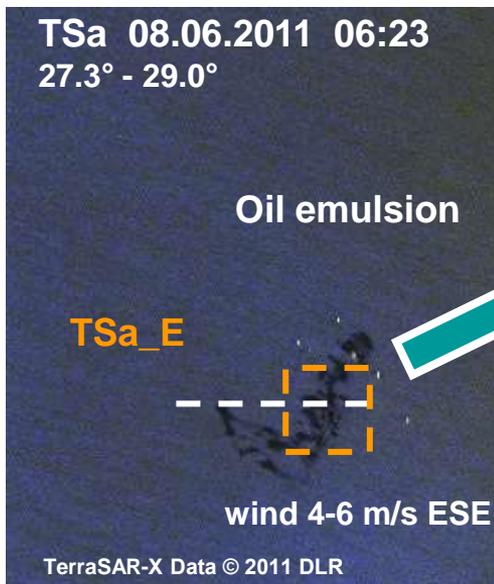


**Fig. 4.** Grease-ice thickness along the wind or current direction. The thickness profile resulting from a  $6 \text{ m s}^{-1}$  wind may be compared to the observed profile of grease-ice thickness depicted using green squares, while the  $6.6 \text{ m s}^{-1}$  profile may be compared to that depicted using blue stars.

Smedsrud L. H. Grease-ice thickness parameterization //Annals of Glaciology. – 2011. – Т. 52. – №. 57. – С. 77-82.

# Пример обработки РЛИ TerraSAR-X

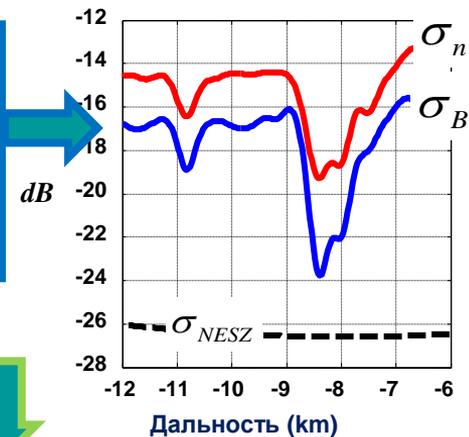
NOFO 2011 oil-spill exercise



**Шаг 1**

$$\sigma_B \approx \frac{\sigma^V - \sigma^H}{1 - P_{0B}(\theta)}$$

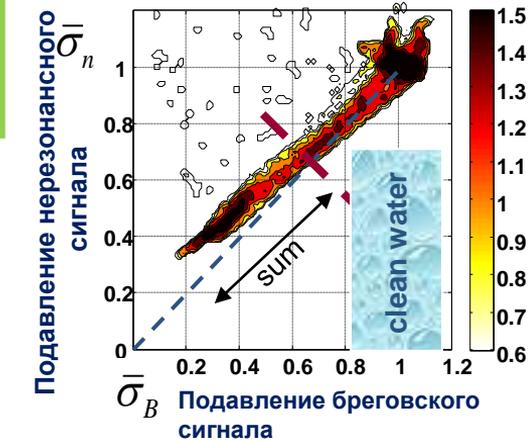
$$\sigma_n \approx \frac{\sigma^H - P_{0B}\sigma^V}{1 - P_{0B}(\theta)}$$



**Шаг 2**

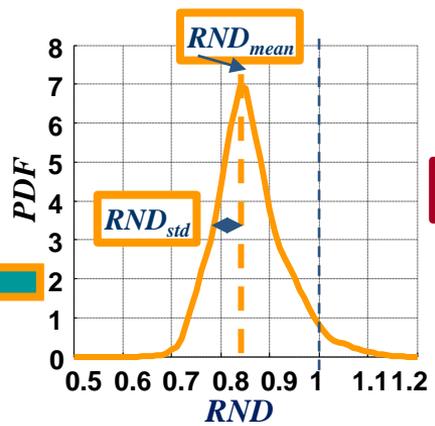
$$\bar{\sigma}_B = \frac{\sigma_{B,slick}}{\sigma_{B,water}}$$

$$\bar{\sigma}_n = \frac{\sigma_{n,slick}}{\sigma_{n,water}}$$



**Шаг 3**

$$RND = \frac{\Delta \bar{\sigma}_n}{\Delta \tilde{\sigma}_B}$$



**Шаг 4**  
**TSa\_E** характеристики

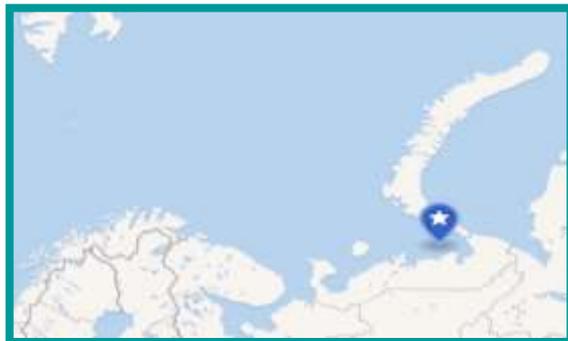
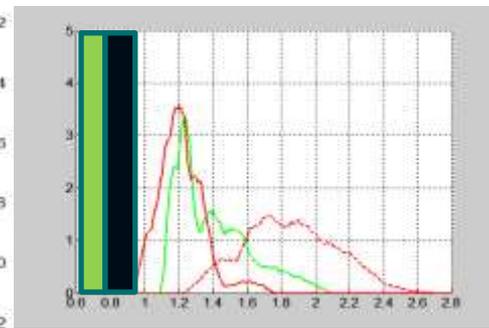
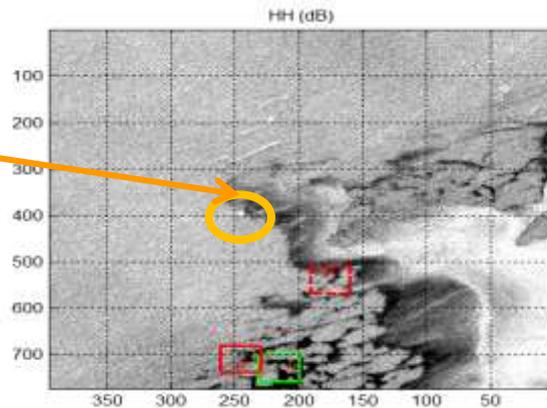
$RND_{mean} = 0.84$

