

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ В ОКЕАНЕ И ПРИВОДНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

*М.И. Митягина**

Институт космических исследований РАН



Одиннадцатая международная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли». 16.03 - 20.03.2020, г. Таруса



RADio Detection And Ranging



ПЕРВЫЙ СПУТНИК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА



Seasat (Seafaring Satellite), NASA JPL

Запуск - 27 июня 1978

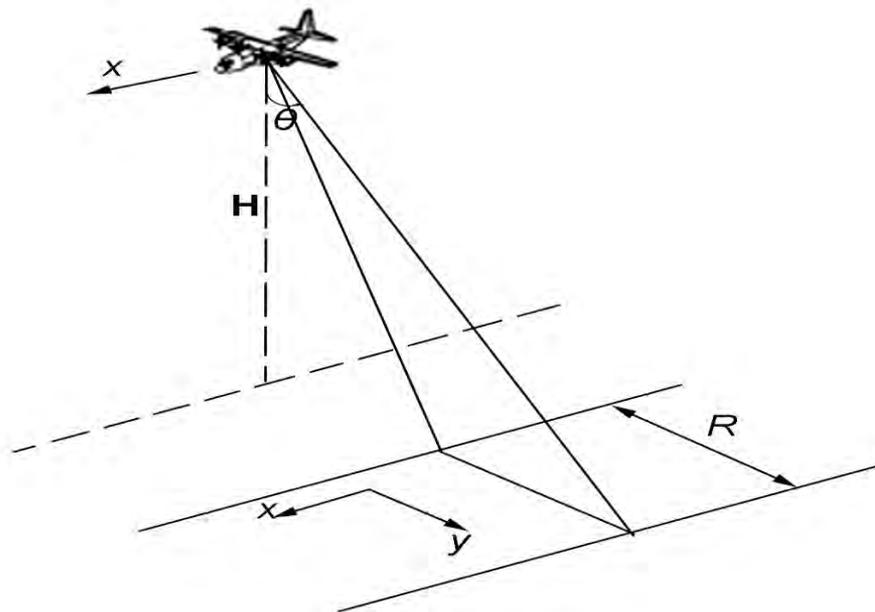
Полезная нагрузка

1. **Первый исследовательский (необоронного назначения) радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) L-диапазон (23 см), НН –поляризация**
2. **Альтиметр**
3. **СВЧ скаттерометр (направление и сила ветра)**
4. **СВЧ-радиометр (ТПО)**
5. **Радиометр оптического диапазона (видимый + ИК)**

Seasat функционировал 110 дней

За это время было собрано больше информации об океане, чем за предыдущие 100 лет судовых исследований

ГЕОМЕТРИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ (РАДИОЛОКАТОРЫ БОКОВОГО ОБЗОРА)



Геометрия съемки радиолокационной станции бокового обзора (РЛСБО).

Антенна такой станции вытягивается вдоль фюзеляжа самолета и обеспечивает боковое "видение".

В частности, при длине волны $\lambda=2$ см и длине антенны $L_a:=6$ м (для самолетной антенны это довольно большая длина) и номинальной высоте полета 2 км имеем $\Delta\varphi\approx 1/300$ рад, элемент разрешения Δx на расстоянии $y=10$ км от оси полета составит $\Delta x=y\cdot\Delta\varphi/2=15$ м.

В рассмотренном примере элемент разрешения ("пиксел") на плоскости x,y представляет собой квадрат размером 15 м x 15 м

Разрешение в боковом направлении (по наклонной дальности) определяется длительностью импульса τ :

$$\Delta y = \frac{C\tau}{2\sin\theta}$$

C - скорость света, θ - угол зондирования.

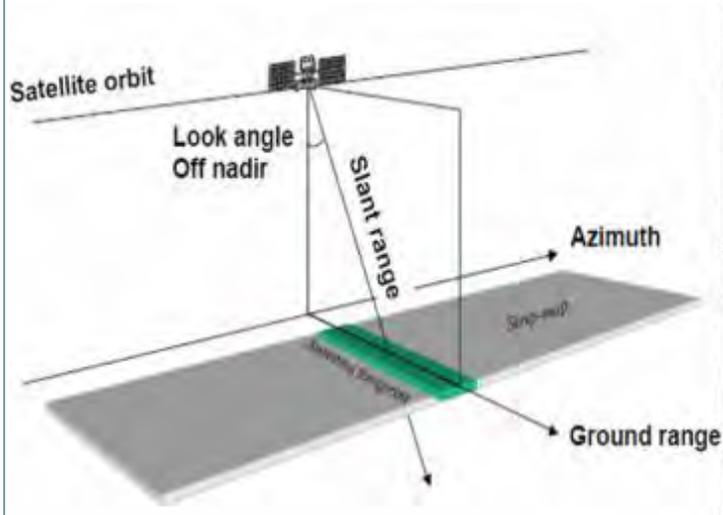
При типичной длине импульса $\tau=0,1$ мкс и высоких углах зондирования разрешение по наклонной дальности составит примерно 15 м.

Разрешение в азимутальном направлении, т.е. в направлении полета (ось x), зависит от угловой (азимутальной) ширины диаграммы направленности $\Delta\varphi$,

которая может быть оценена как отношение длины волны λ к длине антенны L_a : $\Delta\varphi\sim\lambda/L_a$.

Разрешение в азимутальном направлении определяется следующим образом: $\Delta x = \frac{H\Delta\varphi}{\cos\theta}$

ГЕОМЕТРИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ РАДИОЛОКАТОРЫ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ (РСА)



Разрешение Δx в продольном направлении можно улучшить, если использовать технику "синтезирования апертуры": производится специальная когерентная (т.е. с сохранением фазы) обработка рассеянных сигналов в течении некоторого времени Δt .

Скорость движения v , расстояние $\Delta L_{\text{синт}} = v\Delta t$ играет роль длины синтезированной антенны и может в сотни и тысячи раз превышать физические размеры бортовой антенны L_a .

$\Delta L_{\text{синт}} = 5$ км, длина волны - 5 см, наклонная дальности $R = 1000$ км. Разрешение Δx , оцененное при помощи введенной выше формулы, составит 5 м

Весьма высокое разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой (сокращенно их называют РСА) сочетается с их способностью работать в условиях облачности и в темное время суток.

В этом заключается их главное преимущество

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.

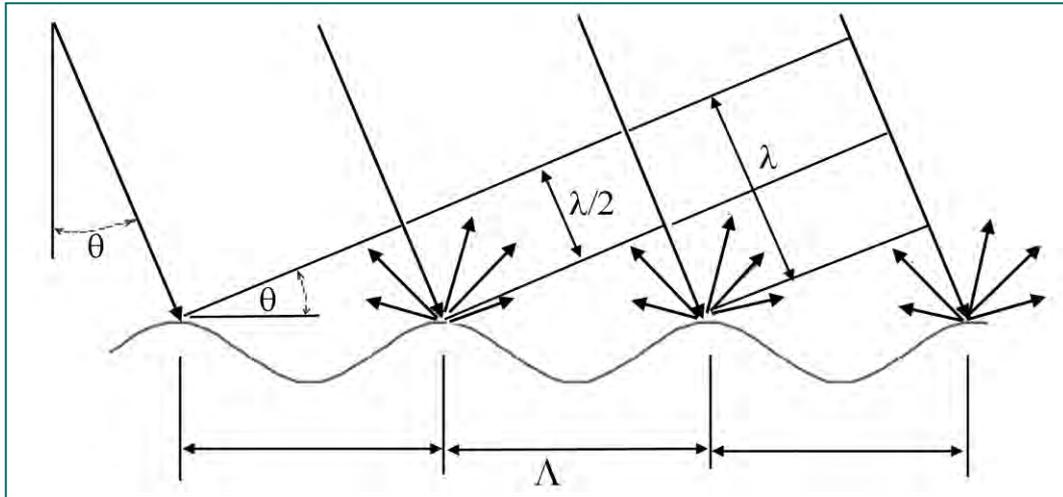
ТРАДИЦИОННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ

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</i> (Япония)
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> и канадских спутников <i>RADARSAT-1,2</i> <i>SENTINEL-1</i>
X	Used in WW II for fire control, X for cross (as in crosshair)	8 — 12 ГГц	2,5 — 3,75 см	РСА на борту германского спутника <i>TERRA/SAR-X</i> , <i>TANDEM</i> в США диапазон 10,525 ГГц ± 25 МГц используется в РЛС аэропортов <i>Cosmo-SkyMed</i> (Италия)
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.

Обозначения сложились на Западе в ходе Второй мировой войны.

В настоящее время они закреплены в США стандартом IEEE, а также международным стандартом ITU

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

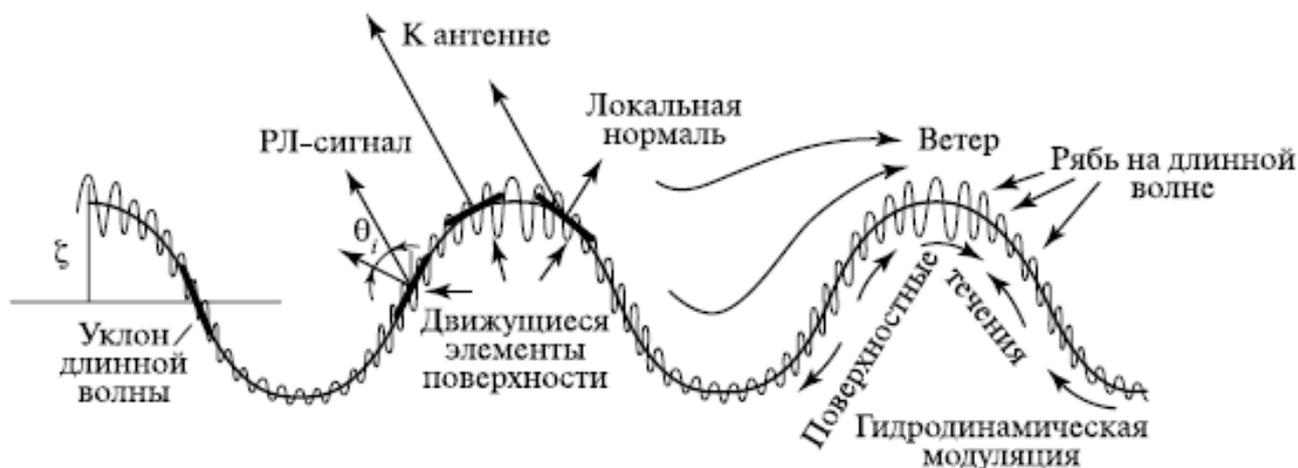
$$\Lambda_{res} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

Соотношение 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 $20^\circ - 26^\circ$ длины резонансной компоненты поверхностного волнения для наиболее распространенных частотных диапазонов:

- для зондирующей волны 3 см — $3,9 \pm 0,5$ 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

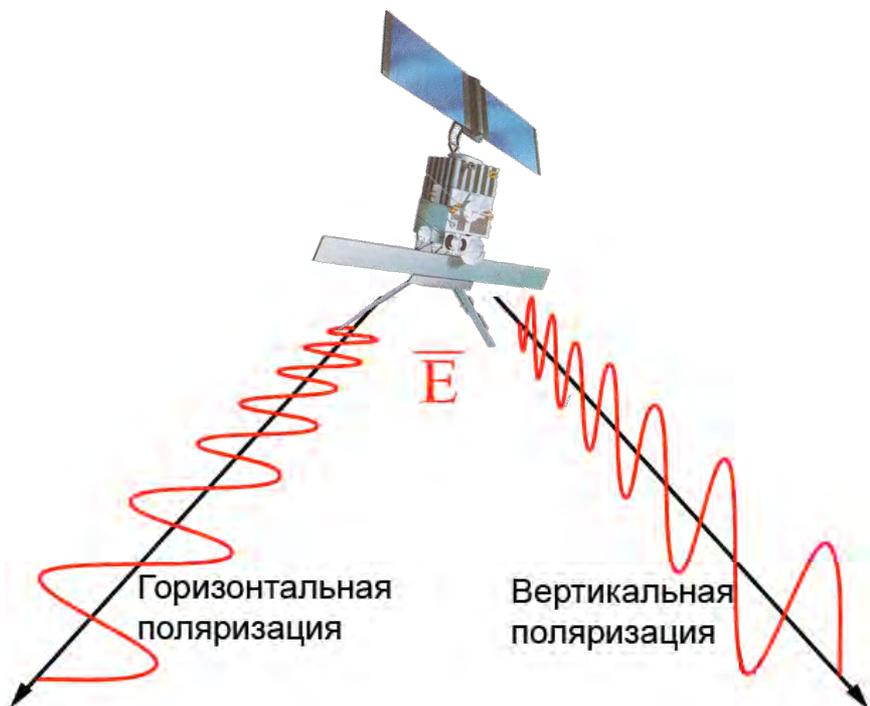
Двухмасштабную или композитную модель морской поверхности квалифицируют также как «рябь на крупной волне»

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

ТИПЫ ПОЛЯРИЗАЦИЙ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА



Вектор электрического поля при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирующего сигнала

В общем случае, коэффициент рассеяния водной поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной и перекрестных.

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 (ГГ) поляризации;
- ✓ -излучение и прием на перекрестных поляризациях (ВГ и ГВ)

Поляризация излучения определяется вектором электрического поля \vec{E} в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения радиоволны. При горизонтальной поляризации излучения вектор электрического поля $\vec{E}_Г$ параллелен подстилающей поверхности. При вертикальной поляризации вектор излучения $\vec{E}_В$ направлен под углом падения к местной вертикали

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СПУТНИКОВЫХ РСА

ИСЗ	SEASAT	ERS-1/2	Алмаз	JERS-1	RADARSAT-1	Envisat	RADARSAT-2	TERRA-SAR/X	Sentinel-1A, -B
Страна	США	ЕС	СССР	Япония	Канада	ЕС	Канада	Германия	ЕС
Год вывода на орбиту	1978	1991-2000 1995-2011	1991-1992	1992-2001	1995-2013	2002-2012	2007-Наст. Вр	2008-Наст. Вр	2014-Наст. Вр. 2014-Наст. Вр.
Диапазон	L	C	S	L	C	C	C	X	C
Частота зондирующего сигнала (ГГц)	1.275	5.25	3.1	1.275	5.3	5.7	5.3	9.65	5,405
Длина волны зондирующего сигнала (см)	23.5	5.66	9.6	23.5	5.66	5.66	5.66	3.13	5,55
Поляризация	ГГ	ВВ	ГГ	ГГ	ГГ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ,ВВ, ВГ, ГВ	ГГ/ГВ; ВВ/ВГ
Угол падения (градусы)	20	23	17-62	39	20-50	15-45	20-60	20-55	20-45
Ширина полосы обзора по наземной дальности (км)	100	100	30-60	75	50-500	56-400	18-500	10/30/100	20/80/250/400
Пространств. разрешение (м)	25	25	25	18	8-100	25-75	3 -100	1/3/16	5x5, 5x20, 25x80.20x40



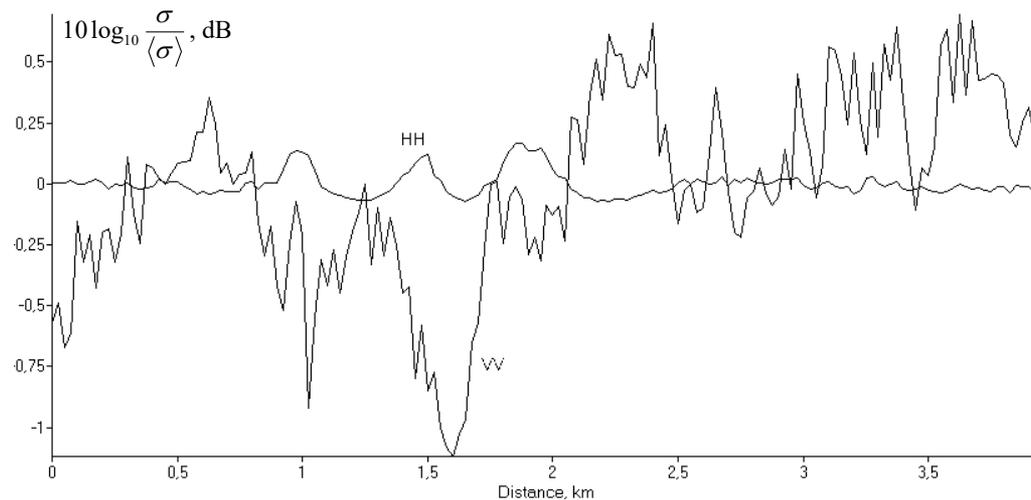
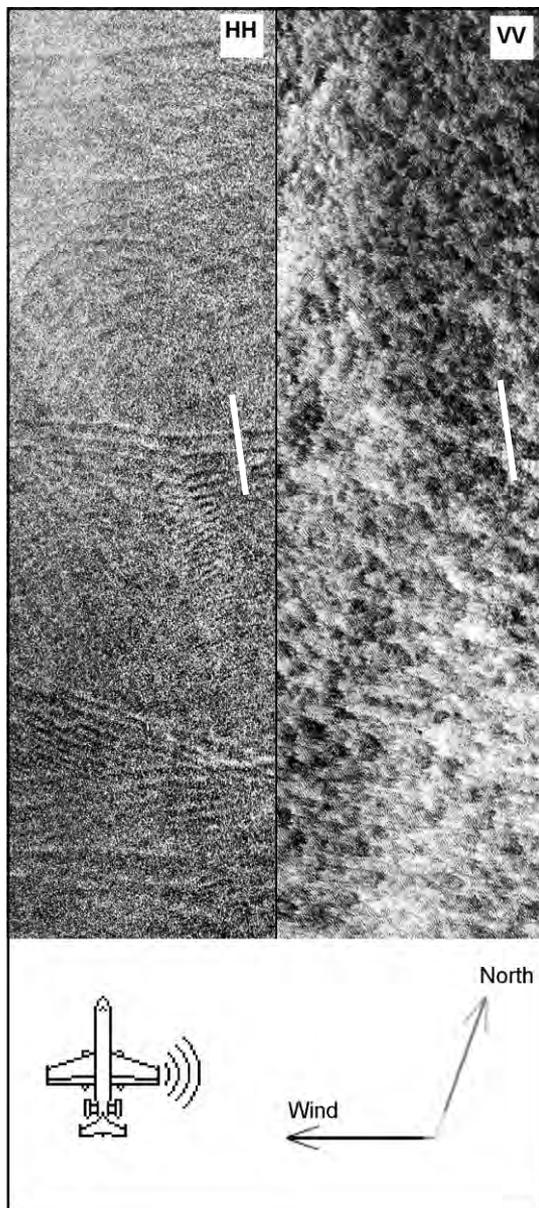
КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СПУТНИКОВЫХ РСА

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

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

	VV	HH	VV/HH	VH	HV	VV/VH	HH/HV
Envisat	+	+	+			+	+
Radarsat-2	+	+	+			+	+
TerraSAR-X	+	+	+			+	+
Cosmo-SkyMed	+	+	+	+	+		
ALOS-2	+	+		+	+		
Sentinel-1A, -B	+	+				+	+

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.

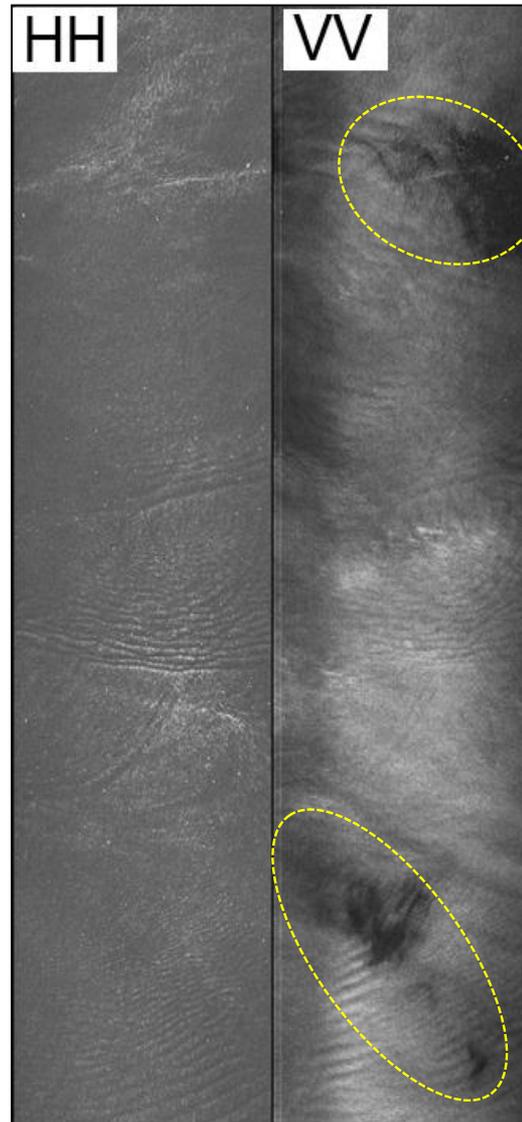
Поверхностные проявления внутренних волн в океане, наблюдаемые на ГГ поляризации, практически не идентифицируются на ВВ поляризации.

РЛСБО «Нить», Ки диапазон.

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

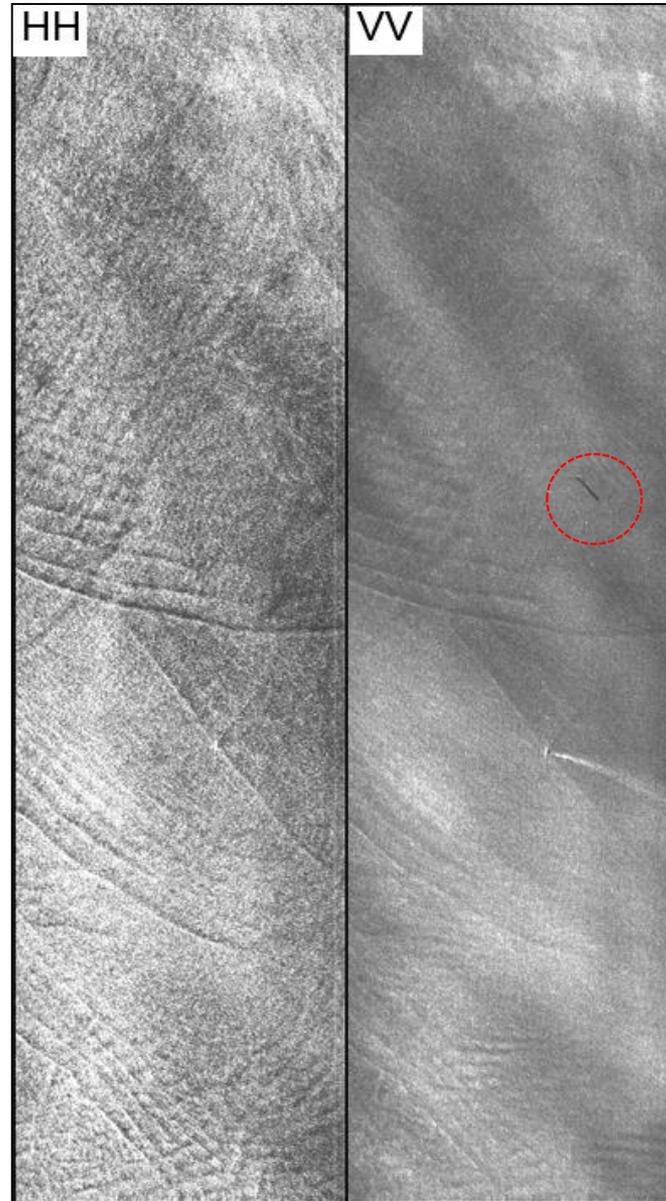
(Слева ГГ поляризация, справа ВВ поляризация).

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (2)



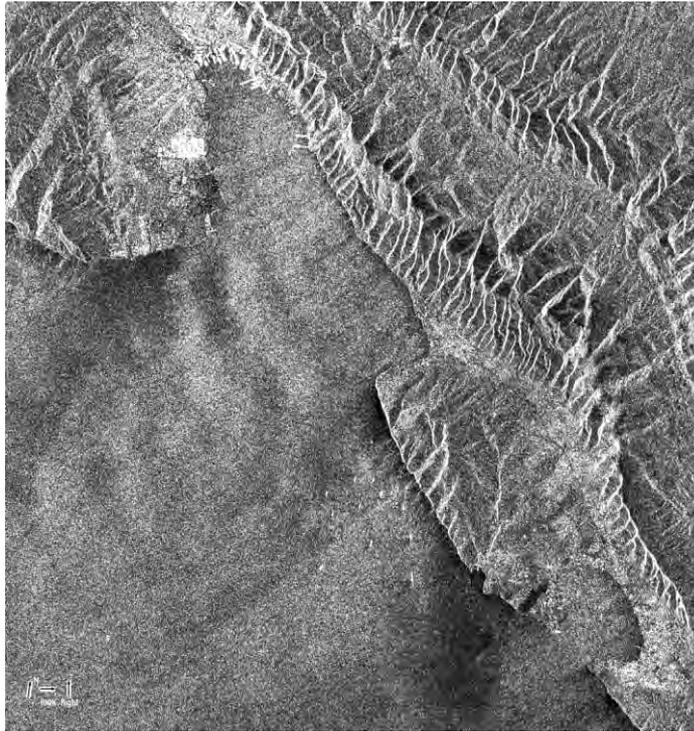
*РЛСБО «Нить», Ки диапазон.
Радиолокационное изображение
морской, полученное 21.07.92
(Слева ГГ поляризация, справа ВВ
поляризация).*

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*

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (5)

ВВ-поляризация применяется для изучения широкого класса процессов и явлений, проявляющихся на морской поверхности посредством модуляции гравитационно-капиллярной составляющей спектра поверхностного волнения.

ГГ-поляризация, будучи менее чувствительной к вариациям мелкомасштабной шероховатости морской поверхности, широко применяется для наблюдения морских льдов и разделения сигнатур ледового покрова и открытой воды

Поскольку интенсивность рассеяния морской поверхности существенно понижается при использовании излучение и прием на перекрестных **поляризациях (ВГ и ГВ)**, такие режимы используются для выделения на морской поверхности объектов, обуславливающих многократное рассеяние, таких, например, как корабли и деформации ледового покрова (торосы, трещины, расколотый лед).

