

Радиолокационные методы выявления пленочных загрязнений морской поверхности

*М. Митягина**

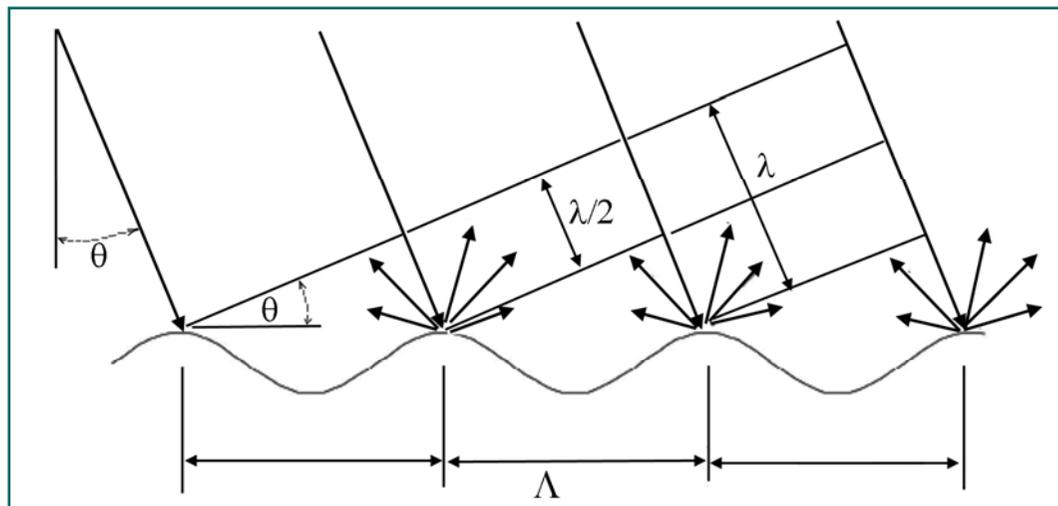
Институт космических исследований РАН



Шестая международная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли». 02.03 - 06.03.2015, г. Таруса



РЕЗОНАНСНЫЙ (БРЕГГОВСКИЙ) МЕХАНИЗМ РАССЕЯНИЯ



Механизм формирования резонансного рассеяния радиолокационного сигнала на взволнованной морской поверхности, где λ - длина зондирующей волны, Λ - длина резонансной компоненты спектра поверхностного волнения, θ - угол между направлением зондирования и надиром

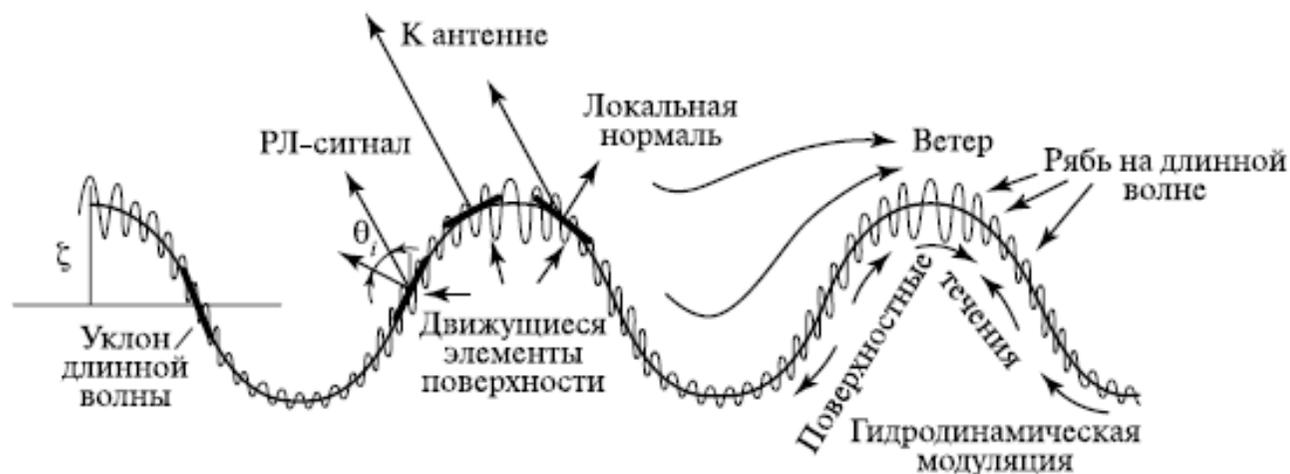
$$\Lambda_{res} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

Соотношение Вульфа-Брегга определяет резонансную длину волны возмущения, которая селективно преобразует первичную волну, падающую под углом θ , в рассеянную волну, идущую в обратном направлении

Для углов зондирования 20–26° длины резонансной компоненты поверхностного волнения для наиболее распространенных частотных диапазонов:

- для зондирующей волны 3 см — 3,9±0,5 см;
- для зондирующей волны 5,7 см — 7±1 см;
- для зондирующей волны 23 см — 30±4 см.

ДВУХМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ



Схематичное представление двухмасштабной модели поверхности

Двухмасштабную или композитную модель морской поверхности квалифицируют также как «рябь на крупной волне»

Влияние ряби учитывают в рамках теории возмущений (брегговский механизм рассеяния), а влияние крупномасштабной компоненты — изменением наклона поверхности.

В результате мелкомасштабная компонента волнения (ее «сантиметровая» часть) оказывается ответственной за обратное рассеяние радиолокационных сигналов, а крупномасштабная — за пространственную модуляцию рассеянных сигналов.

Такой комбинированный подход известен как двухмасштабная модель рассеяния

ОТОБРАЖЕНИЕ ПЛЕНОЧНОГО СЛИКА НА РЛИ



Наличие поверхностной пленки приводит к затуханию гравитационно-капиллярных компоненты поверхностного волнения, соответственно, на поверхности океана образуются выглаженные области (слики), которые проявляются на радиолокационном изображении как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

РЛ-образ морской поверхности зависит от:

- ✓ диапазона зондирования;
- ✓ поляризации излучения;
- ✓ угла падения зондирующего сигнала



Излучающее устройство радиолокатора передает электромагнитную волну.

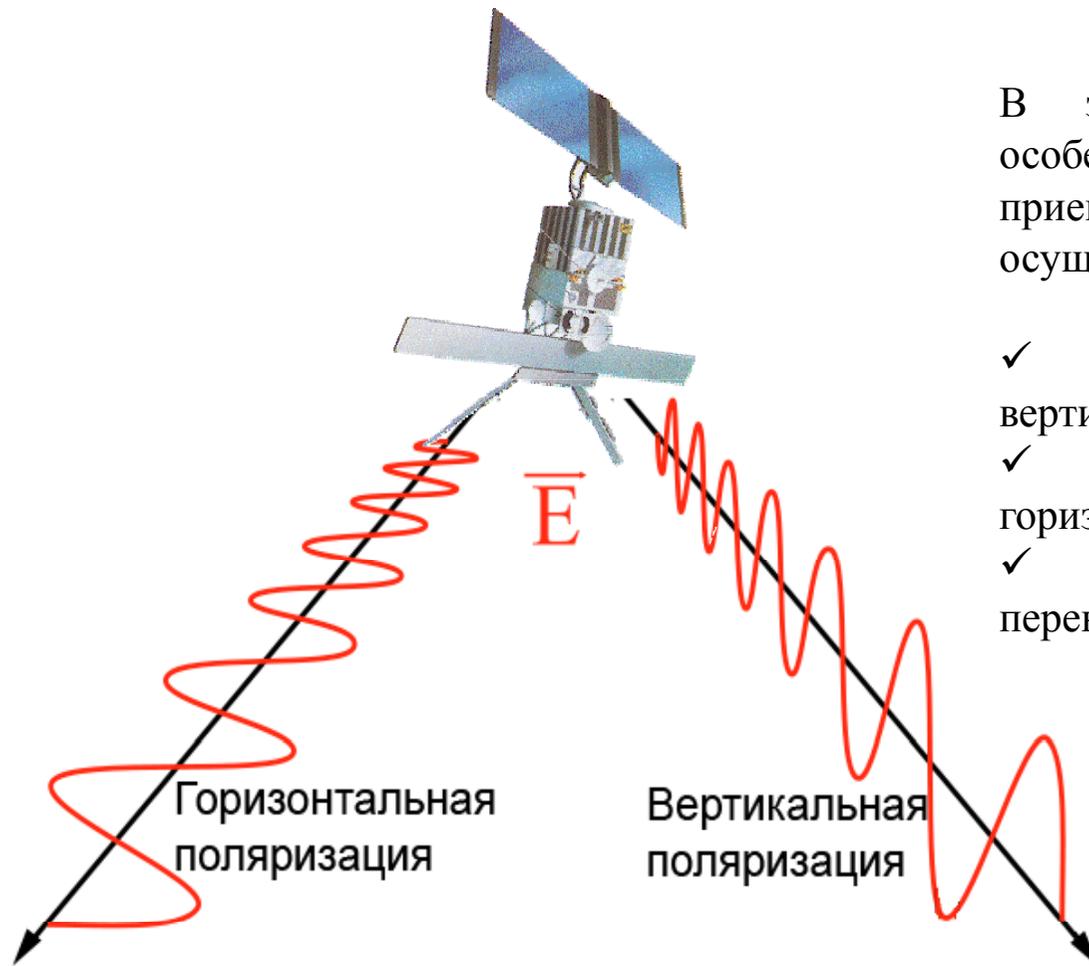
Ее характеристиками являются:

- ✓ длина λ ;
- ✓ частота – величина $f = C/\lambda$, где C - скорость распространения электромагнитных волн в среде;
- ✓ волновой вектор, указывающий направление распространения волны;
- ✓ поляризация электромагнитной волны – очень важное свойство, от положения плоскости поляризации по отношению к отражающей поверхности зависит коэффициент отражения волны.

ТРАДИЦИОННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Диапазон	Этимология	Частоты	Длина волны	Применение
P	Previous	< 300 МГц	> 1 м	Использовался в США на первых самолетах-лабораториях NASA
L	Long	1 — 2 ГГц	15 — 30 см	РСА на борту ИСЗ <i>SEASAT</i> (США) и <i>JERS-1</i> (Япония), сенсор SIR-C/X-SAR на борту космического челнока «Endeavor»(США) <i>ALOS-2/PALSAR-2 (Япония)</i>
S	Short	2 — 4 ГГц	7,5 — 15 см	РСА ИСЗ «Алмаз-1»
C	Compromise промежуточный диапазон между X и S	4 — 8 ГГц	3,75 — 7,5 см	РСА на борту европейских спутников <i>ERS-1,2</i> и <i>Envisat</i> , <i>SENTINEL-1</i> и канадских спутников <i>RADARSAT-1,2</i>
X		8 — 12 ГГц	2,5 — 3,75 см	РСА на борту германских спутника <i>TERRA/SAR-X</i> , <i>TANDEM</i> в США диапазон 10,525 ГГц ± 25 МГц используется в РЛС аэропортов <i>Cosmo-SkyMed (Италия)</i>
K_u	Under K нем. Kurz — «короткий»	12 — 18 ГГц	1,67 — 2,5 см	Ледовая разведка, картографирование высокого разрешения, спутниковая альтиметрия. РЛСБО «Нить» и «Торос» на борту самолетов-лабораторий ТУ-134 Сх и Ан-24.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВЕКТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



Вектор электрического поля при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирующего сигнала

В зависимости от конструктивных особенностей и режима работы РЛС приемо-передающие системы могут осуществлять:

- ✓ -излучение и прием на вертикальной (ВВ) поляризации;
- ✓ -излучение и прием на горизонтальной (НН) поляризации;
- ✓ -излучение и прием на перекрестных поляризациях (VH и HV)

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПУТНИКОВЫХ РСА

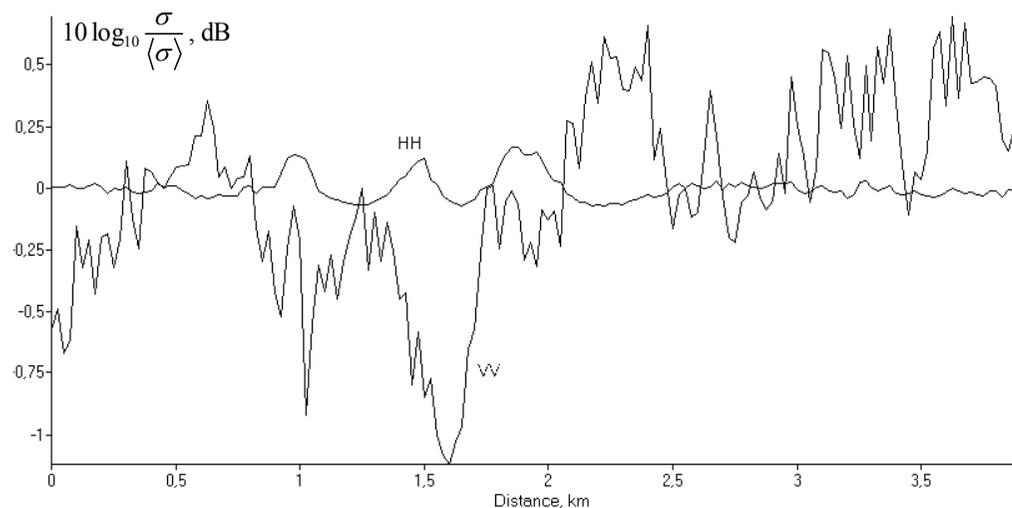
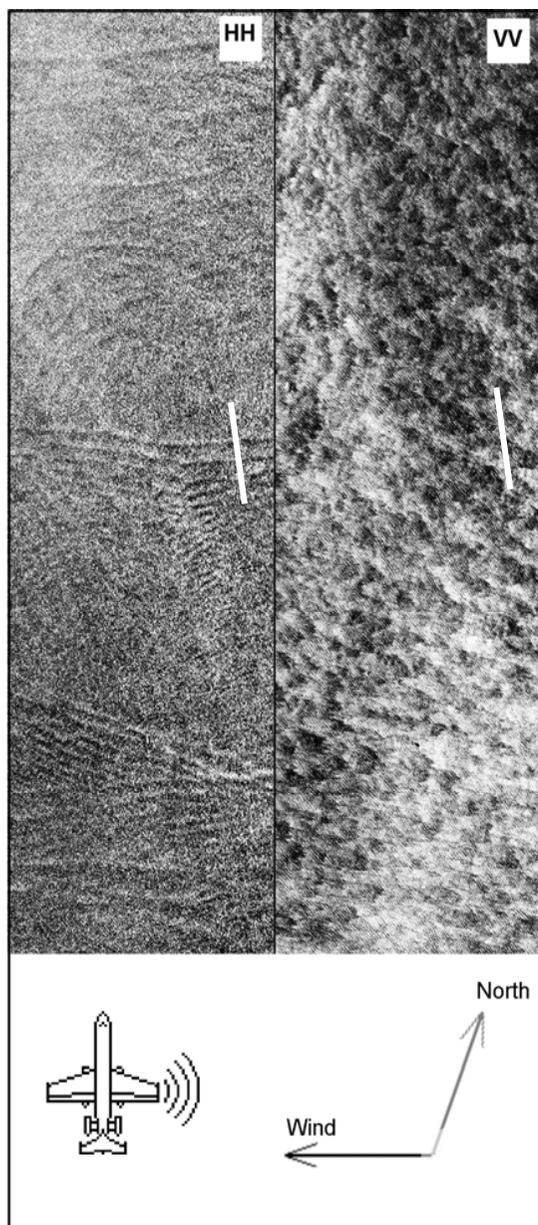
HH	VV
«Алмаз-1»,	ERS-1, -2
Seasat,	
JERS-1	
Radarsat-1	

Спутниковые радиолокаторы первого поколения обладали возможностью съемки на одной фиксированной поляризации зондирующего сигнала:

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПУТНИКОВЫХ РСА

	Single Co		Single Cross		Dual			Quad Rolarization
	VV	HH	VH	HV	VV+HH	VV+VH	HH/HV	VV+HH+HV + VH
Envisat	+	+			+	+	+	
Radarsat-2	+	+	+	+	+	+	+	+
TerraSAR-X	+	+	+	+	+	+	+	+
Cosmo-SkyMed	+	+	+	+	+			
ALOS-2 /PALSAR	+	+	+	+	+	+	+	+
Sentinel-1	+	+				+	+	

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (1)



Пульсации приповерхностного ветра, обусловленные активной конвекцией в пограничном слое, создают на изображении, полученном на ВВ поляризации, характерную высококонтрастную ячеистую структуру с пространственными масштабами 1.5-2 км.

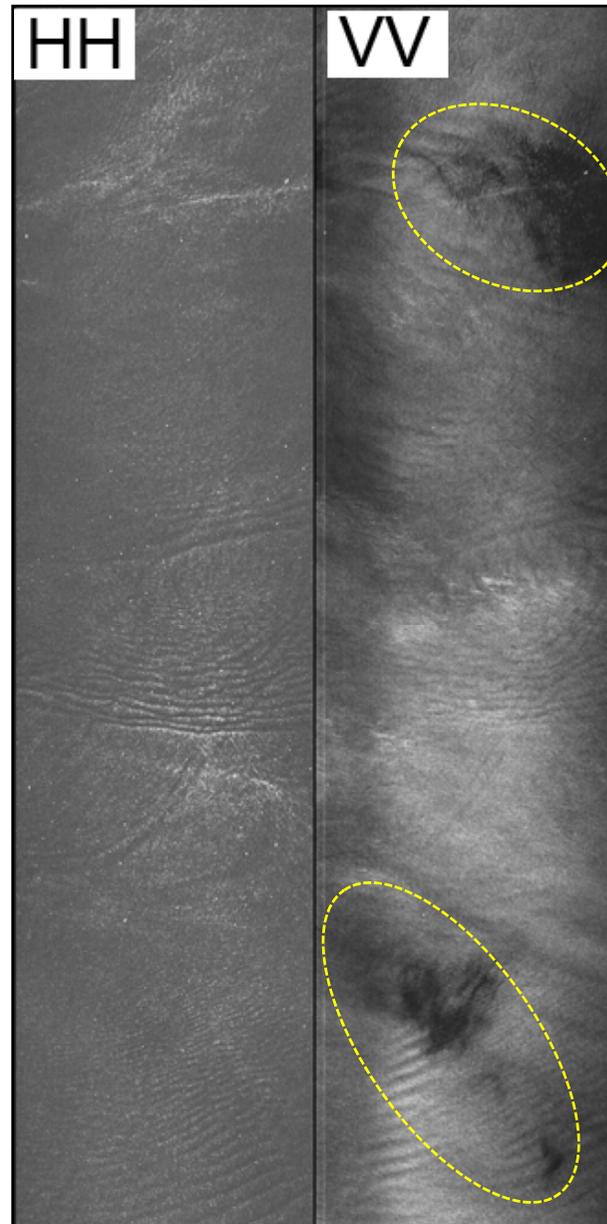
Поверхностные проявления внутренних волн в океане, наблюдаемые на ГГ поляризации, практически не идентифицируются на ВВ поляризации.

РЛСБО «Нить», Ки диапазон.