$RND_{std} = 0.023$

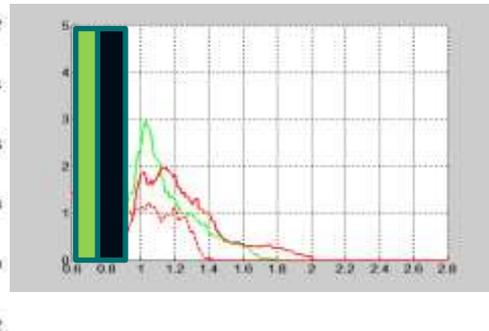
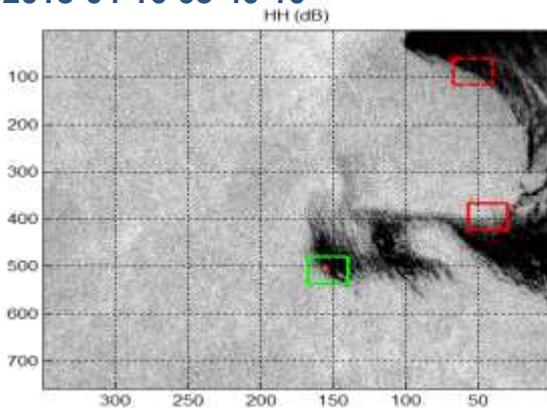
# Печорское море, платформа «Приразломная»

2017-11-28-02-55-19

Radarsat-2



2018-04-16-03-40-10



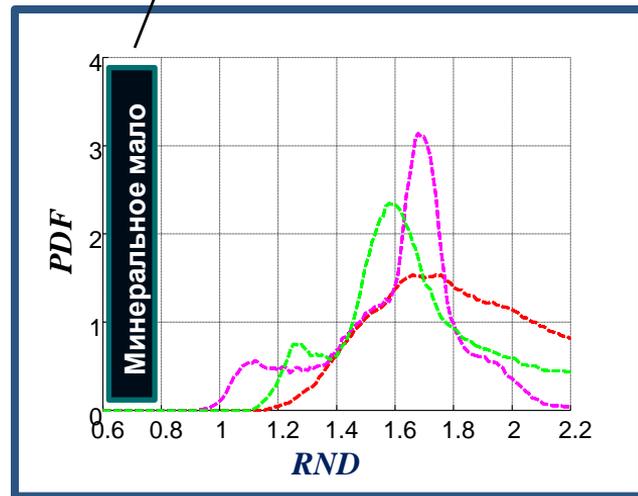
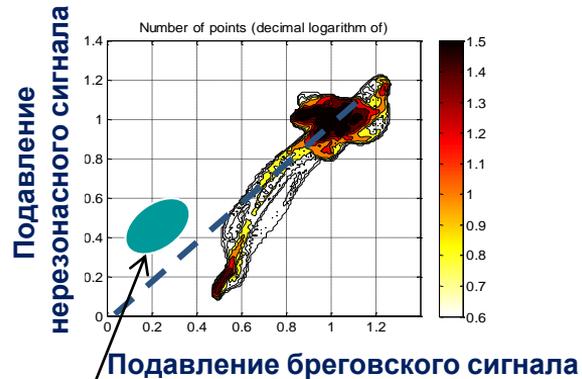
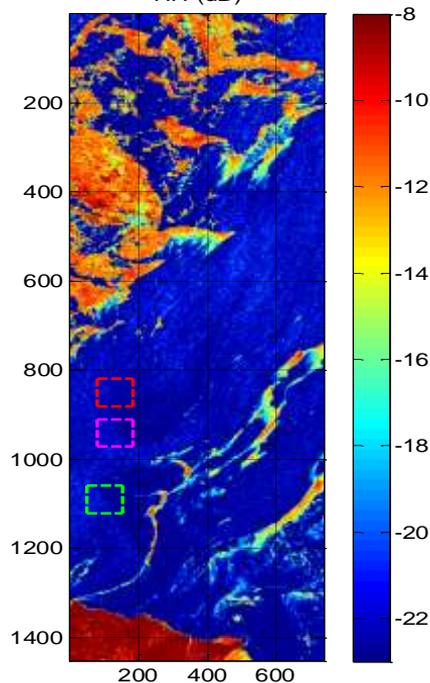
# Баренцево море, Шпицберген: начальные формы льда