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ОТ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ (1)

При обратном рассеянии

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

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

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

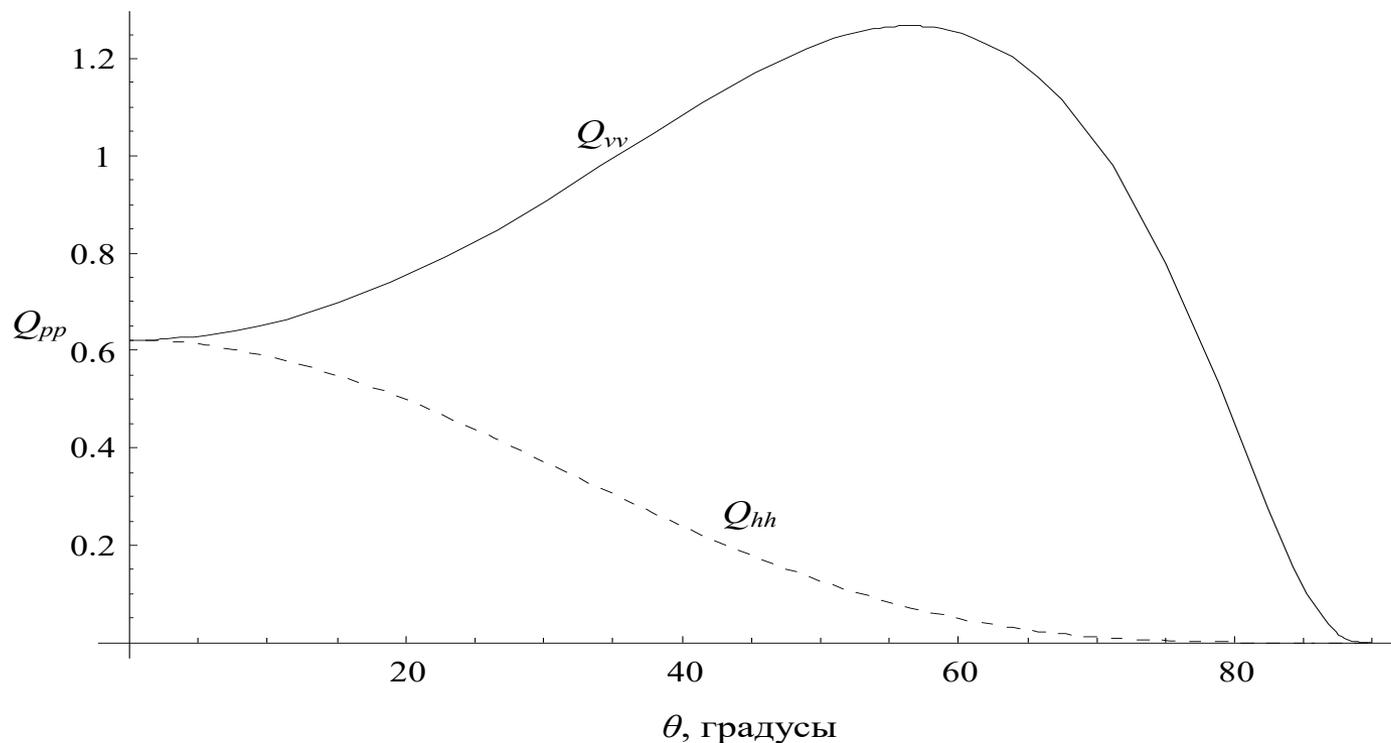
$$Q_{hh}(\mathbf{n}_i) = \frac{1}{16} \left| (\varepsilon - 1)(1 + R_h)^2 \right|^2$$

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)



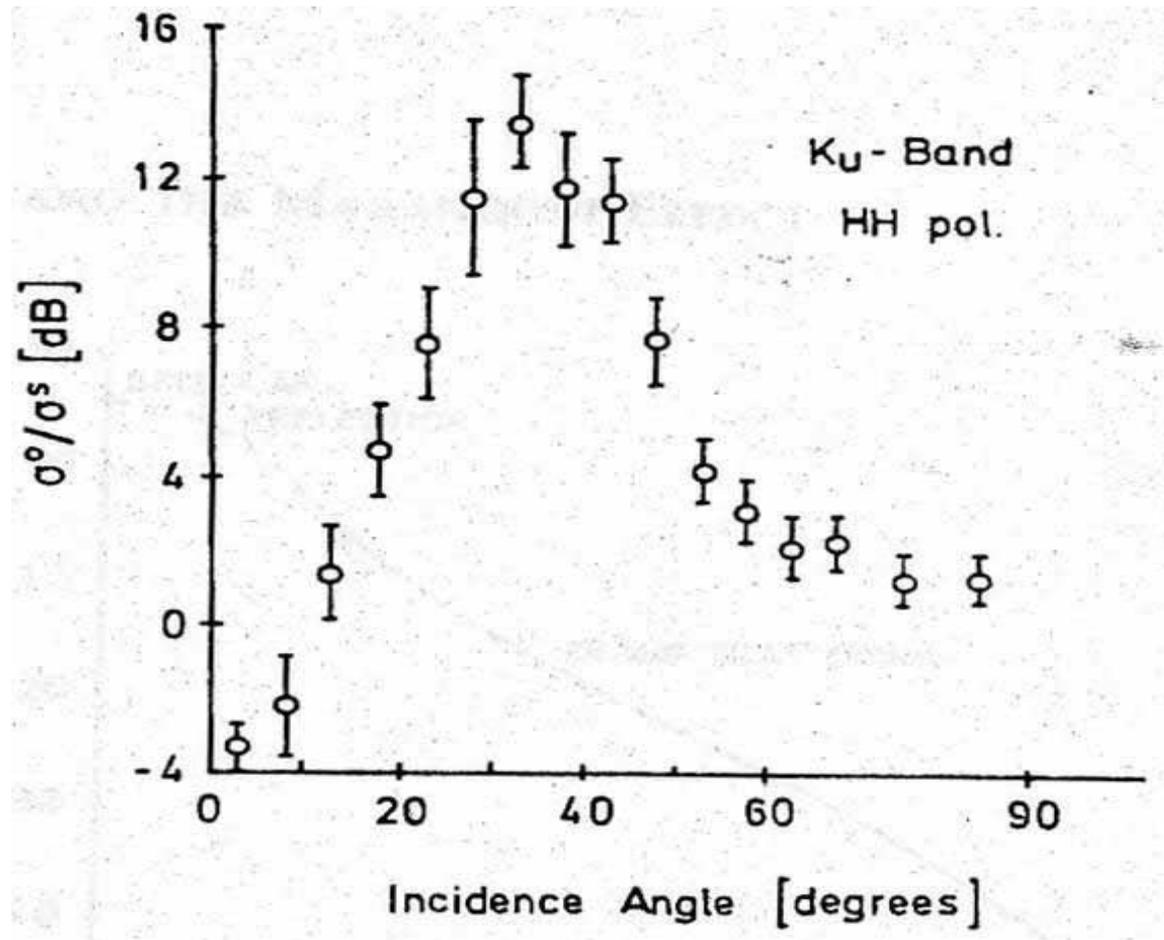
Угловая зависимость поляризационного параметра, характеризующего резонансное рассеяние на вертикальной (сплошная кривая) и горизонтальной (штрихованная кривая) поляризациях для морской воды

Для диэлектрической проницаемости морской воды

$$\varepsilon = 49.32 + 39.53i$$

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

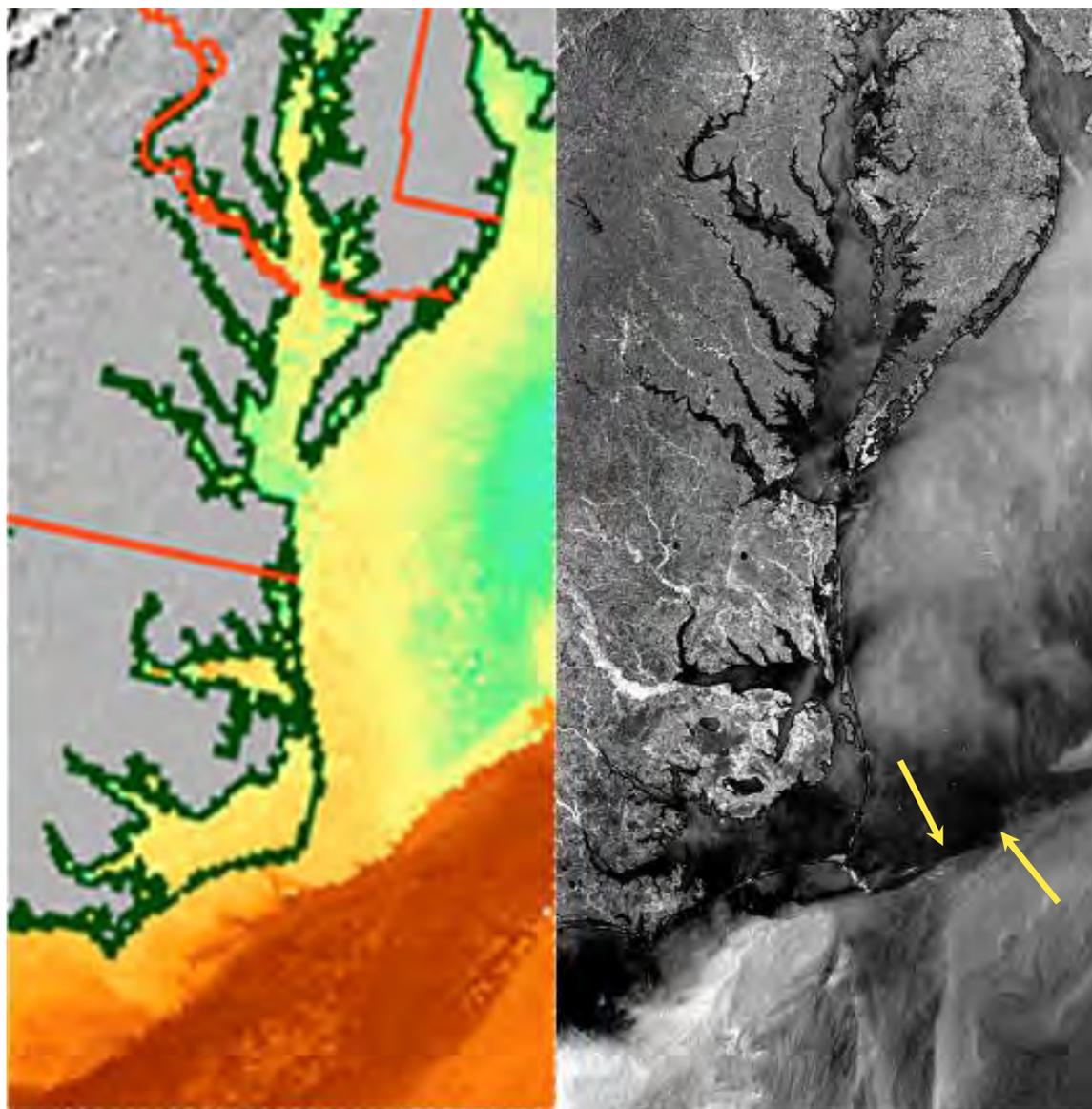
ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ОТ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ (3)



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.

**МЕХАНИЗМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ
ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ В ОКЕАНЕ И
ПРИВОДНОМ СЛОЕ
АТМОСФЕРЫ НА
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЯХ МОРСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ**

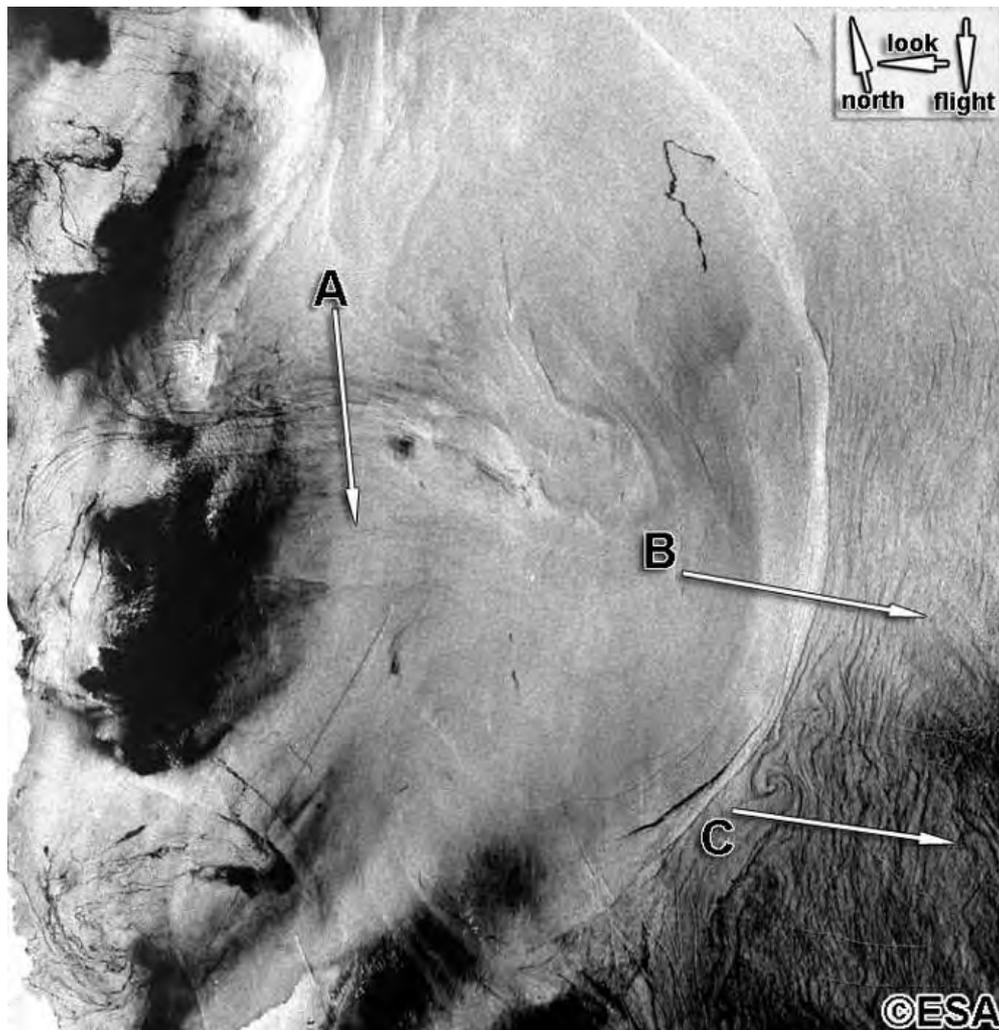
ФРОНТ ОКЕАНСКОГО ТЕЧЕНИЯ



The Gulf Stream off North Carolina imaged via AVHRR (thermal infrared) (left panel - 1300 UTC) and

RADARSAT-1 (C-band, HH) (right panel – 23:00 UTC) on 16 October 1996 under low winds (between 2 and 3 m s⁻¹).

Surface temperatures in AVHRR image range from 15°C (light green) to 30°C (red).



ERS-2 SAR
September 27, 1999
North-west Pacific
Japan Sea

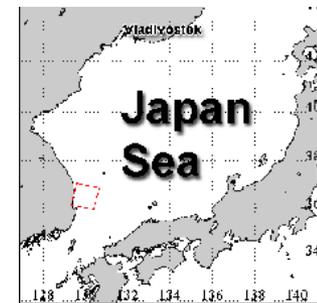
ФРОНТ ОКЕАНСКОГО ТЕЧЕНИЯ

The image covers the area of the East Korean Warm Current (EKWC) in the Japan Sea.

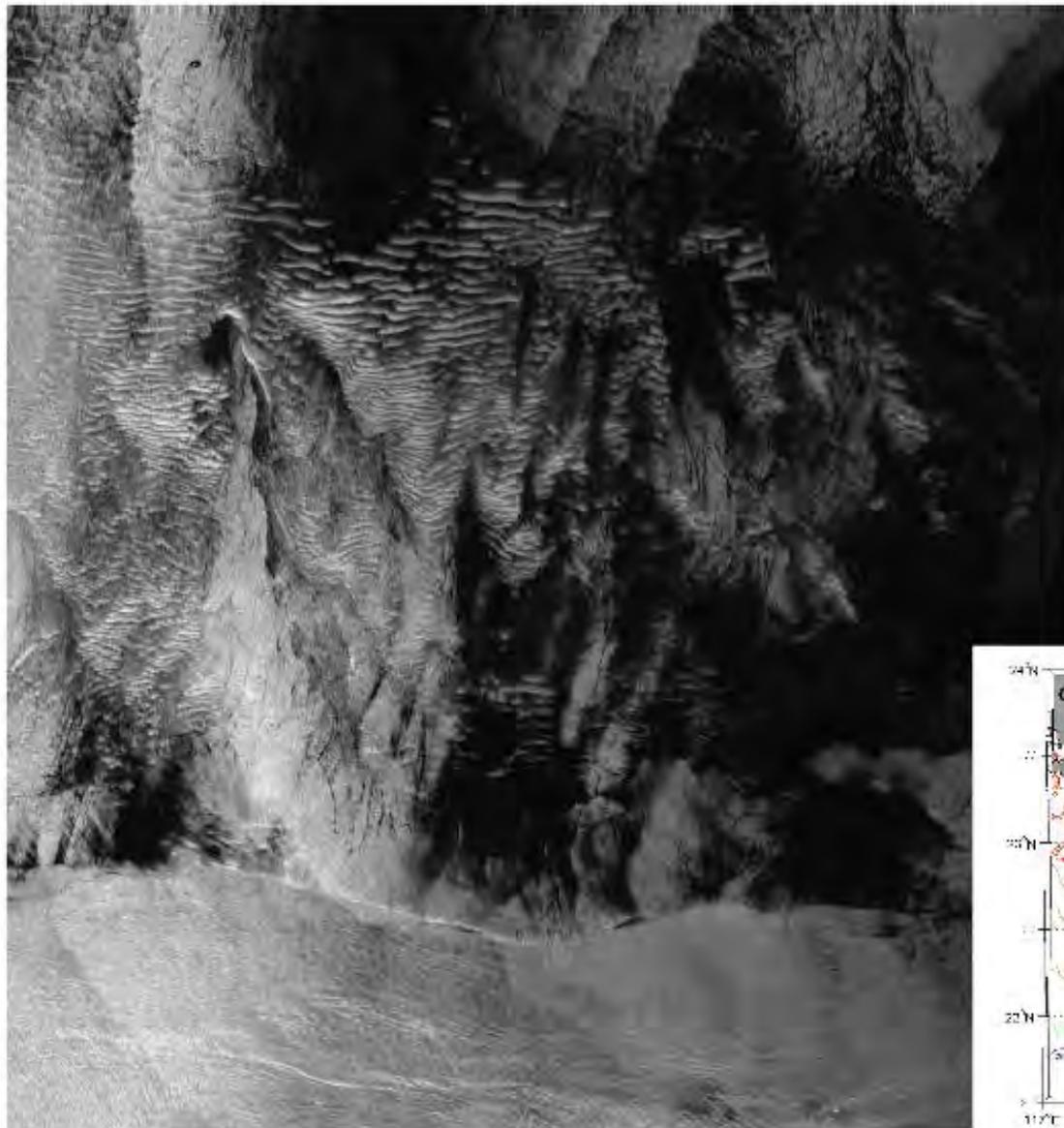
The EKWC flows to the north along the eastern coast of Korea. It is separated from the coast at 38°N and flows to the northeast where it meets the cold subarctic waters and forms a subarctic front in the Japan Sea along approximately 40°N .

The SAR image shows a situation when the coastal southward North Korean Cold penetrated to the 36°N and formed the arched convergence zone with the radius of 50 km on the western side of the EKWC.

Surface films trace an offshore jet at left-centre of the image (section A) and the EKWC front (section B). The NRCS variations caused by filamentary slicks in the EKWC area is shown in section C.



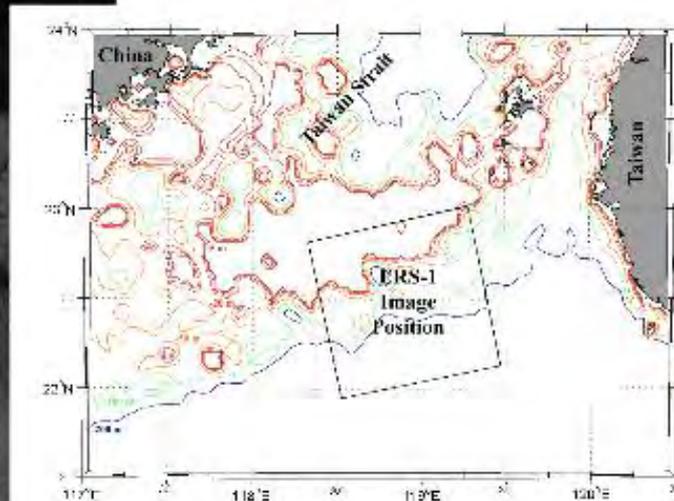
ДОННАЯ ТОПОГРАФИЯ + ФРОНТ ОКЕАНСКОГО ТЕЧЕНИЯ



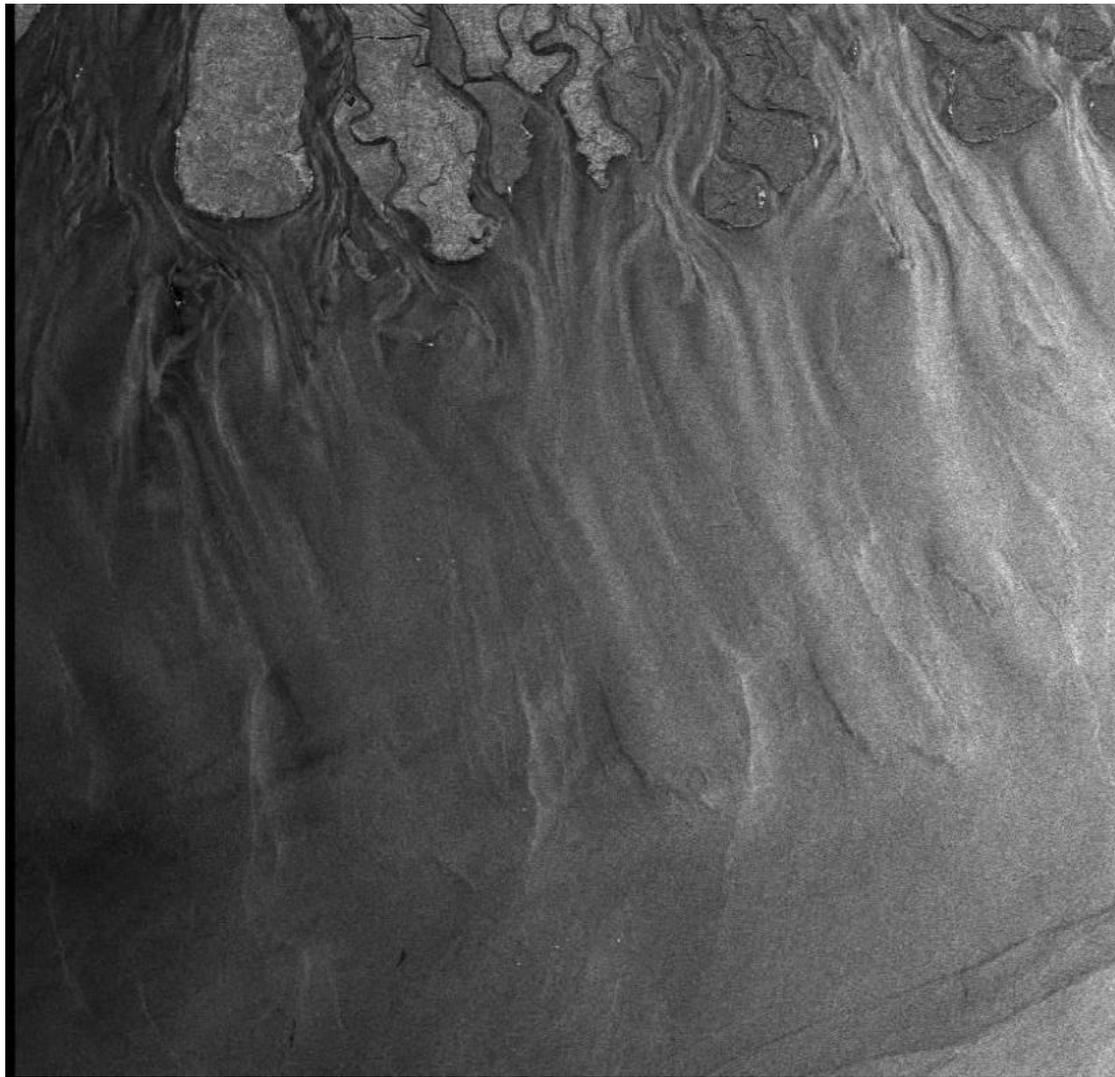
ERS-1 (C-band, VV) SAR image of the central part of the Taiwan Tan Shoals acquired 27 July 1994.

The water depth in most of the shallow areas (the areas to the North showing wave-like patterns in the image) is between 10 m and 20 m.