Радиолокационное изображение морской поверхности в условиях неустойчивой стратификации пограничного слоя атмосферы, полученное 16.07.92

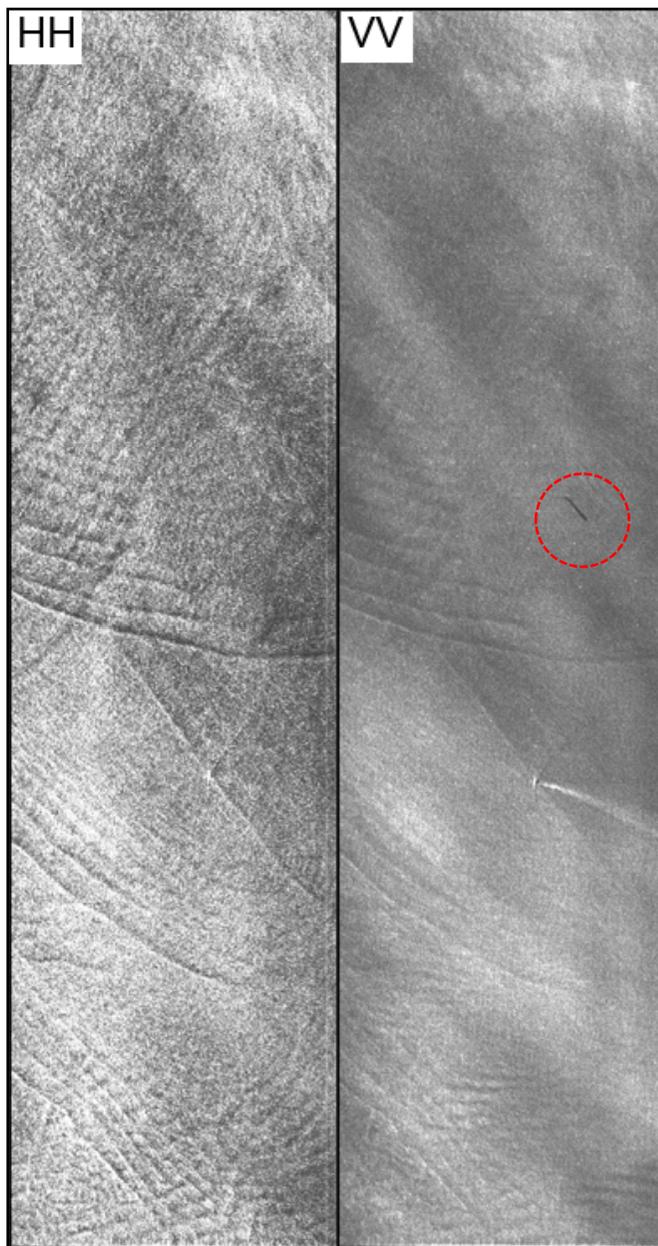
(Слева ГГ поляризация, справа ВВ поляризация).

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (2)



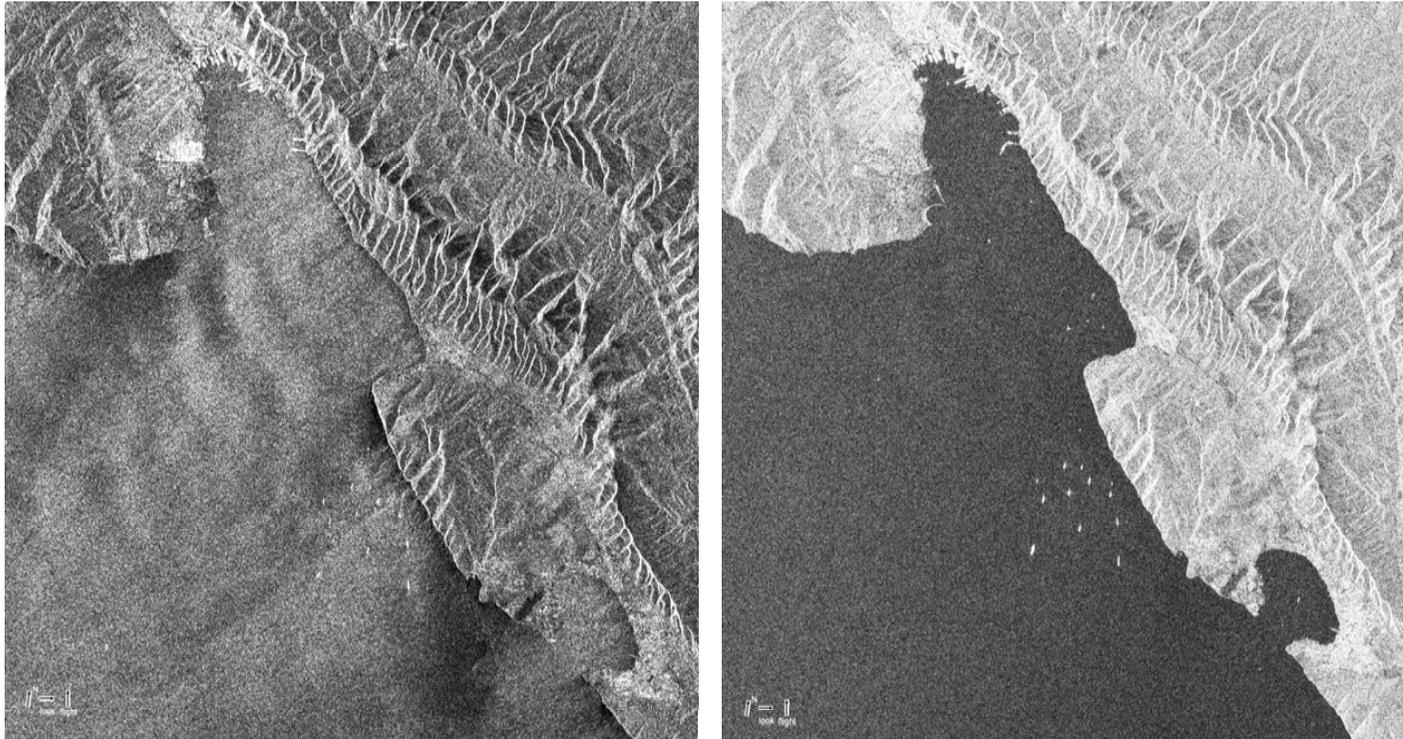
*РЛСБО «Нить», Ки диапазон.
Радиолокационное изображение
морской, полученное 21.07.92
(Слева ГГ поляризация, справа ВВ
поляризация).*

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (3)



*РЛСБО «Нить», Ки диапазон.
Радиолокационное изображение
морской поверхности, полученное в
условиях слабой неустойчивости
приводного слоя атмосферы 18.07.92
(Слева ГГ поляризация, справа ВВ
поляризация).*

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (4)



*Фрагмент изображения Envisat ASAR от 27.08.2005, 19:13 UTC.
Слева - VV-поляризация; справа - VH-поляризация*

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ОТ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ (1)

При обратном рассеянии

$$\sigma_p^r = \frac{4}{\pi} k^4 \Phi_\zeta(\mathbf{q}) Q_{pp}(\mathbf{n}_i) \quad q = 2k \sin \theta \quad \text{к-волновой вектор}$$

Пространственная спектральная плотность неровностей

$$\Phi_\zeta(\mathbf{q}) = \int K_\zeta(\mathbf{r}) e^{-i\mathbf{q}\mathbf{r}} d^2\mathbf{r}$$

$\mathbf{r}=(x,y)$ — радиус-вектор в горизонтальной плоскости

Корреляционная функция поверхностных неровностей

$$K_\zeta(\mathbf{r}) = \langle \zeta(\mathbf{R} + \mathbf{r}) \zeta(\mathbf{R}) \rangle$$

Зависящая от поляризации часть угловой зависимости определяется множителем

$$Q_{vv}(\mathbf{n}_i) = \frac{1}{16} \left| (\varepsilon - 1)(1 + R_h) \left[1 + R_h + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} (1 - R_v^2) \sin^2 \theta \right] \right|^2,$$

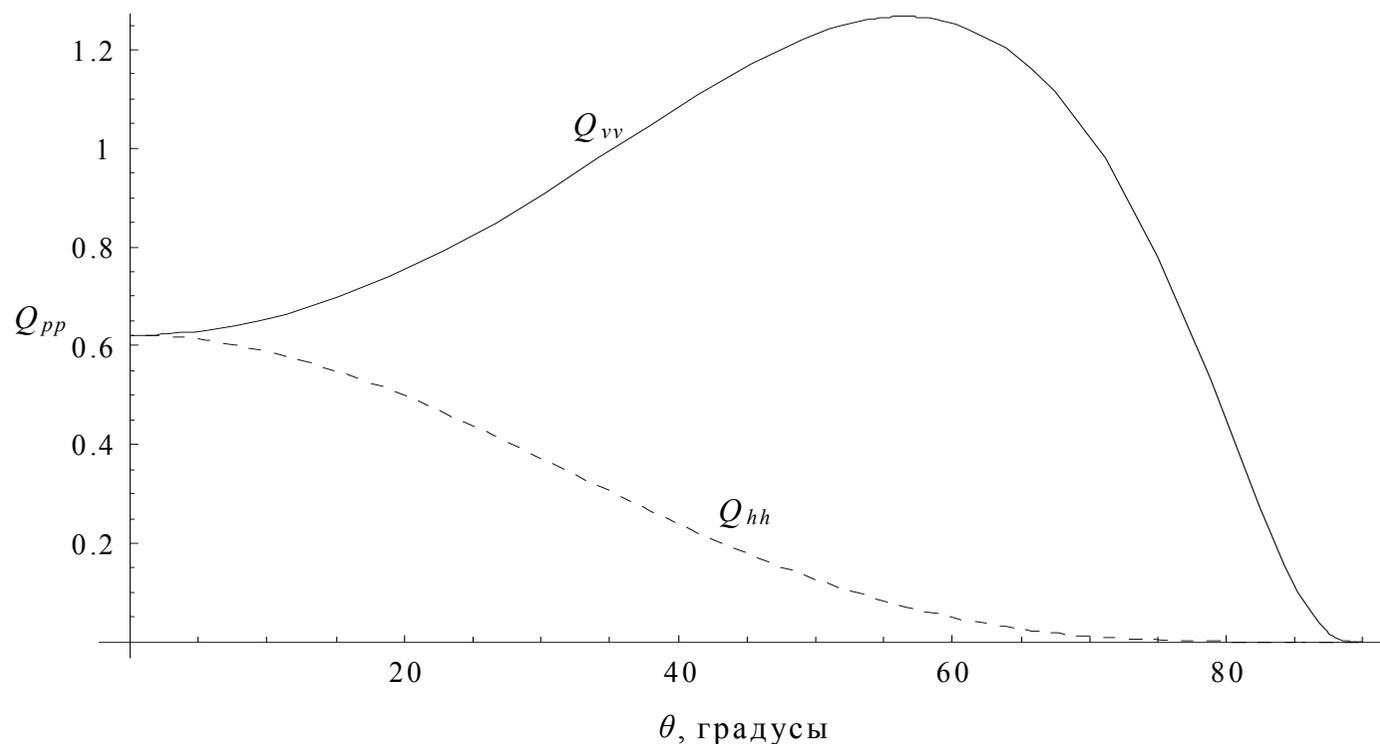
$$Q_{hh}(\mathbf{n}_i) = \frac{1}{16} \left| (\varepsilon - 1)(1 + R_h)^2 \right|^2$$

Френелевские амплитудные коэффициенты отражения

$$R_h(\theta) = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^2 \theta}}{1 + \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^2 \theta}}, \quad R_v(\theta) = \frac{\varepsilon - \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^2 \theta}}{\varepsilon + \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^2 \theta}}$$

ε — диэлектрическая проницаемость морской воды

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ОТ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ (2)

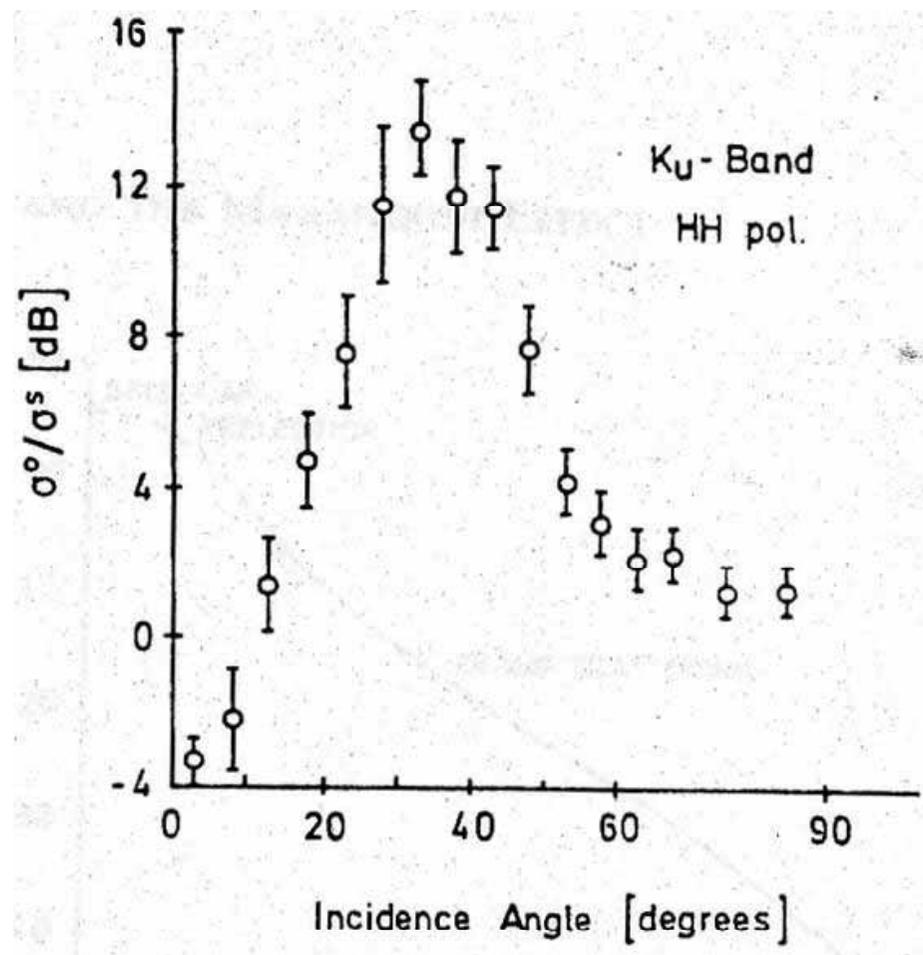


Угловая зависимость поляризационного параметра, характеризующего резонансное рассеяние на вертикальной (сплошная кривая) и горизонтальной (штрихованная кривая) поляризациях для морской воды

Для диэлектрической проницаемости морской воды $\varepsilon = 49.32 + 39.53 i$

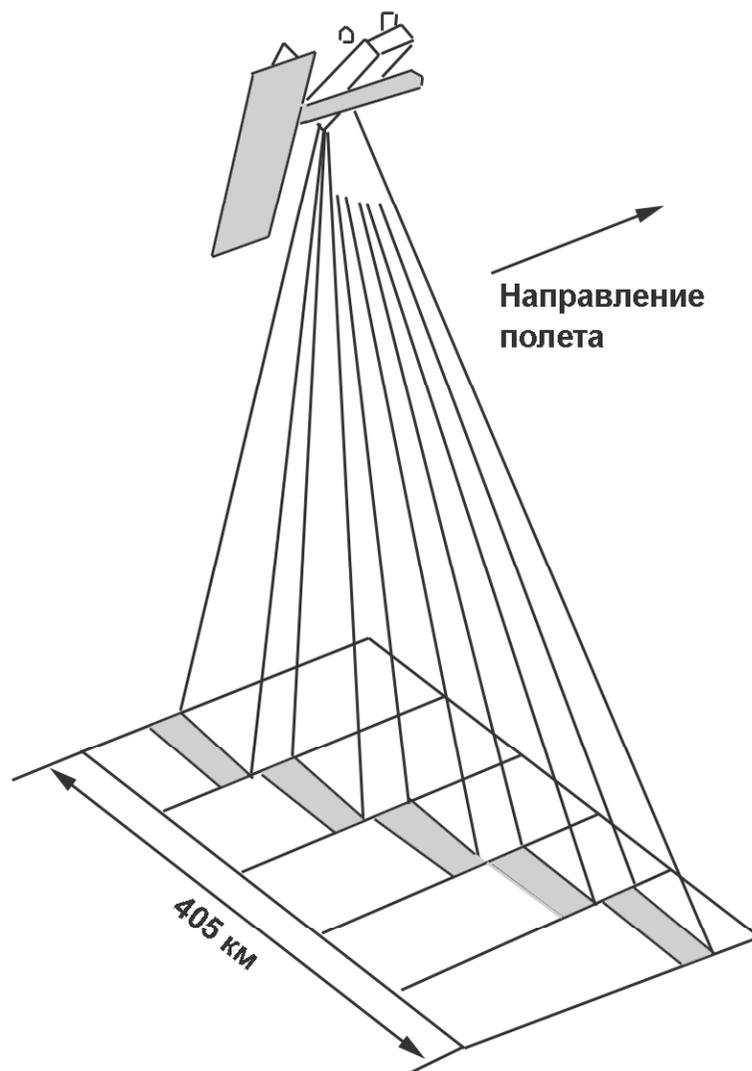
длины волны 3.2 см, температуры 10°C и солености 35 ‰

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ОТ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ (3)



V. Wismann, R. Theis, W. Alpers, and H. Hühnerfuss, "The damping of short gravity capillary waves by experimental sea slicks measured by a multifrequency microwave scatterometer," in Proc. OCEAN, vol. II, Victoria, Canada, 1993, pp. 342–347.

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ОТ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ (4)



ASAR Envisat

$$15 < \theta < 45$$

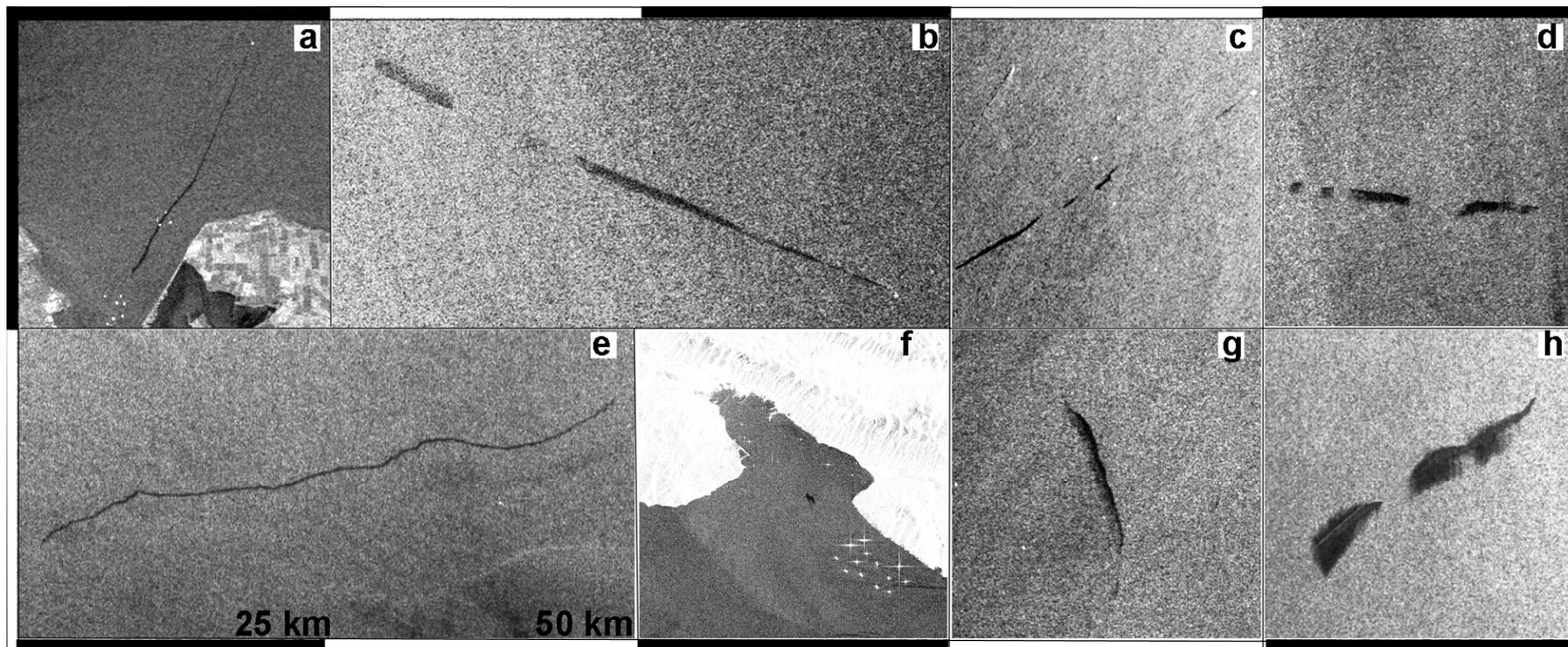
СПУТНИКОВЫЕ РСА (КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ)

ИСЗ	SEASAT	ERS-1/2	«Алмаз»	JERS-1	Envisat	RADARSAT-1	RADARSAT-2	Terra-SAR-X	Sentiinel 1	ALOS-2 /PALSAR	Cosmo ScyMed
Страна	США	ЕС	СССР	Япония	Европа	Канада	Канада	Германия	ЕС	Япония	Италия
Год вывода на орбиту	1978	1991/1995	1991	1992	2002	1995	2007	2008	2014	2014	2007, 2007, 2008, 2010
Диапазон	L	C	S	L	C	C	C	X	C	L	X
Частота зондирующего сигнала (ГГц)	1.275	5.25	3.1	1.275	5.3	5.3	5.3	9.65	5.4	1.24	3.1
Длина волны зондирующего сигнала (см)	23.5	5.66	9.6	23.5	5.66	5.66	5.66	3.13	5.54	22.9	9.6
Поляризация	ГГ	ВВ	ГГ	ГГ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ
Угол падения (градусы)	20	23	17-62	39	15-45	20-50	20-60	20-55	20-46	8-70	20-60
Ширина полосы обзора по наземной дальности (км)	100	100	30-60	75	56-400	50-500	18-500	10/30/100	80/100/250	25/50/70/ 350/ 490	10/30/40 /100/200
Пространств. разрешение (м)	25	25	25	18	25-75	8-100	3 -100	1/3/16	5/20/40	1/3/6/10/60/100	1/3/5/30 /100

На сегодняшний день основной метод диагностики нефтяных загрязнений – экспертная оценка

- Учитывается комплекс факторов: ветровые условия, состояние волнения, присутствие других океанических явлений, проявляющихся в виде сигнатур, подобных нефтяным пятнам.
- Идентификация нефтяных пятен по их геометрическим и текстурным признакам, а также с учётом наличия поблизости судов – потенциальных источников загрязнения.
- Для улучшения надёжности идентификации пятен активно привлекаются метеоданные и все доступные спутниковые данные.