TerraSAR-X 19.01.2016

39.7°



HH

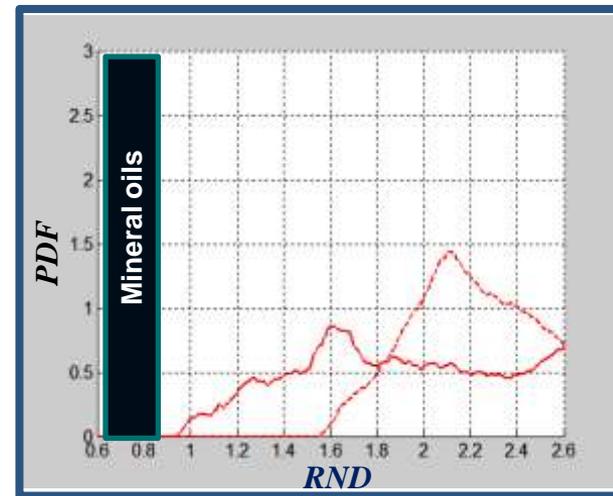
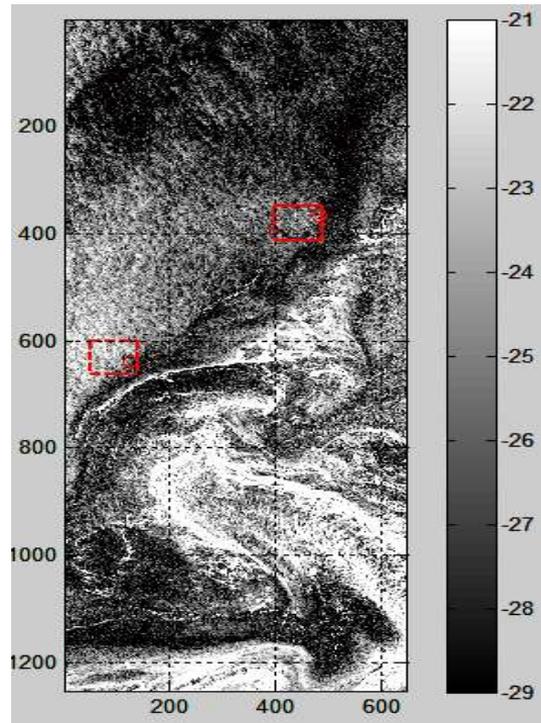
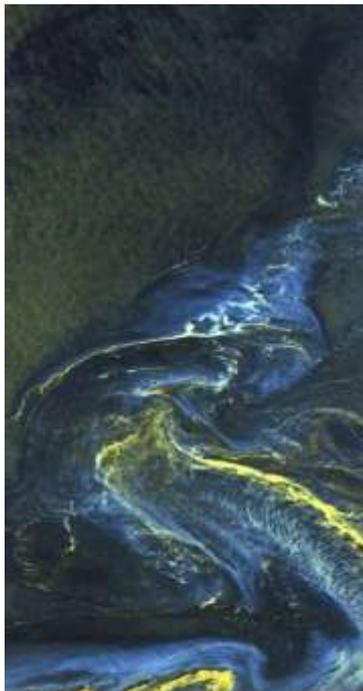