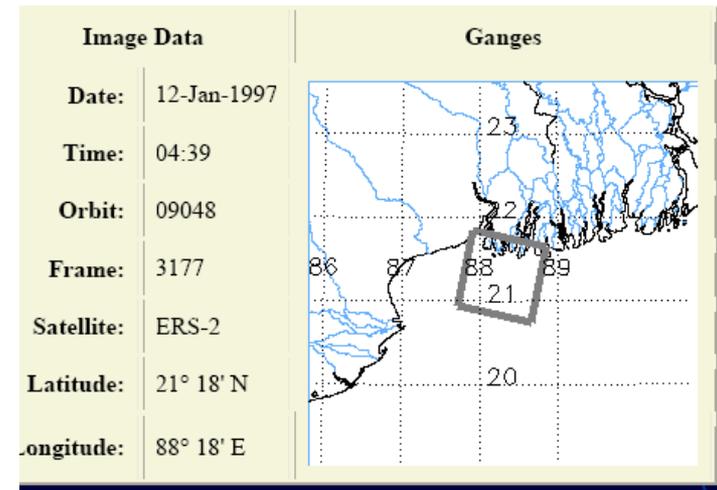
The Taiwan current is visible in the lower section of the image. The bright streaks are sea surface manifestations of current fronts that closely follow the depth lines

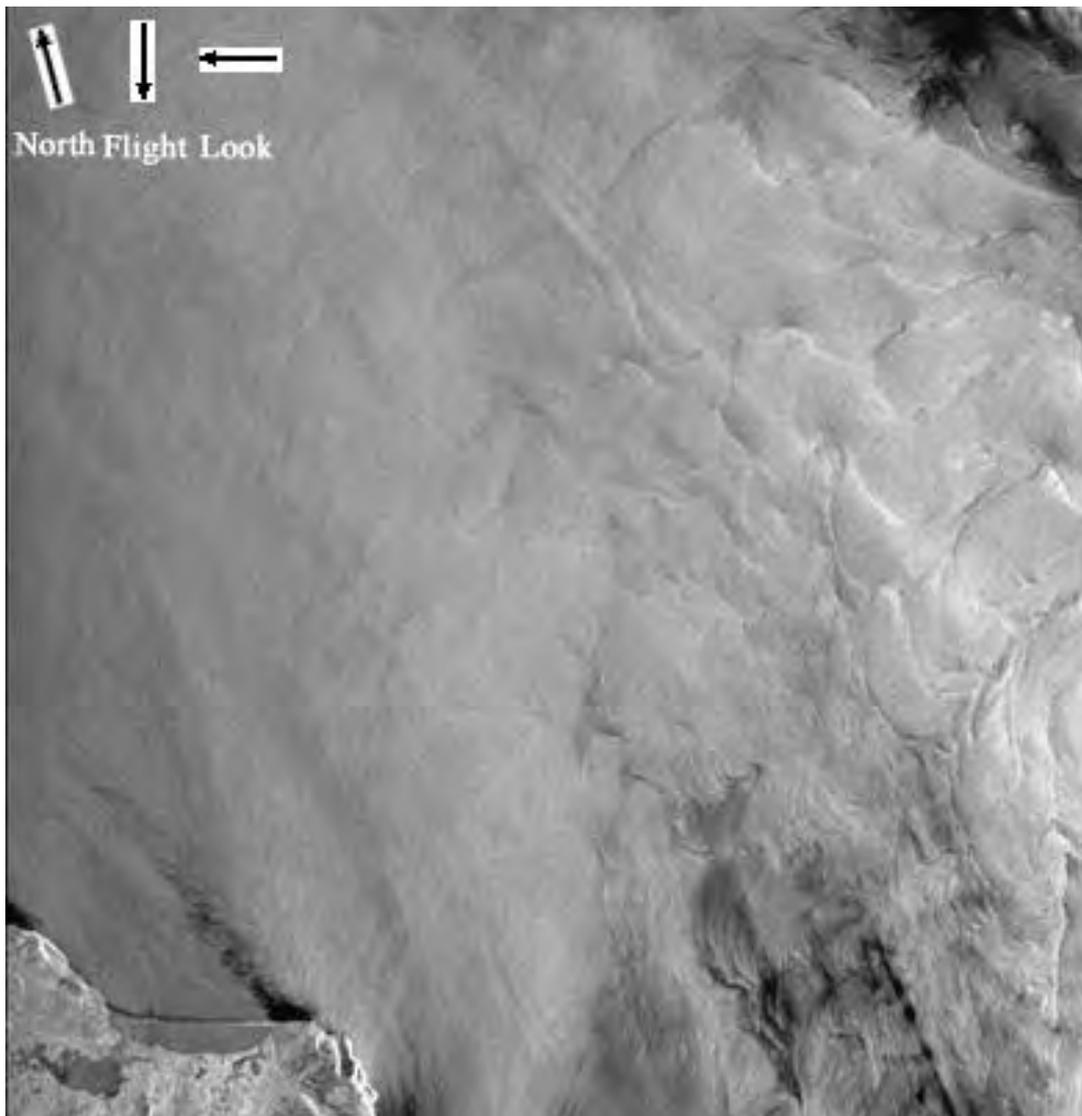


ДОННАЯ ТОПОГРАФИЯ



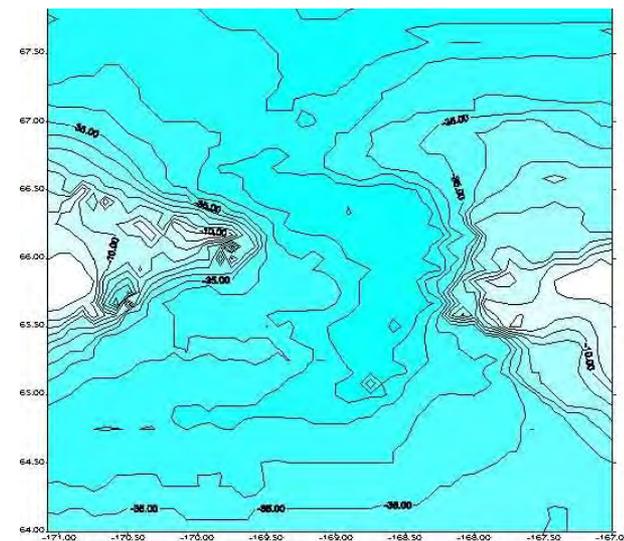
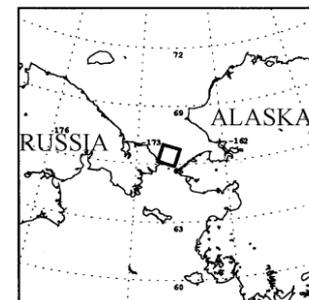
ERS-1 SAR
January 12, 1997 at 04:39
Indian Ocean





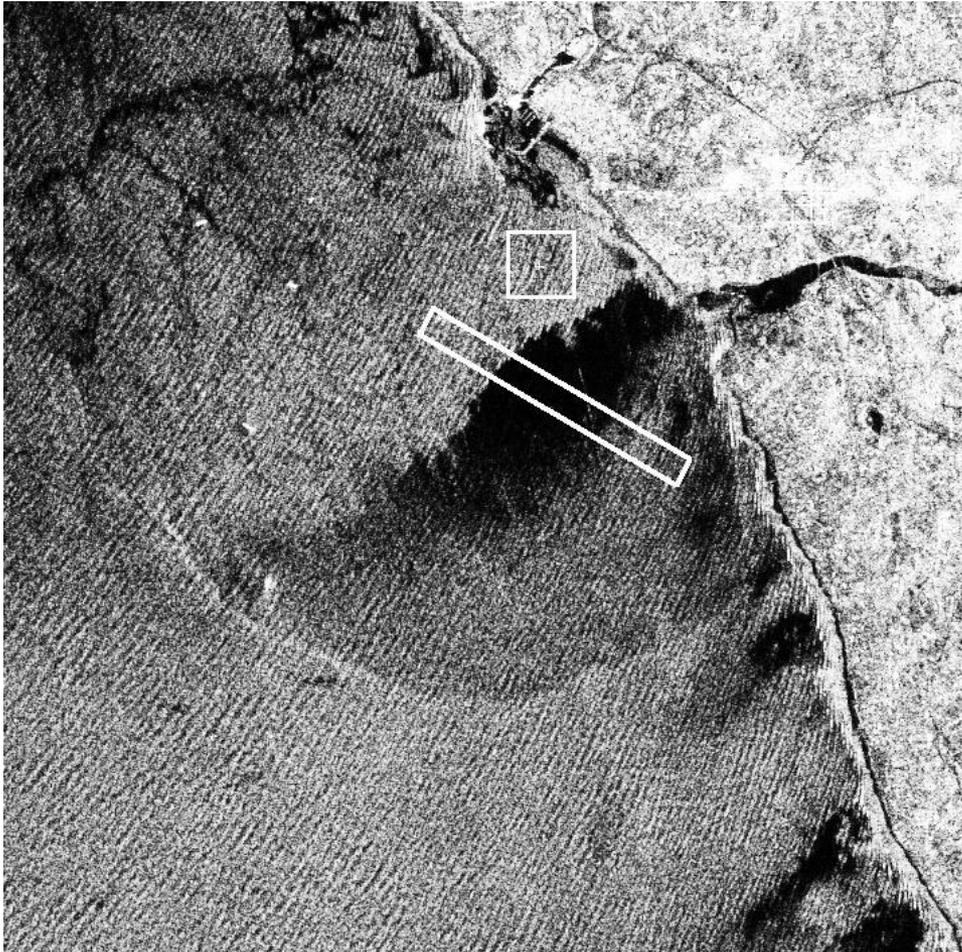
ERS-1 SAR
11.07.95 / 22:38:06
The Bering Stait

ДОННАЯ ТОПОГРАФИЯ

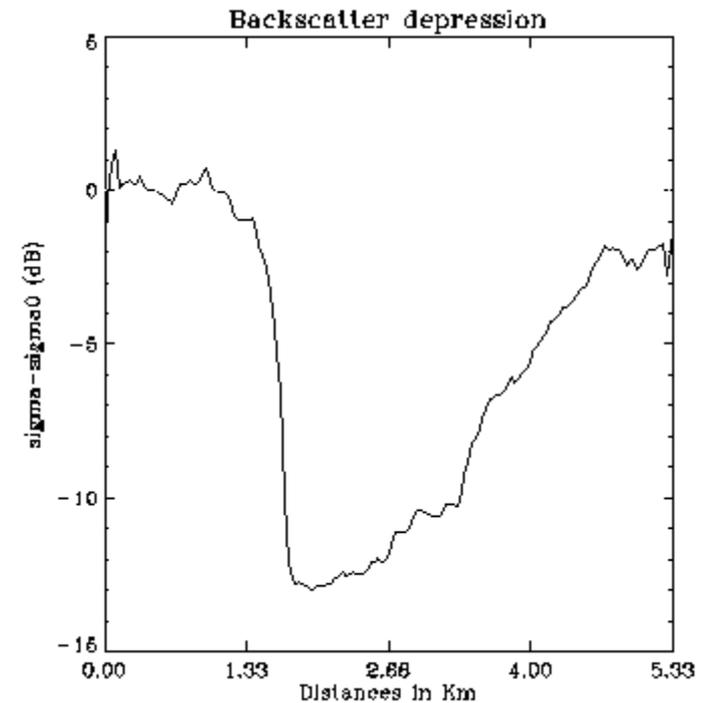


The map is kindly provided by Prof. Thomas J. Weingartner,
Institute of Marine Science, Univ. of Alaska, Fairbanks, Alaska

РЕЧНОЙ «ПЛЮМ»+ ЗЫБЬ

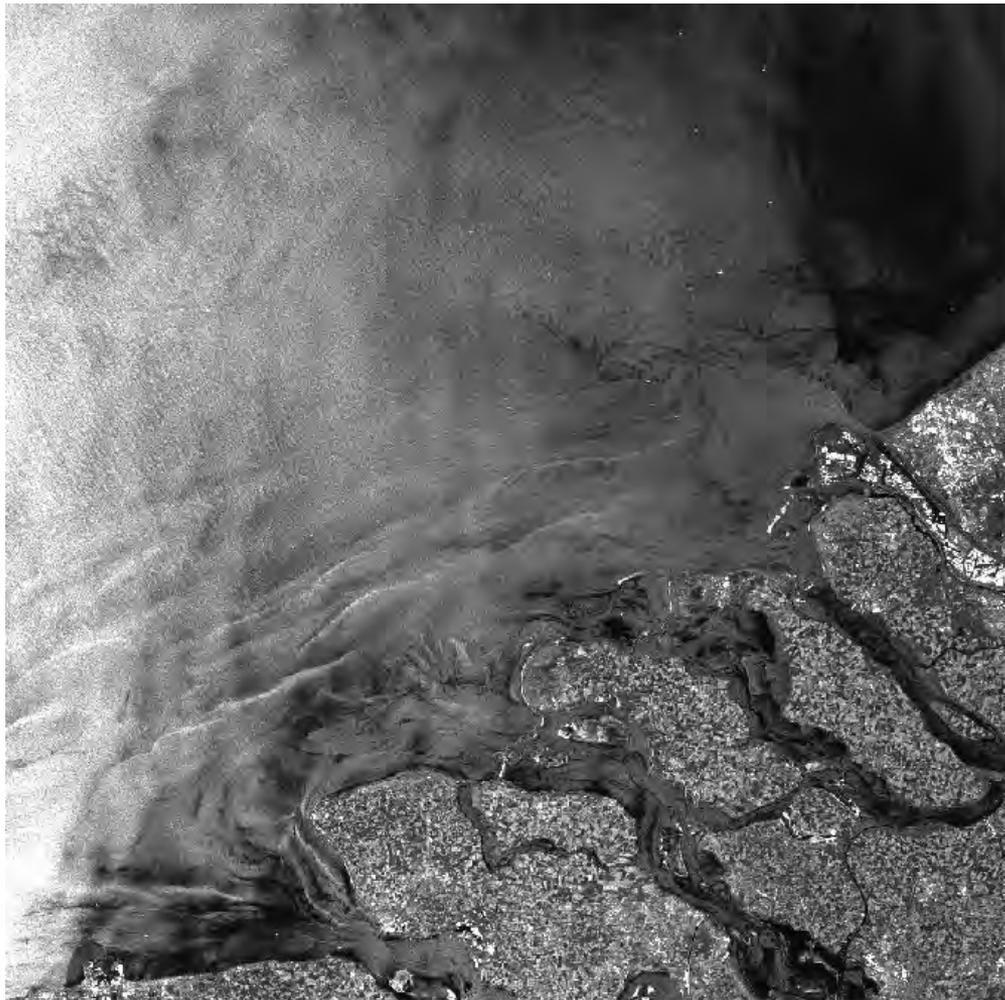


ERS-2 SAR
November 15, 2000
North-East Atlantic
Portuguese coast
Douro River mouth



Distinct plume
area stretches
for over 10 km
into ocean from
the river mouth

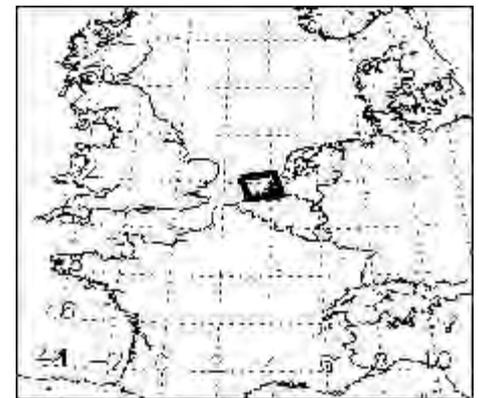




РЕЧНОЙ «ПЛЮМ»

The plume is modulated by the tidal cycle in that area, thus leading to parallel bright lines, which are caused by local shear currents. In the right image centre the plume can be clearly delineated through the presence of marine surface films that are driven away from the river mouth.

ERS-1 SAR
July 12, 1995 at 21:49
river Rhine mouth
Southern North Sea



РЕЧНОЙ «ПЛЮМ»

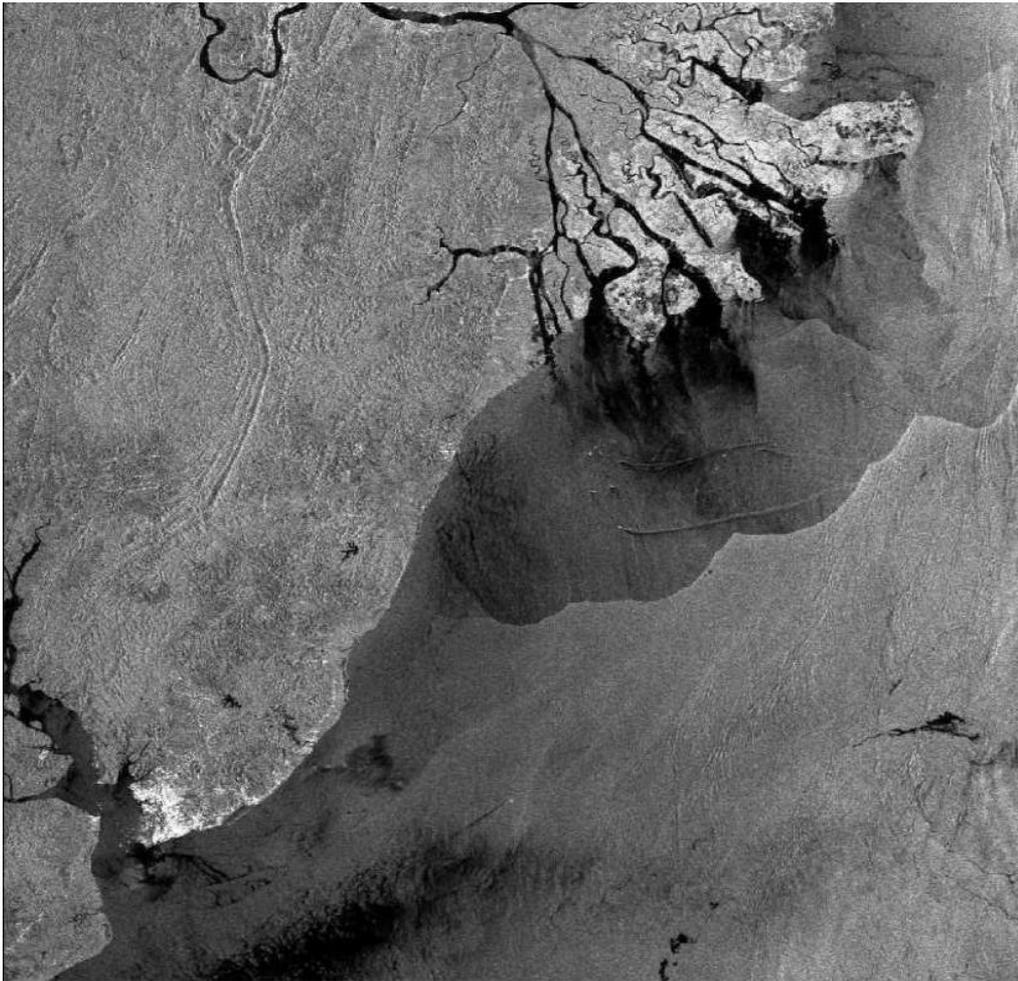
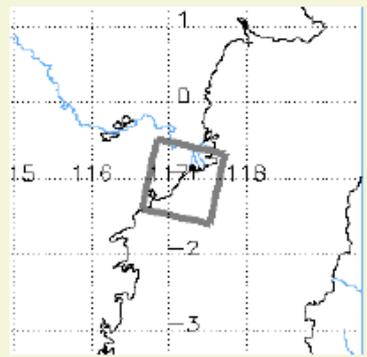
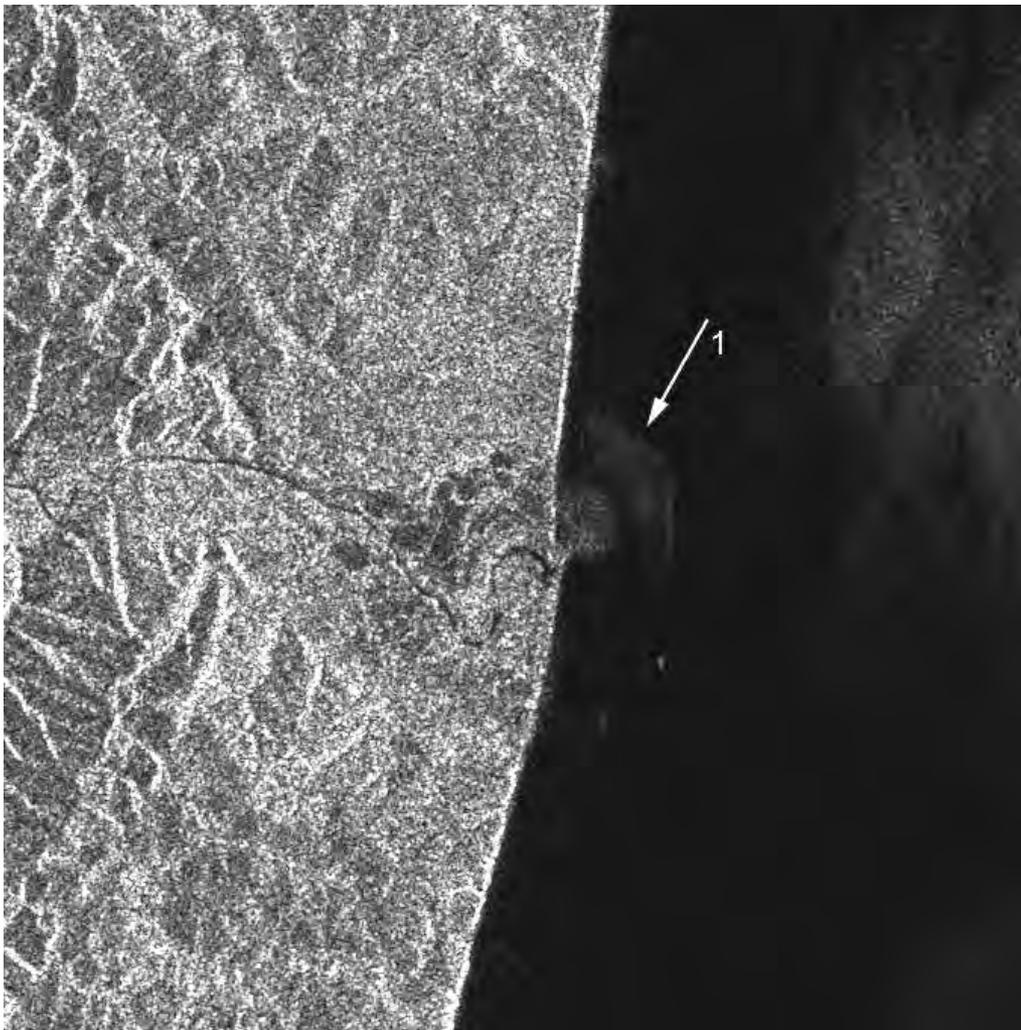


Image Data		Kutai
Date:	12-Dec-1999	
Time:	02:29	
Orbit:	24320	
Frame:	3627	
Satellite:	ERS-2	
Latitude:	1° 01' S	
Longitude:	117° 12' E	

ERS-2 SAR
December 12, 1999 at 02:29
East coast of Kalimantan Island
Mahakam River

РЕЧНОЙ «ПЛЮМ»

Against the background of a large slick, a brighter typically-shaped plume area of river Uryup (1) is distinctly visible.



ERS-1 SAR
July 23, 1995 at 01:19
North-West Pacific
Sea of Okhotsk
South end of Sakhalin Island



ОКЕАНСКИЕ ВИХРИ

The ERS-2 SAR image covers the area of the subarctic frontal zone in the Japan Sea.

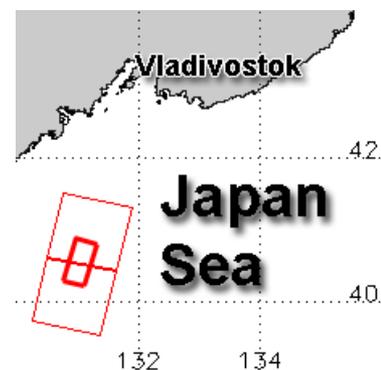
Detailed consideration of SAR images of the subarctic frontal zone taken at wind speed $W < 5-6$ m/s revealed the instabilities in the form of small-scale eddy streets.

They are not detected on IR images due to their small thermal contrast against the surrounding background and/or due to insufficient spatial resolution of satellite IR sensors.

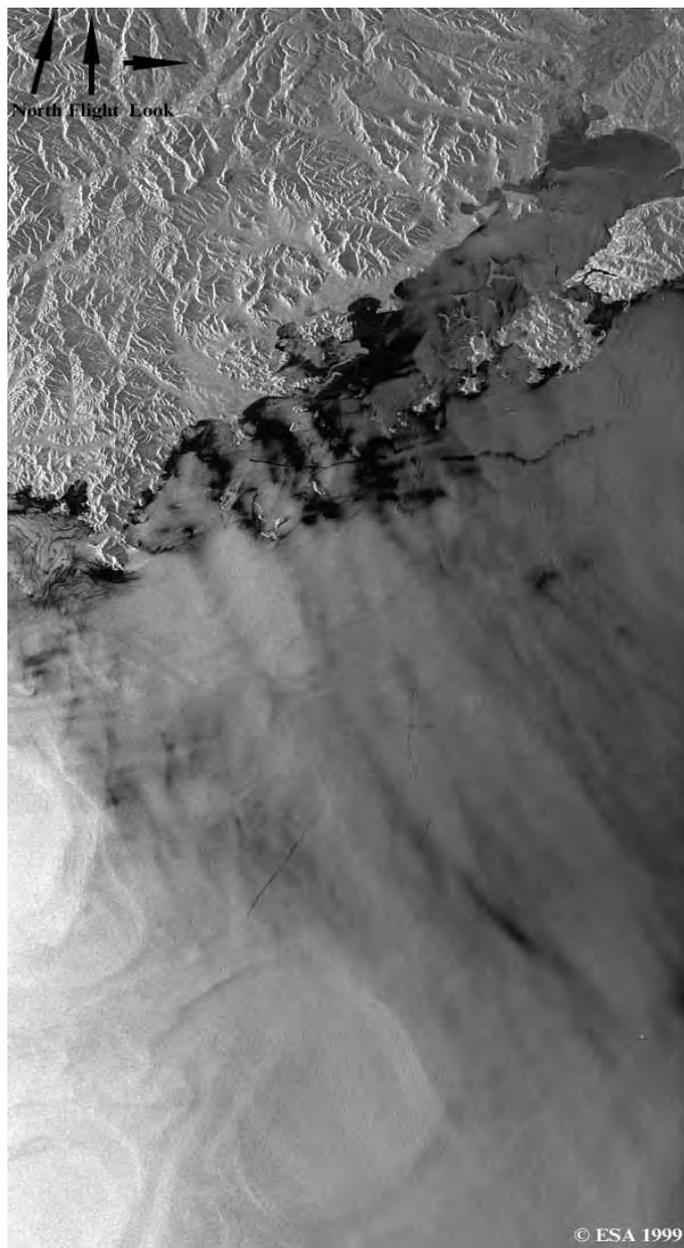
Several elongated features consisting of cyclonic eddies with the typical size of 3-5 km are clearly visible due to filamentary slicks.



ERS-2 SAR
September 02, 1996 at 02:01
Japan Sea



ОКЕАНСКИЕ ВИХРИ



100 x 204 km
ERS-2 SAR
23.03.99 / 13:27
Northwestern Japan Sea



ОКЕАНСКИЕ ВИХРИ

Cyclonic eddies on the front of the Soya Warm Current, La Perouse Strait.

In the SAR image, the narrow bright band ~1 km wide is caused by current shift and starts near Kamen Opasnosti (Rock of Danger) where cold waters are located

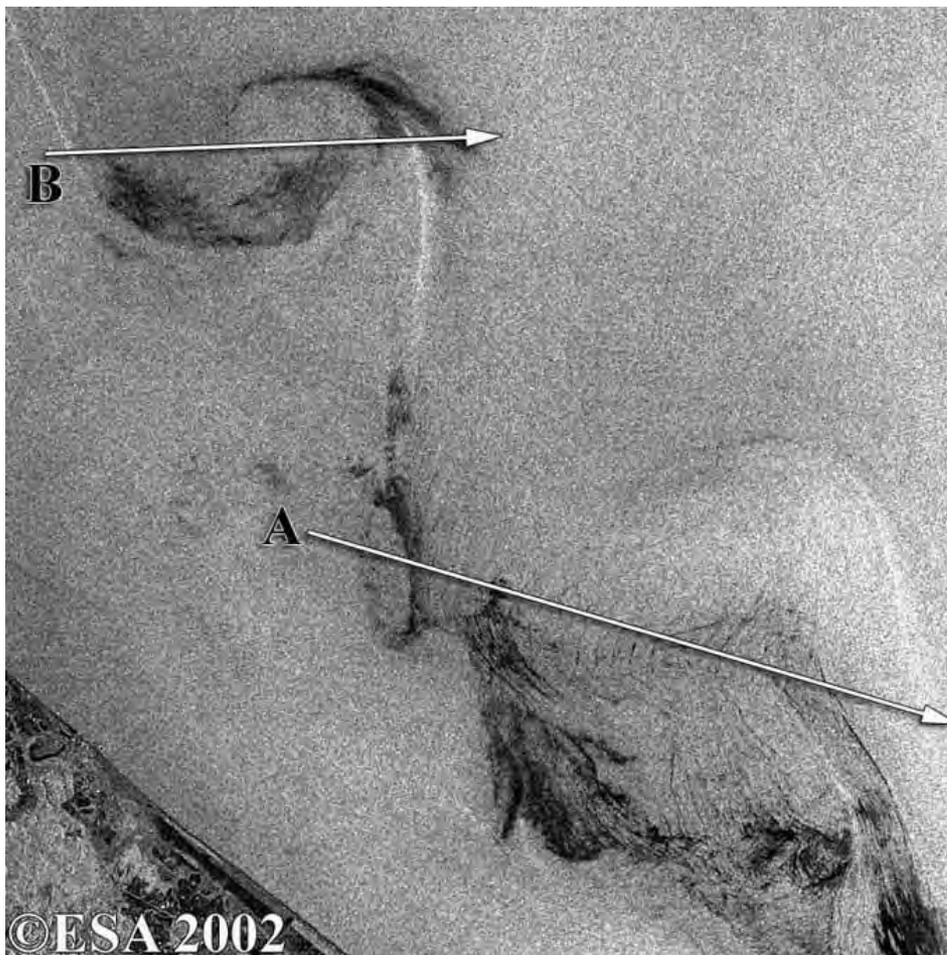
The band is close to the boundary dividing warm (Soya) and cold (offshore) waters. (The position of the current shift zone may be different from the thermal boundary). The first eddy-like structure is located to the southeast of Rock of Danger.

The second eddy consisting of a cold core of the size of ~8 km and two spiral tails is clearly revealed on both images.

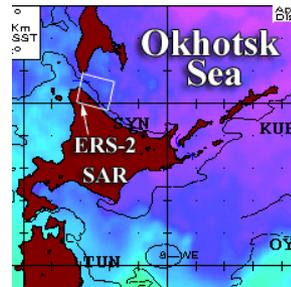
The distance between tails is ~15 km and can be considered as the eddy's size.

The third eddy also has the cold central area with SST equal to 5°C. The coldest waters (4°C) form a band to the southeast off the eddy's centre. The cold waters in the third eddy's area are characterized by decreased backscatter.