ПРИМЕРЫ РЛИ-ОБРАЗОВ СУДОВЫХ СБРОСОВ

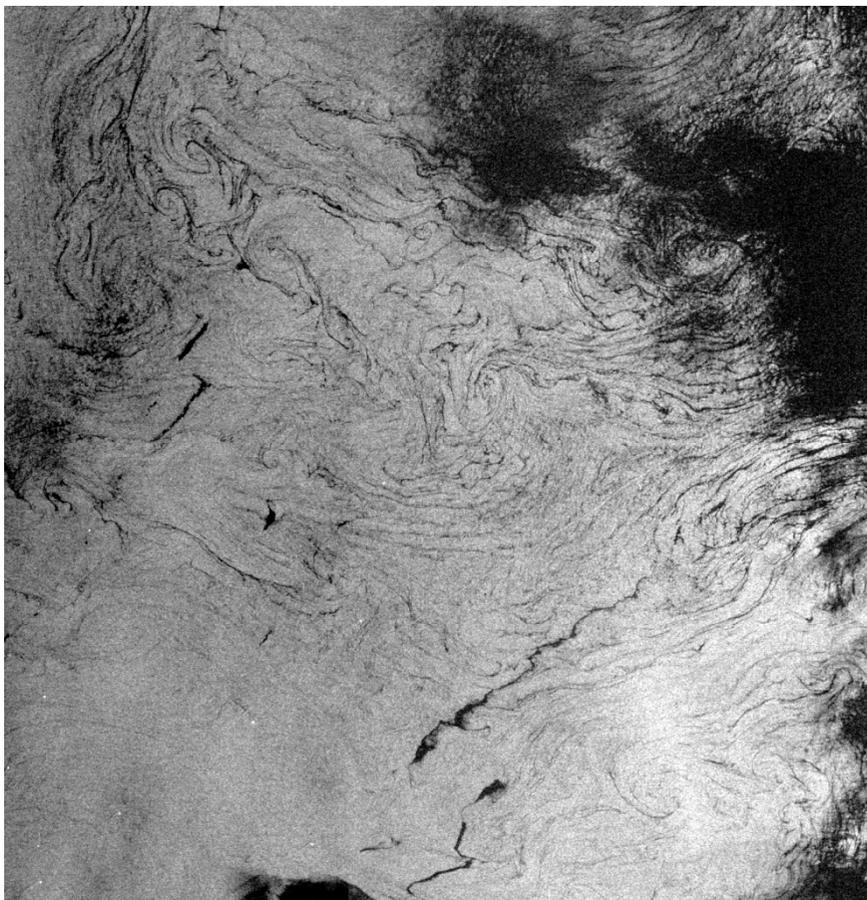


РЛИ-изображения нефтяного пятна на морской поверхности зависят от внешних условий.

Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется большим числом параметров, таких как скорость ветра, высота волн, количество и тип разлитой нефти.

Форма разлива будет разной в случаях выброса нефти из стационарного и движущегося объекта, а также для разного количества нефти, для разной динамики ветра и течения между моментами разлива и получения изображения.

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (1) БИОГЕННЫЕ ПЛЕНКИ



Фрагмент ASAR Envisat изображения (102x104 км),
полученного 24.04.11 в 08:11 UTC с разрешением в точке 75
м в южной части Черного моря;

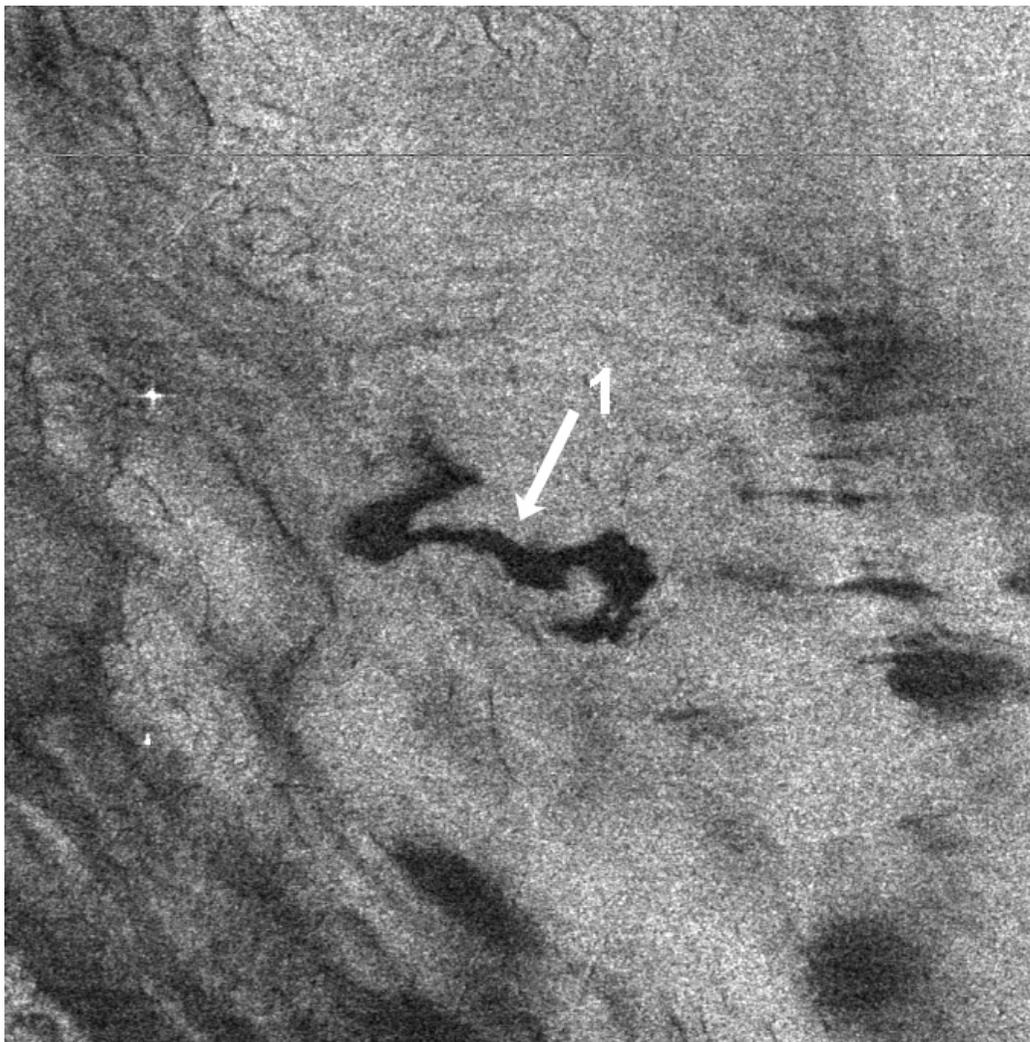
Биогенные пленки - результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом, фито и зоопланктона, а также бактерий.

Они образуются в море при сложных биохимических реакциях в процессе жизнедеятельности и разложения морских организмов, и не могут считаться загрязнениями в прямом смысле слова.

Подобные биогенные пленки чувствительны к взаимодействию с поверхностными течениями и принимают геометрическую форму, отвечающую локальной структуре циркуляции.

Органические пленки сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превышает 6 - 7 м/с. После прекращения действия сильного ветра органические вещества снова выносятся на поверхность и образуют слики.

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (2) ОБЛАСТИ ИНТЕНСИВНОГО ЦВЕТЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА



Envisat ASAR
June 12, 2004 at 20:16
East Baltic Sea

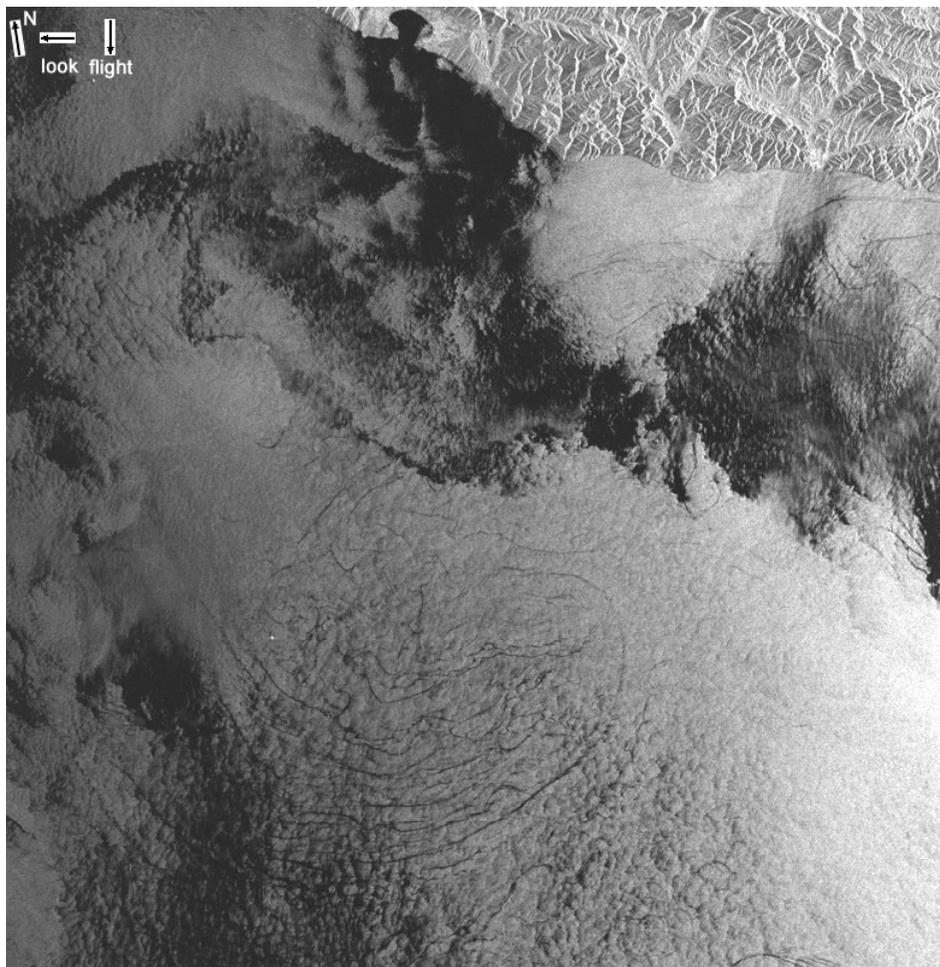
Comment

The image is taken under low wind and small waves. Patch (1) is due to algal bloom

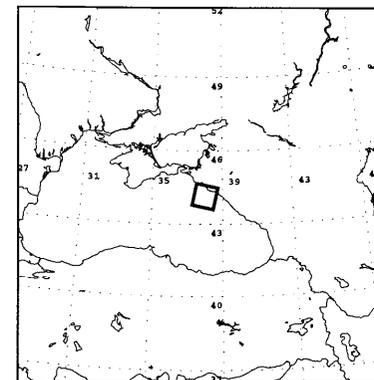
Image

surface geometry : 51*51 km
image size: 680pxl*680pxl

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (3) АТМОСФЕРНЫЕ /ОКЕАНИЧЕСКИЕ ФРОНТЫ

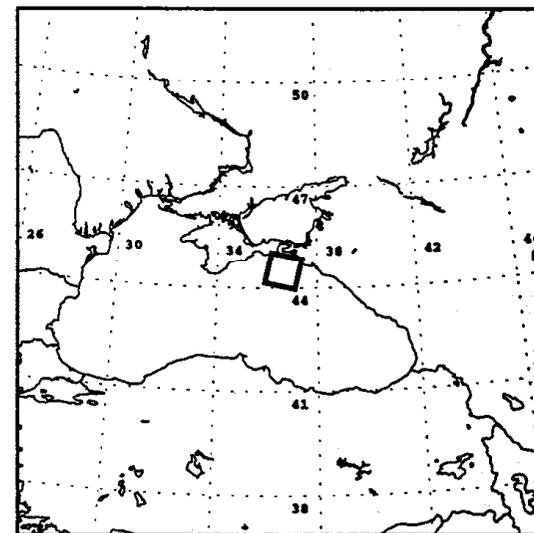
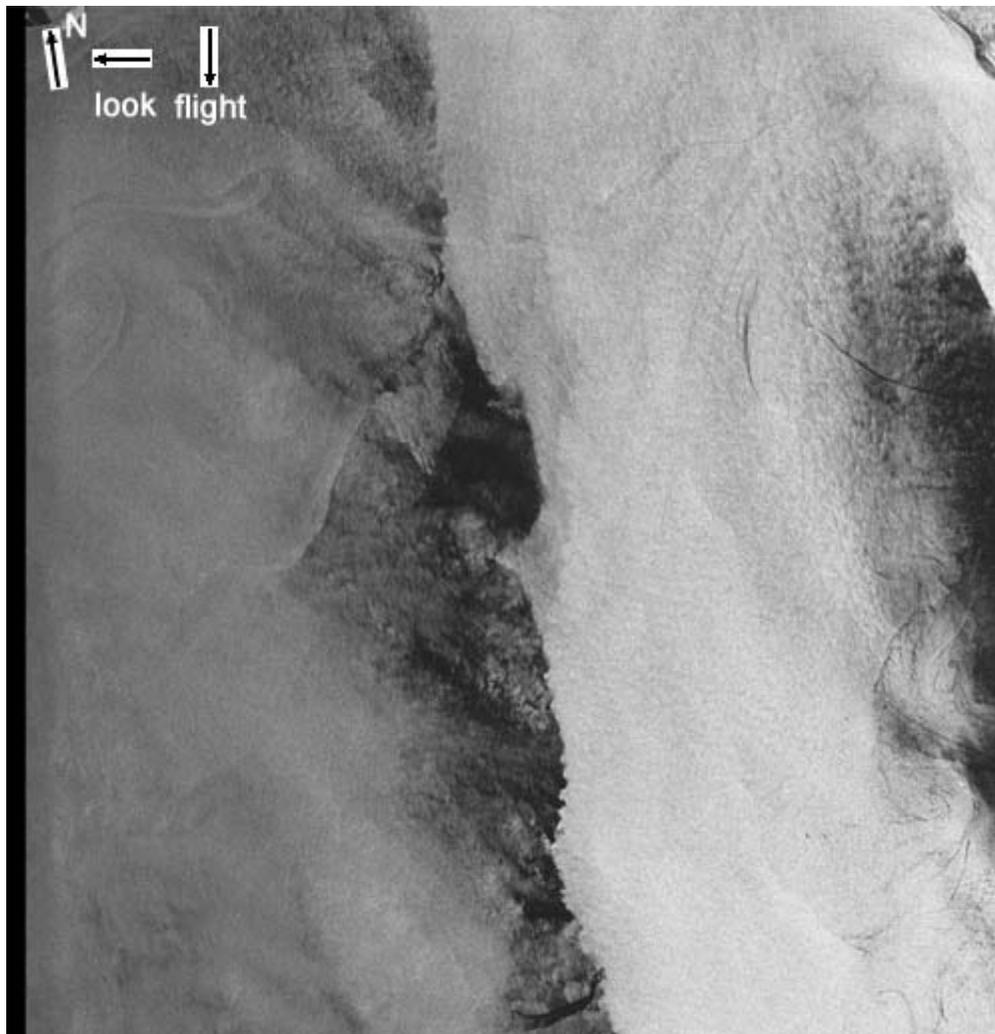


ERS SAR VV-pol, $\theta=23^\circ$
16.08.02/08:14



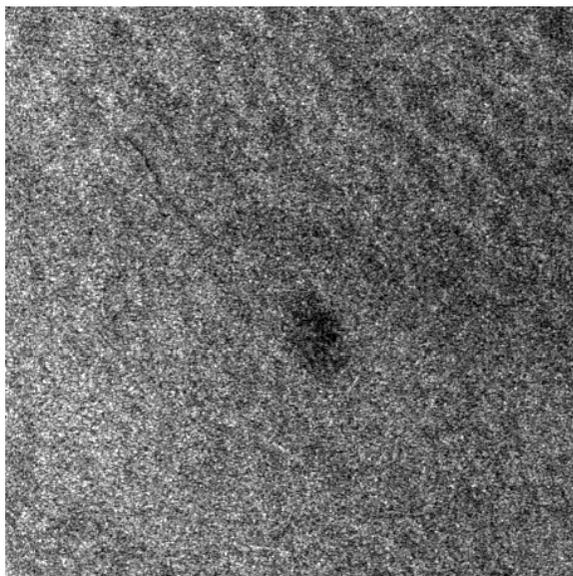
Hydrometeorological data:
wind: speed 1 m/s, dir. 170°;
temperature: air 25,4°C, water
26,0°C;
surface waves: SW, 2 points

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (4) АТМОСФЕРНЫЕ /ОКЕАНИЧЕСКИЕ ФРОНТЫ