# Море Бофорта: начальные формы льда

TerraSAR-X 27.09.2015

HH

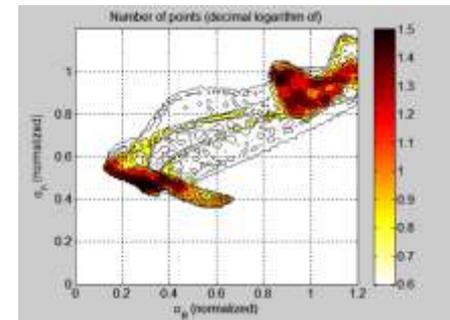
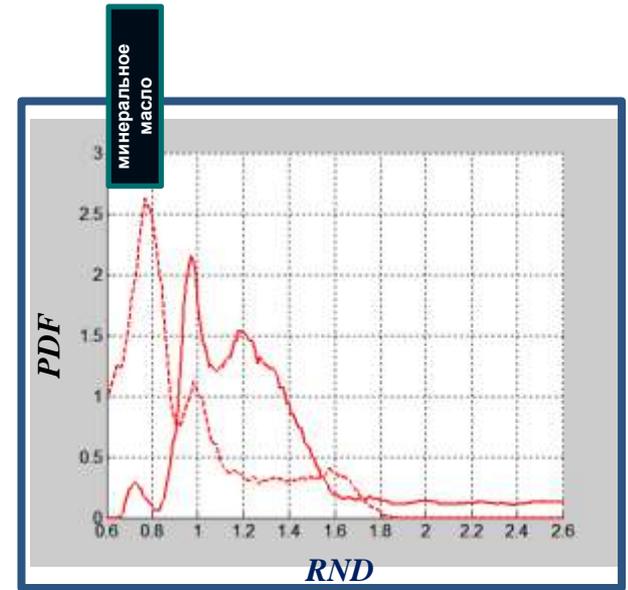
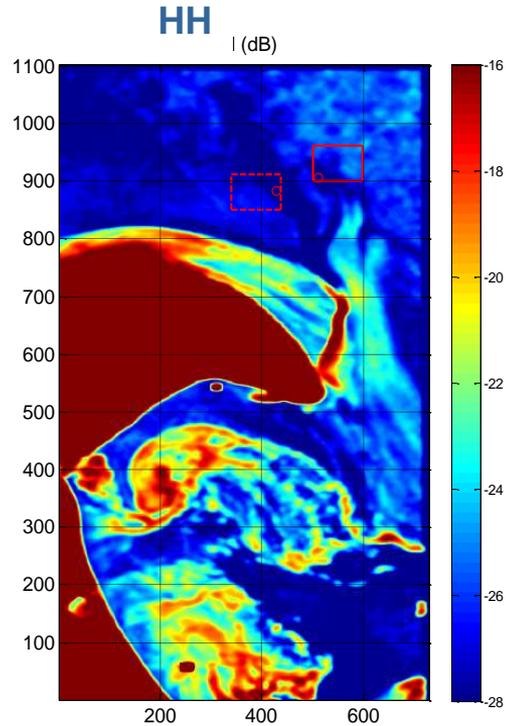
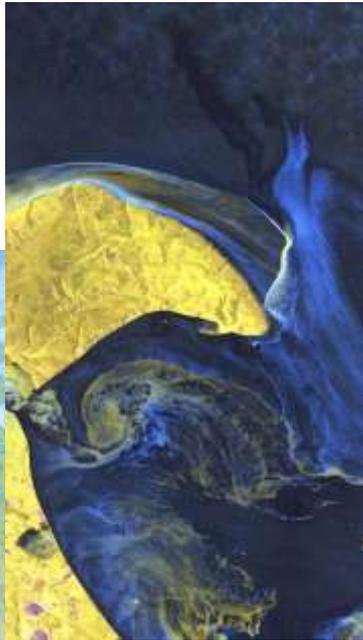
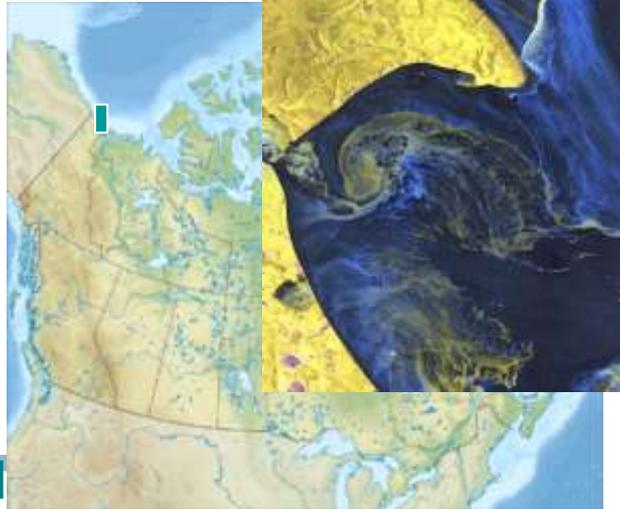
34.5°



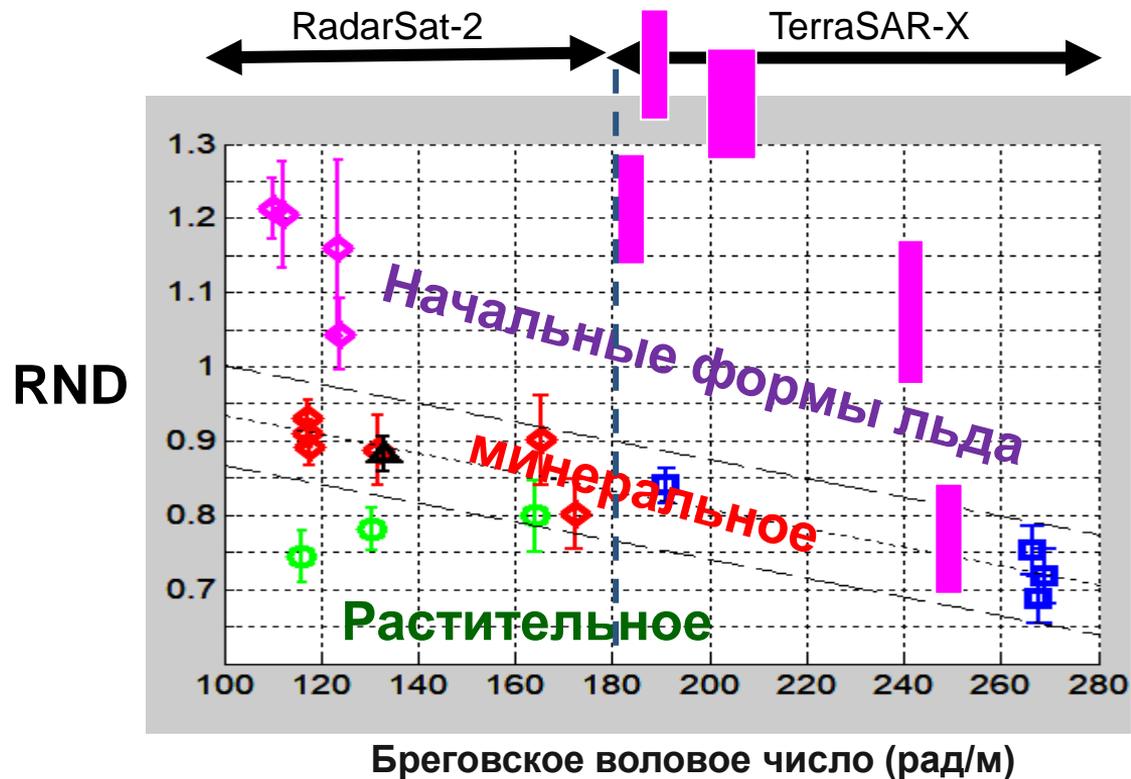
# Море Бофорта, остров Хершел: начальные формы льда