The current shift zone (narrow bright band) is visible to the north of the eddy where SST is 6.5°. The eddies are located at a distance of ~25 km from the coastline and the distance between their centers is ~37 km which closely agrees with the results of numerical model experiments



ERS-2
May 13, 2002
Okhotsk Sea

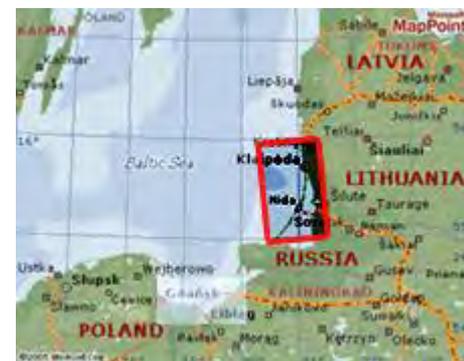




Envisat ASAR
August 18, 2004 at 20:11
South-East Baltic Sea
Kouronian Spit

ВИХРИ В МОРЕ

Slicks of mixed origin outline multiple vortices of small and medium sizes along Kouronian Spit.



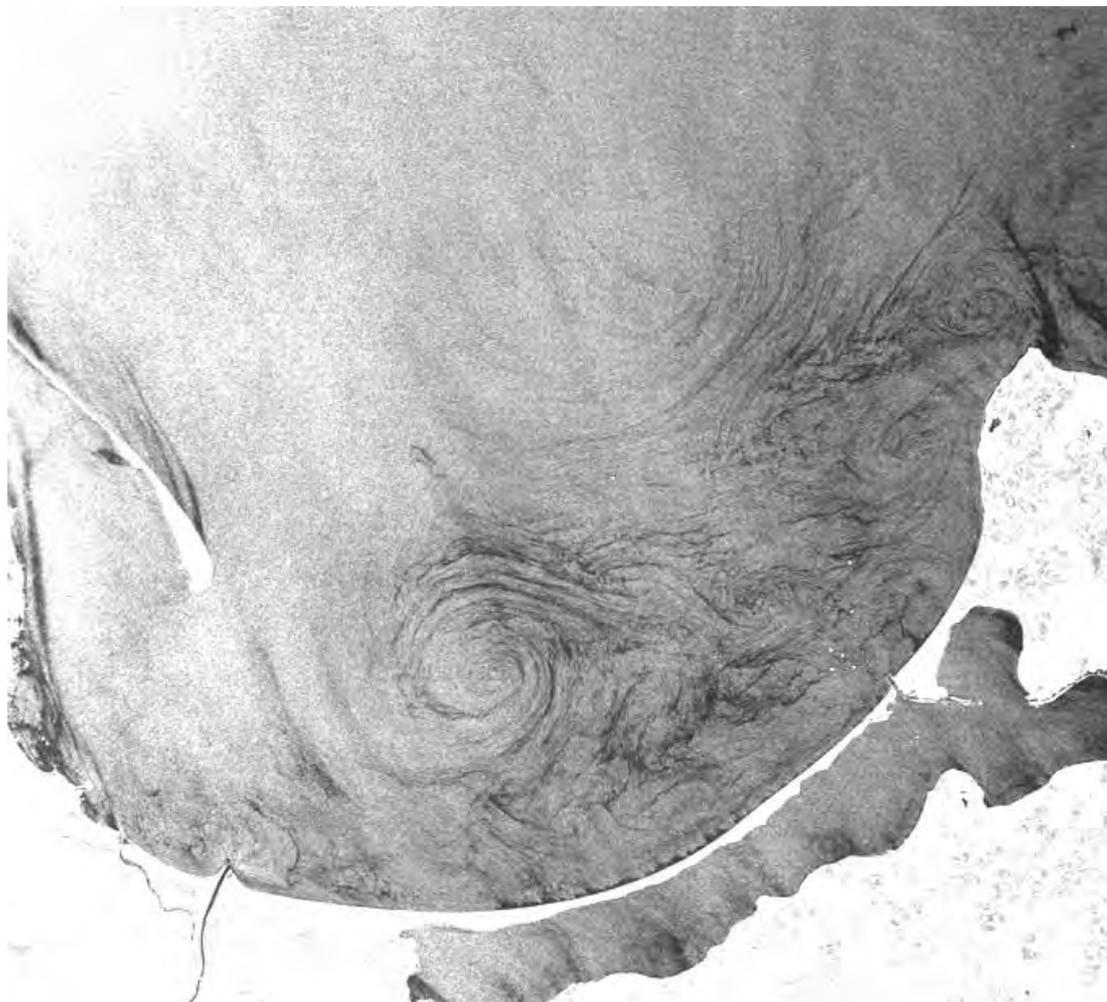
ВИХРИ В МОРЕ



ERS-2 SAR
August 04, 2004 at 08:19
North-East Black Sea
Novorossiysk-Ghelendjik region

Mushroom flow in the sea
is manifested through
bands of surfactant slicks





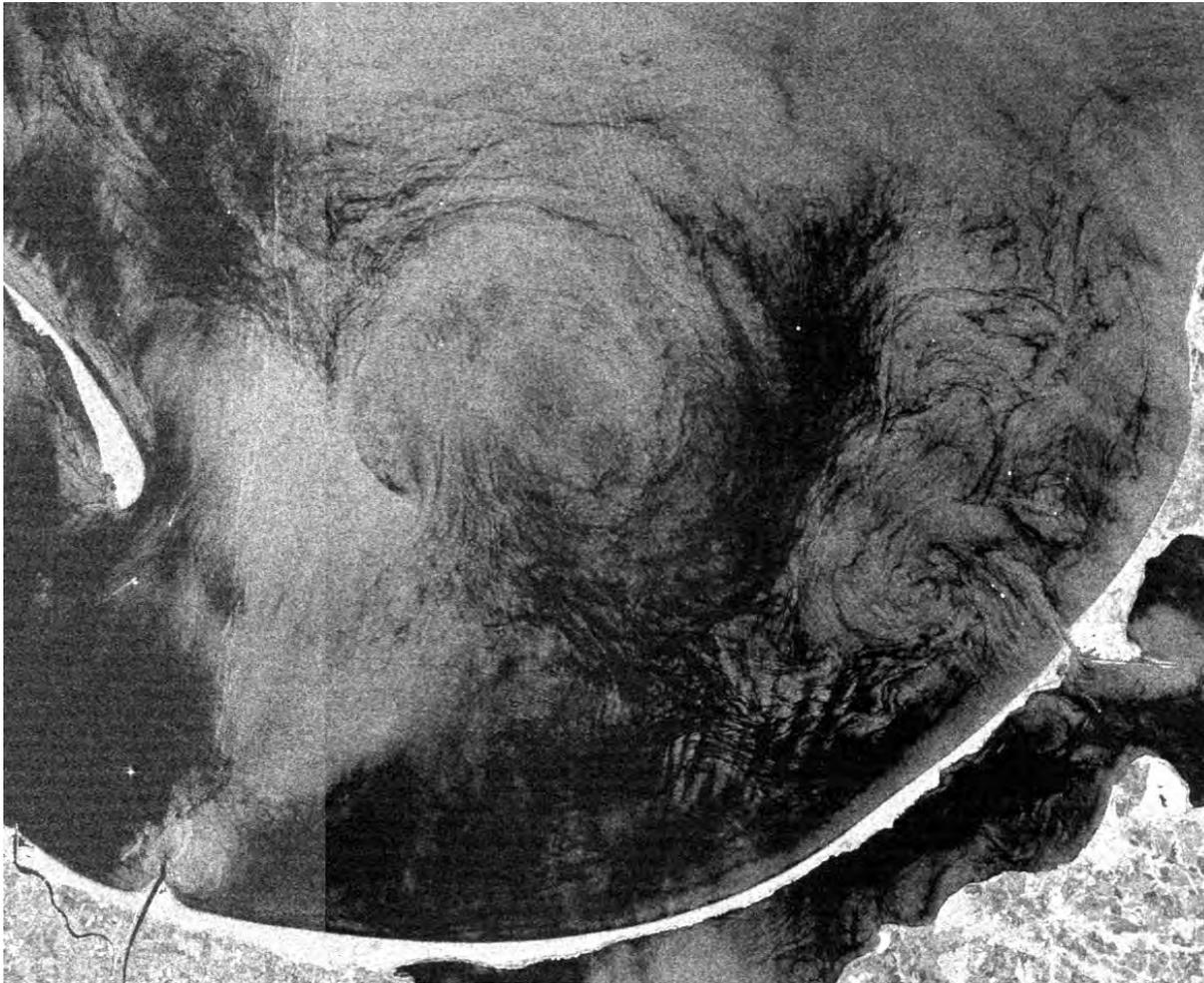
ВИХРИ В МОРЕ

Slicks of biogenic origin outline multiple vortices of small and medium sizes in Gdansk Bay.

Envisat ASAR
August 05, 2004 at 20:19
Gdansk Bay
South-East Baltic Sea



ВИХРИ В МОРЕ +РЕЧНОЙ «ПЛЮМ»



Envisat ASAR
May 28, 2005 at 20:16 GMT
South Baltic Sea
Gulf of Gdansk

At the end of May, the sea surface is densely covered with filamentary slicks helping to disclose local dynamics pattern. In the image, the centre of the Gulf of Gdansk is occupied by an eddy dipole of about 70 km in diameter.



АТМОСФЕРНЫЙ ФРОНТ

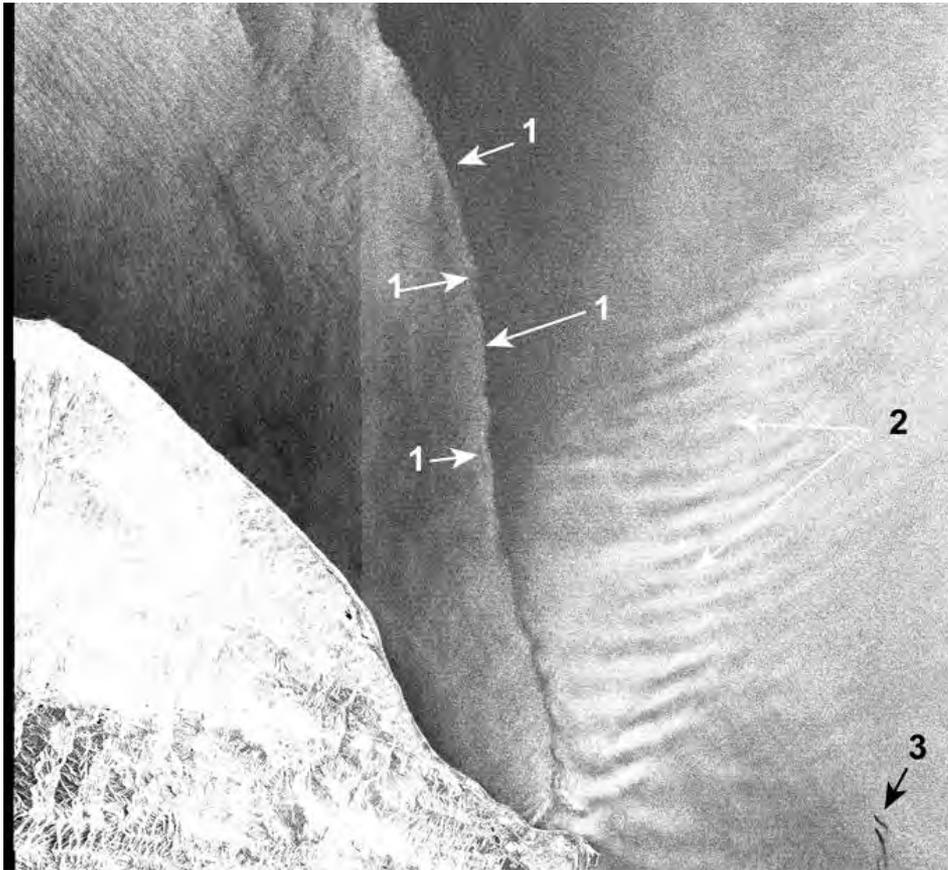
The image shows a strongly pronounced atmospheric front.



Envisat ASAR
June 13, 2005 at 20:14
South-East Baltic Sea



АТМОСФЕРНЫЙ ФРОНТ



In the image, we see manifestations of an atmospheric front (1), a packet of quasi-linear atmospheric gravity waves (2), and oil pollution (3).

Envisat ASAR
September 04, 2004 at 06:46
Caspian Sea
Baku region



АТМОСФЕРНЫЙ ФРОНТ



ERS-2 SAR
October 04, 1999 at 08:21
North-East Black Sea

Cold air from east (from the shore) interacts with warmer air over the sea.

Temperature and pressure horizontal gradients are large.

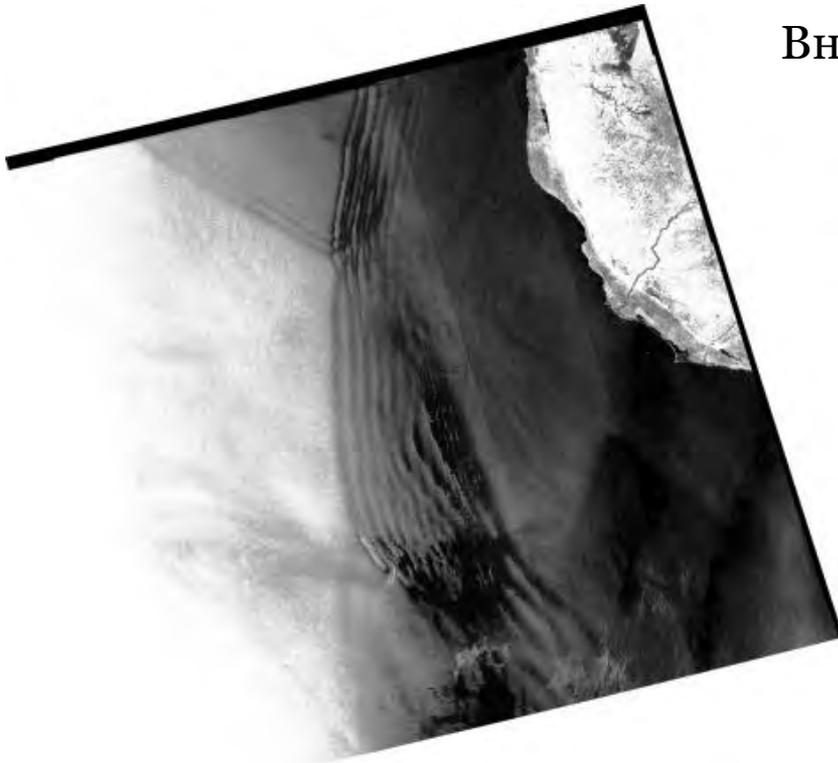
Colder air induces convective processes in the near-surface layer of the atmosphere.

The wind is stronger there hence radar contrasts are larger.

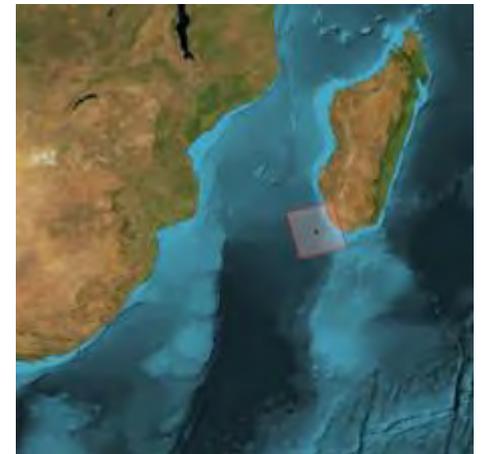


Внутренние волны в атмосфере

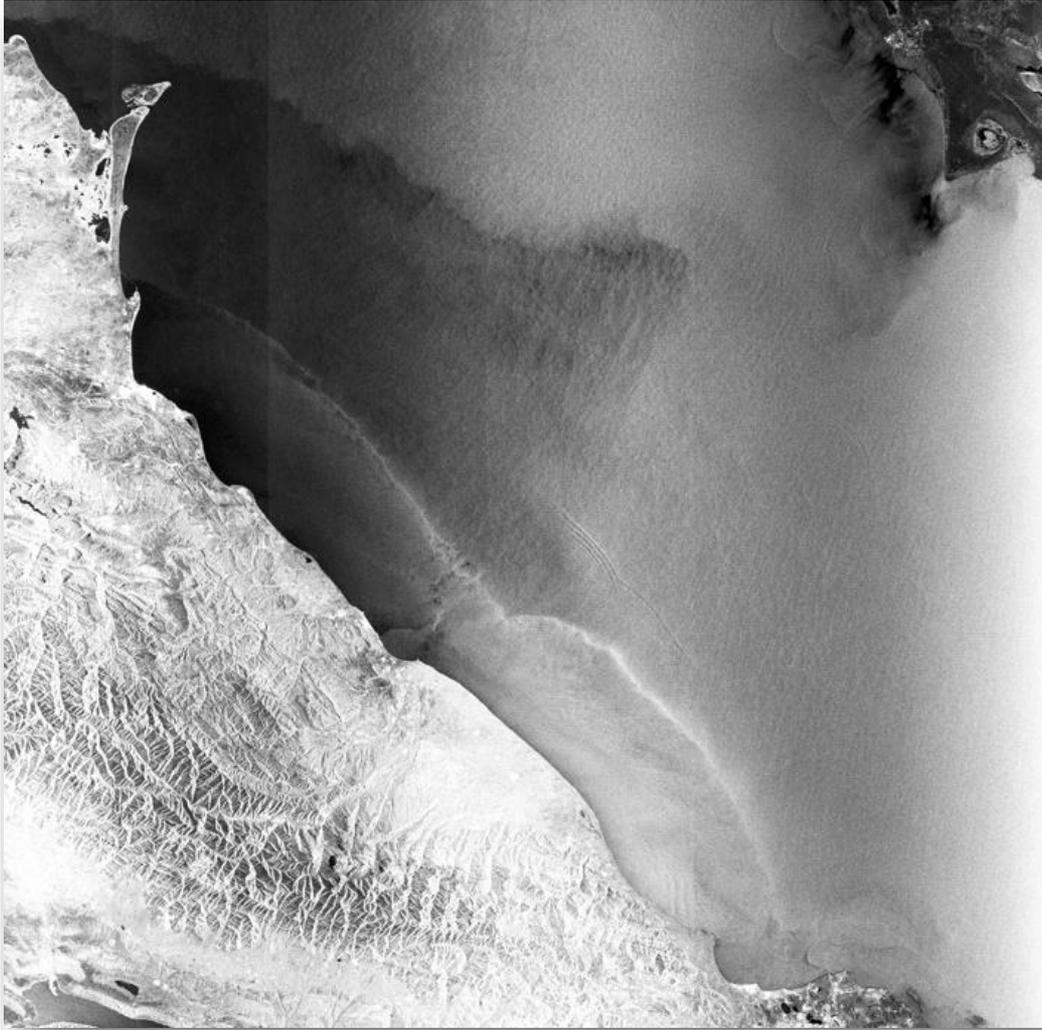
The image reveals an atmospheric internal solitary wave packet propagating west off Madagascar's southwest coastline. The large-scale internal solitary wave packet is made visible by characteristic sea surface roughness patterns, which are due to modulation of Bragg waves associated with wind stress variability on the sea surface.



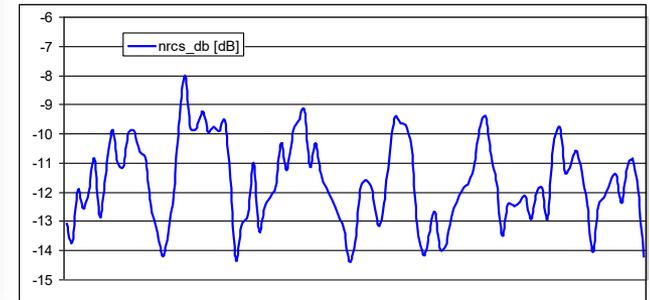
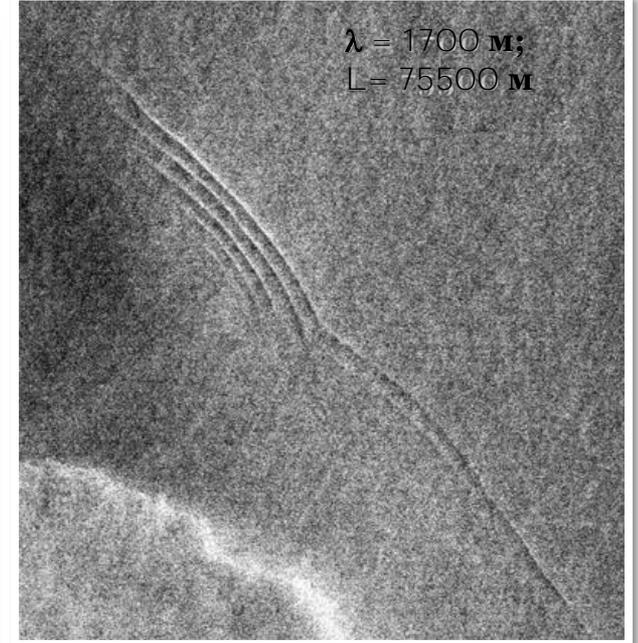
Envisat ASAR
September 19, 2004
at 19:42
West Indian Ocean
Madagascar coast



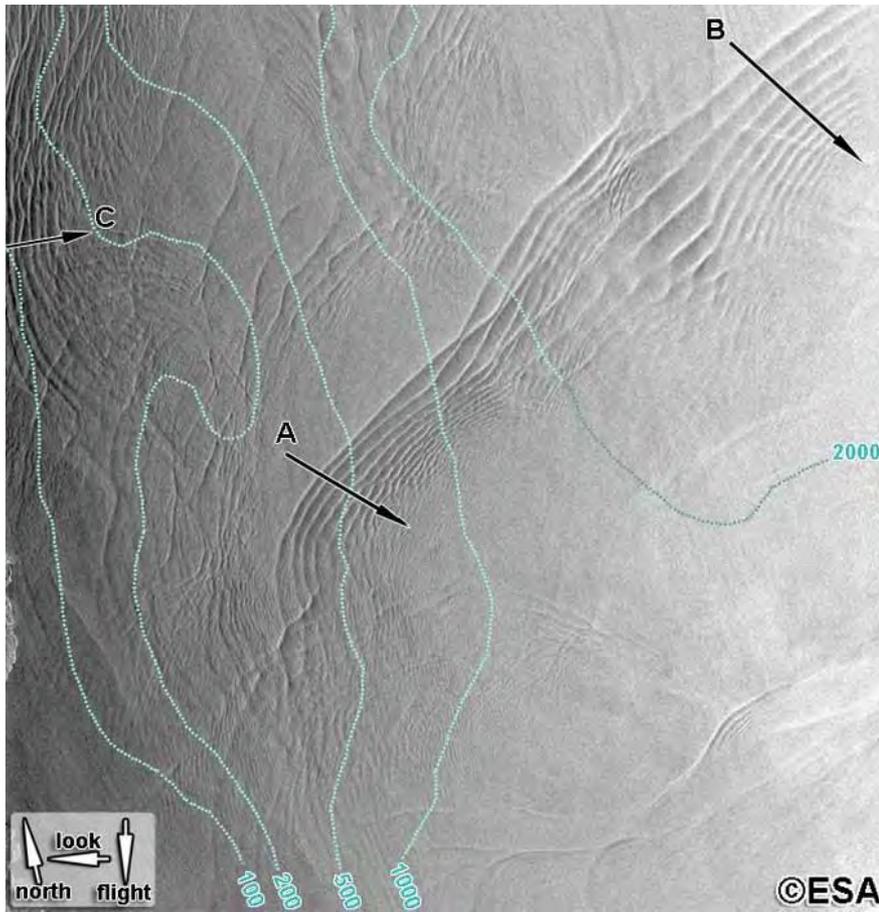
АТМОСФЕРНЫЙ ФРОНТ + ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В МОРЕ



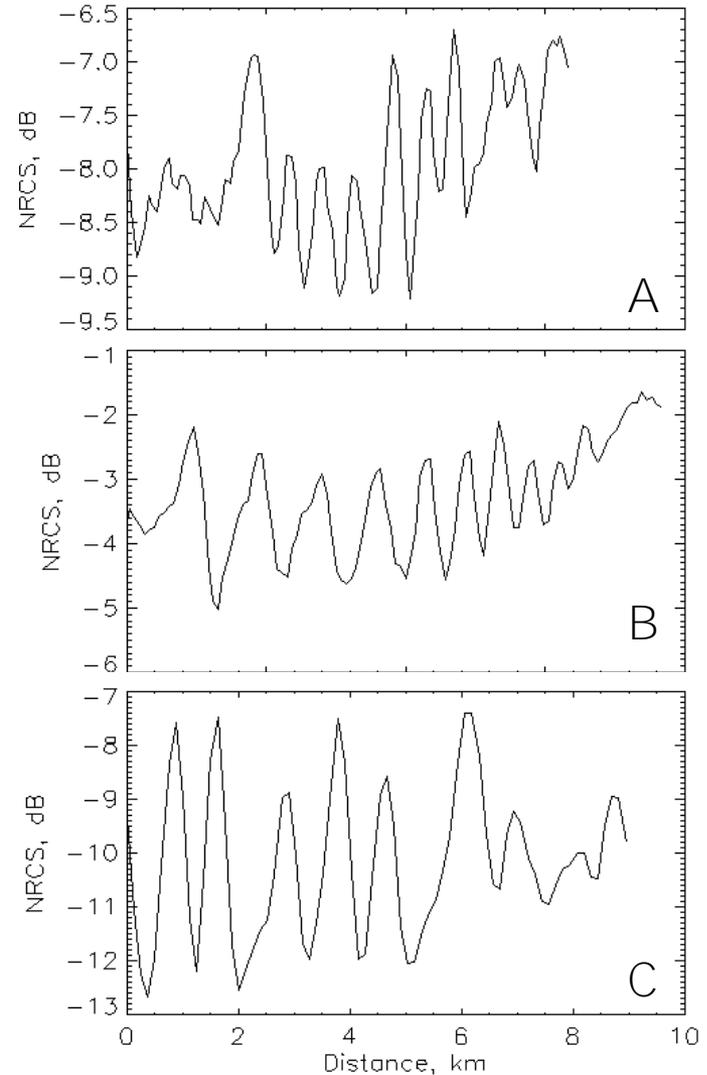
Envisat ASAR WSM, 75 m
2010-09-11 06:52



ОКЕАНСКИЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ



ERS-2 SAR
September 02, 1996 at 02:02
Japan Sea



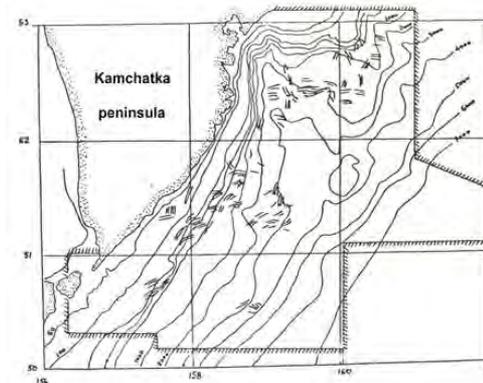
ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ : ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

- Распространяющиеся в океане внутренние волны проявляются на морской поверхности благодаря горизонтальным компонентам орбитальных скоростей вблизи поверхности, которые приводят к вариациям характеристик коротких ветровых волн.
- На морской поверхности ВВ проявляются в виде полос и пятен с повышенной (сулой, бегущий сулой) и пониженной (слики) интенсивностью коротких гравитационных волн.
- На РЛ-изображениях внутренние волны выглядят соответственно как полосы повышенного и пониженного рассеяния
- РЛ проявления внутренних волн определяются, наряду с гидродинамическими особенностями возмущений характеристик рассеивающих ветровых волн, также и электродинамическими механизмами рассеяния и зависят от поляризации, углов падения и длины зондирующих электромагнитных волн.

ОКЕАНСКИЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ

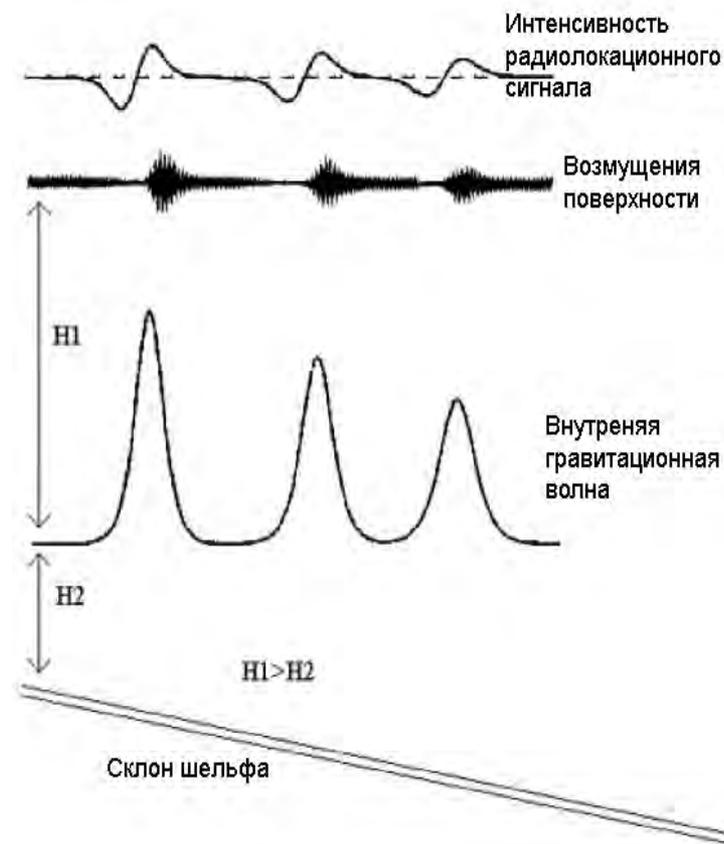
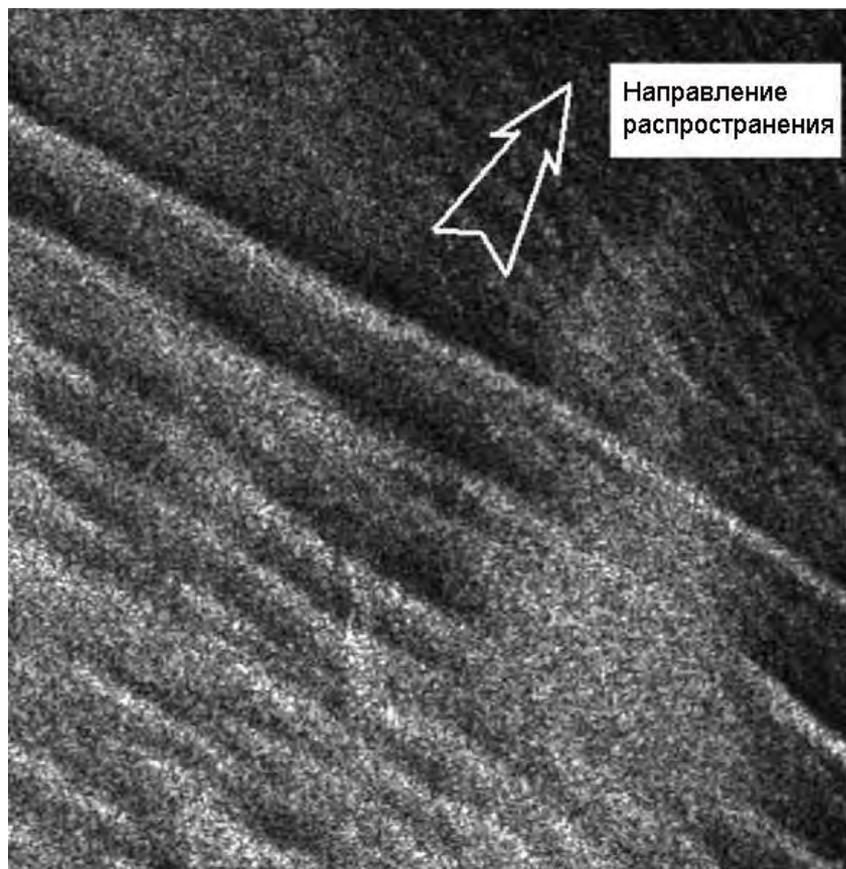


AN-24/RAR	
Flight altitude/speed	2150 m / 355 km/h
Image partition	No
Wavelength(s)/Frequency(ies) /Band(s)	2,25cm/13,6GHz/Ku
Polarization(s)	HH
Incidence angle(s)	72-84°
Date/Local time	25.08.83 / 04:07 - 04:10



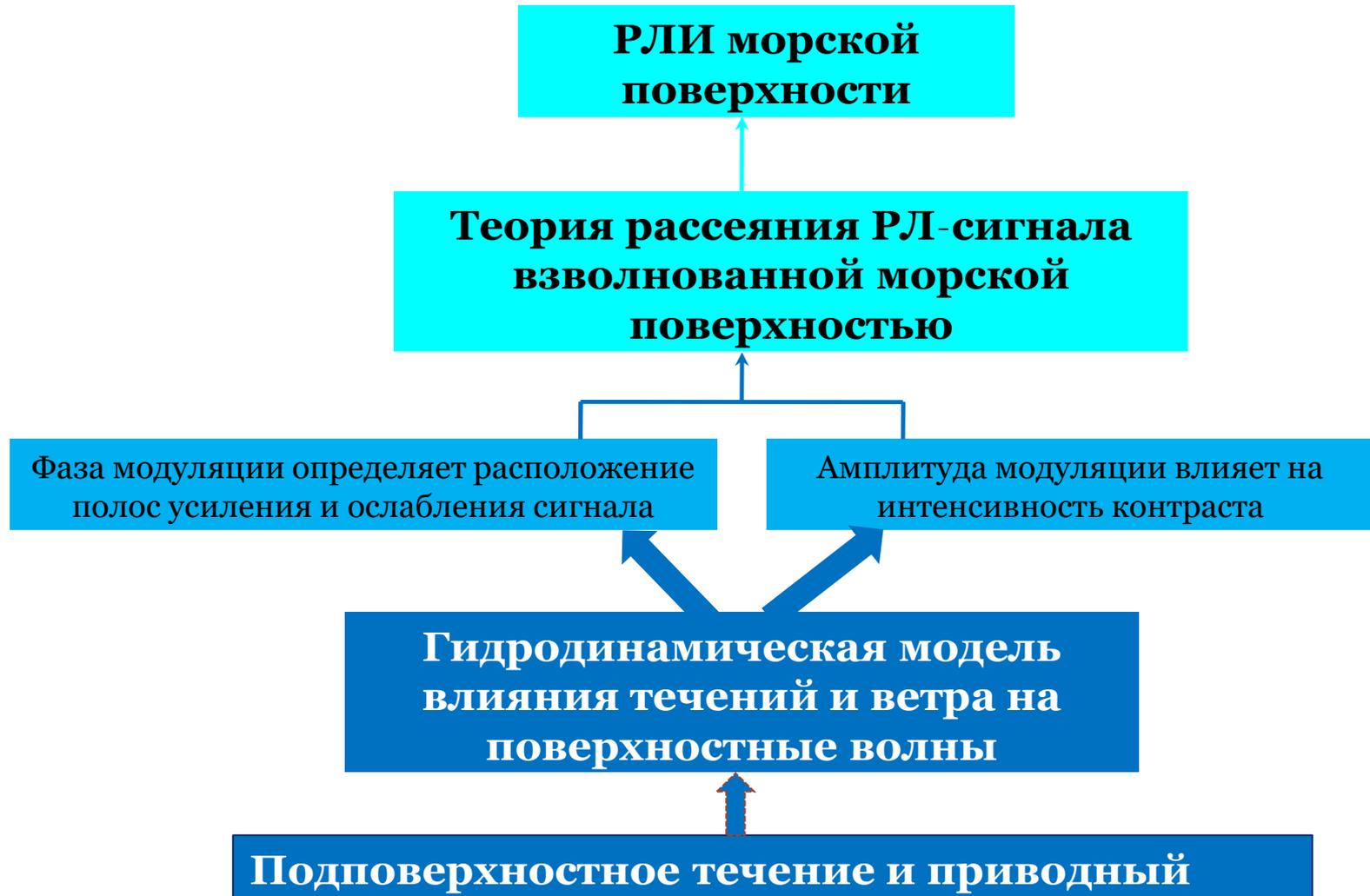
Map and line drawing interpretation of surface manifestation of internal wave packets in the North-western Pacific off Kamchatka peninsula.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВВ

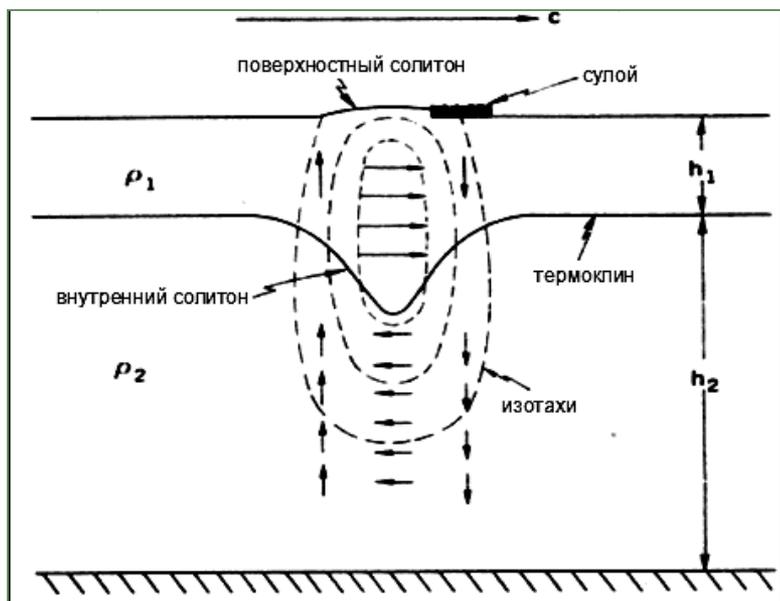


Пример проявления ВВ на радиолокационном изображении (слева) и (качественно) смещение пикноклина, вариации поля поверхностной сантиметровой ряби, вариации интенсивности обратно рассеянного сигнала (справа).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ПРИВОДНОГО ВЕТРА ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ



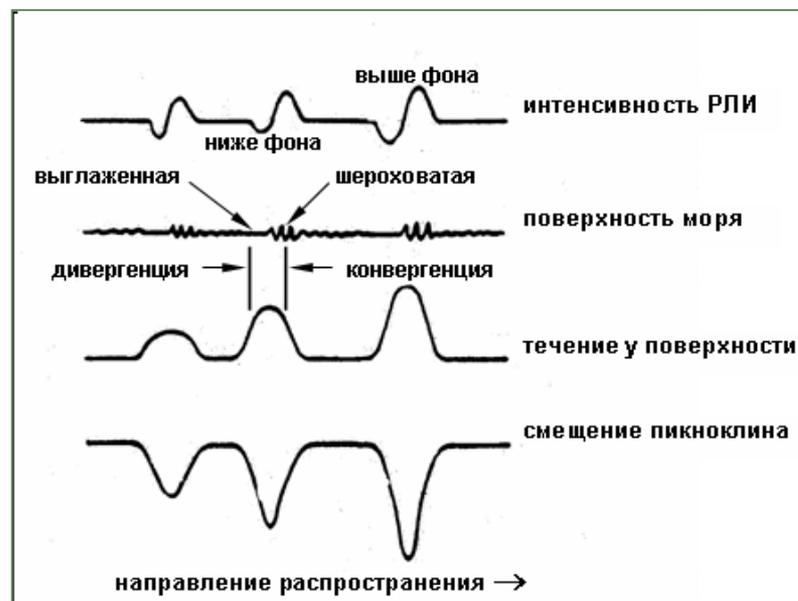
ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВВ



Одиночный внутренний солитон в двухслойной жидкости конечной глубины и положение сулоя на поверхности (рисунок из [Osborne and Burch, 1980])

Osborne AR, Burch TL. Internal solitons in the andaman sea//Science. 1980. 208(4443):451-60.

Gasparovic, R.F., Apel, J.R. and Kasischke, E.S. (1988). An overview of the SAR Internal Wave Signature Experiment. *Journal of Geophysical Research* 93: doi: 10.1029/88JC00356. issn: 0148-0227.

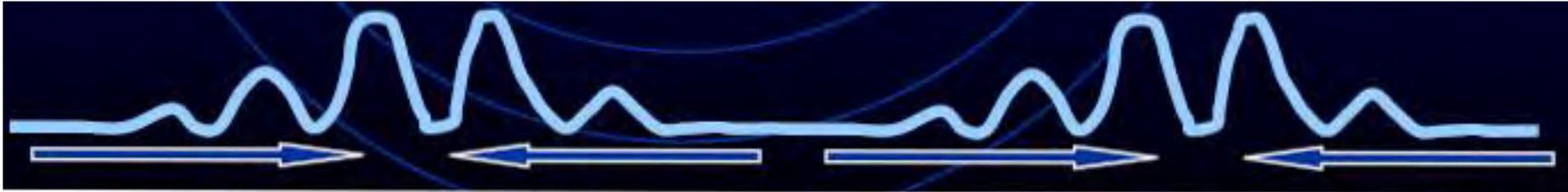


Схематическое представление эффектов на поверхности моря, обусловленных прохождением внутренней волны (рисунок из [Gasparovic et al., 1988])

Различные механизмы воздействия внутриволновых возмущений на морскую поверхность по проявлениям в РЛ- рассеянии

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ

Изменение спектра поверхностных волн (усиление в зонах конвергенции), связанное непосредственно с модуляцией волн приповерхностными орбитальными течениями, включая эффект резонансной модуляции в условиях, когда фазовая скорость распространения ВВ совпадает с групповой скоростью коротких поверхностных волн



Модуляция волн определяется градиентом скорости течения на поверхности

В условиях, когда реализуется кинематический механизм, можно ожидать существования "резонансного" диапазона, в котором поверхностные проявления внутренних волн сильны.

Учитывая, что фазовые скорости ВВ обычно варьируются от величин порядка 0.5 м до единиц метров, выполнение условия резонансной модуляции приходится в основном на поверхностные волны дециметровых / метровых длин, что делает Р- и L-диапазоны довольно эффективными для исследования поверхностных проявлений ВВ.

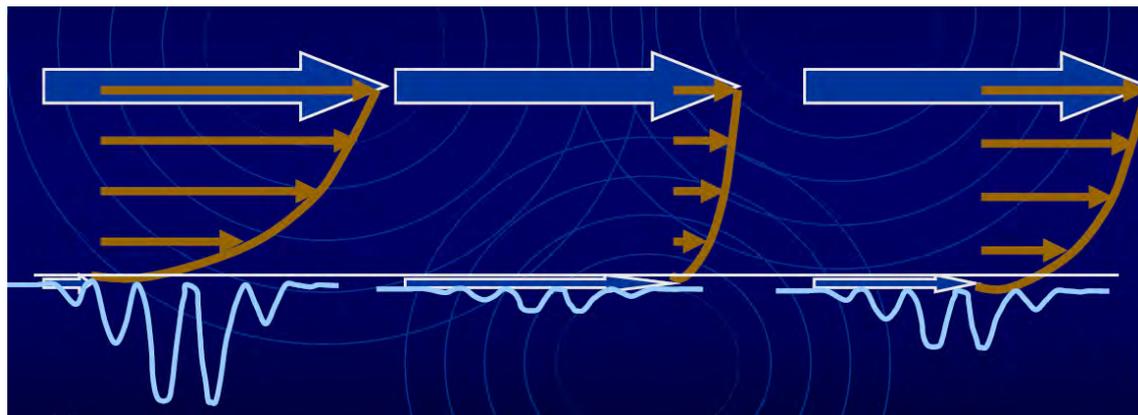
Hughes 1978; Басович и др. 1982; Apel et al. 1988; Баханов, Таланов 1999

МОДУЛЯЦИЯ ИНКРЕМЕНТА КОРОТКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Эффект модуляции коэффициента возбуждения ветровых волн связан с модуляцией коэффициента ветрового возбуждения коротких поверхностных волн из-за трансформации поля ветра в поле орбитальных поверхностных течений, создаваемых внутренней волной



Энергообмен между ветром и волнами

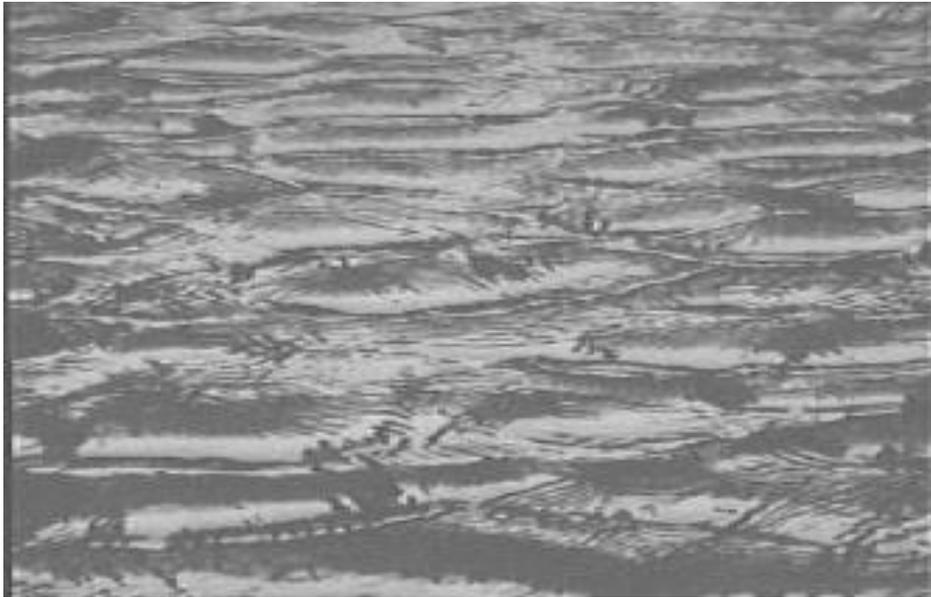


Эффект модуляции скорости роста является существенным именно для сантиметровых и дециметровых волн и умеренных ветров

Горшков К.А., Долина И.С., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Трансформация коротких волн в поле неоднородных течений на поверхности океана. Влияние модуляции ветрового инкремента // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 7. С. 513-536.

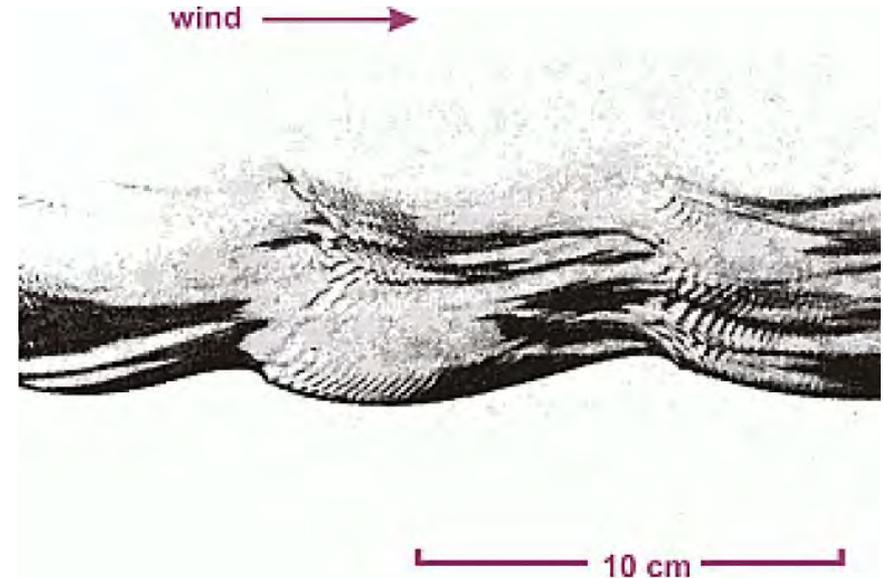
КАСКАДНЫЙ МЕХАНИЗМ

Сильная модуляция капиллярно-гравитационных волн (паразитной ряби), возбуждаемых в виде "паразитной капиллярной ряби" короткими гравитационными волнами



Скорость ветра 5 м/с. (50 см × 150 см)

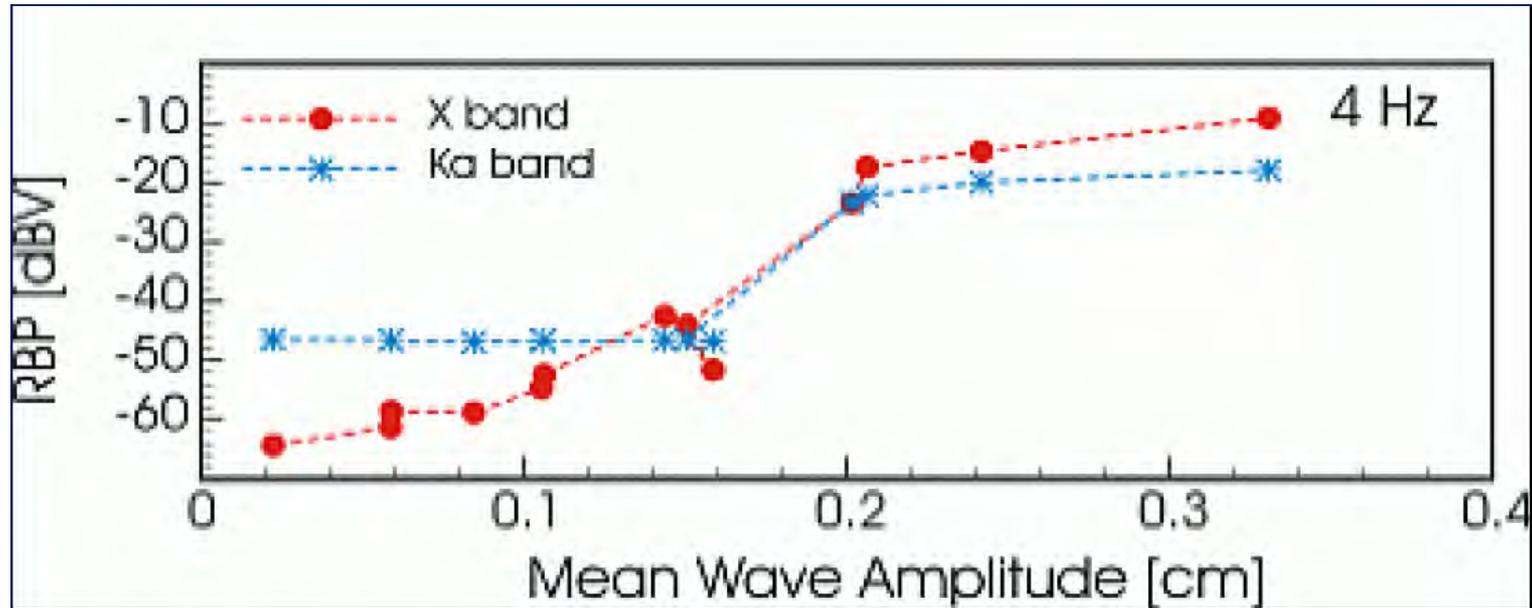
Паразитные гравитационно-капиллярные волны



Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Щегольков Ю.Б.. Лабораторное исследование сильной модуляции радиолокационных сигналов при наличии длинных волн на воде с поверхностно-активной пленкой // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2002. Т. XLV. №12. С. 1025-1042.

Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Зуйкова Э.М., Кияшко С.В., Щегольков Ю.Б. Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности // Доклады РАН. 2003. Т. 388. №1. С. 109-112.

КАСКАДНЫЙ МЕХАНИЗМ



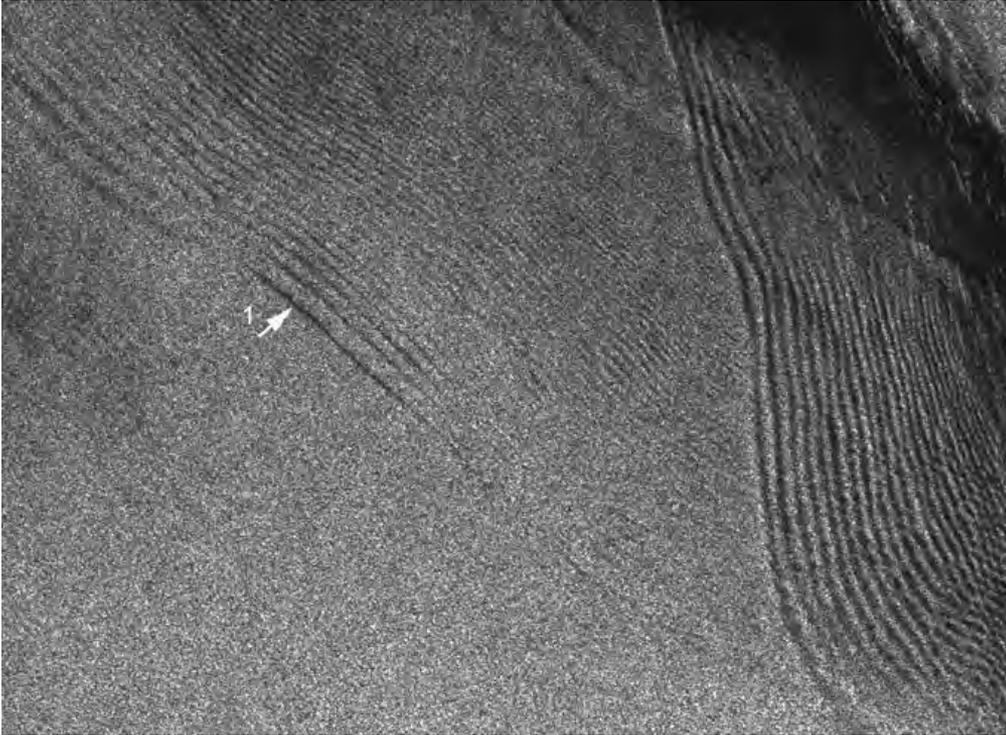
При увеличении амплитуды дм волны появление паразитной капиллярной ряби резко увеличивает сечение рассеяния поверхности воды в Ка и X диапазонах

Gade, M., W. Alpers, S.A. Ermakov, H. Hühnerfuss, and P.A. Lange, 1998: Wind-wave tank measurements of bound and freely propagating short gravity-capillary waves, J. Geophys. Res., 103, 21697-21710.

ПЛЕНОЧНЫЙ МЕХАНИЗМ

- В коротких сантиметровых диапазонах эффективным оказывается также и пленочный механизм, поскольку инкремент роста и затухания резонансно рассеивающей ряби сильно зависит от сил поверхностного натяжения.
- В случае действия пленочного механизма на поверхности моря вблизи впадин ВВ формируются области пленки с повышенной концентрацией ПАВ, что приведет к существенному затуханию ряби и образованию слика.
- Поскольку в прибрежных зонах морей вследствие антропогенного воздействия обычно встречается повышение концентрации ПАВ, то можно ожидать здесь большую распространенность действия этого механизма.