ERS-2 SAR VV-pol, $\theta=23^\circ$
04.10.99 / 08:22

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (5) МОЛОДОЙ ЛЕД



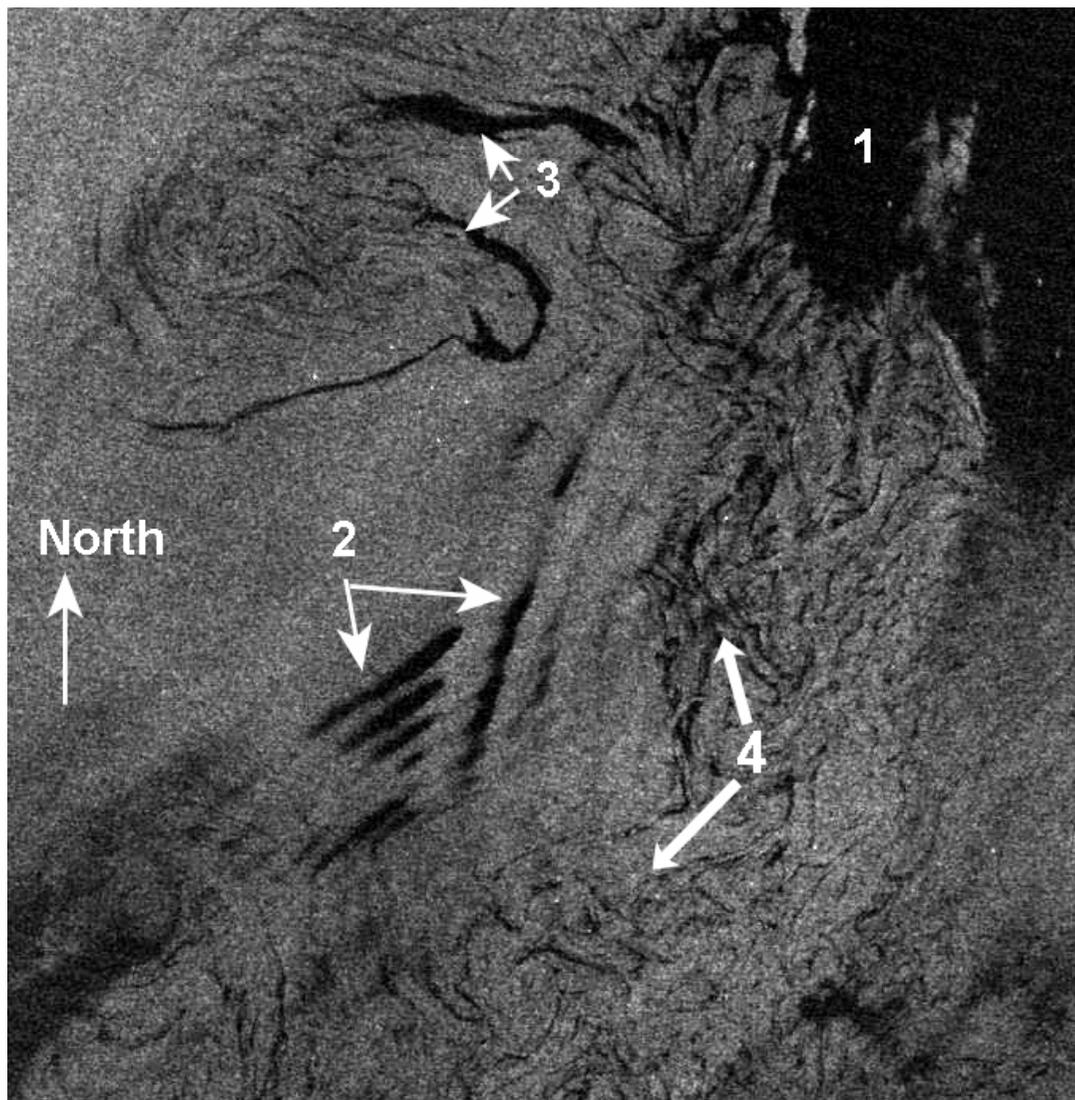
02 февраля 2010, 20:10 GMT

В отдельных случаях, области пониженного рассеяния, связанные с гашением ряби во время образования молодого льда, имеют такой же характер, как и при нефтяном загрязнении



05 февраля 2010, 09:20 GMT

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (6)



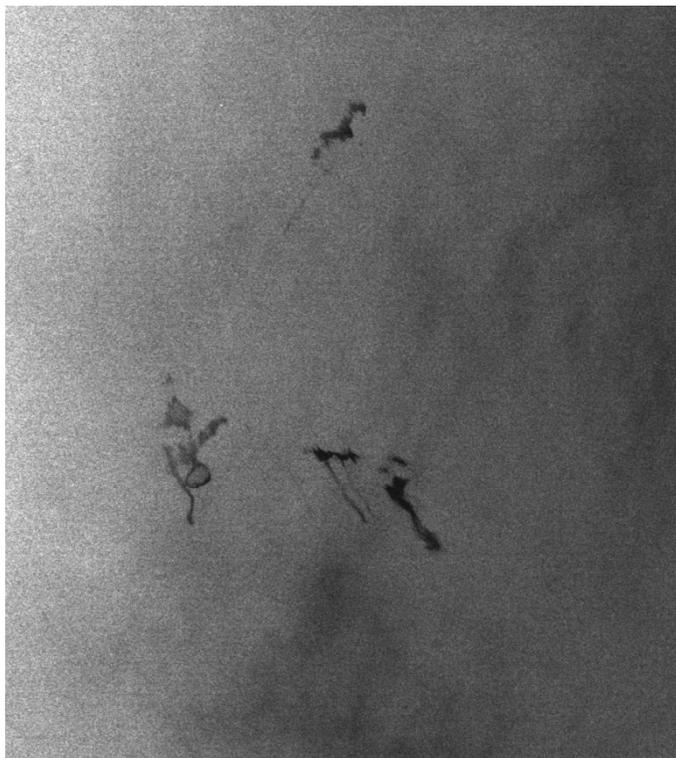
Envisat ASAR
April 10, 2005 at 09:00
East Baltic Sea

1. an area of calm wind,
2. two interacting packets of internal waves in the near-surface layer of the atmosphere,
3. algal bloom,
4. an area of increased biogenic productivity

Image

surface geometry : 50*50 km
image size: 680pxl*680pxl

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (9)



Фрагмент ASAR Envisat изображения (79x88 км), полученного 09.06.11 в 19:43 UTC в западной части Черного моря

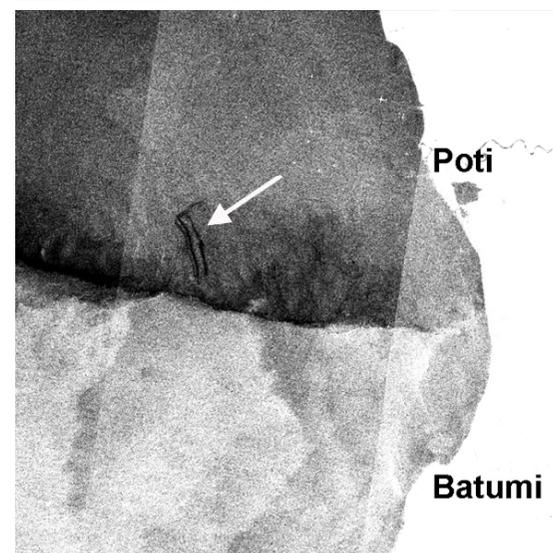
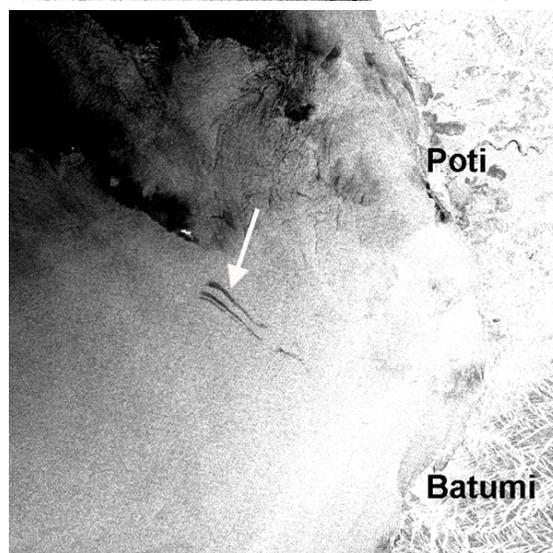
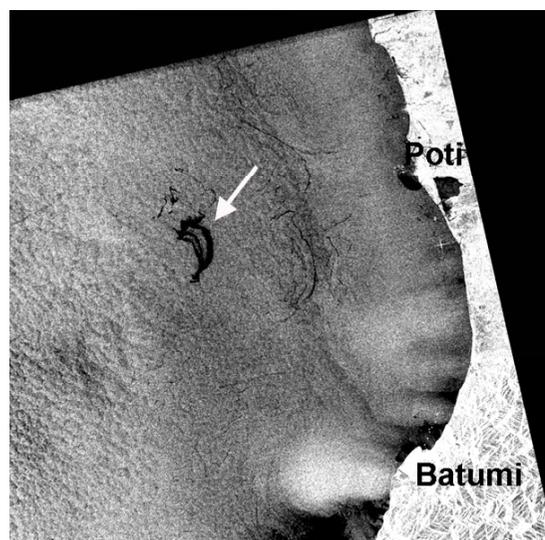
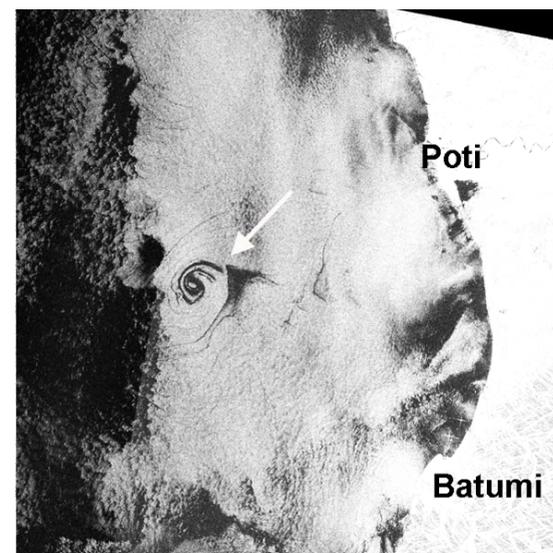
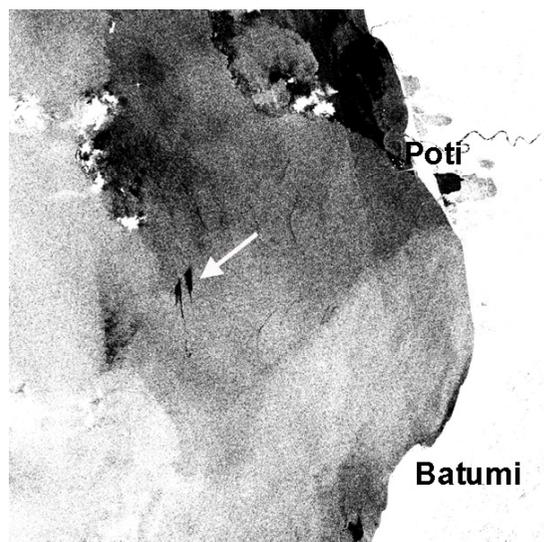
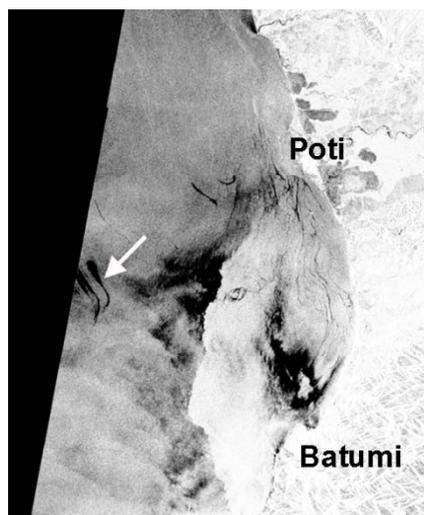


Фрагмент ASAR Envisat изображения (70x50 км), полученного 07.02.09 в 07:54 UTC в глубоководной части Черного моря южнее Крыма



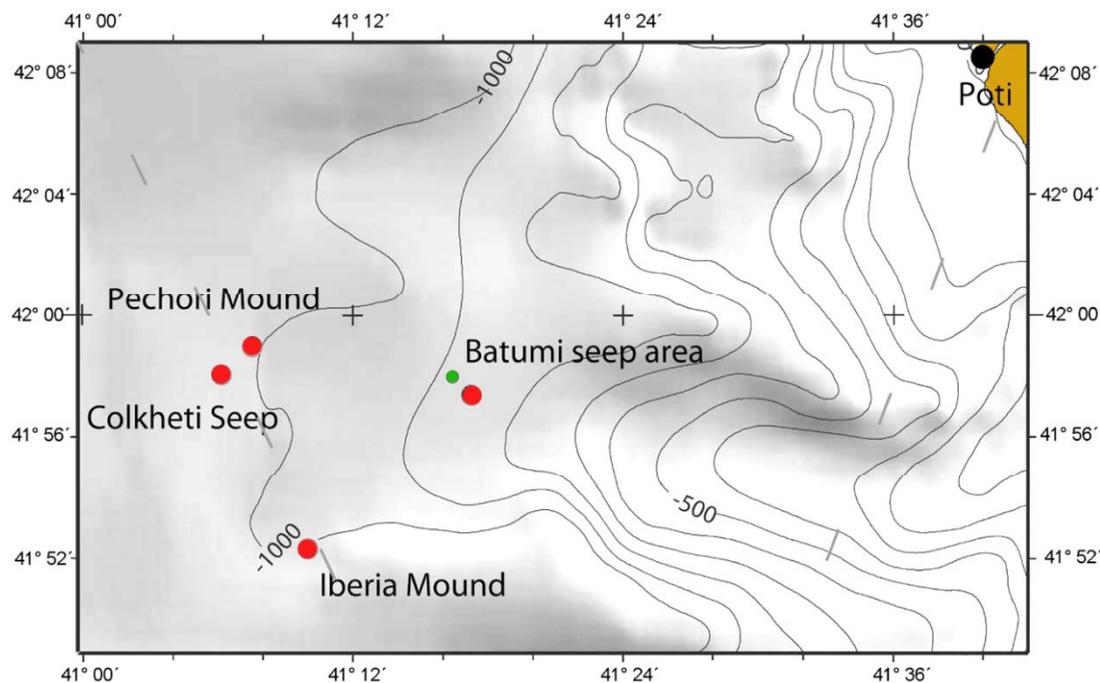
Фрагмент ASAR Envisat изображения (83x55 км), полученного 11.01.11 в 19:02 UTC в восточной части Черного моря.

НЕФТЕСОДЕРЖАЩИЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛЕНКИ В РАЙОНАХ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВЫХОДОВ УГЛЕВОДОРОДОВ НА МОРСКОМ ДНЕ (1)



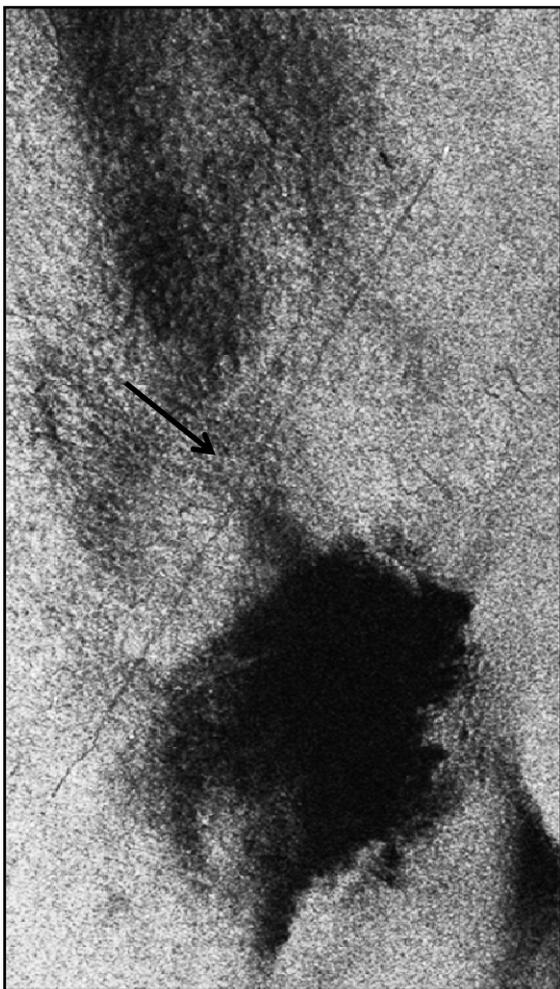
Примеры проявлений сликовых структур над акваторией грузинского континентального склона

НЕФТЕСОДЕРЖАЩИЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛЕНКИ В РАЙОНАХ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВЫХОДОВ УГЛЕВОДОРОДОВ НА МОРСКОМ ДНЕ (2)



Батиметрическая карта морского дна в грузинском секторе Черного моря с нанесенными на нее исследованными метановыми сипами (Reitz et al, 2011)

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (8)



Фрагмент (5 км x 25 км) Envisat ASAR изображения пленочных следов за кораблями, полученного 17.08.2010 в 19:34 UTC.

Длина следа достигает 50 км.

Образованию на морской поверхности органической плёнки, состоящей из микроводорослей фитопланктона, способствует флотация – механизм извлечения из воды различных веществ с помощью мелких пузырьков воздуха.

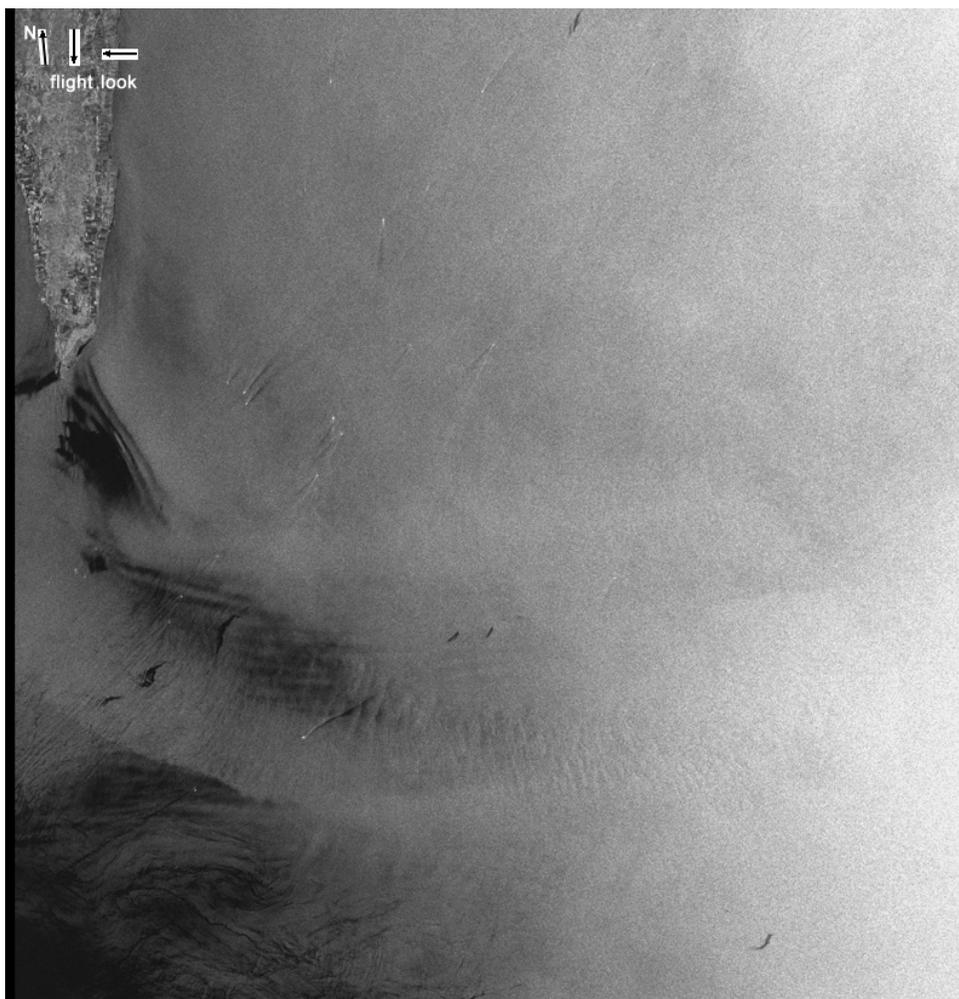
При движении судов образуется большое число воздушных пузырьков различных размеров. Крупные пузырьки всплывают быстро, а основная масса с размерами менее 1 мм всплывают со скоростью 1-10 см/с. Для крупнотоннажных судов с осадкой 10-15 метров время всплытия может составлять 20-25 и более минут. Поэтому плёночный след за кораблем проявляется на поверхности моря примерно через 25 минут после прохождения судна и восстановления поверхностного ветрового волнения.

При соприкосновении воздушного пузырька с гидрофобной частью клетки фитопланктона плёнка воды стягивается силами поверхностного натяжения и происходит присоединение клетки фитопланктона к пузырьку. Далее клетка всплывает вместе с пузырьком, и после разрушения последнего остаётся в пограничном слое воды.

При большом количестве мелких (менее 1 мм) медленно всплывающих пузырьков, на морской поверхности будет образовываться плёнка из планктона и продуктов его жизнедеятельности, достаточная для заметного гашения гравитационно-капиллярных волн и образования выглаженных полос - сликов.