TerraSAR-X 06.10.2015

38.8°



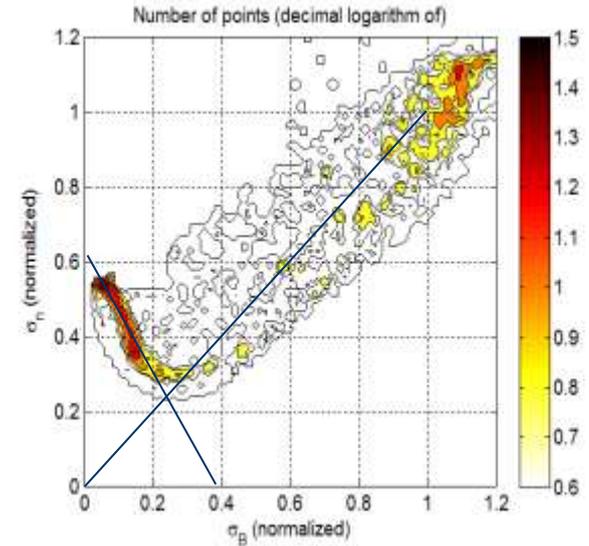
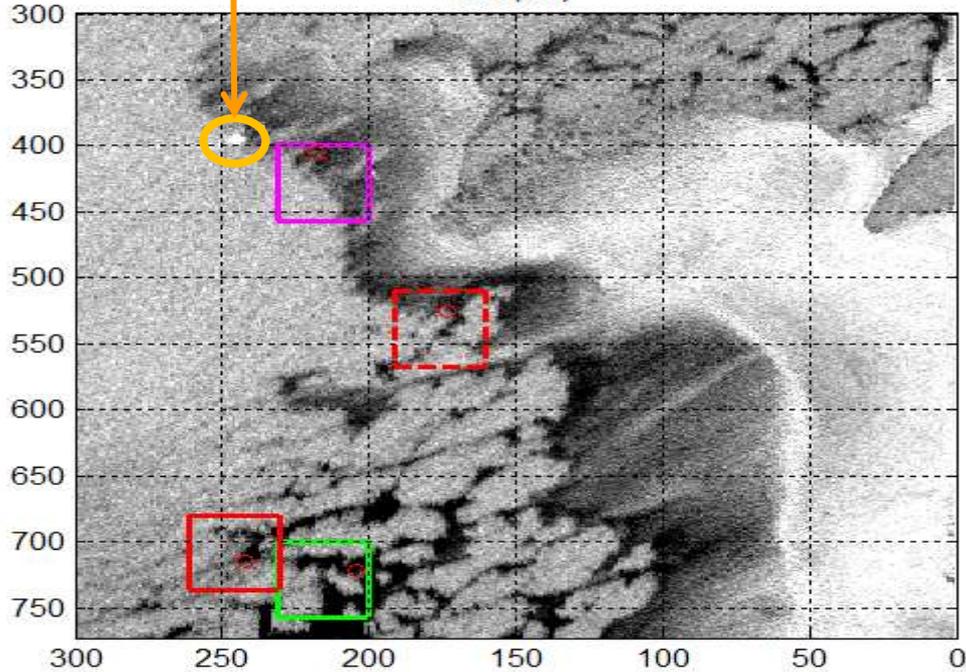
# Поляризационная диаграмма: начальные формы льда vs. нефть