ПЛЕНОЧНЫЙ МЕХАНИЗМ



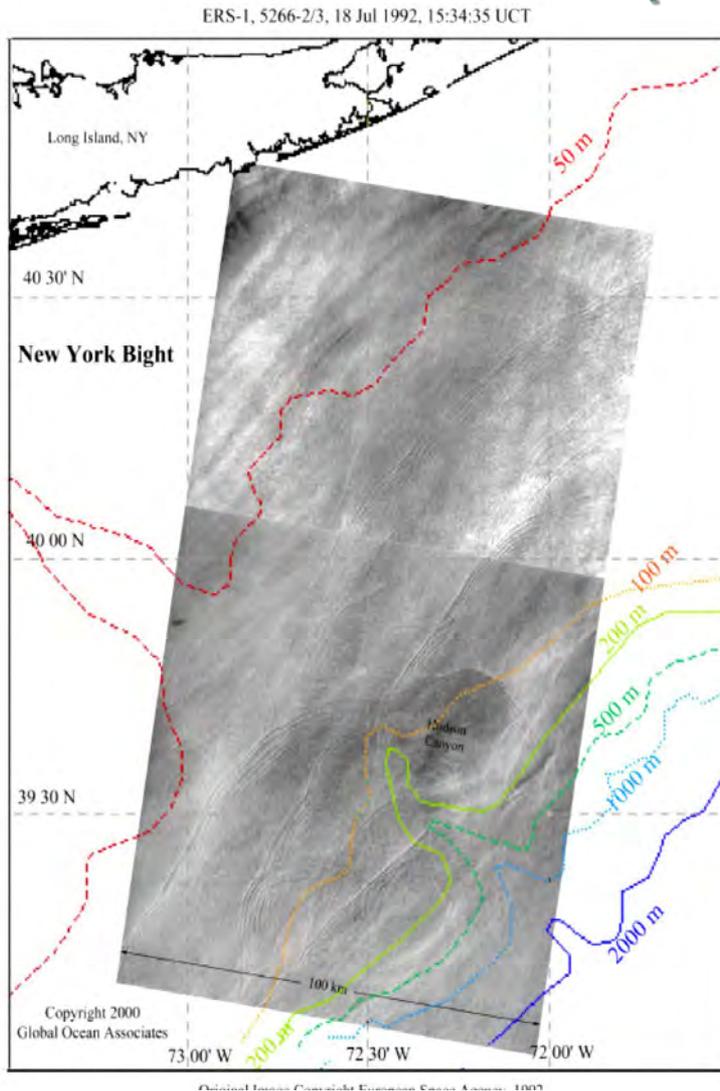
Interference of two packets of oceanic internal waves. Long narrow bands of slicks (1) are well visible in convergence zones.

ERS-1 SAR
July 23, 1995 at 01:19:22
North-West Pacific
north-east off Hokkaido island



СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЗОНДИРУЮЩЕГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

OCEANIC INTERNAL WAVES IN THE NORTHWESTERN ATLANTIC (JUSREX EXPERIMENT)

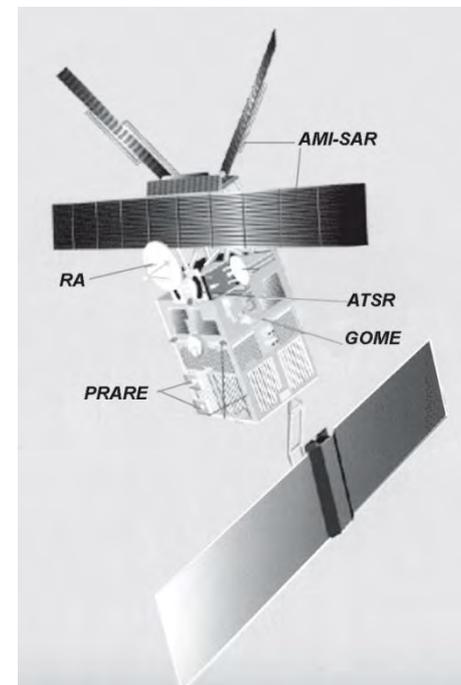


Весьма интересные экспериментальные результаты, касающиеся формирования РЛ-образов ВВ в широком диапазоне длин зондирующих волн, получены в ходе совместного российско-американского эксперимента JUSREX-92, который был проведен в период с 13.07.92 по 25.07.92 на континентальном шельфе восточного побережья США

Цель эксперимента состояла в выявлении тех механизмов воздействия внутриволновых возмущений на морскую поверхность, которые являются определяющими для разных диапазонов зондирующего сигнала и определения оптимальных методов детектирования и идентификации ППВО в радиолокационных данных.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ИСЗ ERS-1

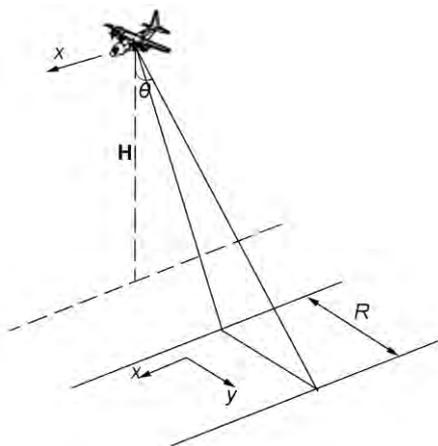
Высота орбиты	785 км
Наклонение орбиты	98.5°
Частота зондирующего сигнала	5.3 ГГц
Длина волны зондирующего сигнала	5.6 см (C –диапазон)
Поляризация	ВВ
Импульсная мощность передатчика	4.8 кВт
Длительность импульса	37 мкс (ЛЧМ)
Ширина полосы обзора по наземной дальности	100 км
Пространственное разрешение по наземной дальности	25 м
Пространственное разрешение по азимуту	25 м
Угол падения в середине полосы обзора	23°



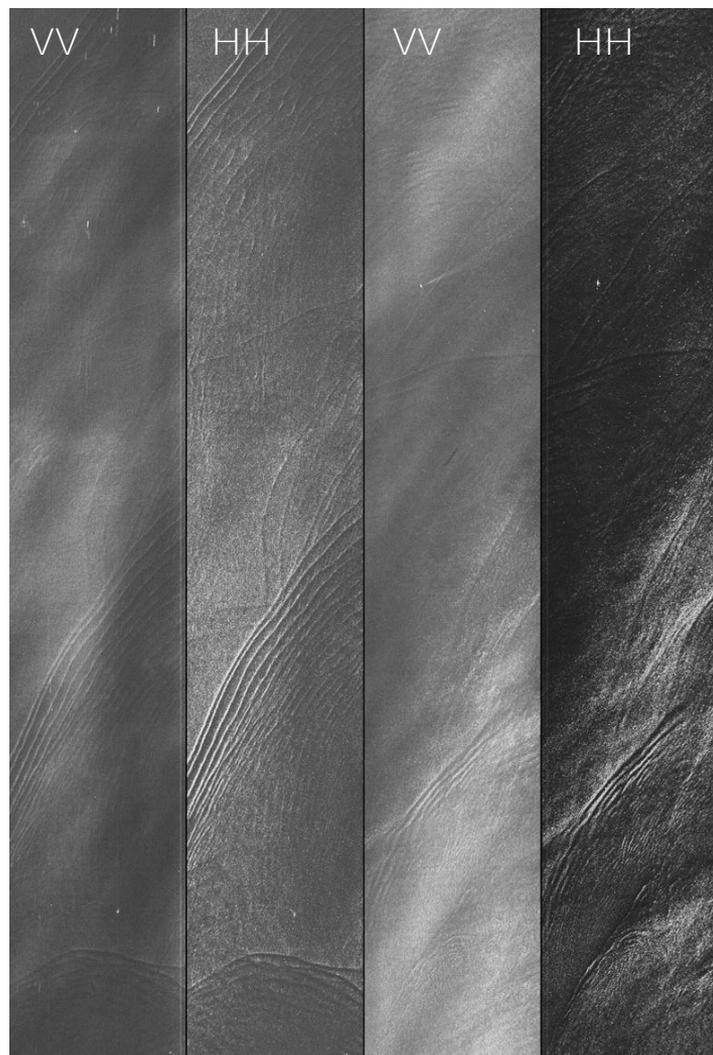
РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СТАНЦИЯ БОКОВОГО ОБЗОРА "НИТЬ" (САМОЛЕТ - ЛАБОРАТОРИЯ "ТУ-134СХ«)



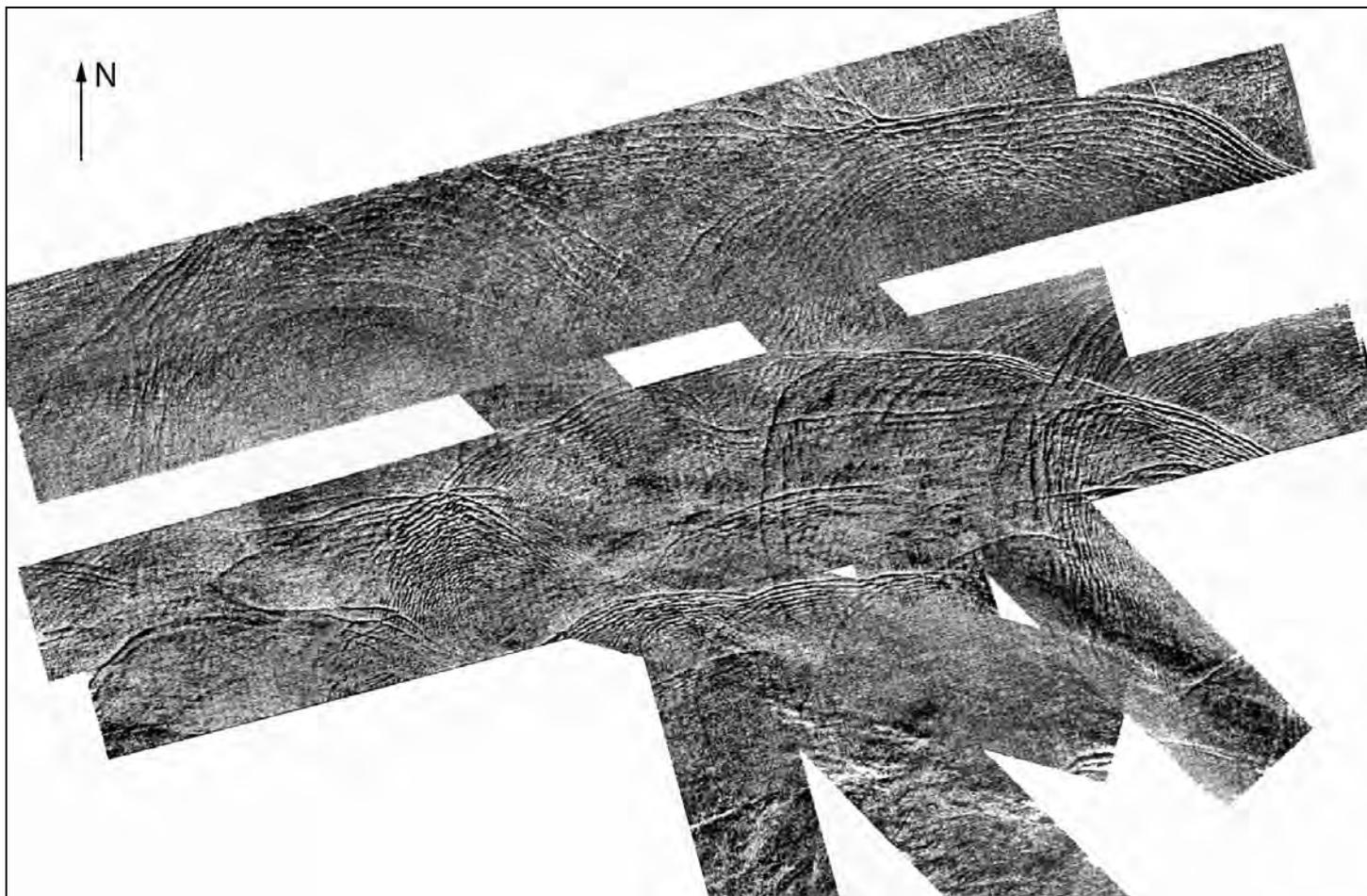
Антенные системы расположены на пилонах под крыльями самолета в радиопрозрачных контейнерах. РЛСБО оснащена двумя приемо-передающими системами, условно разделяемыми по принадлежности к левому и правому борту.



Частота зондирующего сигнала	$f = 13.3 \text{ ГГц}$		
Длина волны зондирующего сигнала	2,25 см		
Поляризации	VV, HH, VH, HV		
Ширина луча антенны	0,0035 рад		
Пространственное разрешение по наземной дальности	25 м		
Пространственное разрешение по азимуту	25 м		
Длительность импульса	110 нс		
Импульсная мощность передатчика	1,5 кВт	5 кВт	1,4 кВт
Ширина полосы обзора	12,5 км (номинальная)		
Углы обзора	$72^\circ - 84^\circ$		
Номинальная высота полета	2 км		



РЛИ, полученное РЛСБО «Нить» (Ku диапазон) 18.07.1992 в 15:47 UTC



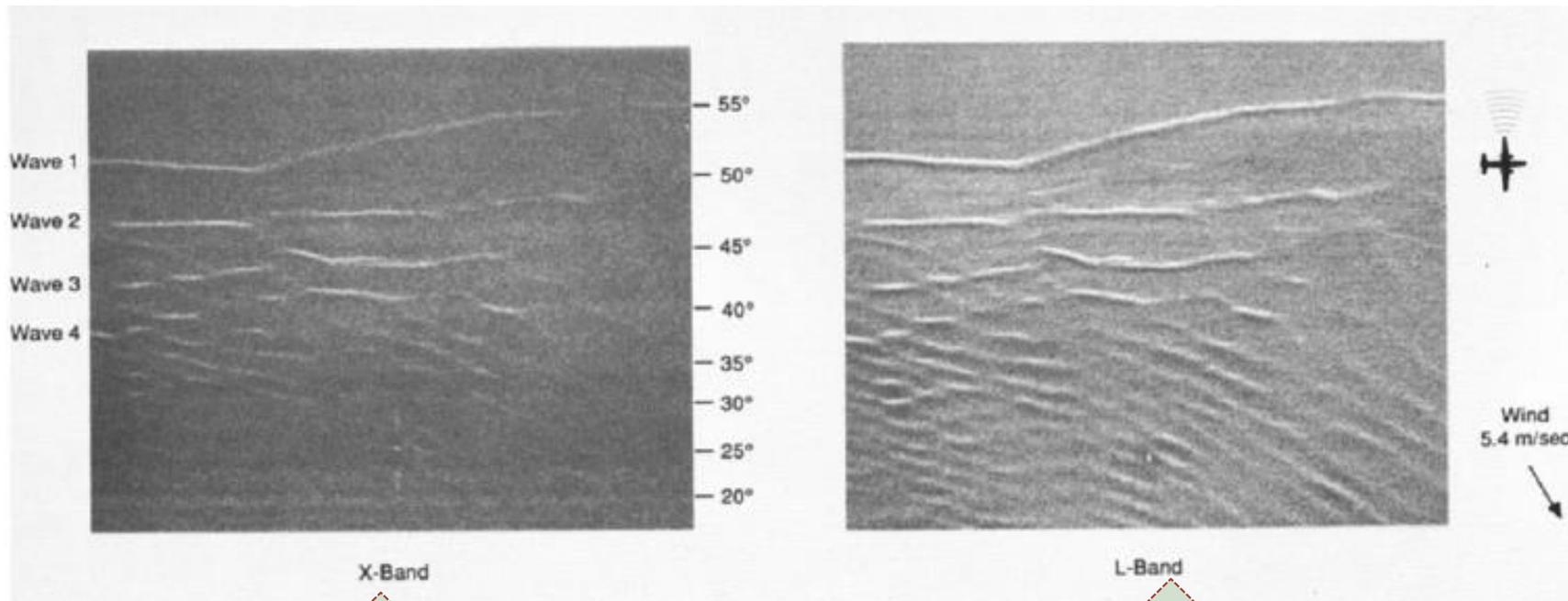
Картина внутренних волн в районе эксперимента, полученная совмещением радиолокационных изображений на различных галсах самолета-лаборатории Ту-134 СХ



Диапазоны	X	L	C:
Частота зондирующего сигнала (для различных диапазонов)	9,38 ГГц	1,25 ГГц	5,26 ГГц
Длина волны зондирующего сигнала	3,2см,	24см	5,6 см
Поляризации	VV, HH		
Ширина луча антенны	1,9 град	8,6 град	3,5 град
Пространственное разрешение по наземной дальности	2.5 м		
Пространственное разрешение по азимуту	2,1 м		
Длительность импульса	4 мкс		
Импульсная мощность передатчика	1,5 кВт	5 кВт	1,4 кВт
Ширина полосы обзора	10 км (номинальная)		
Углы обзора	0° - 70°		
Номинальная высота полета	3 км		

РСА, установленный на американском самолете-лаборатории Lockheed P-3 Orion (четырёхмоторный турбовинтовой самолет, разработанный для военно-морских сил США)

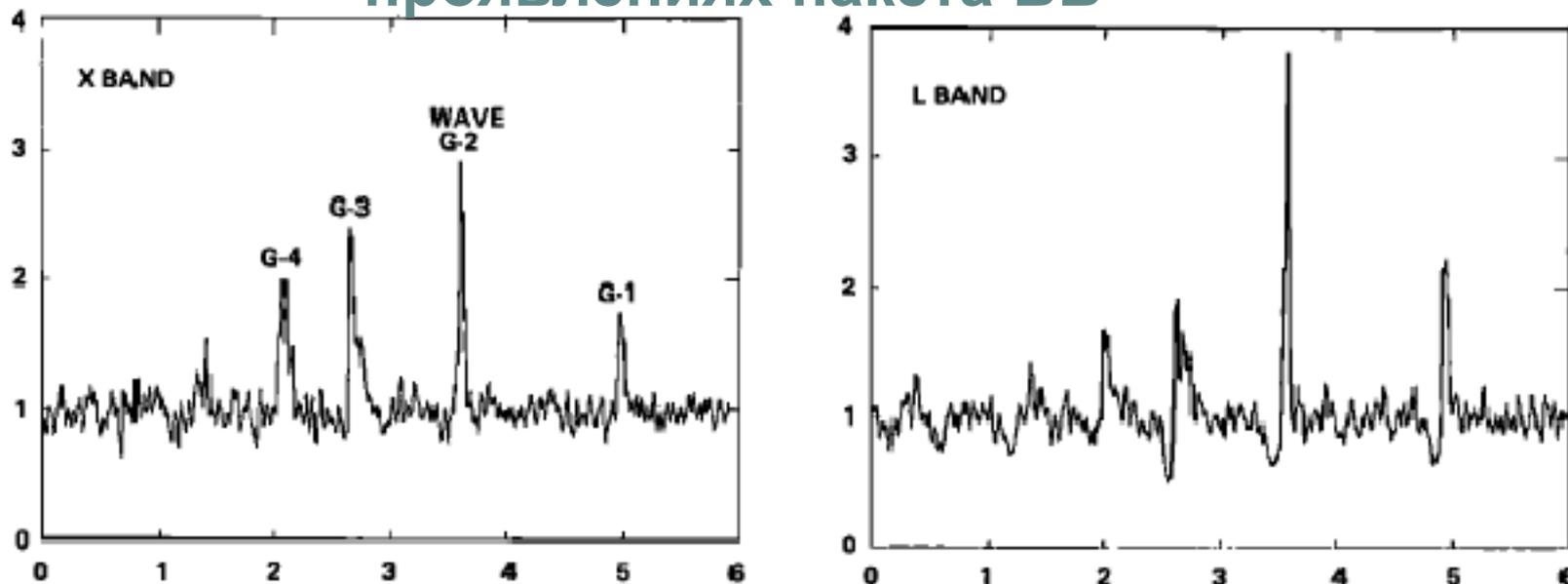
Фрагменты РСА-изображений морской поверхности, полученные в X- и L- диапазонах зондирующего сигнала, отображающие поверхностные проявления пакета ВВ



ВВ визуализируются светлыми полосами повышенной интенсивности обратного рассеянного сигнала

ВВ визуализируются чередованием светлых и темных полос, соответствующих колебаниям интенсивности РЛ-сигнала выше и ниже среднего значения

Модуляция сечения обратного рассеяния в X- и L-диапазонах зондирующего сигнала на поверхностных проявлениях пакета ВВ

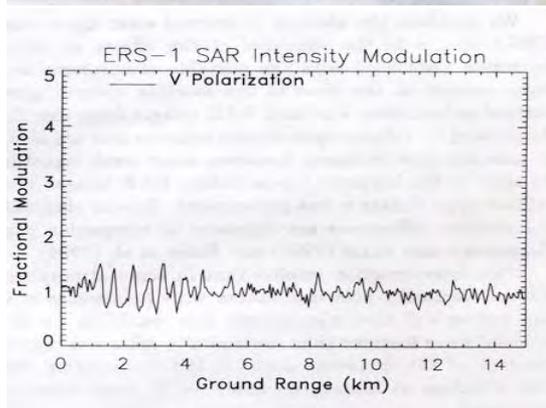
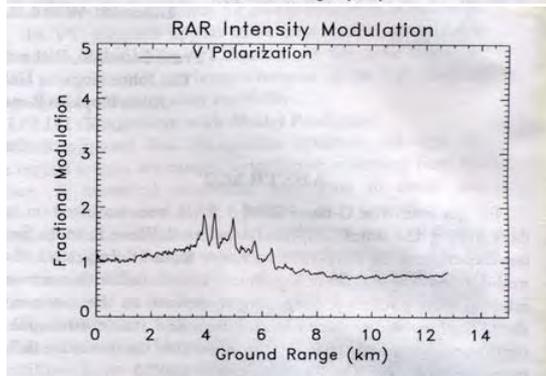
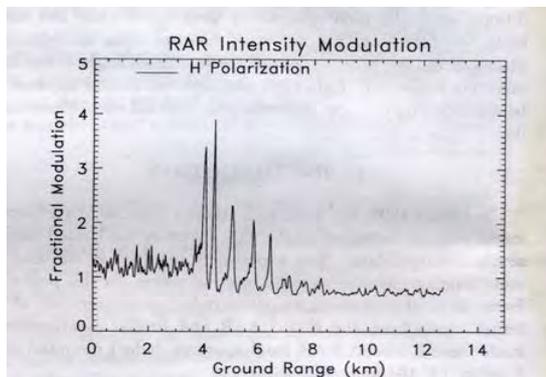


Максимальные интенсивности радиолокационного сигнала превышают средний уровень в 1,5 – 3,5 раза.

Светлые полосы совпадают на обоих РЛИ, отражая одновременное усиление рассеяния в X - и L- диапазонах для одной и той же фазы ВВ.

- **L-диапазон - проявления определяются кинематическим резонансным механизмом, который предсказывает знакопеременные контрасты вариаций спектров ветровых волн при резонансном взаимодействии дм-волн с ВВ**
- **X-диапазон - в поле ВВ наблюдается фактически усиление сечения обратного рассеяния, степень которого сопоставима с вариациями в L-диапазоне.**
- **Это отличается от предсказаний линейной кинематической модели.**
- **Возможной причиной такого расхождения могут быть обрушения дм-волн и генерация ими рассеивателей в X-диапазоне.**

СОПОСТАВЛЕНИЯ СТЕПЕНИ МОДУЛЯЦИИ РЛ-СИГНАЛА ПОВЕРХНОСТНЫМИ ПРОЯВЛЕНИЯМИ ВВ В К_U- И С-ДИАПАЗОНАХ



Максимумы рассеяния, соответствующие 6-ти волнам в пакете, уверенно идентифицируются и в том и в другом диапазонах зондирования.

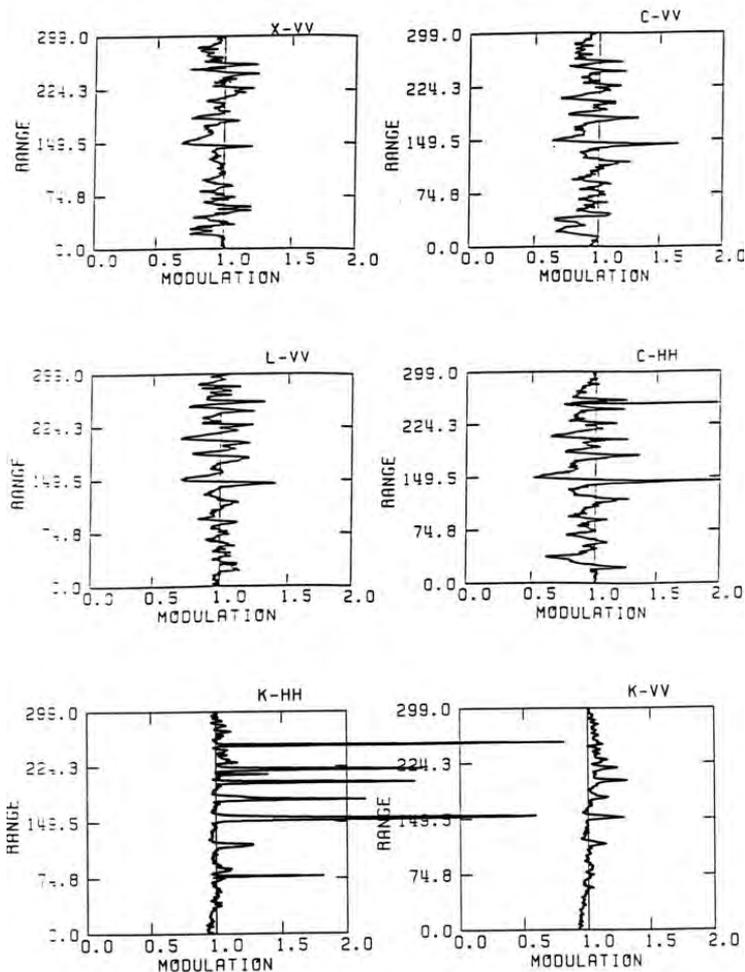
Отличительной особенностью сечения РЛИ К_U-диапазона на ВВ поляризации является отсутствие области пониженного рассеяния в зоне выглаживания, что вероятно связано с обрушениями более длинных, дециметровых волн

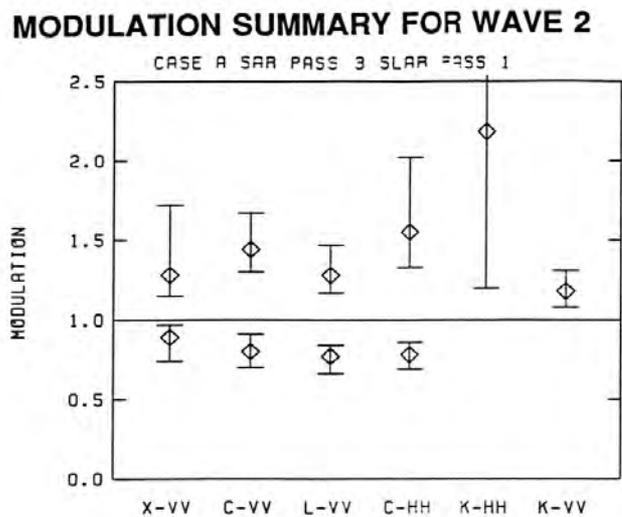
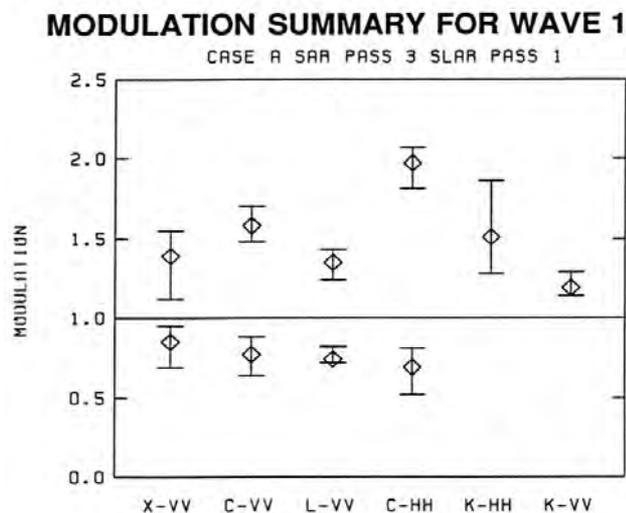
Модуляция РЛ-сигнала σ_{\max} / σ_0 в сулое по отношению к среднему невозмущенному фону в К_U- и С-диапазонах на ВВ поляризациях оказывается примерно одинаковой и составляет ~1,6 и ~1,4 (2дБ и 1,5дБ).