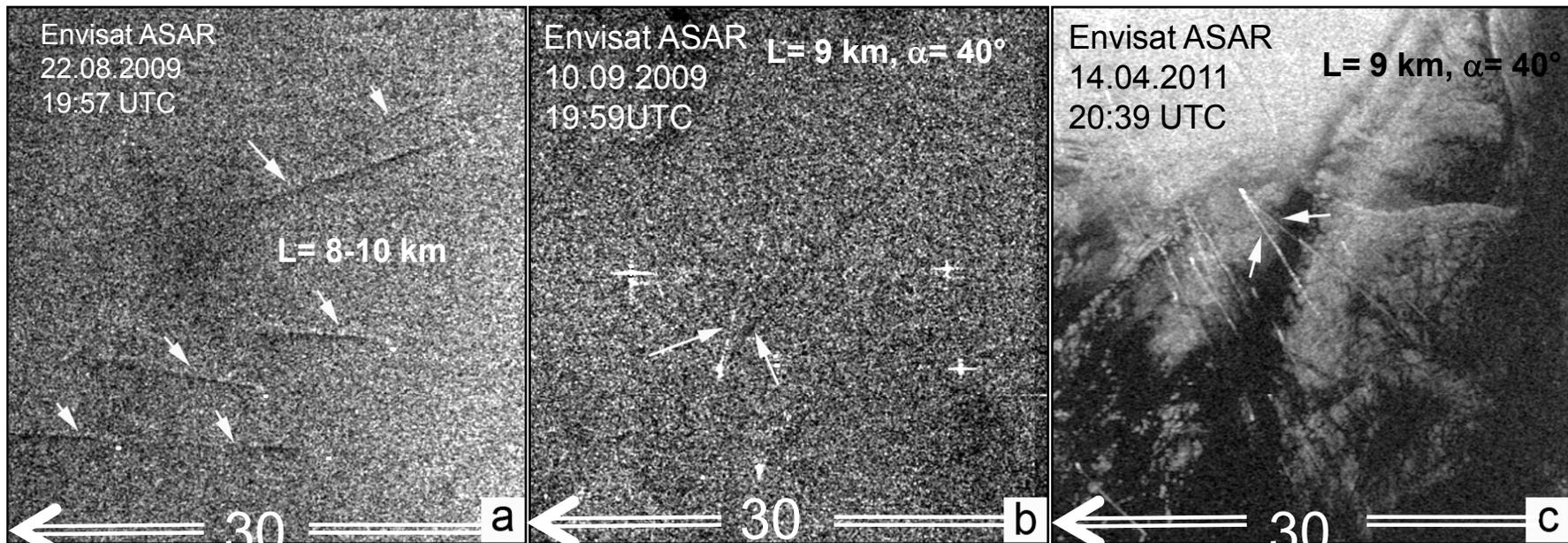
РЛИ получено над западной частью Черного моря вблизи дельты Дуная, где воды отличаются повышенным содержанием хлорофилла и взвесей.

ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (7)



Hydrometeorological data:
wind: dir. 285°, speed 2.1 m/s
temperature: air 19.2°C, water
21.4°C

ERS-2 SAR VV-pol, $\theta=23^\circ$
06.18.99 / 09:53

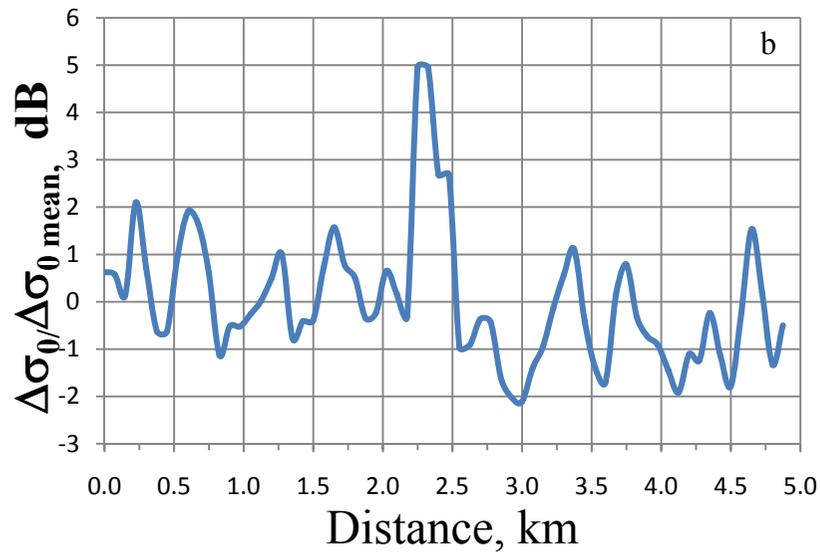


Traditional classification of surface ship wakes manifestations in satellite SAR images:

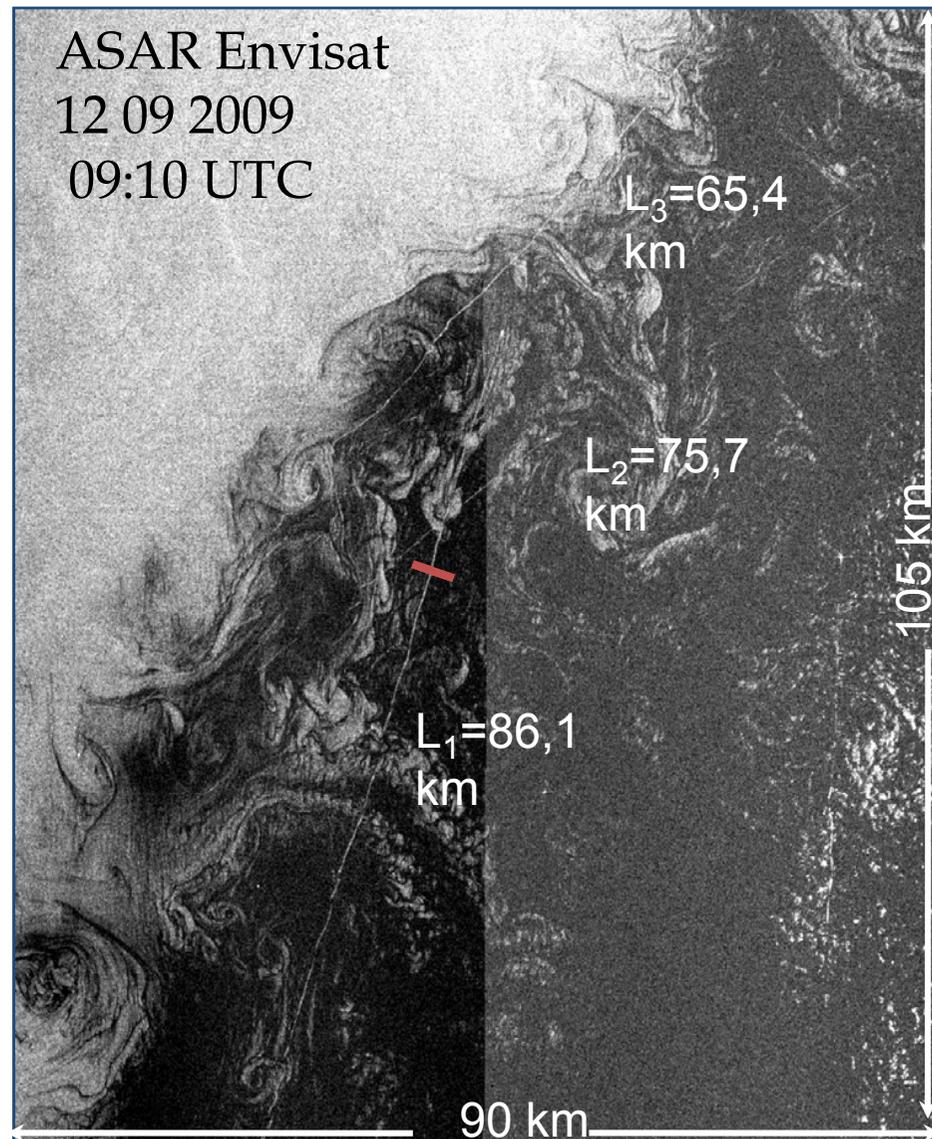
(a) dark trailing centreline region (turbulent wake);

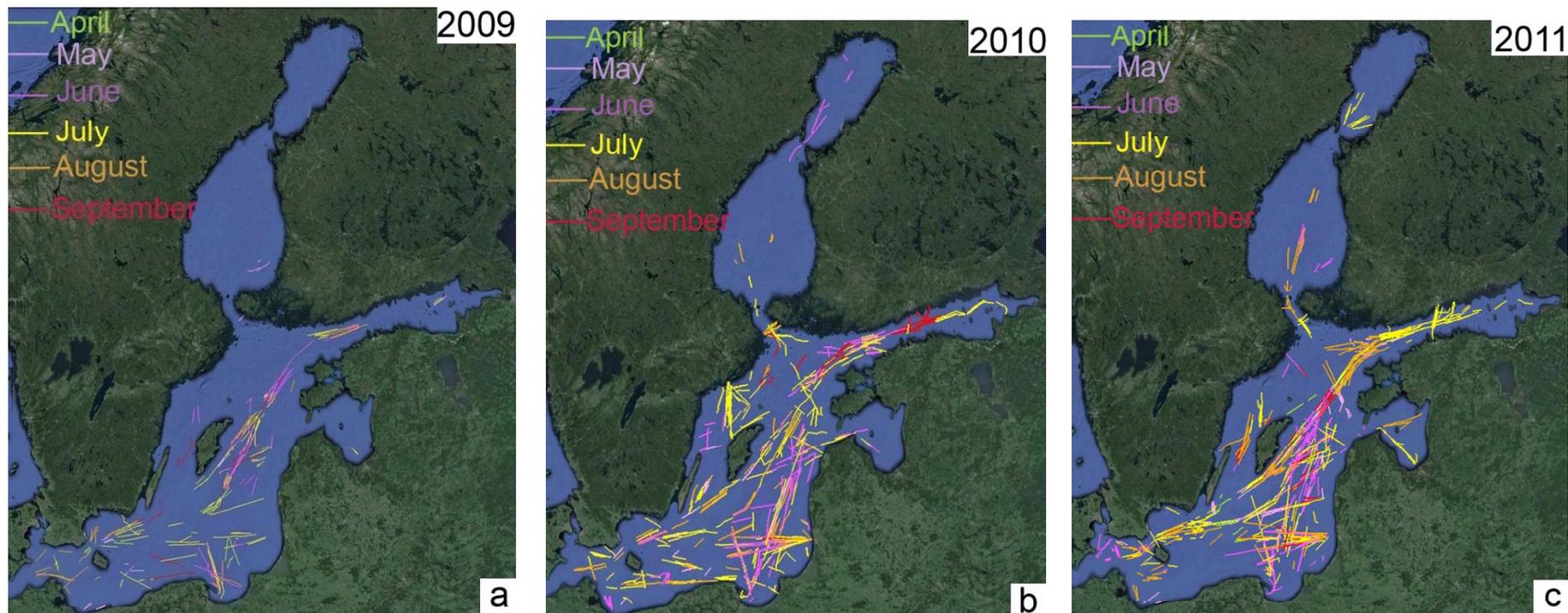
(b, c) V-wakes (the Kelvin wake).

Characteristic lengths – up to tens of kilometers. Life span – from tens of minutes up to one hour

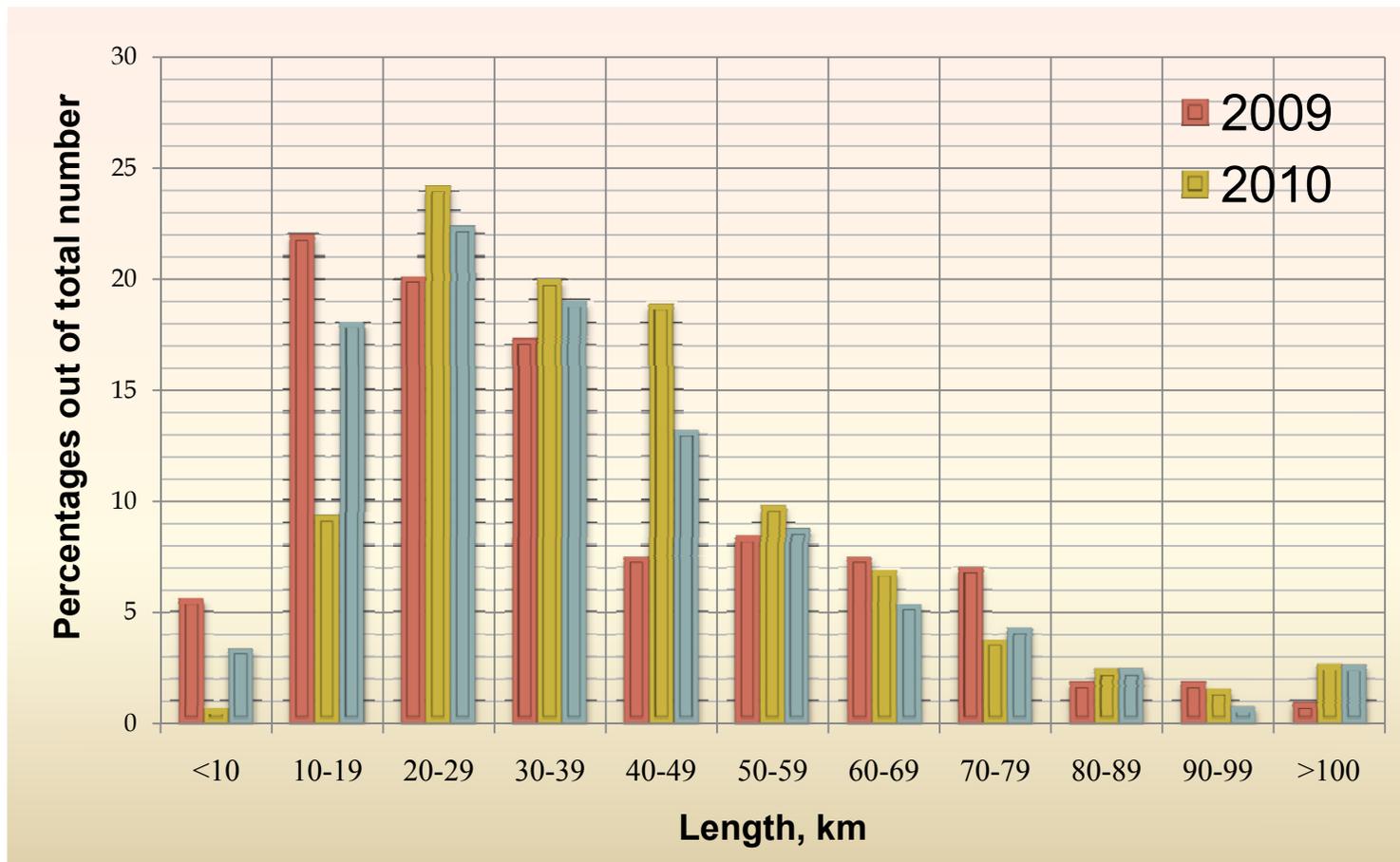


- Manifested in radar images as relatively narrow strips of enhanced radar signal.
- Stretch along the ship track for up to 200 km.
- No noticeable expansion of the wake in the direction opposite to the ship motion.
- Approximate life span up to 6 hours.

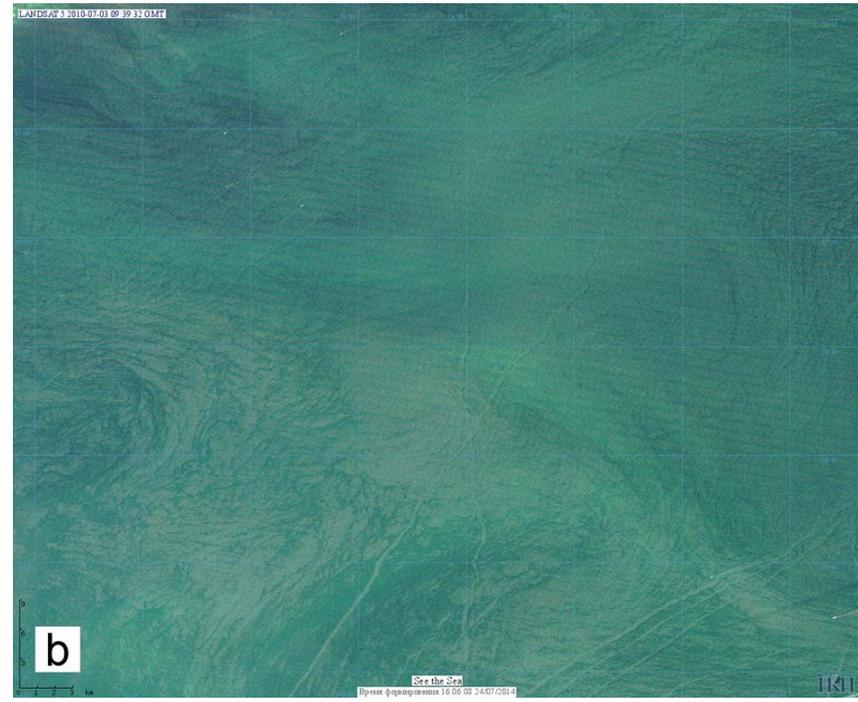
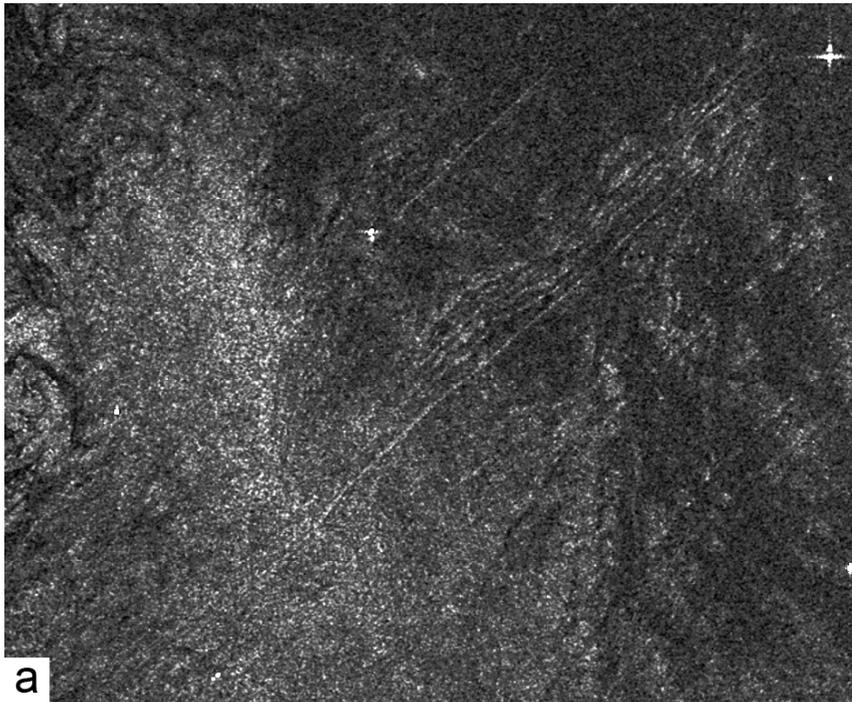