# Автоматический алгоритм картографирования различных форм начального льда

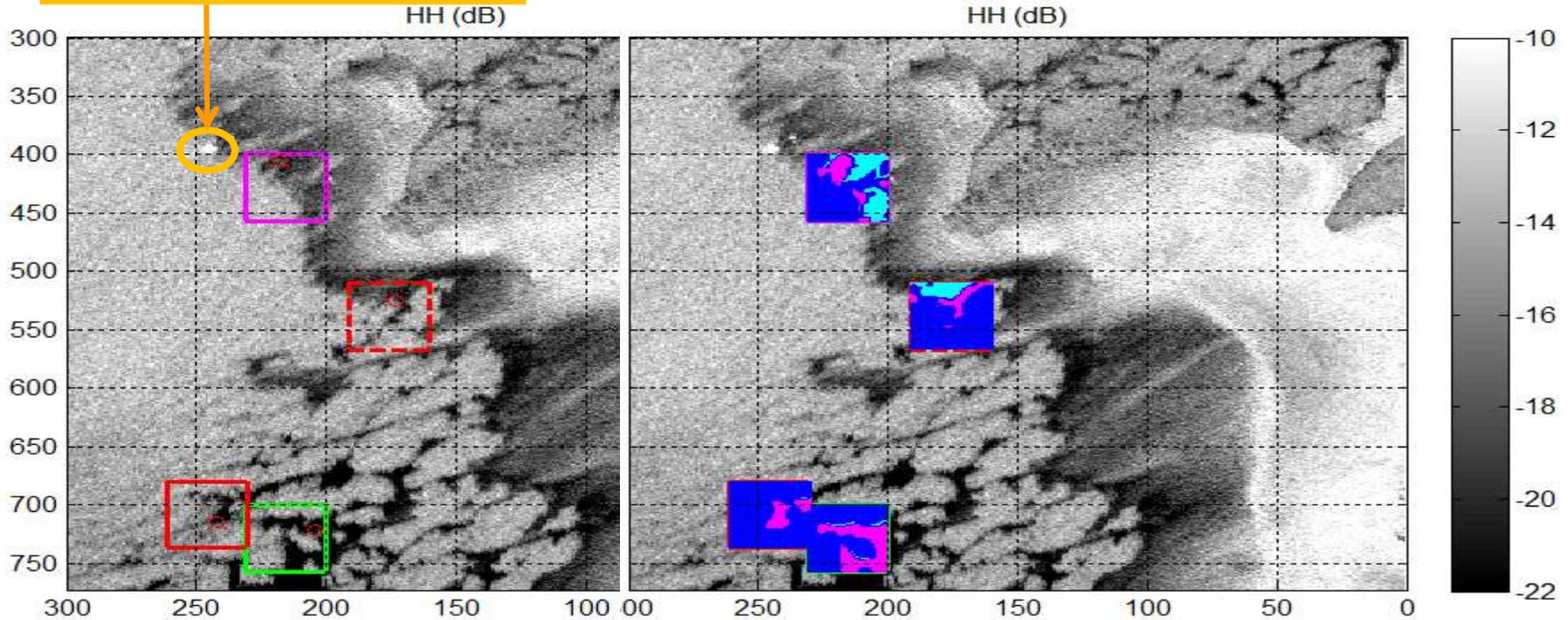


HH (dB)





# Автоматический алгоритм картографирования различных форм начального льда





Начальные формы льда

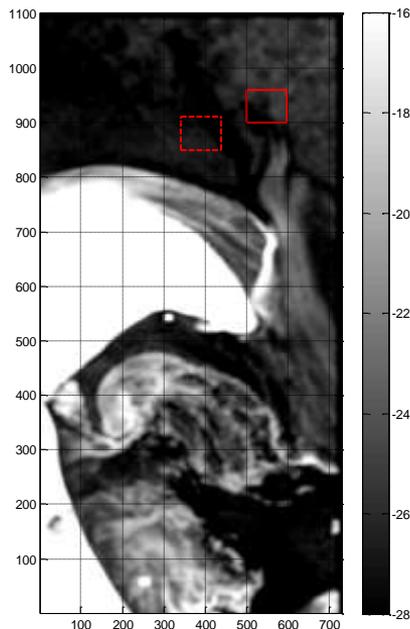
Анализ поляризационного отношения = HH/VV

# Поляризационное отношение: начальные формы льда vs. нефть

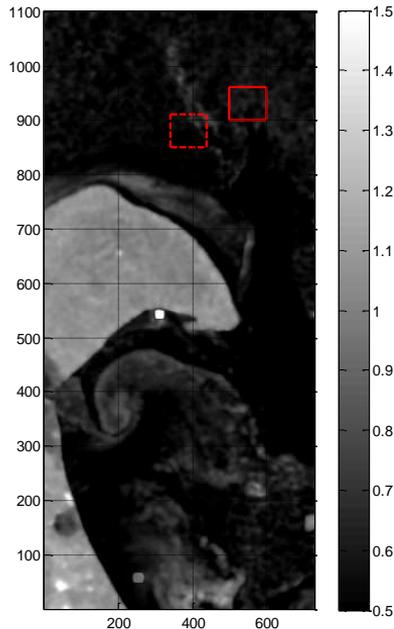
лед

TerraSAR-X 06.10.2015 38.8°

HH



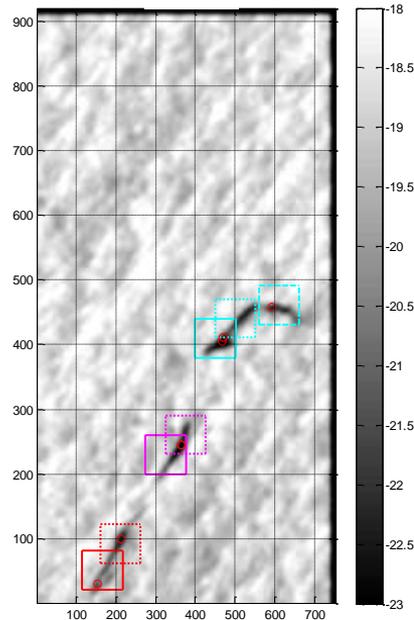
HH / VV



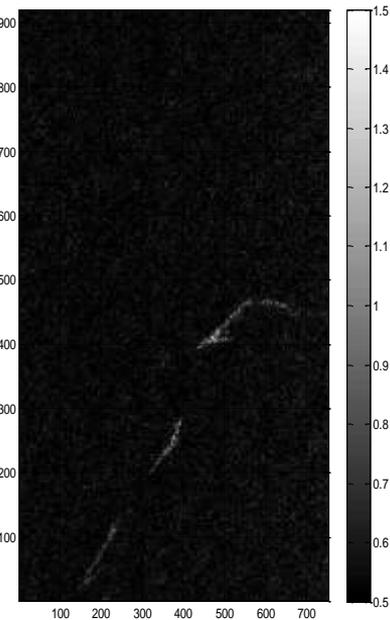
нефтяная эмульсия (40-60%)