Модуляция РЛ-сигнала в К_U-диапазоне на ГГ поляризации составляет ~ 4.6 (6.6дБ).

Сопоставление модуляционных характеристик ППВВ по результатам синхронной самолетной РЛ-съемки РЛСБО "Нить-Сх" и трехдиапазонным PCA P-3

CUT 1 RESULTS FOR SAR PASS 3, SLAR PASS 1





Интервалы изменения сечения обратного рассеяния на различных частотах в областях повышенной шероховатости и в зонах выглаживания

ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ:

- ПОДОБНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ППВВ В K_U -ДИАПАЗОНЕ НА ГГ ПОЛЯРИЗАЦИИ ОБУСЛОВЛЕНА В ПЕРВУЮ ОЧЕРЕДЬ СКОЛЬЗЯЩИМИ УГЛАМИ ЗОНДИРОВАНИЯ.
- ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДАЖЕ ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНО НЕБОЛЬШИХ ВАРИАЦИЯХ ЛОКАЛЬНОГО УГЛА РАССЕЯНИЯ МОЖЕТ БЫТЬ ОБУСЛОВЛЕНО МОДУЛЯЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН ВНУТРИВОЛНОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ, ПРИ УГЛАХ ПАДЕНИЯ РЛ-СИГНАЛА $\theta=74-82^\circ$.
- КРОМЕ ТОГО, ИМЕЮТ МЕСТО И НЕРЕЗОНАНСНЫЕ МЕХАНИЗМЫ РАССЕЯНИЯ.

СВИДЕТЕЛЬСТВА СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕРЕЗОНАНСНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

Большая часть наблюдаемых при помощи радиолокаторов явлений на поверхности океана может быть объяснена в рамках резонансного механизма рассеяния. В то же время широкий круг явлений свидетельствует о существовании нерезонансных механизмов рассеяния.

Всплески рассеяния на горизонтальной поляризации.

Одними из первых высказали гипотезу о нерезонансном (небрэгговском) 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

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. Экспериментально измеренное сечение рассеяния на горизонтальной поляризации не стремится к нулю так быстро, как это следует из резонансной теории при этом различие между брэгговской теорией и экспериментом может достигать 10-20 дб.

Kalmykov, A. A., V. V. Postovoytenko, On polarization features of radio signals scattered from the sea surface at small grazing angles, J. Geophys. Res., 8112, 1960–1964, 1976.

Guinard, N. W., J. T. Ransone Jr., J. C. Daley, Variation of the NRCS of the sea with increasing roughness, J. Geophys. Res., 76, 1525–1538, 1971.

Допплеровские спектры на двух поляризациях. Третьим свидетельством существования нерезонансных эффектов служат особенности доплеровских спектров обратно рассеянных сигналов на двух поляризациях. Эксперименты показывают, что при настильных углах наблюдения доплеровский сдвиг на вертикальной поляризации вполне отвечает предсказаниям брэгговской теории, в то время как на горизонтальной поляризации доплеровское смещение оказывается значительно большим, чем должно быть при резонансном рассеянии, и отвечает фазовой скорости морских волн длиной около 1 м.

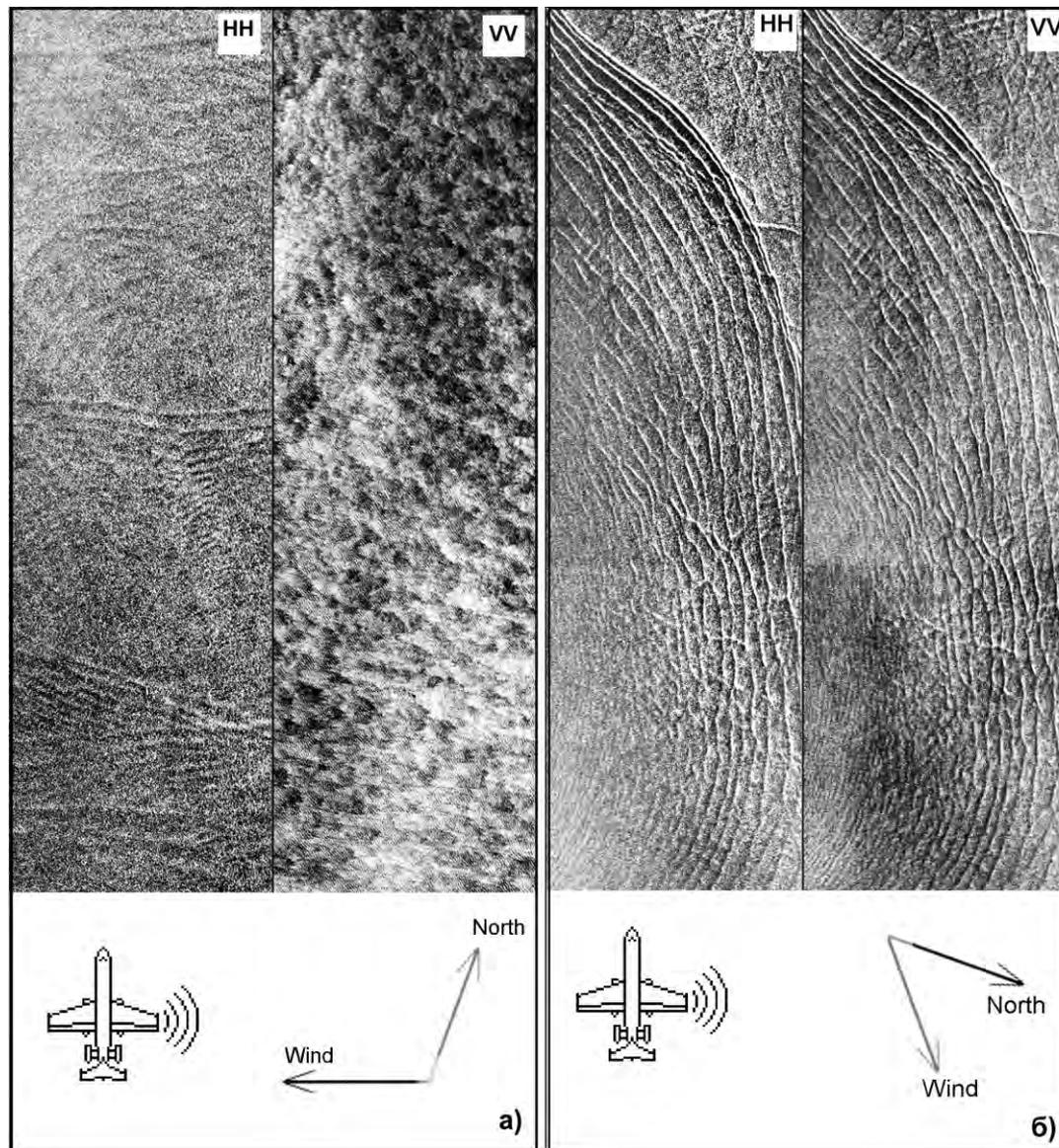
Двухполяризационные изображения океана на настильных углах наблюдения.

Четвертым и наиболее ярким доказательством существования нерезонансного механизма служат двухполяризационные изображения океана в условиях устойчивой и неустойчивой стратификации атмосферы.

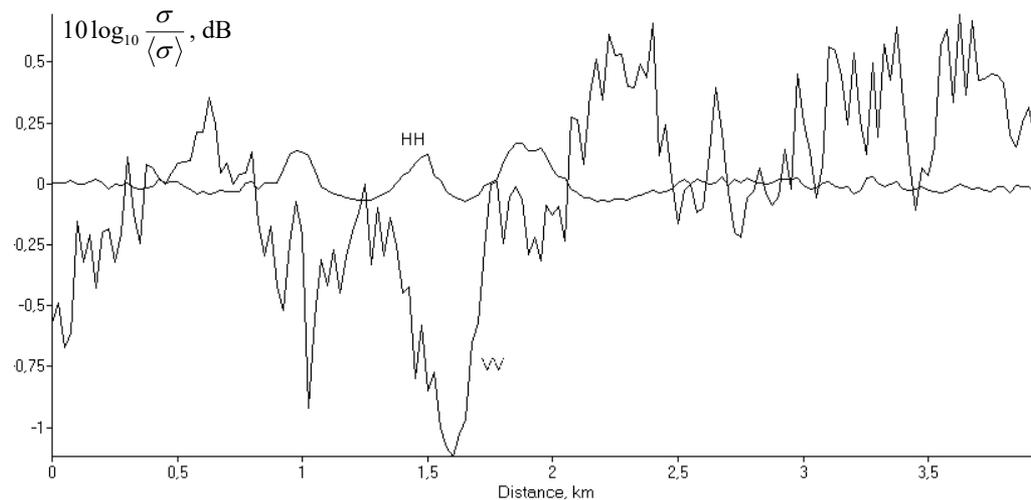
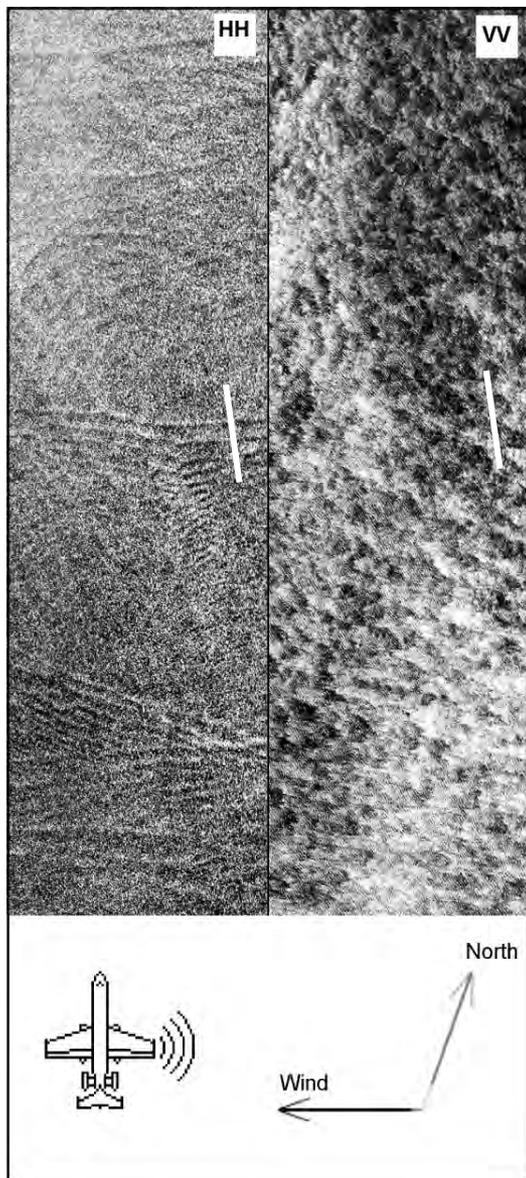
. H. Y Lee, J. D. Barter, K. L. Beach, C. L. Hindman, B. M. Lake, H. Rungaldier, J. C. Shelton, A. B. Williams, R. Yee, and H. C. Yuen, “**X band microwave backscattering from ocean waves**,” J. Geophys. Res.—Oceans , vol. 100, no. C2, pp. 2591–2611, 1995.

P. H. Y. Lee, J. D. Barter, E. Caponi, M. Caponi, C. L. Hindman, B. M. Lake, and H. Rungaldier, “**Wind-speed dependence of small-grazing-angle microwave backscatter from sea surfaces**,” IEEE Trans. Antennas Propag. , vol. 44, no. 3, pp. 333–340, Mar. 1996.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (1)



ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАЗЛИЧИЯ (2)



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 (3)

Резонансная теория дает для сечений рассеяния на вертикальной и горизонтальной поляризациях выражения, отличающиеся друг от друга лишь коэффициентом при спектральной плотности $F_\zeta(q)$.

Из пропорциональности σ_h и σ_v одной и той же величине $F_\zeta(q)$ следует, что изображения на вертикальной и горизонтальной поляризации должны быть подобными друг другу

Наблюдаемое же расхождение между двумя изображениями океана в условиях неустойчивой стратификации однозначно свидетельствует о существовании иного, отличного от резонансного механизма рассеяния

НЕРЕЗОНАНСНОЕ РАССЕЯНИЕ

Выявлены свидетельства преобладающего воздействия нерезонансного, то есть ветронезависимого, рассеяния на следах внутренних волн. В качестве наиболее вероятного источника нерезонансного рассеяния указаны микрообрушения поверхностных волн с обостренными кромками

Наиболее вероятная причина нерезонансного рассеяния - мезомасштабные крутые короткие волны, близкие к обрушению. Характерные длины (50-100 см) и высоты (10-20 см) таких волн лежат в области, промежуточной между мелкомасштабной (единицы сантиметров) и крупномасштабной (метры и более) компонентами спектра волнения.

Включение мезомасштабных волн в двухмасштабную модель морской поверхности делает ее трехмасштабной.

В сущности, речь идет не столько о добавлении промежуточных пространственных масштабов, сколько о внесении в двухмасштабную модель волн нового качества

Кравцов Ю.А., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Рассеяние электромагнитных волн на мезомасштабных обрушающихся волнах на морской поверхности // Известия РАН. Серия физическая. 1999. Т.63. № 12. С. 2403-2410.

Кравцов Ю.А., К.Ц. Литовченко, М.И. Митягина, А.Н. Чурюмов. Резонансные и нерезонансные явления при микроволновом дистанционном зондировании поверхности океана // Радиотехника. 2000. №1. С. 61-73.



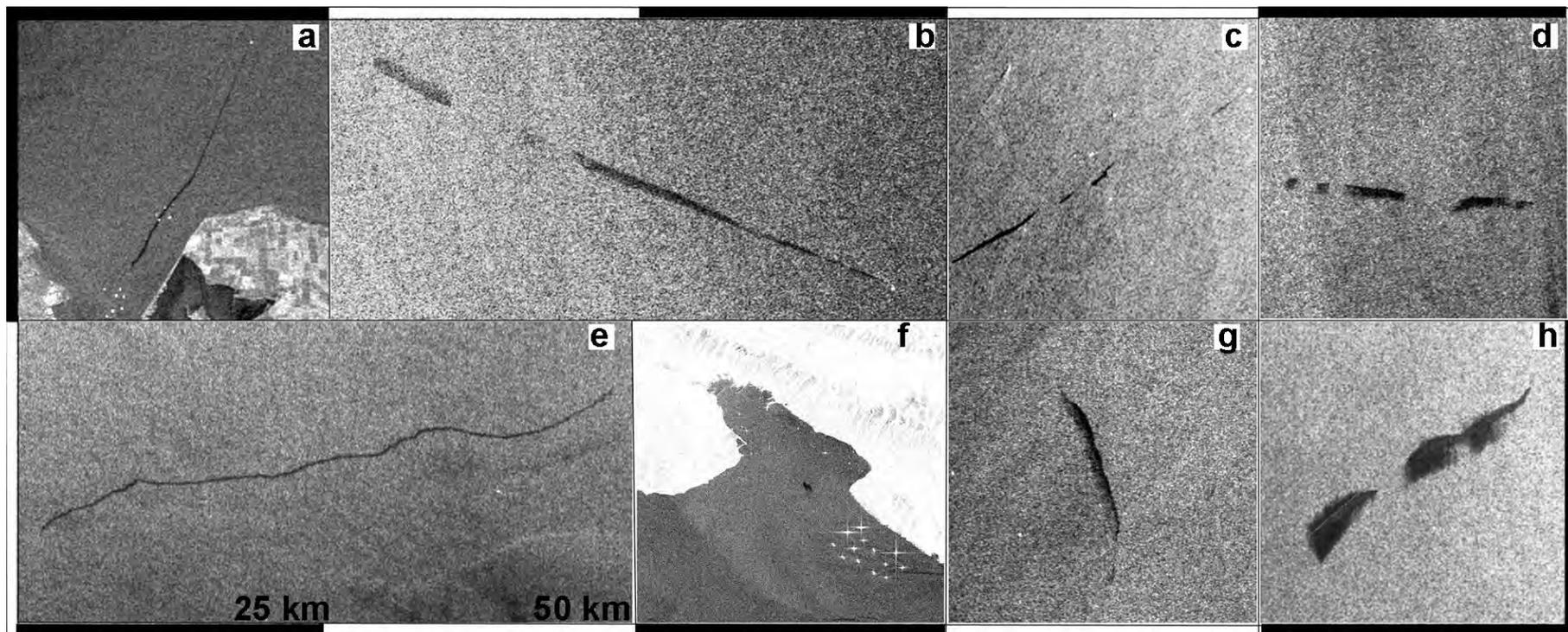
Наличие поверхностной пленки приводит к затуханию гравитационно-капиллярных компоненты поверхностного волнения, соответственно, на поверхности океана образуются выглаженные области (слики), которые проявляются на радиолокационном изображении как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами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

Радиолокационные методы выявления на морской поверхности разливов нефти, нефтепродуктов и поверхностно- активных веществ

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

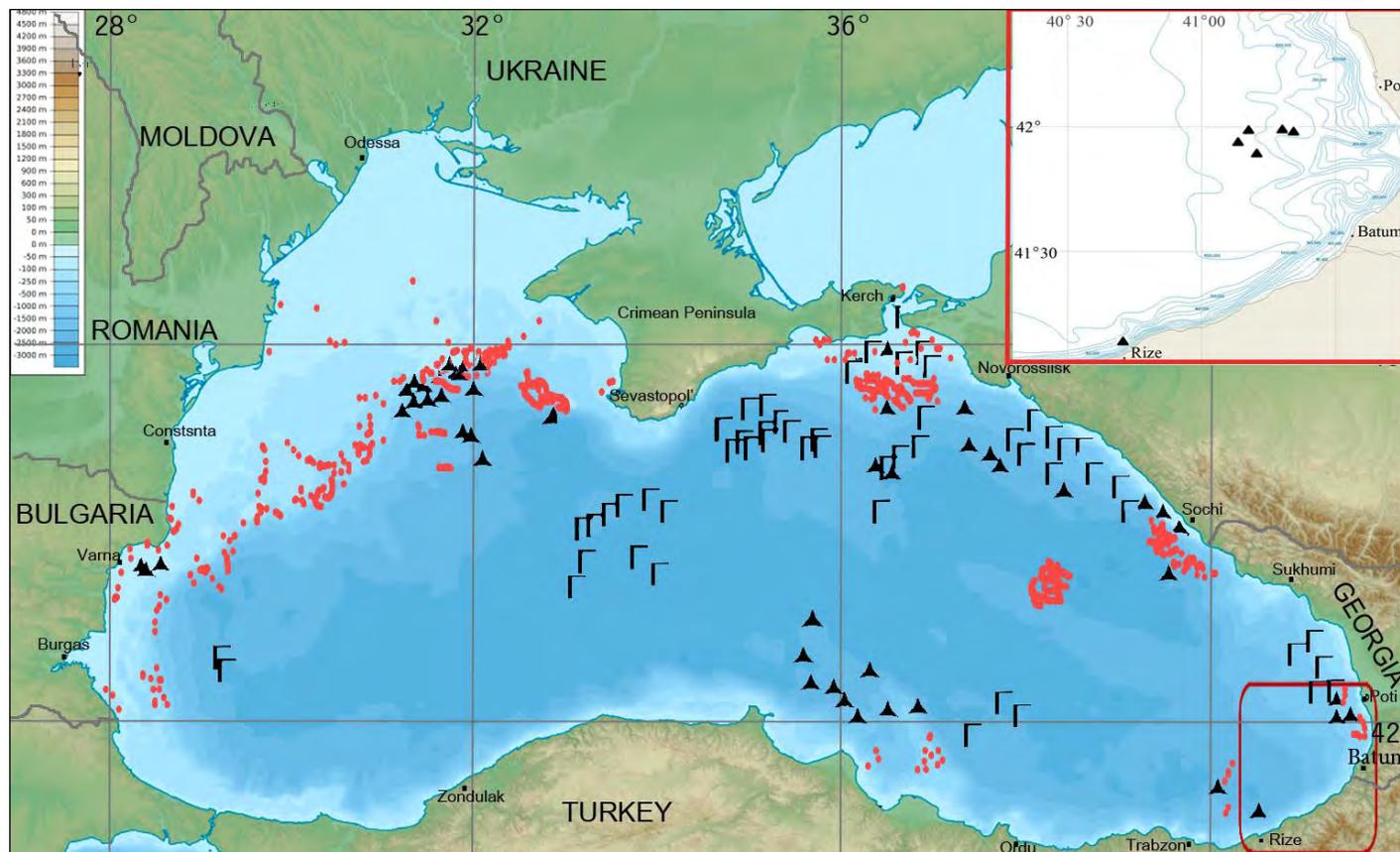


РЛИ-изображения нефтяного пятна на морской поверхности зависят от внешних условий.

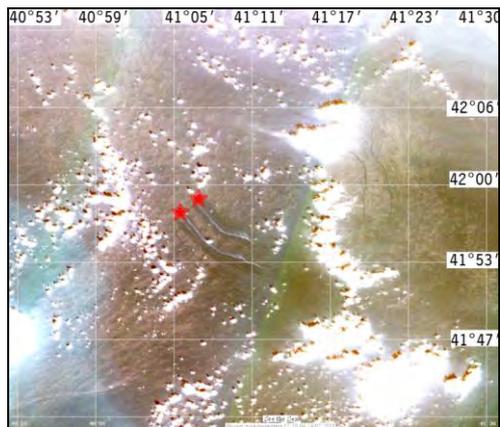
Контраст между областью разлива и окружающей поверхностью определяется большим числом параметров, таких как скорость ветра, высота волн, количество и тип разлитой нефти.

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.

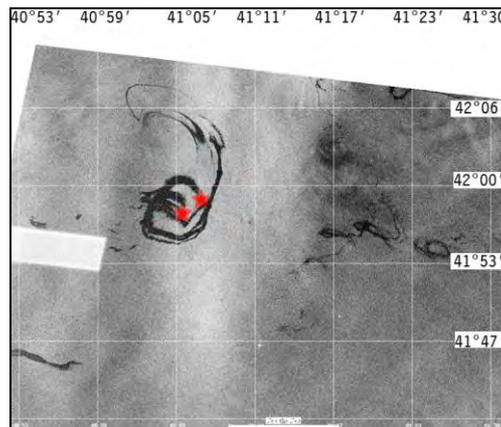
ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЫХОДЫ УГЛЕРОДОВ С МОРСКОГО ДНА



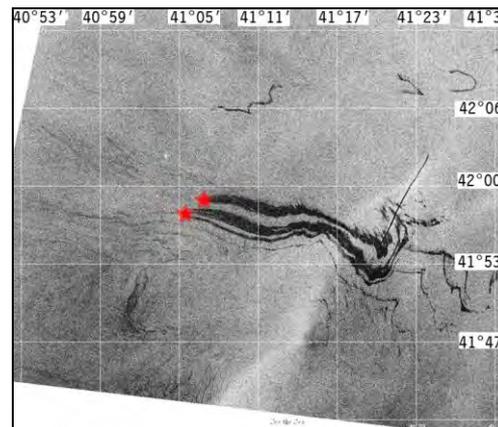
ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЫХОДЫ УГЛЕРОДОВ С МОРСКОГО ДНА



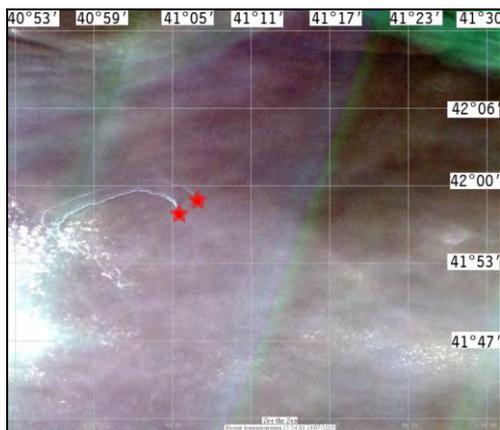
a



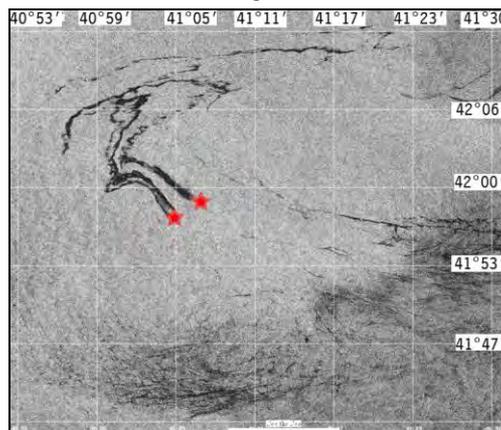
b



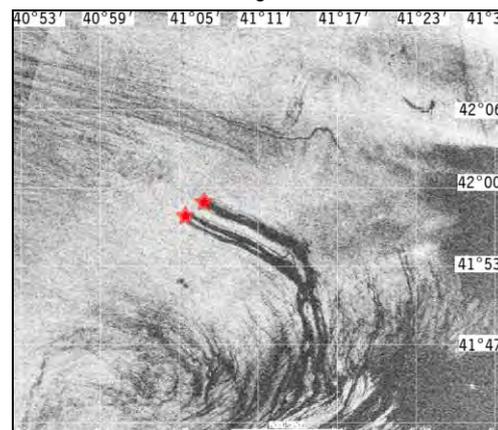
c



d



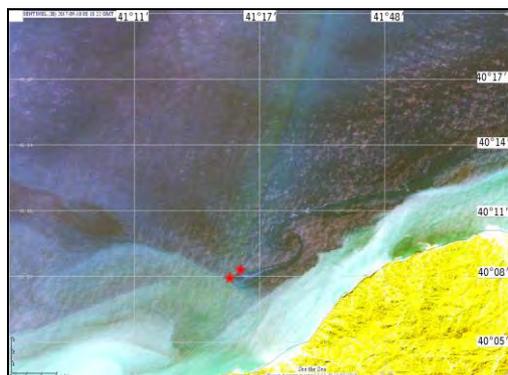
e



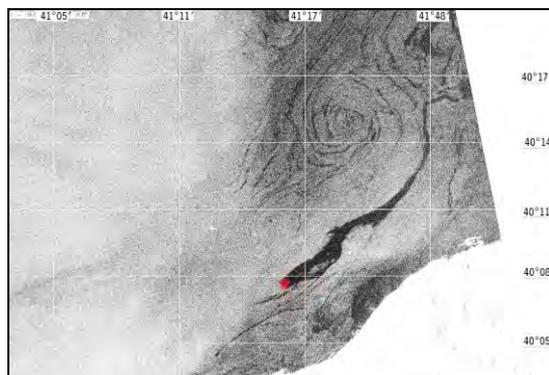
f

Examples of natural oil showings at the sea surface in satellite radar images taken over the Georgian shelf zone: a) MSI Sentinel-2B, 10.09.2017 08:17 UTC; b) Sentinel-1A SAR, 28.03.2018 03:16 UTC; c) Sentinel-1A SAR, 04.05.2019 03:16 UTC; d) MSI Sentinel-2B, 20.09.2017 08:17 UTC; e) Sentinel-1A SAR, 26.06.2018 15:10 UTC; f) ASAR Envisat, 17.05.2011 07:32 UTC.