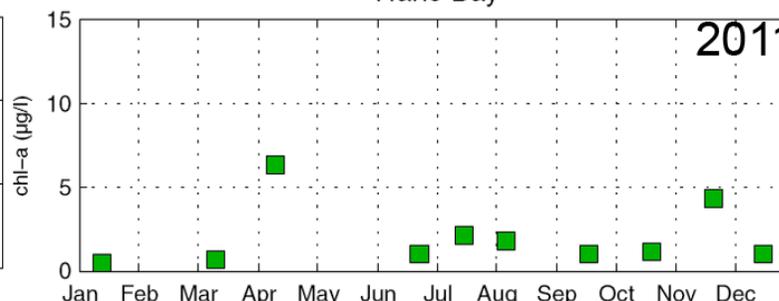
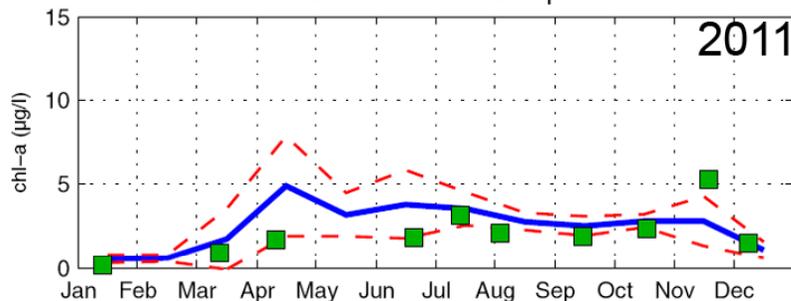
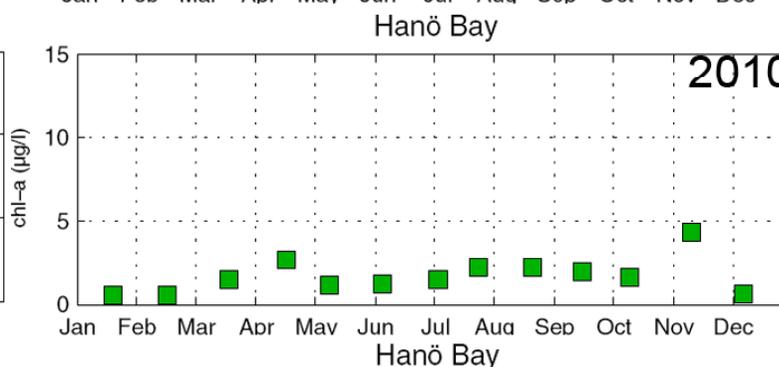
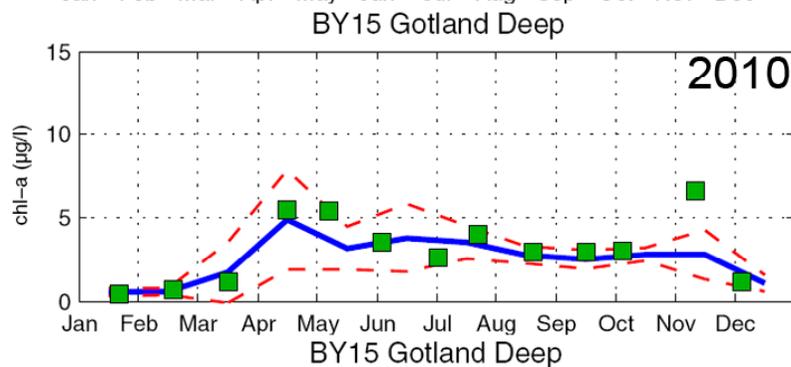
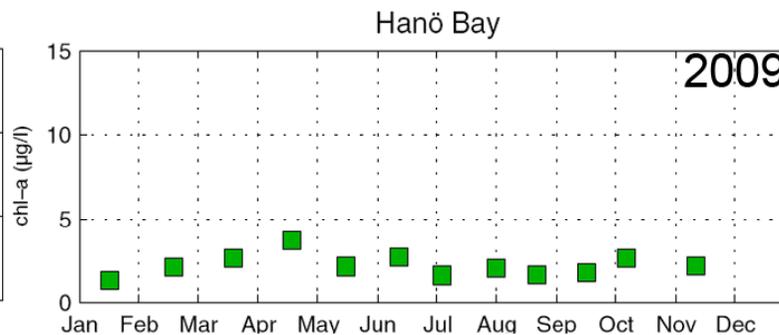
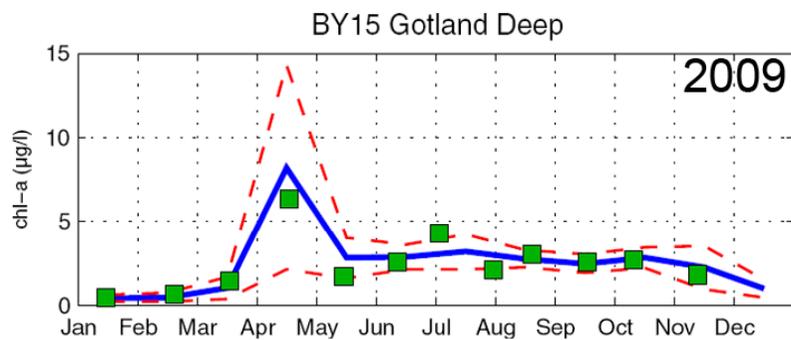
Generalized maps of the long-lasting ship wakes detected in radar images of the Baltic Sea



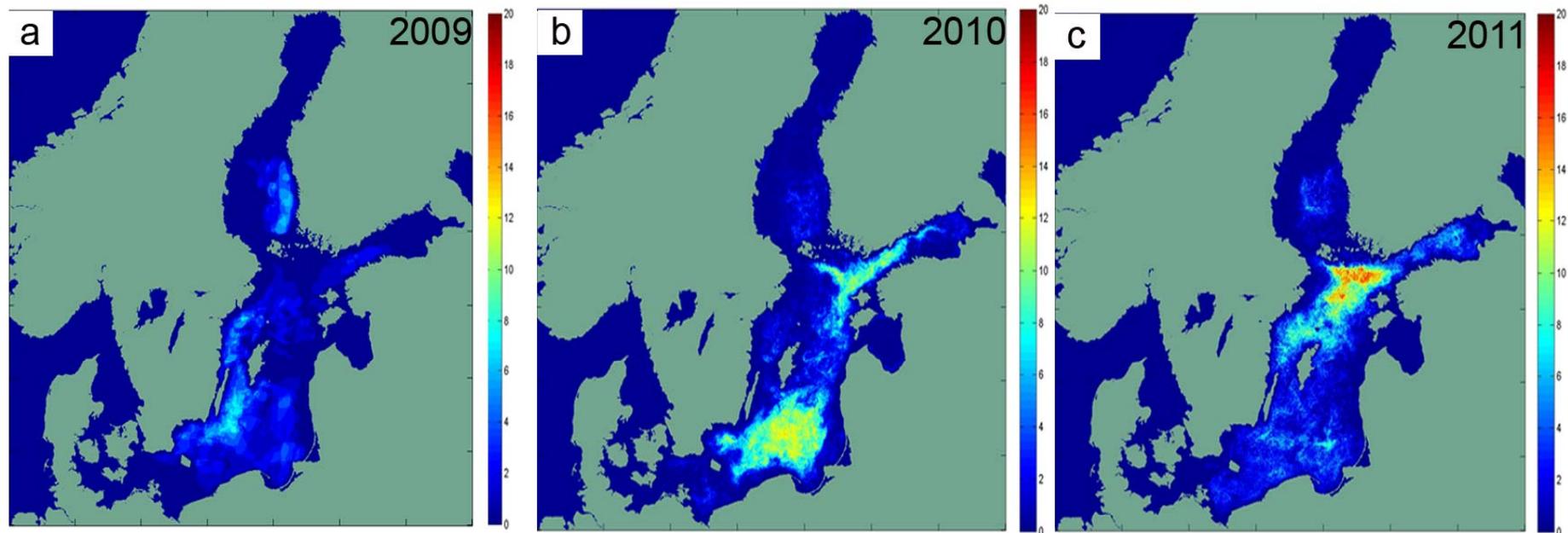
Length distribution of long-lasting ship wakes detected in radar images of the Baltic Sea in 2009, 2010 and 2011



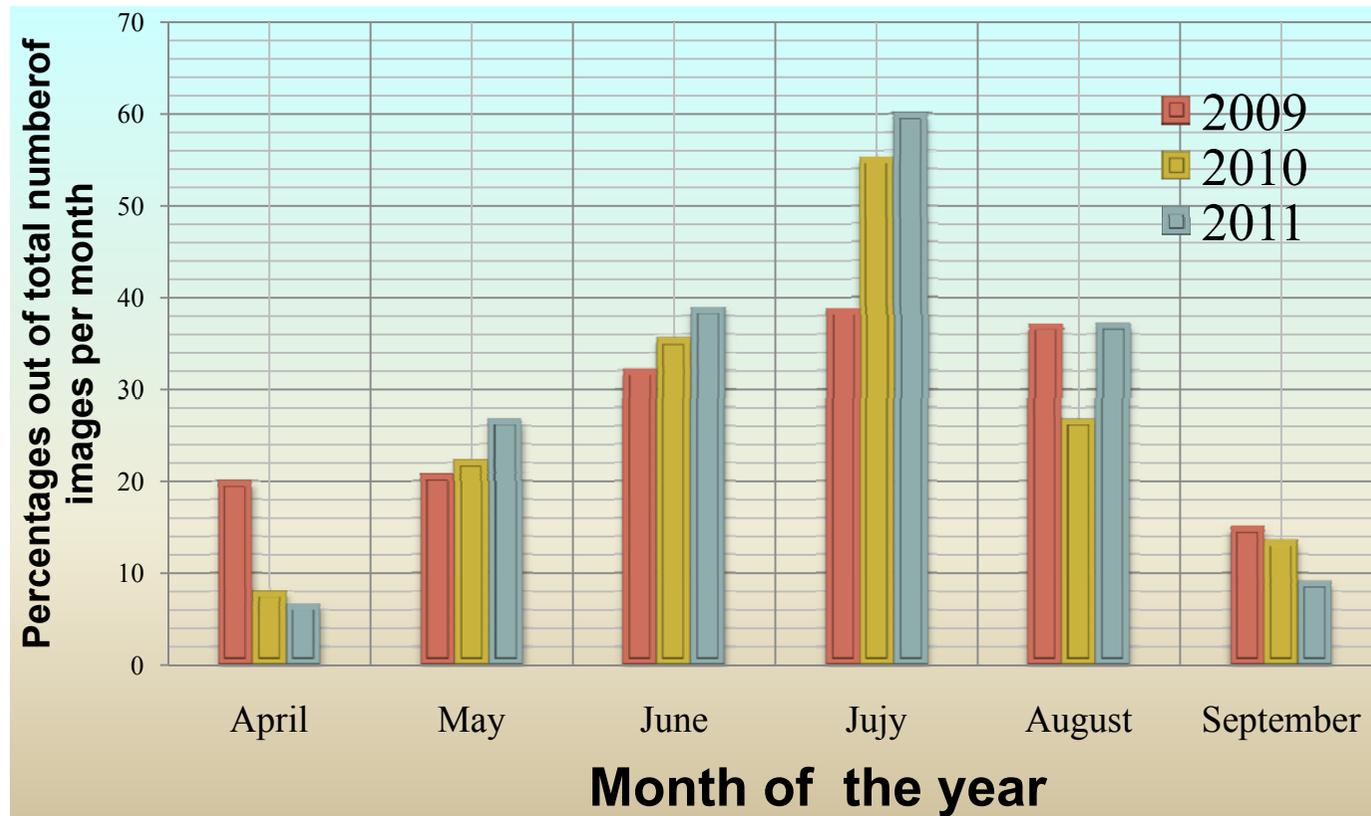
- a) Long-lasting ship wakes manifestations in Envisat ASAR image taken over the Baltic Sea on 02.07.2010 at 20:27 UTC ;
- b) RGB composite of Landsat -5 TM image (3; 2; 1bands) taken over the same area on 03.07. 2010



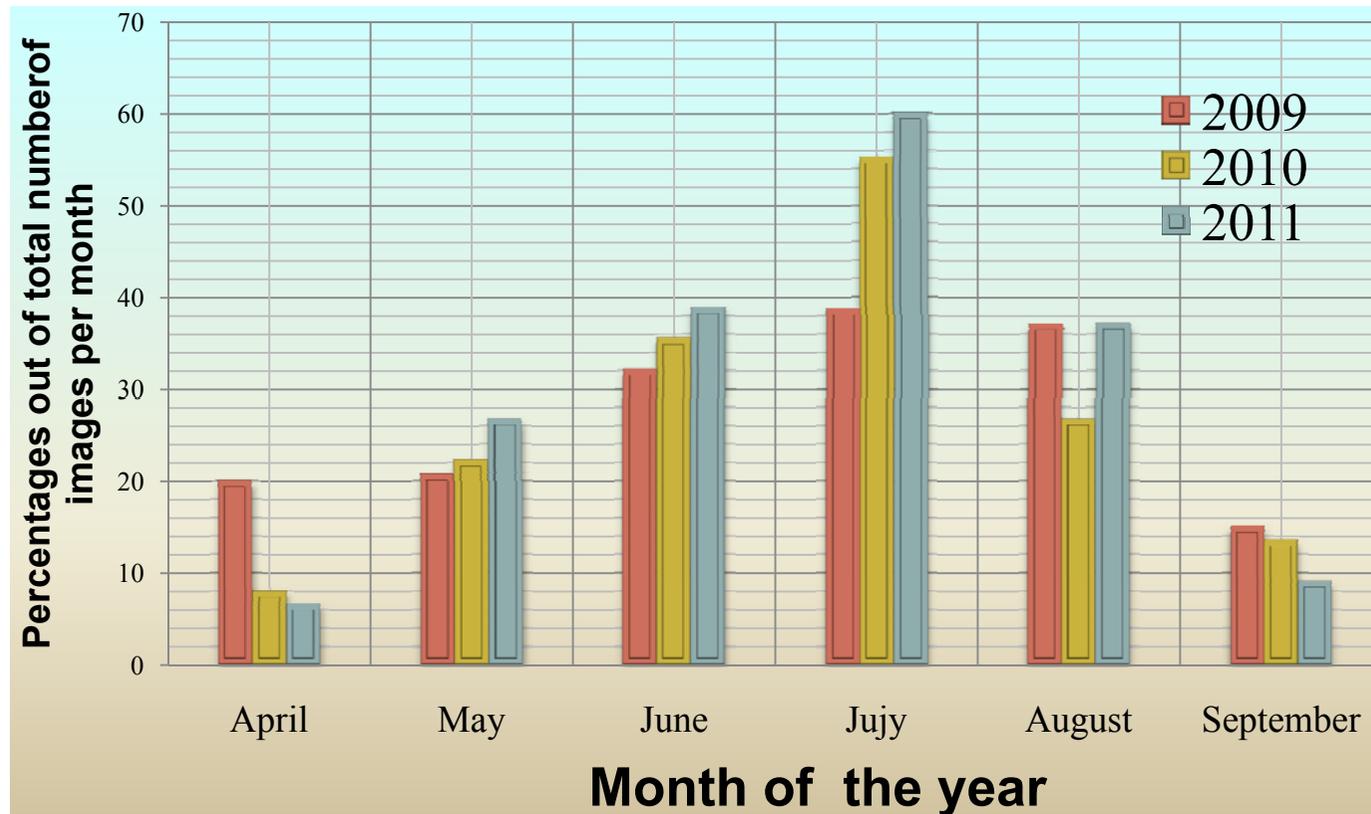
Chlorophyll a mean value in the layer from 0 to 20 m: a) during 2009; b) during 2010; c) during 2011 (by the Oceanographic Unit of SMHI data)



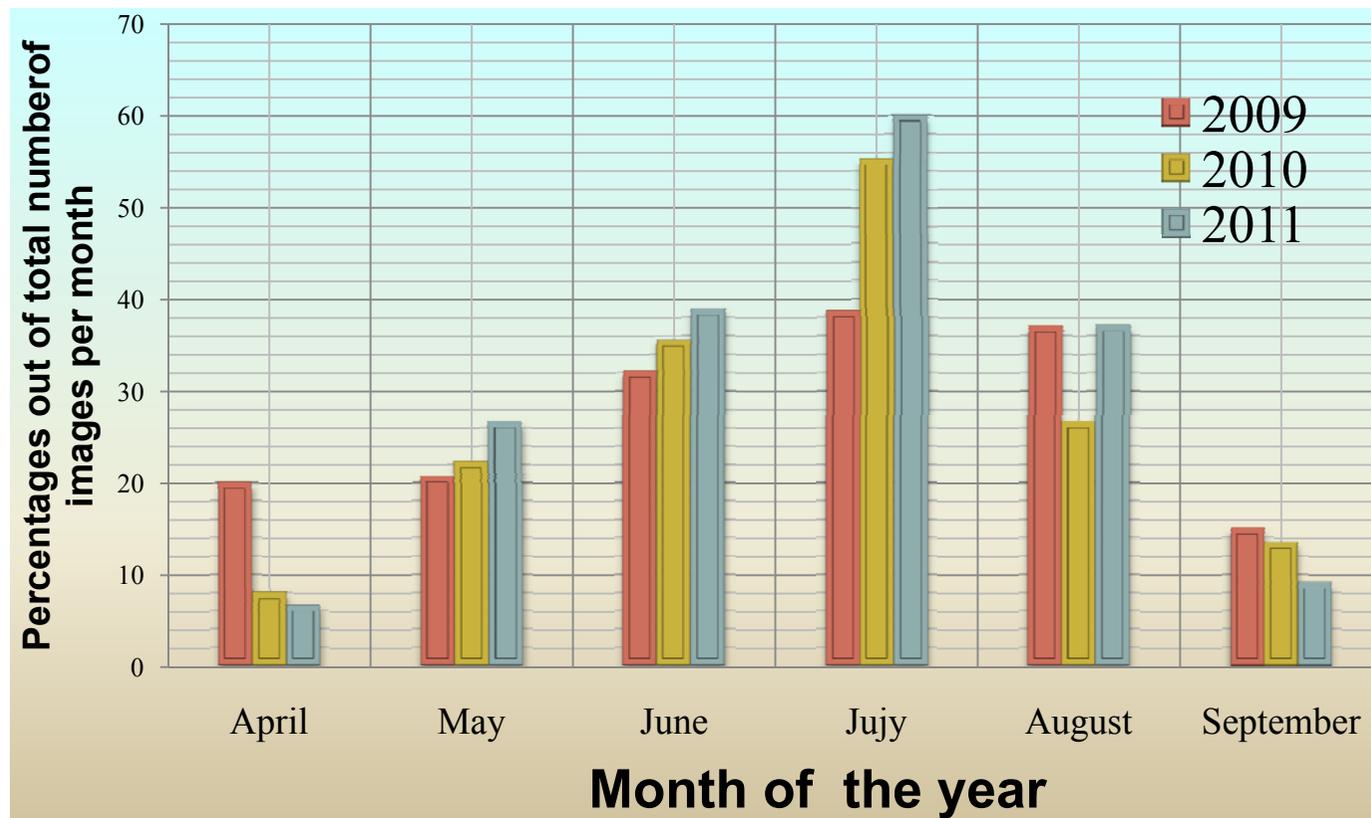
Number of days during with surface accumulations of cyanobacteria observed in each pixel after HELCOM reports 2009 , 2010, 2011



2009. The high percentage of the long-lasting ship wakes revealed in April can be explained by the early bloom in the South and West Baltic. In the diagrams of the integral chlorophyll a content a distinct peak can be seen corresponding to April measurements when the blooms of diatoms and dinoflagellates were detected. The summer bloom of cyanobacteria was not intense and was observed all summer in different waters of the Baltic Sea. Correspondingly, the diagram of long-lasting ship wakes in 2009 is rather smooth and has no sharp peaks



In 2010, the spring bloom of diatoms and dinoflagellates of moderate intensity was detected practically at all stations. The peak of cyanobacteria bloom was in July with sharp decrease in August. It follows from the diagram that in April 2010 a considerable amount of long-lasting ship wake manifestations was revealed in radar images. The peak was in July and a sharp decrease was observed in August.



In 2011, an intense bloom of diatoms and dinoflagellates was observed in the South Baltic, but it was practically negligible in the western part of the sea. The summer cyanobacteria bloom was observed for a long time and extended over a considerable part of the Baltic Sea, including the Gulf of Bothnia. Summer blooms of cyanobacteria were observed for a period of over two months, covering extended areas. The Gulf of Bothnia, which typically blooms in August, also had an unusually prolonged bloom. Correspondingly, in April 2011 the minimal number of long-lasting ship wake manifestations was revealed in radar images and the diagram above features a broad smoothly decaying maximum

Что мы умеем?	Чему мы хотим научиться?
Измерение геометрических характеристик и площадей пятен	Определение типа загрязнения (искусственное или естественное)
	Определение характеристик (толщина, поверхностная концентрация)

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ СЛИКОВ

Эксперименты контролируемые разливами нефти и поверхностно-активных веществ в Северном море (MARSEN79, SAXON FPN, SAMPLEX92).

Были задействованы многочастотные многополяризационные радиолокаторы и скаттерометры авиационного базирования, с помощью которых измерялись радиолокационные контрасты различных нефтяных пятен и пятен ПАВ.