TerraSAR-X 15.06.2012 40.2°

HH



HH / VV



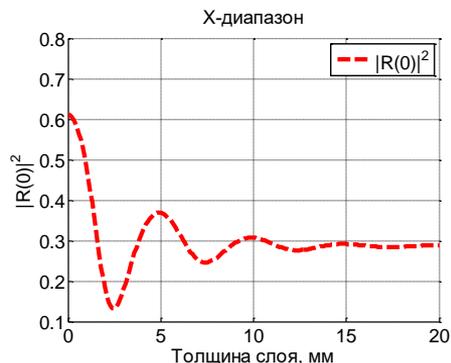
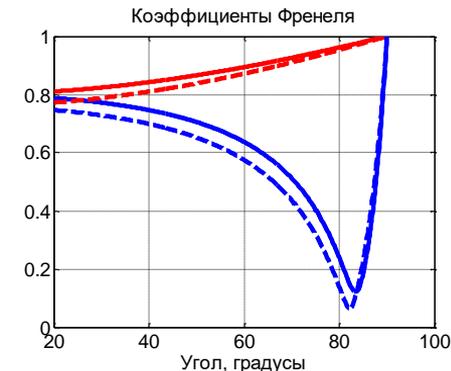
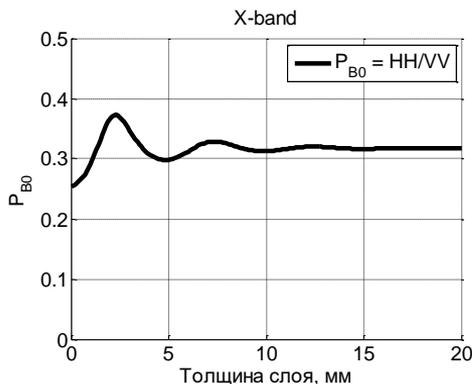
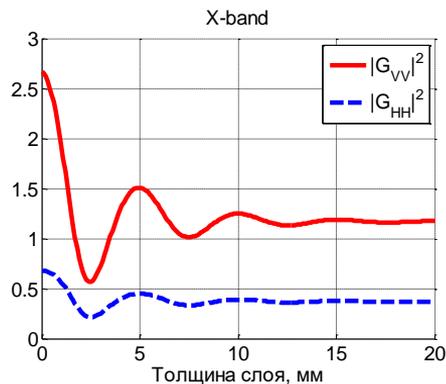
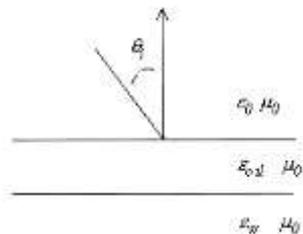
# Теоретическая зависимость коэффициентов отражения от толщины ледяного сала

$$\varepsilon_{water} = 50 - i35$$

$$V_{ice} = 80\%$$

$$\varepsilon_{ice} = 5.7 - i2.3$$

угол зондирования = 38°



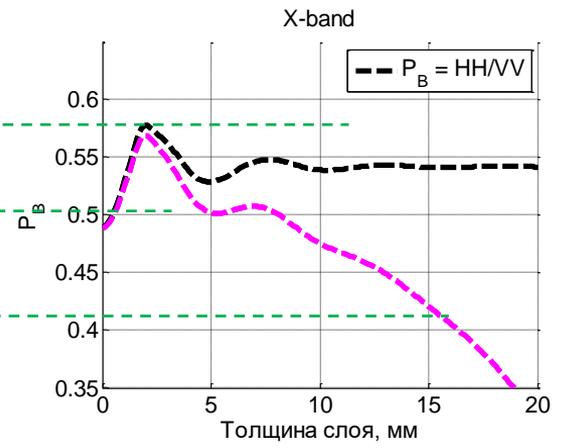
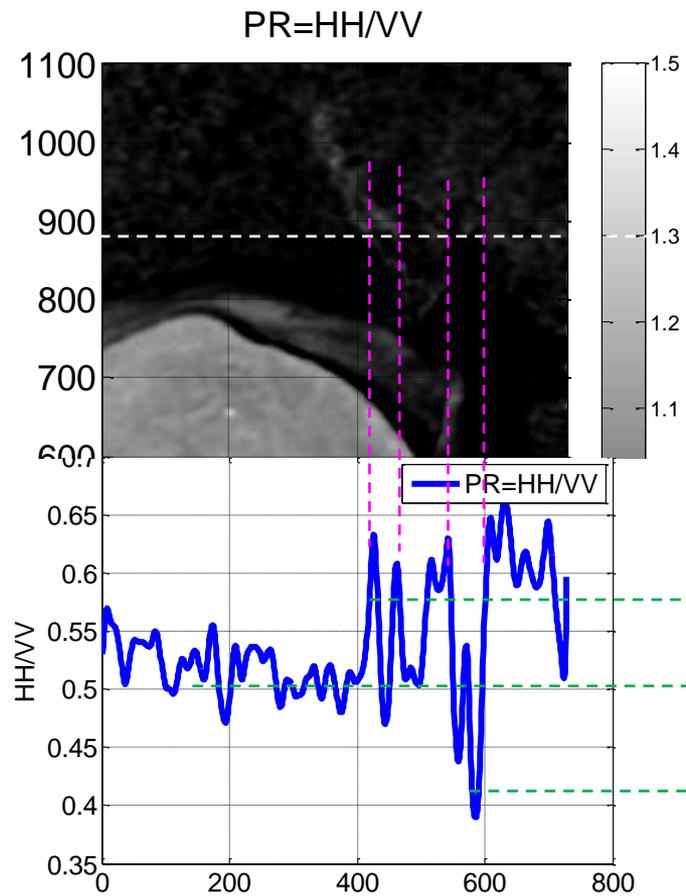
$$\sigma_{0B}^V = 16\pi |G_V(\theta, \varepsilon)|^2 B(\bar{U}_{wind}, k_b)$$

$$\sigma_{0B}^H = 16\pi |G_H(\theta, \varepsilon)|^2 B(\bar{U}_{wind}, k_b)$$

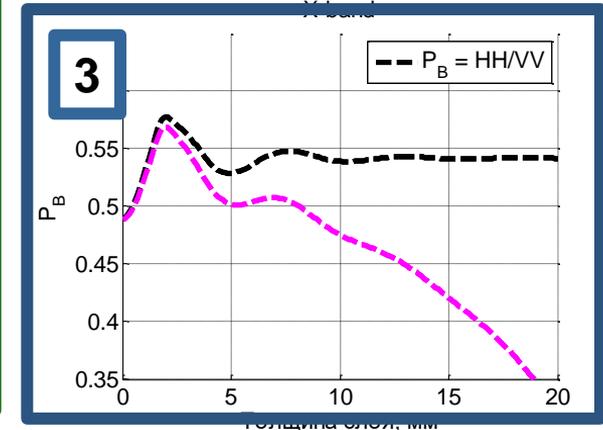
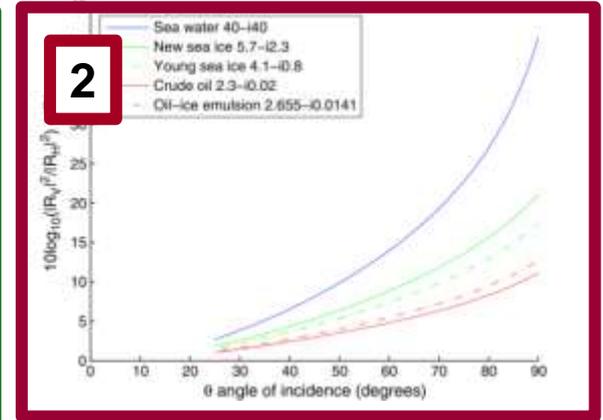
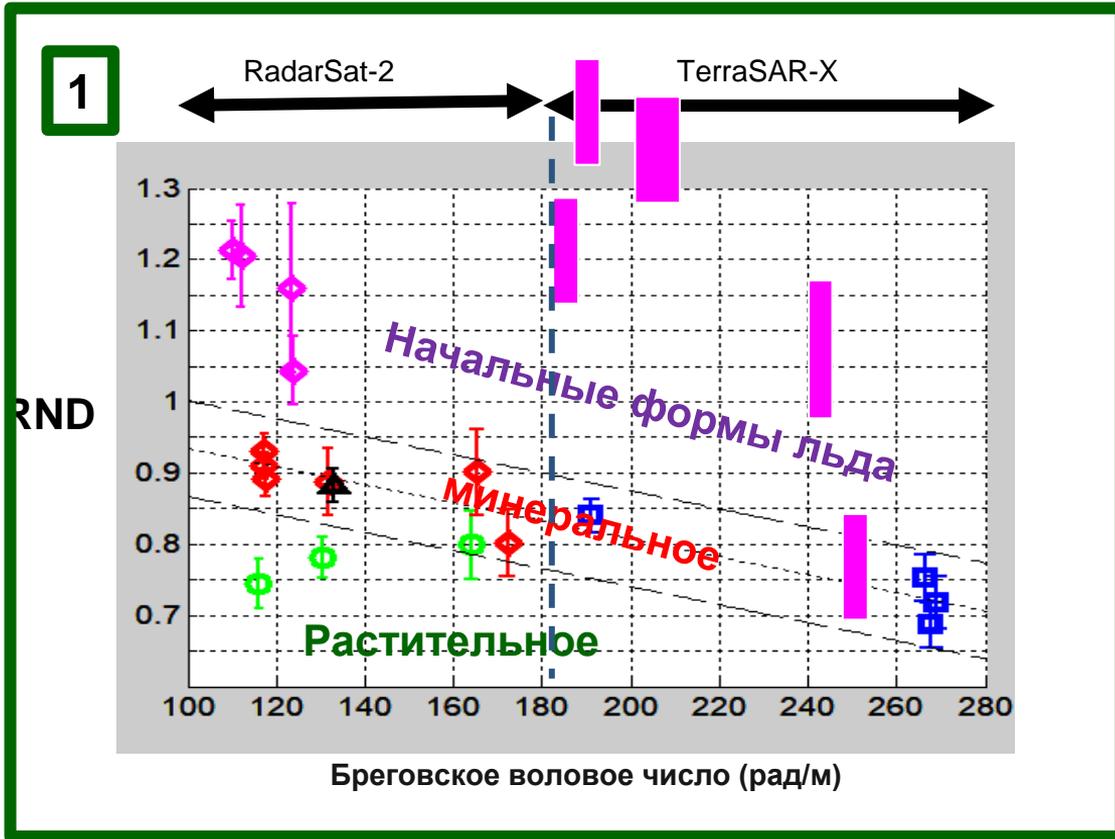
$$P_{0B} = \frac{|G_H(\theta, \varepsilon)|^2}{|G_V(\theta, \varepsilon)|^2}$$

$$\sigma_{wb} = |R(0, \varepsilon)|^2 q \cdot \sigma_{0wb}(\theta)$$

# Поляризационное отношение: начальные формы льда vs. нефть



# Заключение





**Спасибо за внимание!**

**ФИНАНСИРОВАНИЕ.**

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 18-55-20010

Данные Radarsat-2 были представлены Scanex и Ksat (NORRUS)

Данные TerraSAR-X были представлены DLR

Ивонин Д.В., Иванов А.Ю., Кожелупова Н.Г.  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

[ivonin@ocean.ru](mailto:ivonin@ocean.ru)