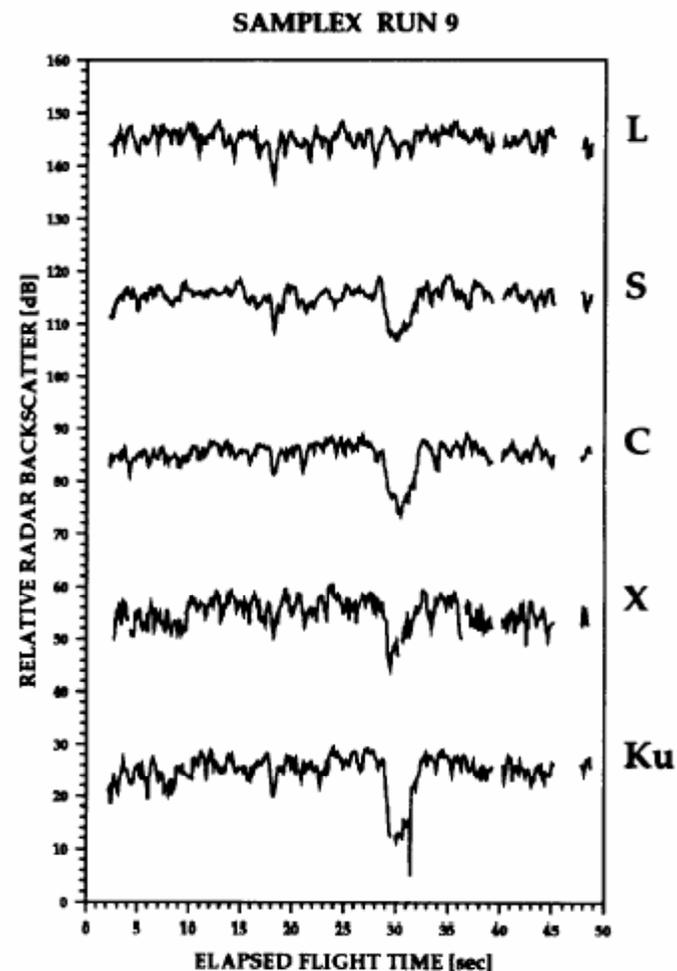
Цель экспериментов состояла в определении зависимости радиолокационных контрастов от типа пленочного загрязнения и условий наблюдения, в частности, от приповерхностного ветра.

Было установлено, что модуляция сигнала для каждой частоты имеет различный тип зависимости от скорости ветра и типа пленочного загрязнения [Hühnerfuss et al., 1983].

Наиболее значительные контрасты наблюдались в С-, Х- и Ku – диапазонах.

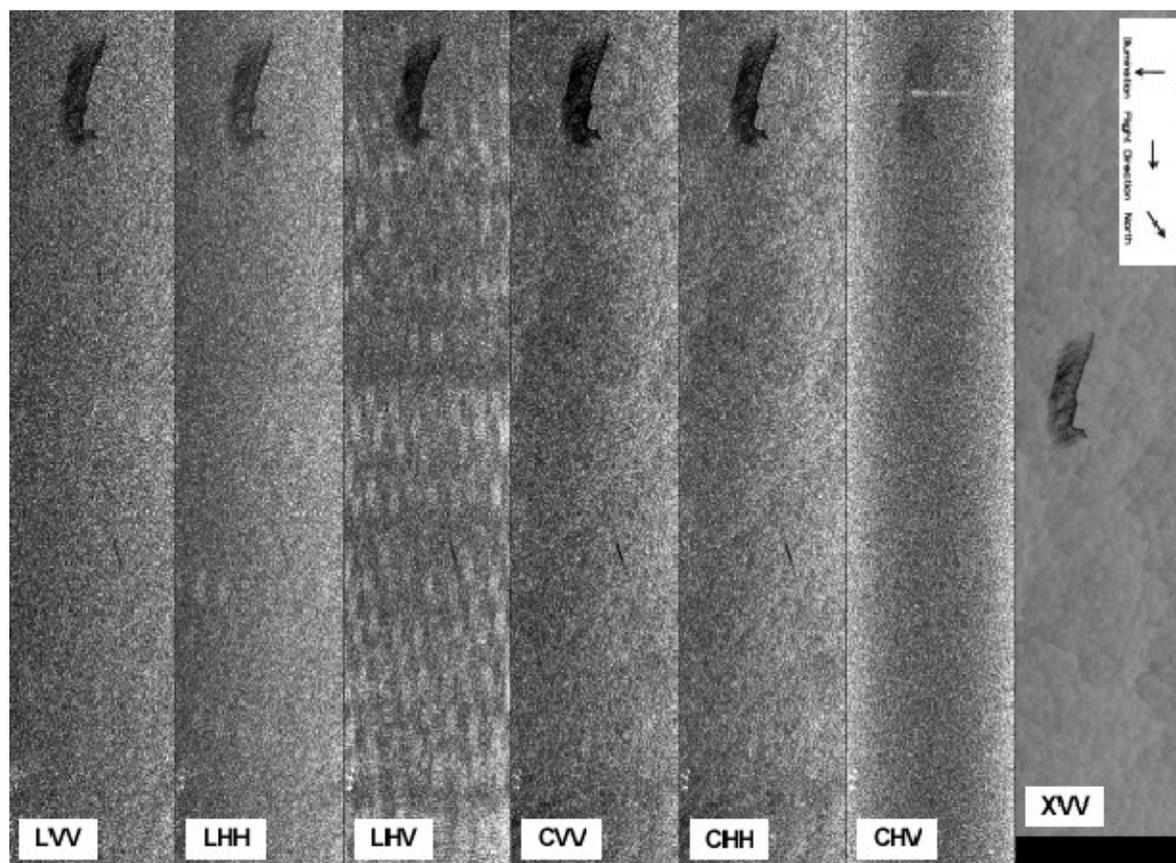
Контрасты, измеренные для разливов «легкой» нефти, составляли 5 дБ, а для разливов «тяжелого» топлива доходили до 10-15 дБ.

В то же время обратно-рассеянный сигнал L- и S- диапазонов слабо реагировал на присутствие поверхностных пленок



Вариации интенсивности обратно-рассеянного сигнала для 5 различных диапазонов на VV поляризации при угле зондирования 25° , полученные при полетах над разливом нефти 1 июня 1992 [согласно (Wismann, 1992)]

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НЕФТЯНЫХ СЛИКОВ

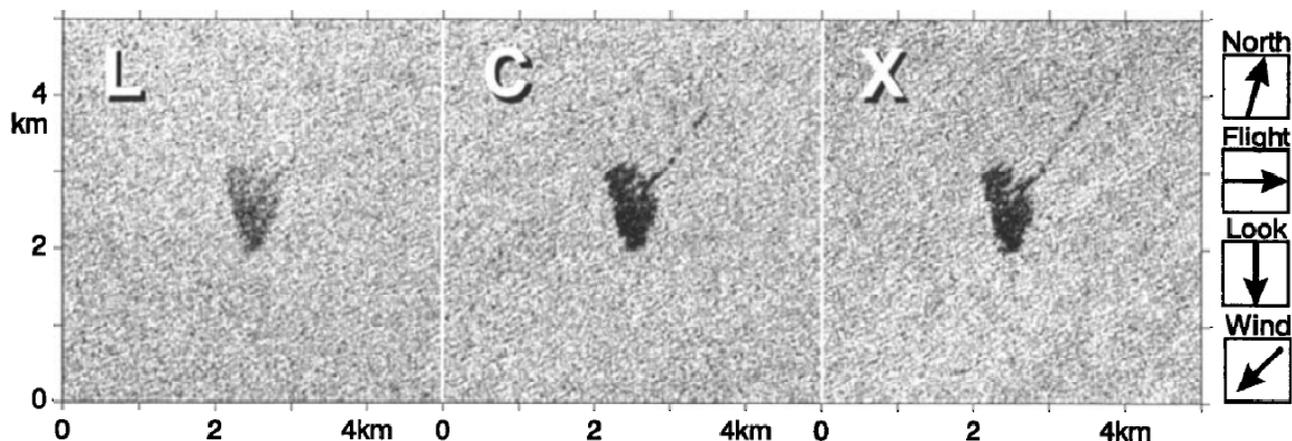


РЛ-изображение, полученное в районе течения Куроиси 04.10.1994, 20:25 UTC сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах и при различных поляризациях зондирующего сигнала. Ширина каждого фрагмента 21 км. В полосе обзора на морской поверхности находится нефтяное загрязнение, деформированное под воздействием ветра.

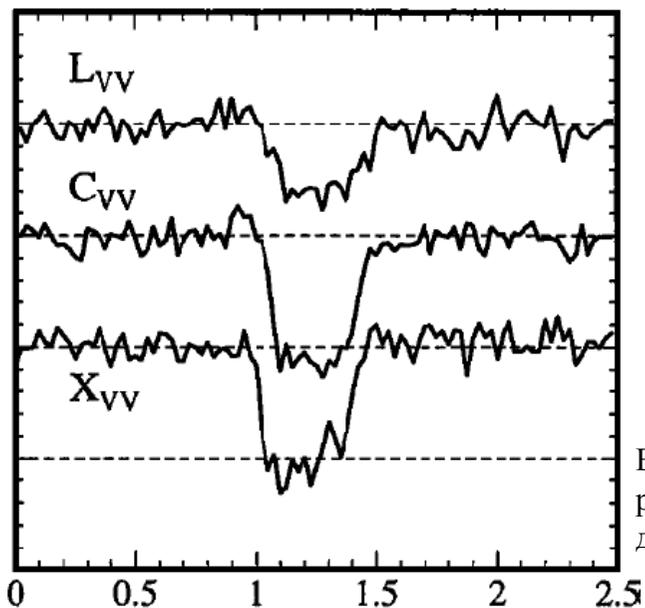
В апреле и октябре 1994 г. сенсор SIR-C/X-SAR, установленный на космическом челноке Endeavour был задействован в двух экспериментах, в ходе которых проводились измерения вариаций интенсивности обратно-рассянного сигнала L-, C- и X-диапазонов на контролируемых разливах нефти и различных видов ПАВ.

Эксперименты проводились в Северном море, а также в Северной части Японского моря и в районе течения Куроиси [Gade et al., 1998].

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СЛИКОВ ПАВ



Фрагменты РЛИ, полученного сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах на VV поляризации 18.04.1994, 05:26 UTC, на которых отчетливо видны мономолекулярные пятна (олеиновый спирт)

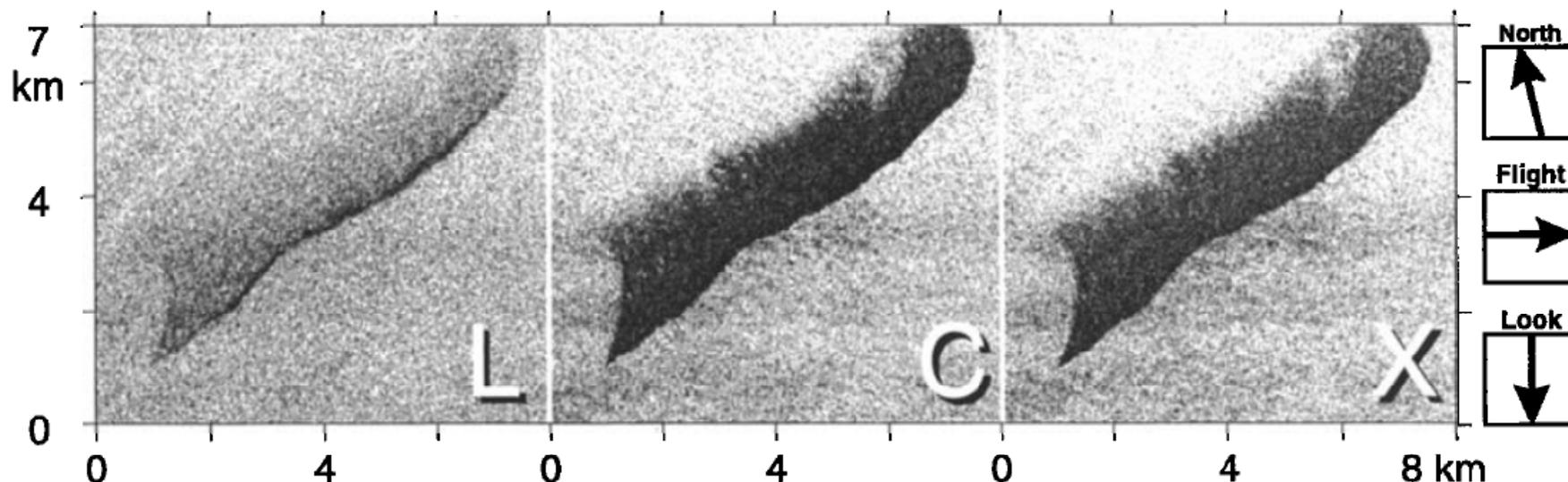


Подобные измерения проводились при различных скоростях ветра.

Для одного и того же ПАВ глубина модуляции интенсивности обратного-рассеянного сигнала существенным образом зависит от скорости ветра

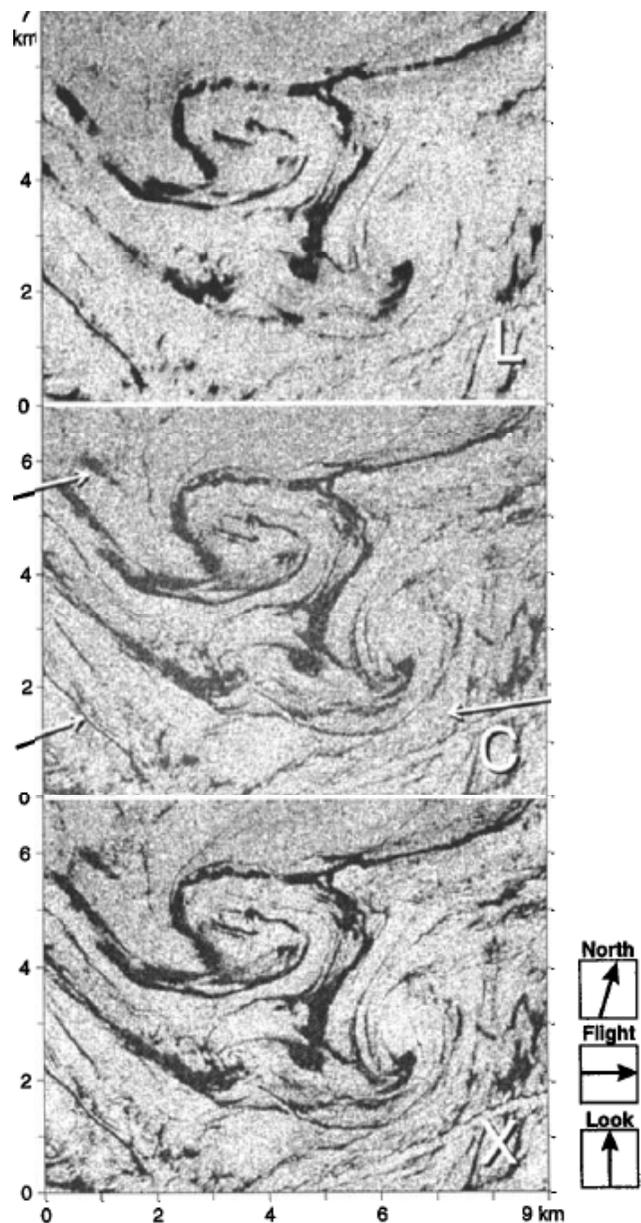
Вариации интенсивности обратного рассеянного сигнала для трех различных диапазонов на VV поляризации

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НЕФТЯНЫХ СЛИКОВ



Фрагменты РЛИ, полученного сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах на VV поляризации 16.04.1994, 07:42 UTC, на которых отчетливо видны пятна нефтяного загрязнения. Следует отметить неоднородность радиолокационных контрастов в области пятна, особенно заметную на изображении L- диапазона (согласно [*Gade et al., 1998*])

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ СЛИКОВ



Фрагменты РЛИ, полученного сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах на VV поляризации 12.04.1994, 07:28 UTC, на которых отчетливо видны биогенные слики естественного происхождения

Неожиданный результат: биогенные слики естественного происхождения обуславливают более сильную модуляцию радиолокационных контрастов, чем пятна нефтяного загрязнения.

При умеренных ветрах различение пленок различного происхождения возможно при помощи многочастотных радиолокационных измерений.

Требуется исследование механизмов формирования сликов

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ СЛИКОВ

Тип радиолокатора	Длина волны, см	Средняя излучаемая мощность, Вт	Поляризация	Ширина полосы обзора, км	Пространственное разрешение, м	Вид обработки данных
РБО	0,8	4,5	VV, HH	15	30...50	бортовая
РБО	3,2	8,3	VV	45	20...50	бортовая
РСА	23	11,2	VV, HH VH, HV	30	2,5...25 25 ... 50	на земле бортовая

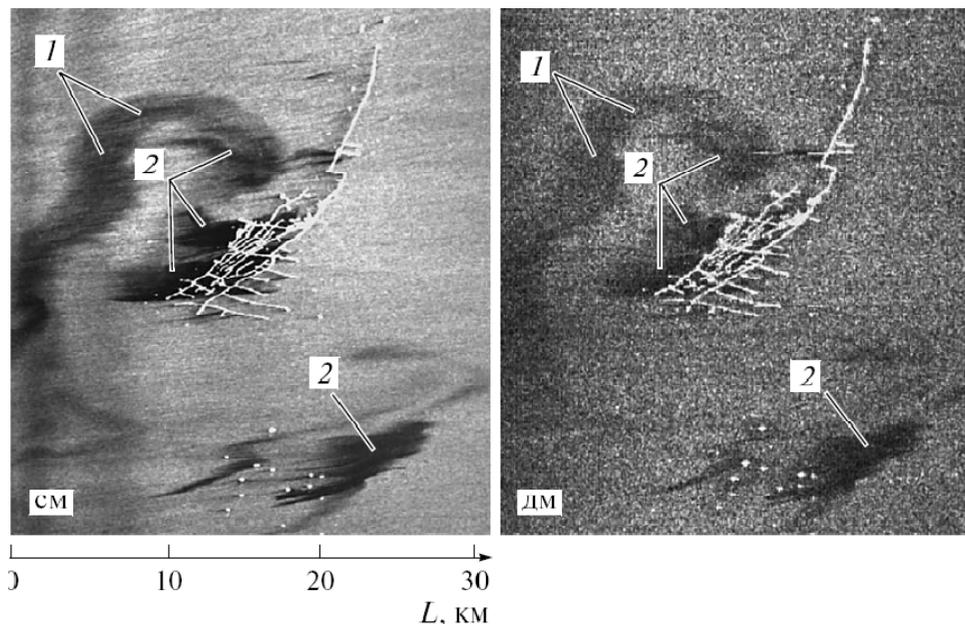
Предприняты попытки разработать методику оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности по данным многочастотного радиолокационного зондирования.

Методика должна опираться на сравнение теоретических результатов и экспериментальных контрастов загрязненной морской поверхности, полученных по результатам синхронных измерений на различных длинах волн.

Экспериментальные данные были получены в акватории месторождения “Нефтяные Камни” в Каспийском море в 1989– 1991 гг. с помощью авиационного многочастотного радиолокационного комплекса “МАРС” [Калмыков и др., 1998], установленного на борту самолета-лаборатории ИЛ-18.

Съемки проводились одновременно тремя локаторами Ka-SLAR, X-SLAR и L-SAR с высоты 7200 м. (Согласно [Боев и др., 1998])

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НЕФТЯНЫХ СЛИКОВ



Синхронное двухчастотное радиолокационное (СМ_ и ДМ_диапазонов) изображение района добычи нефти “Нефтяные Камни” в Каспийском море, полученное с помощью МРЛК “МАРС” 19.07.90. (Согласно [Боев и др., 2008])

Теоретические радиолокационные контрасты рассчитывались в рамках теории взаимодействия поверхностных волн с пленкой конечной толщины [Боев, Ясницкая, 2002; Боев, Ясницкая, 2003]. В уравнениях, используемых авторами, содержится пять параметров, характеризующих пленку: активность, толщина, поверхностное натяжение, вязкость нефти и ее плотность

Следует отметить, что радиолокационный контраст в общем случае является функцией не только параметров пленки, но также скорости ветра, состояния поверхности моря и ряда др. параметров окружающей среды. Пренебрежение последними факторами может привести к ошибкам в расчетах. Возможно, благодаря этому, оценки толщин нефтяных пленок, приведенные в публикации, выглядят существенно завышенными.

Степень загрязнения морской поверхности оценивалась по величине логарифмического радиолокационного контраста $DE(k_E)$:

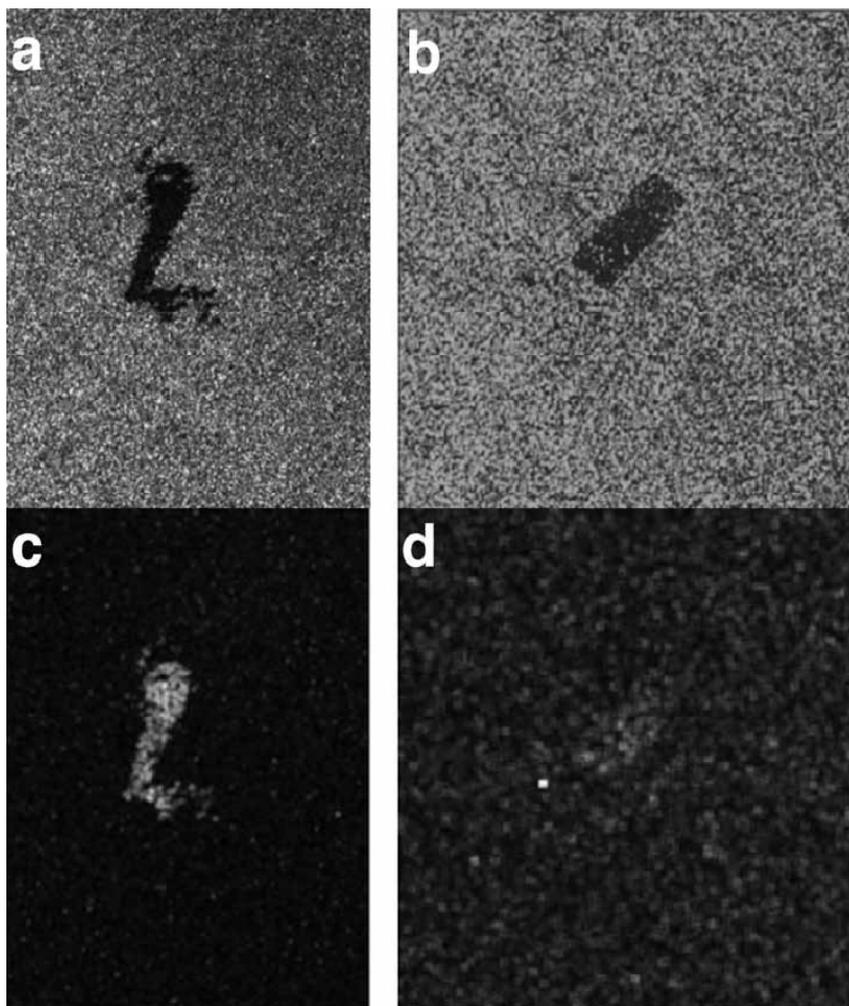
$$D_E(k_E) = 10 \lg \left\{ \frac{\overline{P_r} - \overline{P_N}}{\overline{P_s} - \overline{P_N}} \right\} [\text{дБ}],$$

где P_r , P_s – средние мощности сигналов, принятых, соответственно, от загрязненного и чистого участков морской поверхности, P_N – средняя мощность собственных шумов приемника на выходе блока обработки сигналов.

Еще одним перспективным методом различения пленочных загрязнений различной природы на морской поверхности является использование поляризационных различий РЛИ одного и того же диапазона.

Различными научными группами разрабатываются различные подходы, в зависимости от того, используются только соосные поляризации (VV/HH) или сенсор обладает возможностью получения данных на кросс-поляризациях (VH и HV).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАЗЛИЧИЙ



Амплитудные изображения РЛИ С-диапазона, полученные сенсором SIR-C/X-SAR а) 1.10.1994 и б) 14.04.1994; с) и d) - соответствующие дисперсии разности фаз

Подход, опирающийся на фазовые различия между VV и HH каналами радиолокаторов с синтезированной апертурой. [Migliaccio et al., 2009; Velotto et al., 2011, Caruso et al., 2013].

Существенным моментом является использование комплексных данных, содержащих информацию о фазе и амплитуде.

Свои исследования авторы проводили на основе данных SIR-C/X-SAR, полученных в ходе описанного выше эксперимента.

На рисунках а и б представлены фрагменты РЛИ С-диапазона, полученных сенсором SIR-C/X-SAR. На обоих фрагментах отчетливо видны слики.

а - нефтяной разлив
б - слик ПВА.

На рис. с и d представлены те же фрагменты РЛИ после обработки на основе фазовых различий.

Темное нефтяное пятно на рис. а перешло в светлое пятно на рис. с, тогда как темное пятно на рис. d так и осталось темным, хотя находящийся рядом корабль отчетливо выделяется.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАЗЛИЧИЙ ВКЛАД НЕБРЕГГОВСКИХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

К настоящему времени накопилось достаточно много свидетельств существования нерезонансных (небрегговских) механизмов рассеяния электромагнитных волн.

1. Всплески рассеяния на горизонтальной поляризации. Одними из первых высказали гипотезу о нерезонансном (небрегговском) характере рассеяния под малыми скользящими углами наблюдения Калмыков и Пустовойтенко, которые наблюдали всплески обратно рассеянного сигнала (преимущественно на горизонтальной поляризации) при наблюдении навстречу движению обостренных волн. Подобные всплески неоднократно наблюдались также и в более поздних работах

2. Угловая зависимость сечения рассеяния на двух поляризациях. О недостаточности традиционной двухмасштабной модели при настильных углах убедительно свидетельствуют и данные об угловой зависимости сечения обратного рассеяния на вертикальной и горизонтальной поляризациях. При $\gamma \rightarrow 0$ экспериментально измеренное сечение рассеяния на горизонтальной поляризации не стремится к нулю так быстро, как это следует из резонансной теории (формула (3)), при этом различие между брегговской теорией и экспериментом может достигать 10-20 дБ.

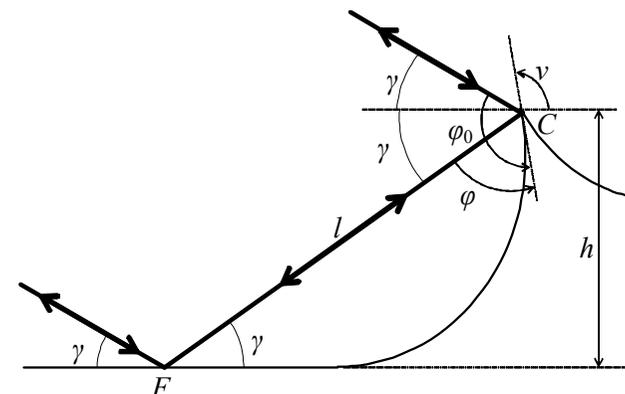
3. Двухполяризационные изображения океана на настильных углах наблюдения. Наиболее ярким доказательством существования нерезонансного механизма служат двухполяризационные изображения океана в условиях устойчивой и неустойчивой стратификации атмосферы.

1. М.Г. Булатов, Ю.А. Кравцов, О.Ю. Лаврова, К.Ц. Литовченко, М.И. Митягина, М.Д. Раев, К.Д. Сабинин, Ю.Г. Трохимовский, А.Н. Чурюмов, И.В. Шуган, "Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана" // Успехи Физических Наук, 2003, 173 (1), стр. 69-87
2. *A.N. Churyumov, Yu. A. Kravtsov, O.Yu. Lavrova, K.Ts. Litovchenko, M.I. Mityagina, and K.D. Sabinin. Resonant and Nonresonant Mechanisms of Forming Space Radar Images of the Ocean // Advances in Space Research, 2002, Vol. 29. No.1, pp.111-116.*
3. *A. N. Churyumov, Yu. A. Kravtsov, O. Yu. Lavrova, K. Ts. Litovchenko, M. I. Mityagina, K. D. Sabinin Signatures of resonant and non-resonant scattering mechanisms on radar images of internal waves // International Journal of Remote Sensing, 2002, Vol. 23, No 20, pp. 4341 - 4355*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАЗЛИЧИЙ ВКЛАД НЕБРЕГГОВСКИХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

Наиболее вероятная причина нерезонансного рассеяния - крутые короткие волны, близкие к обрушению

Интерферирующие между собой каналы рассеяния при дифракции электромагнитной волны на крутой волне мезомасштабного спектра



Как показано на рисунке, существуют четыре пути рассеяния, при которых падающая электромагнитная волна возвращается обратно к радару.

1. отражение назад происходит непосредственно от кромки волны.
2. существует канал рассеяния, при котором отраженное от кромки морской волны (точка C) излучение испытывает вторичное отражение от морской поверхности в точке F перед обрушающейся волной, и только затем возвращается в приемник.
3. Третий канал рассеяния является обратным по направлению второму пути и полностью когерентен ему.
4. Четвертый канал рассеяния состоит из трех отражений: сначала падающая волна отражается от горизонтальной поверхности у подножия волны в точке F , затем отражается назад от кромки волны в точке C и, наконец, снова отражается от морской поверхности в точке F перед обрушающейся волной.

Интерференция между этими каналами рассеяния может приводить как к усилению, так и к ослаблению обратно рассеянного сигнала, что является одной из причин сильных поляризационных различий при рассеянии на крутых обрушающихся волнах. Не менее важной причиной поляризационных различий на настильных углах наблюдения является повышенное (по сравнению с горизонтальной поляризацией) ослабление вертикально поляризованной электромагнитной волны у подножия обрушающейся волны.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАЗЛИЧИЙ ВКЛАД НЕБРЕГГОВСКИХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

Поляризационная разность **Polarization Difference, PD, short Bragg waves :**

$$\Delta\sigma_0 \equiv \sigma_0^{vv} - \sigma_0^{hh} = \sigma_{0B}^{vv} - \sigma_{0B}^{hh}$$

**Деполяризационное
соотношение**

NP contribution from breaking waves :

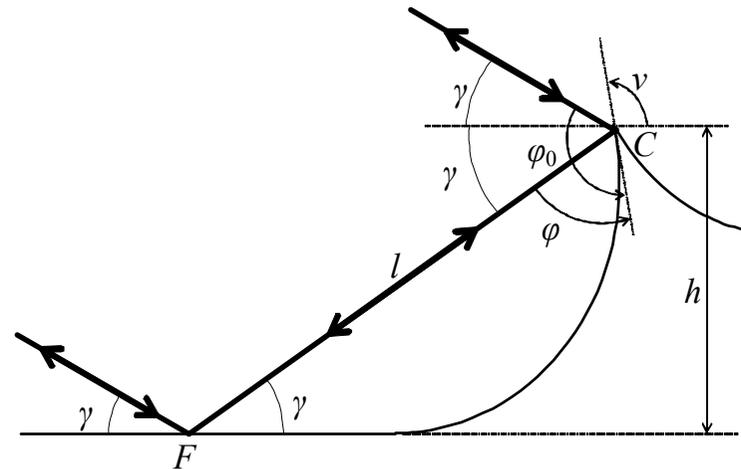
$$\sigma_{wb} = \sigma_0^{vv} - \Delta\sigma_0 / (1 - p_B)$$

where $p_B = \sigma_{0B}^{hh} / \sigma_{0B}^{vv}$ is PR for Bragg scattering

Polarized scattering: Bragg waves

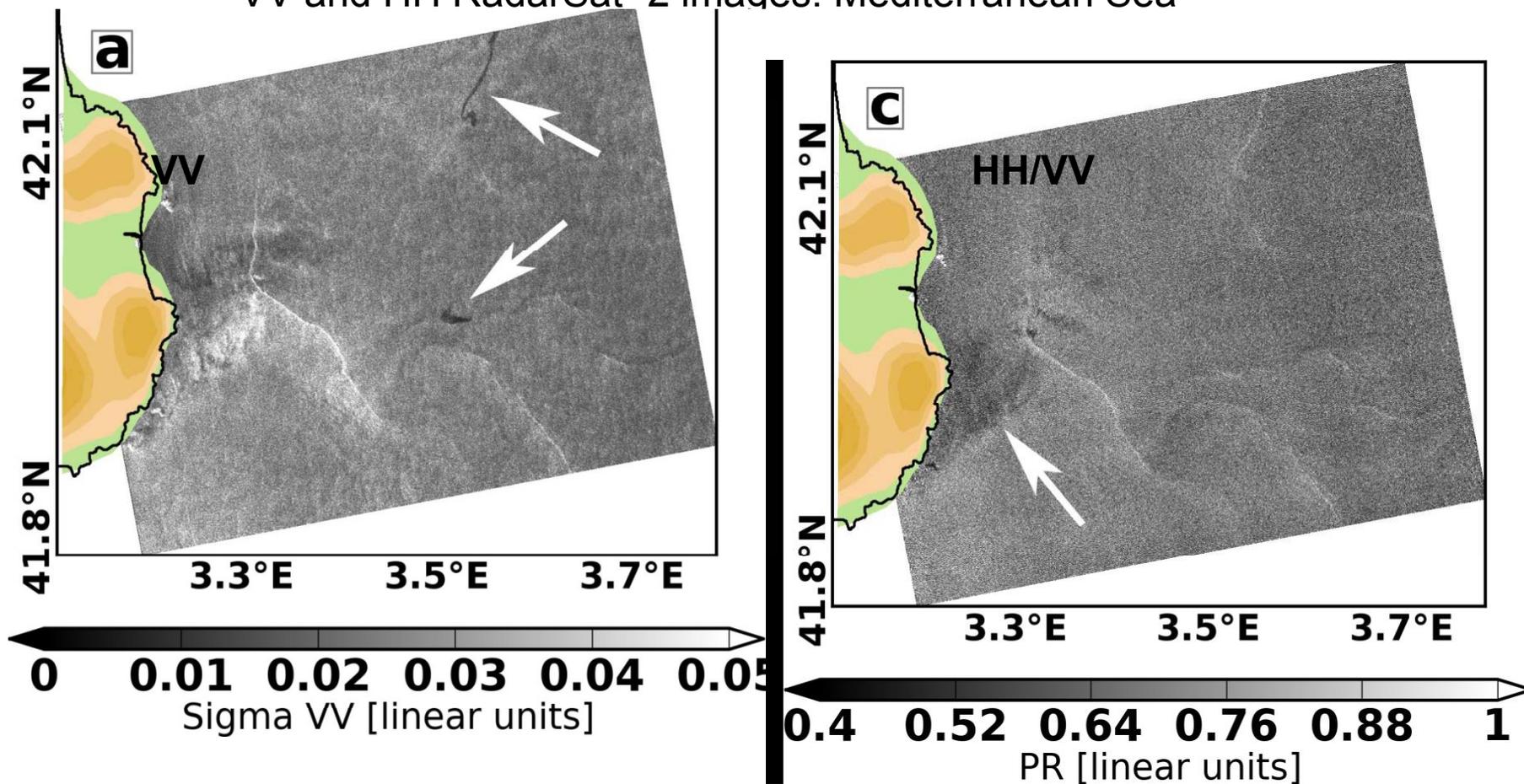


Non - polarized scattering: Wave breaking



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАЗЛИЧИЙ ВКЛАД НЕБРЕГГОВСКИХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

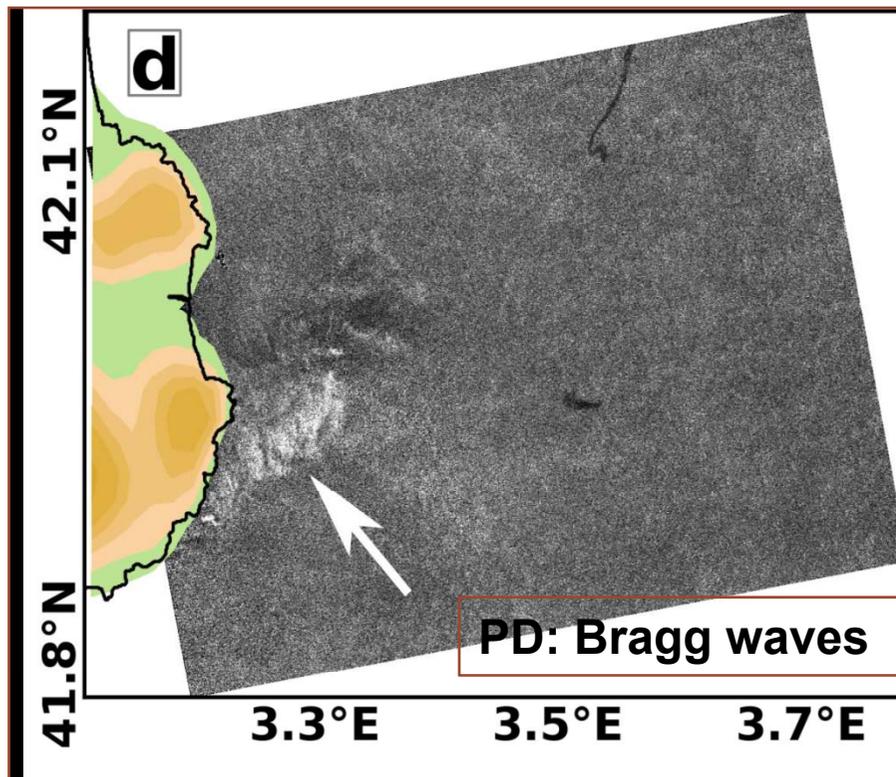
VV and HH RadarSat -2 images: Mediterranean Sea



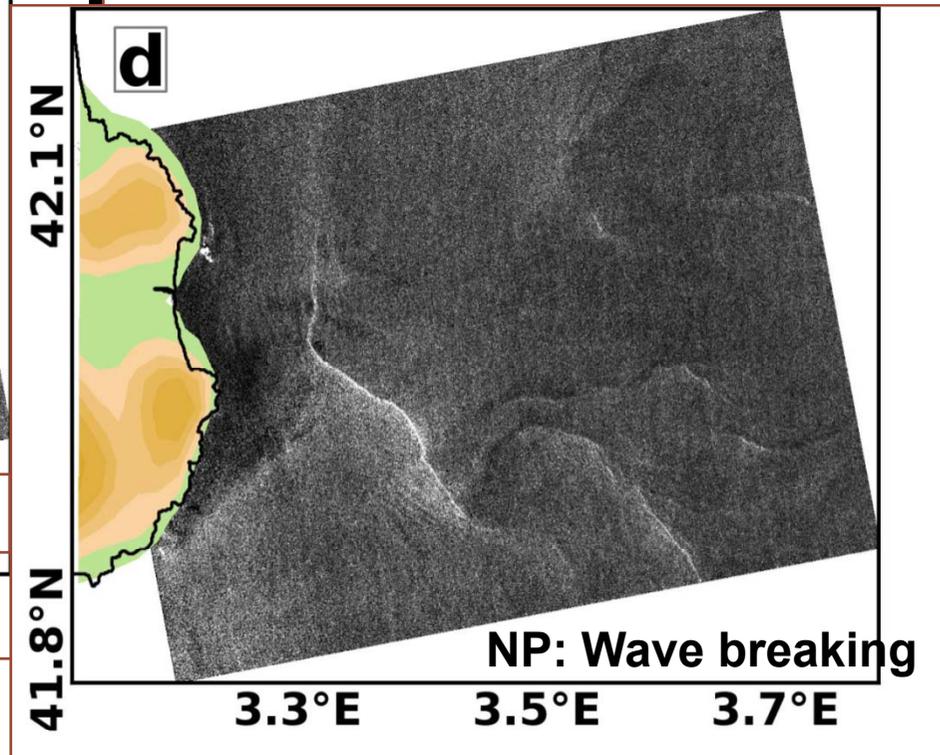
Approach Demonstration: IEEE GRSL, 10, issue 4, 2013

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАЗЛИЧИЙ ВКЛАД НЕБРЕГГОВСКИХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

VV and HH Images Transformation



Slicks are dark, currents are not visible, local wind fields features detectable



Slicks not visible, currents are Well visible, local wind fields features Detectable, but differently

Работа поддержана РФН в рамках проекта № 14-17-00555.
Спутниковые радиолокационные данные предоставлены
Европейским космическим агентством в рамках проектов
C1P.6342, Bear 2775 and C1P.1027 projects

Спасибо за внимание!