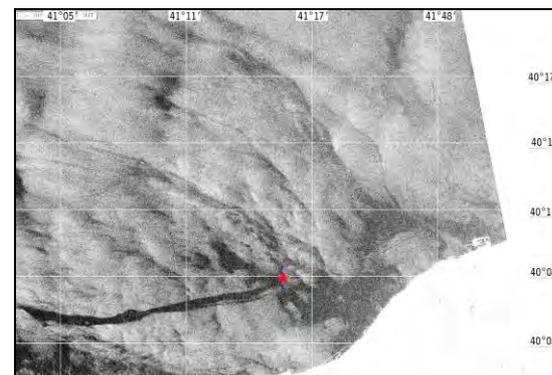
ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЫХОДЫ УГЛЕРОДОВ С МОРСКОГО ДНА



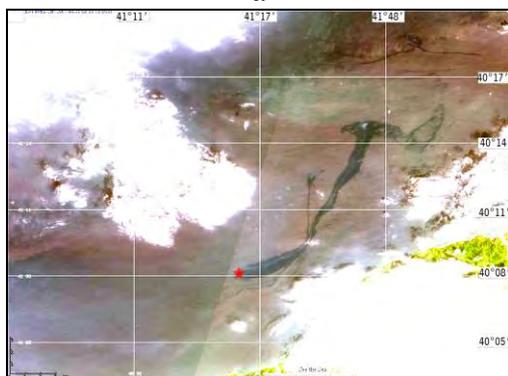
a



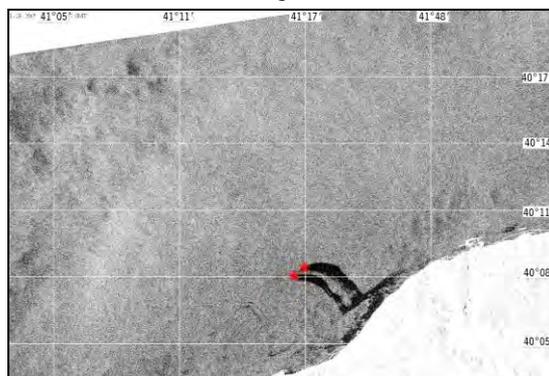
b



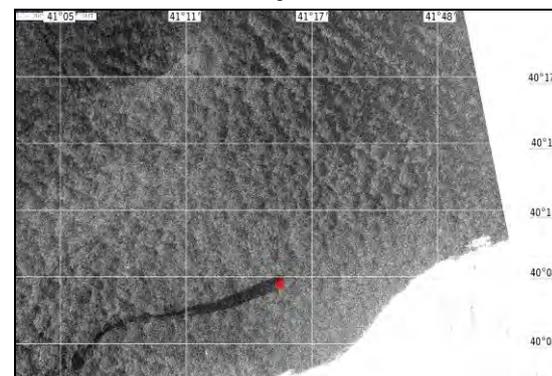
c



d



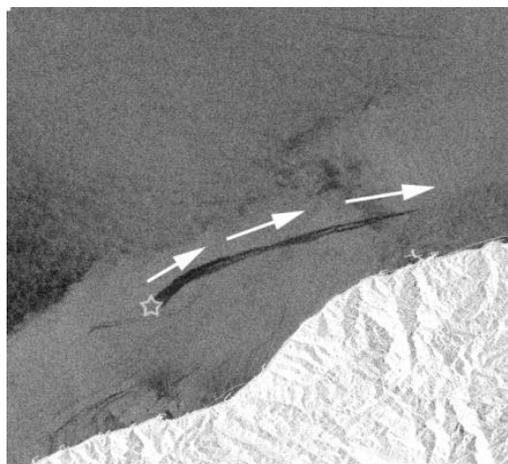
e



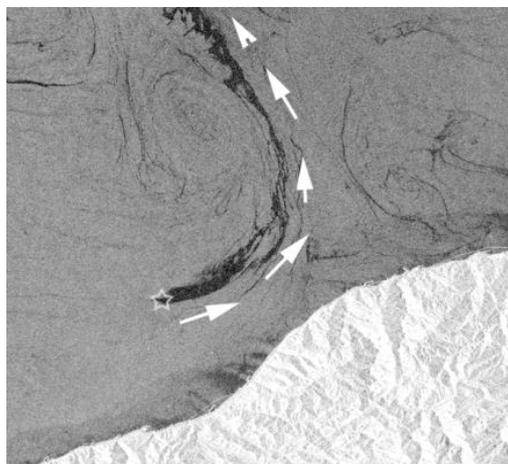
f

. Examples of natural oil showings at the sea surface in satellite radar images taken over the Turkish shelf zone: a) MSI Sentinel-2B, 10.09.2017 08:02 UTC; b) Sentinel-1A SAR, 03.01.2019 15:18 UTC; c) Sentinel-1A SAR, 15.01.2019 03:24 UTC; d) MSI Sentinel-2B 11.08.2017 08:18 UTC; e) Sentinel-1A SAR, 28.01.2019 15:09 UTC; f) Sentinel-1A SAR, 02.07.2019 15:18 UTC.

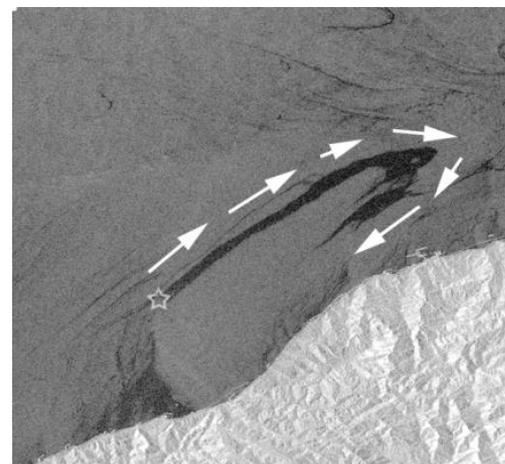
ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЫХОДЫ УГЛЕРОДОВ С МОРСКОГО ДНА



a



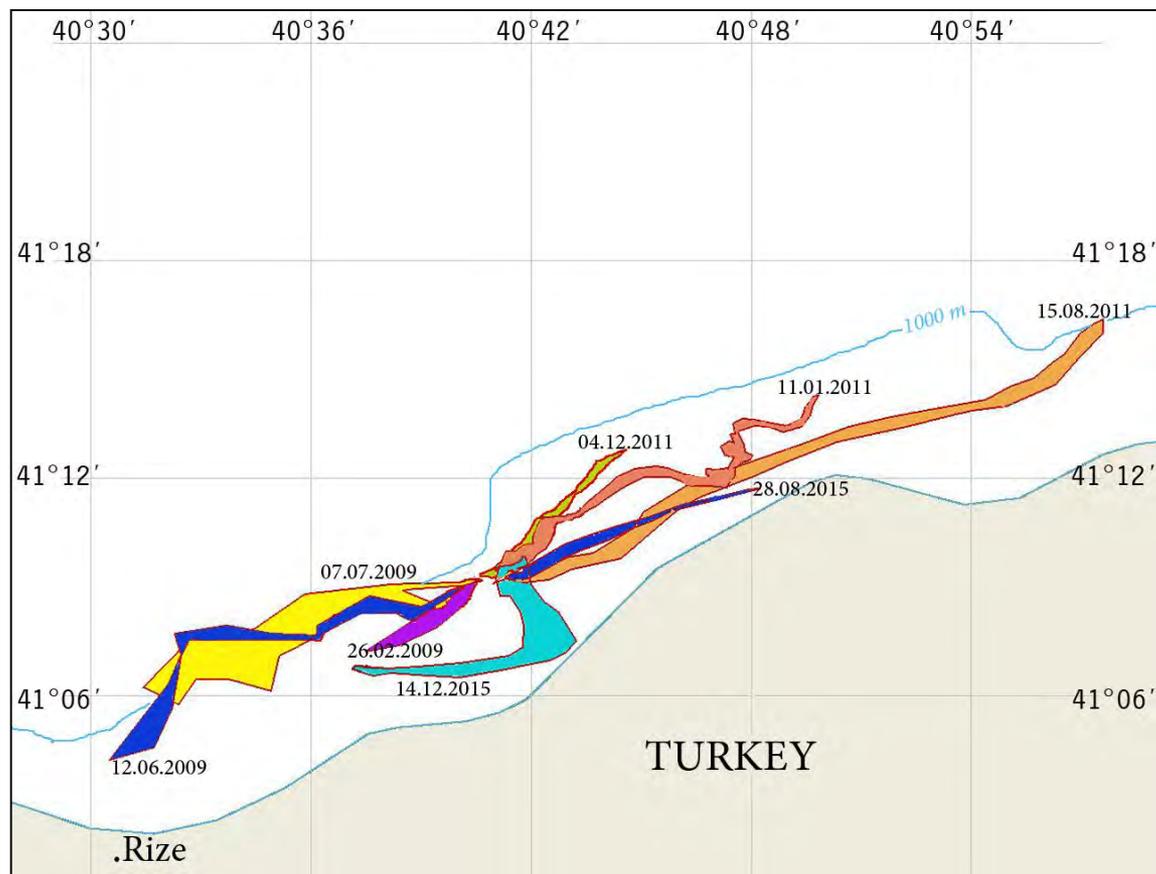
b



c

Parts of SAR images of the sea surface taken in the southeastern Black Sea over the Turkish shelf near the town of Rize, revealing the trajectories of the natural oil films distribution: a) SAR Sentinel 1B. 26.06.2018, 15:09 GMT. An alongshore transport of pollutants; b) SAR Sentinel 1A. 16.11.2017, 15:10 GMT. Transport of pollutants to the open sea; c) SAR Sentinel 1A. 30.08.2018, 03:25 GMT. High possibility of oil beaching.

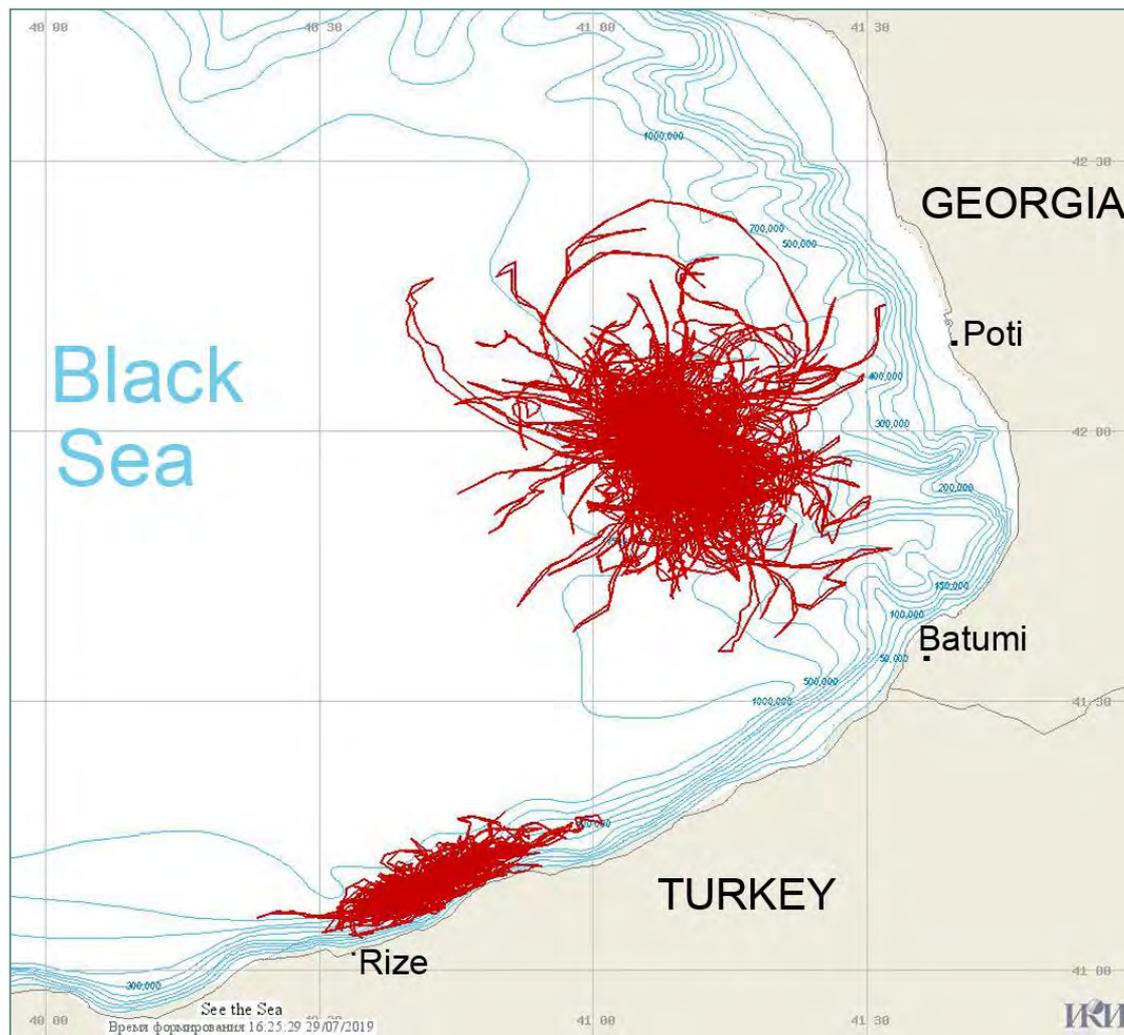
ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЫХОДЫ УГЛЕРОДОВ С МОРСКОГО ДНА



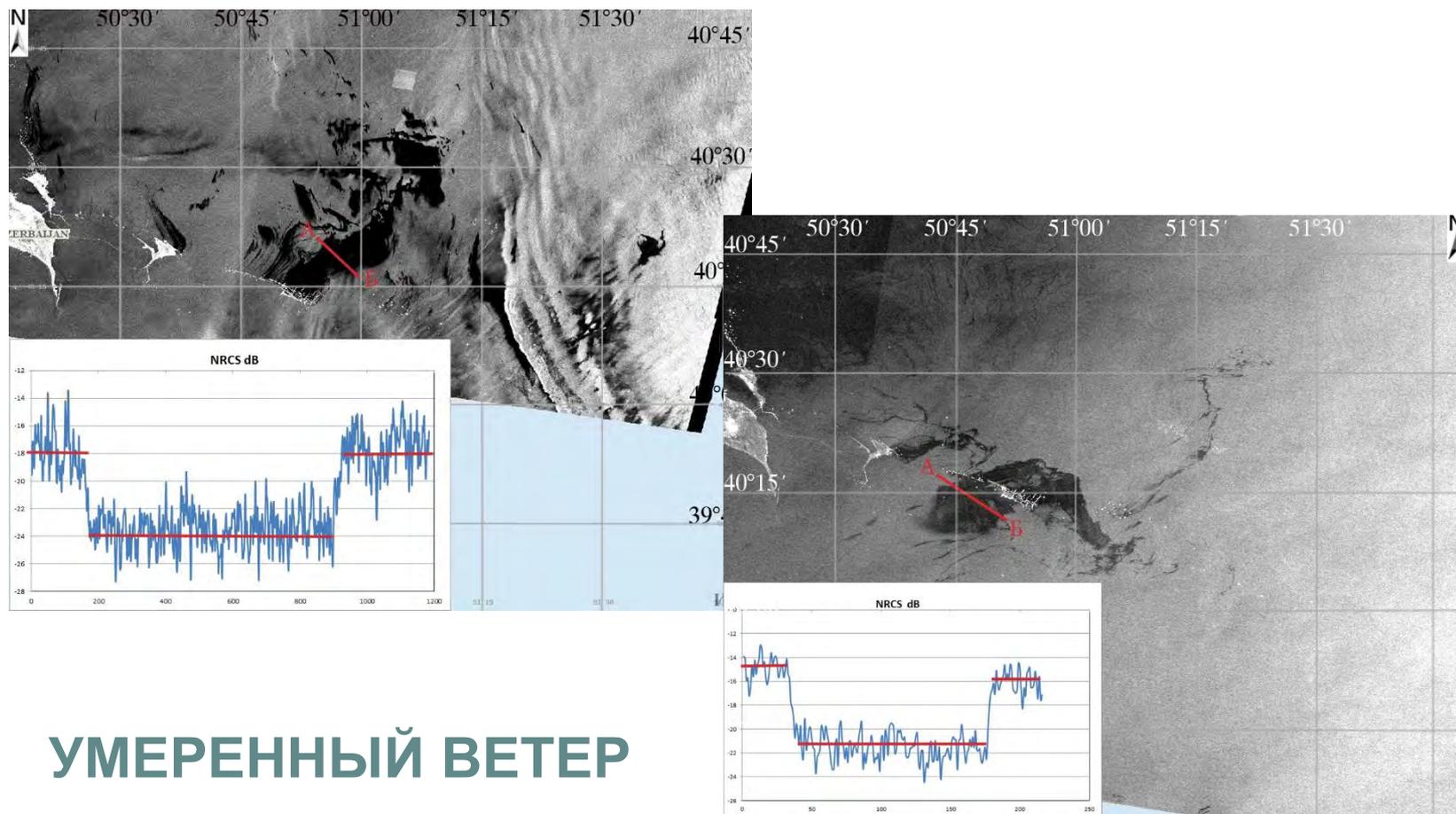
Example using the origins of slicks derived from SAR imagery to find a seep source location

The site of seep source was documented as the persistent location of origins of 230 oil slicks detected in satellite images taken over the region of interest in years 2010-2017. Our results indicate that the point with coordinates 40°41' E, 41°09' N appeared a “source” of the natural oil slicks origin. This point can be recognized as a point of location of an offshore seep at the seafloor at a depth about of 1000 m.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ВЫХОДЫ УГЛЕРОДОВ С МОРСКОГО ДНА

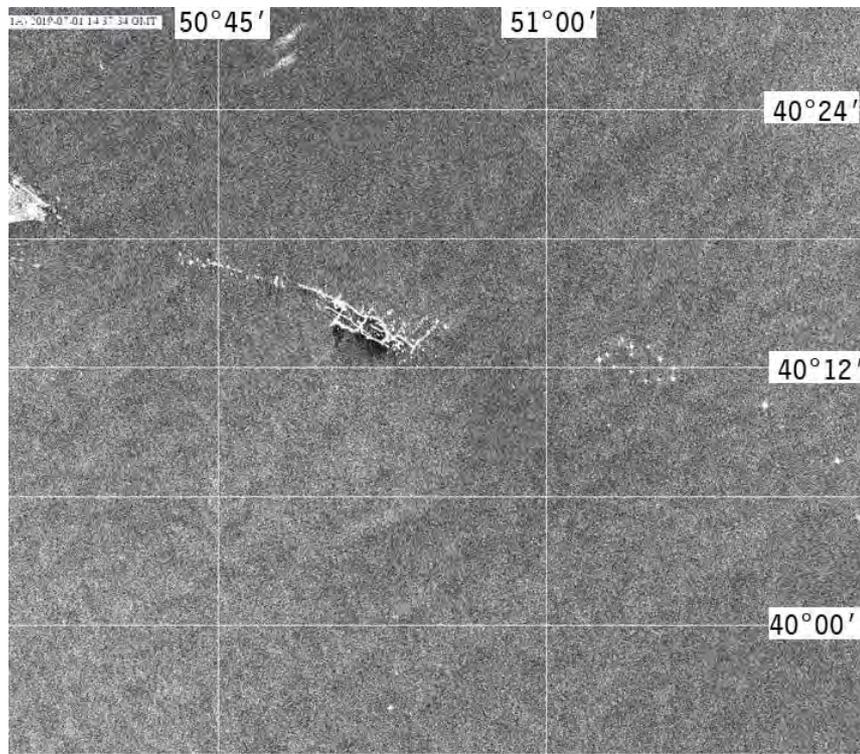


РЛ-ОБРАЗ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ

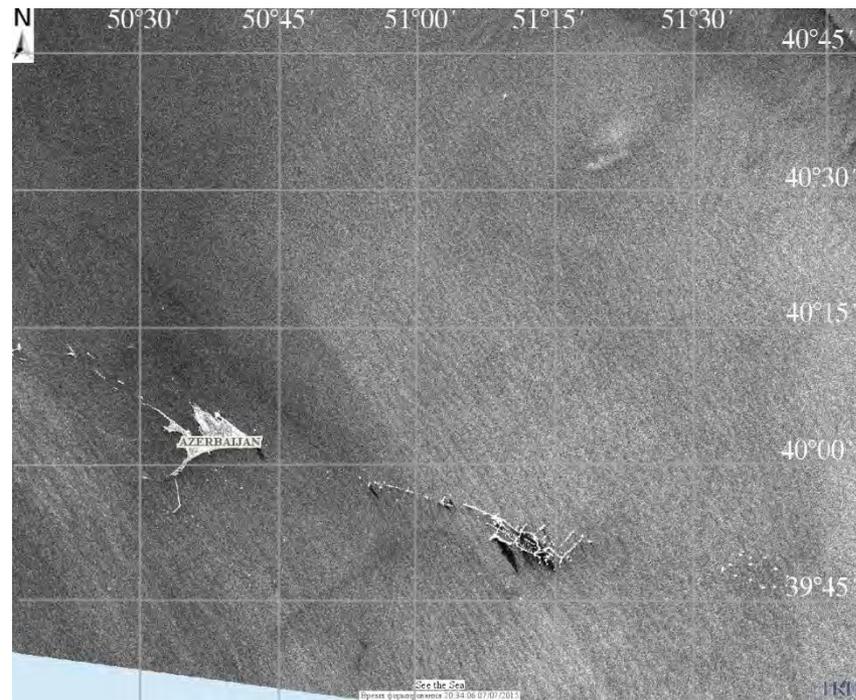


УМЕРЕННЫЙ ВЕТЕР

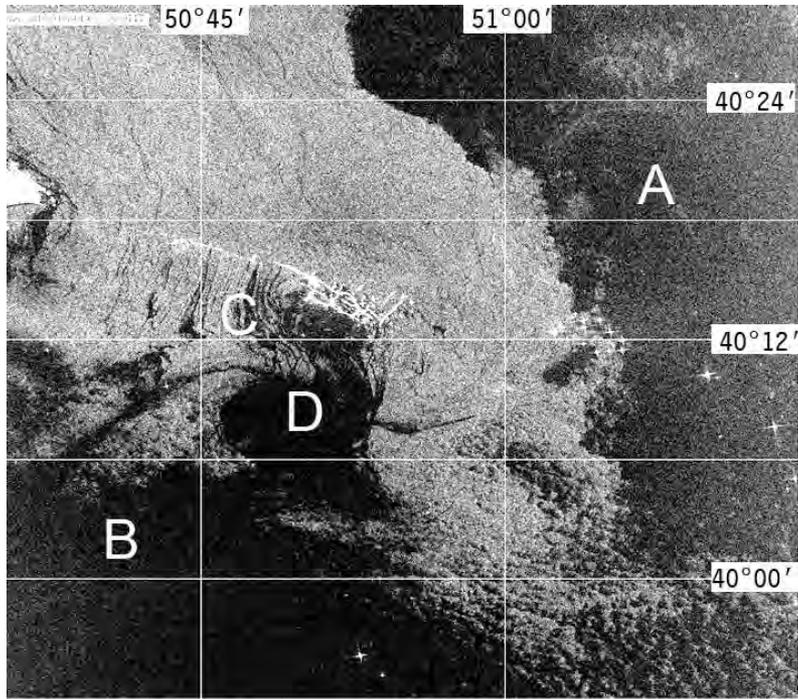
РЛ-ОБРАЗ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ



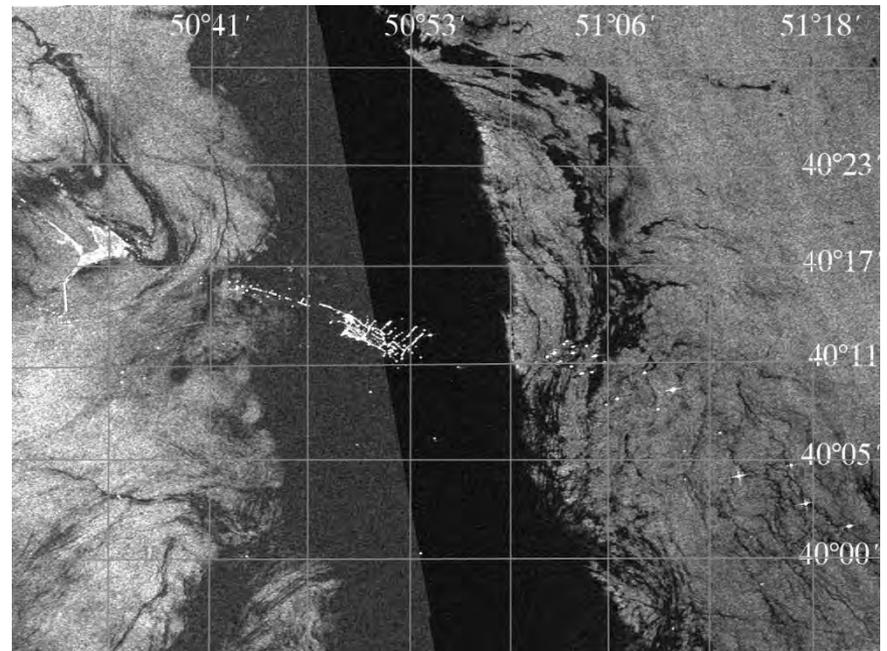
**АКТИВНЫЕ
АТМОСФЕРНЫЕ
ПРОЦЕССЫ/ СИЛЬНЫЙ
ВЕТЕР**



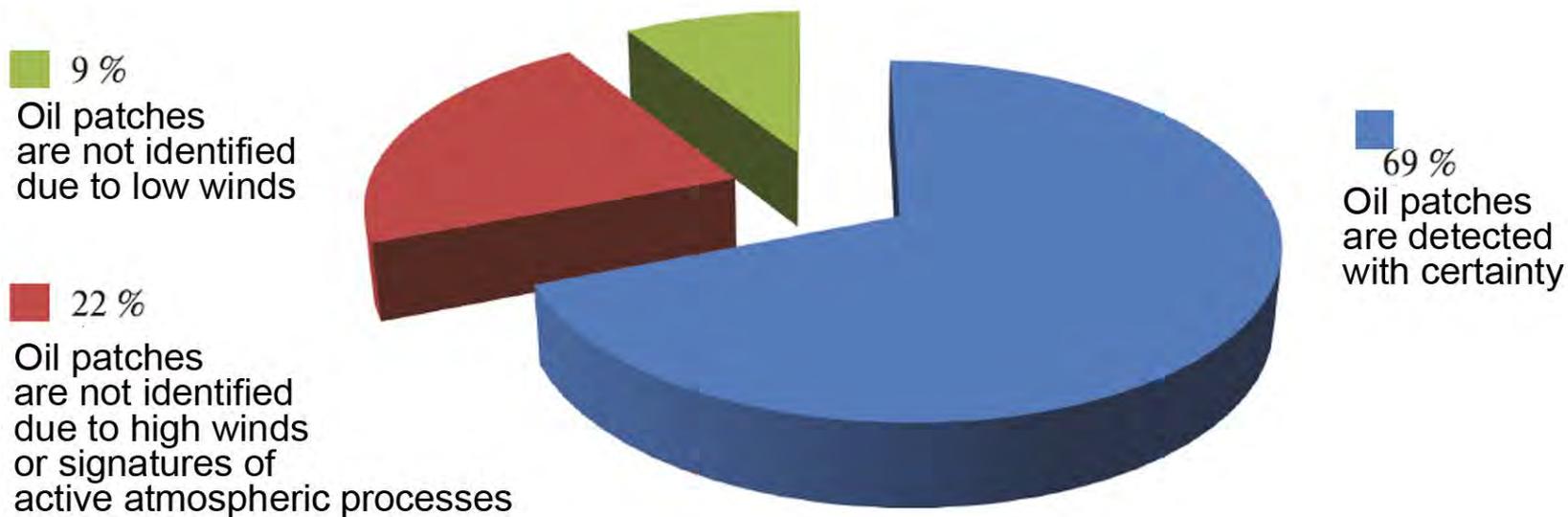
РЛ-ОБРАЗ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ



СЛАБЫЙ ВЕТЕР



ЧАСТОТА ВЫЯВЛЕНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ



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;

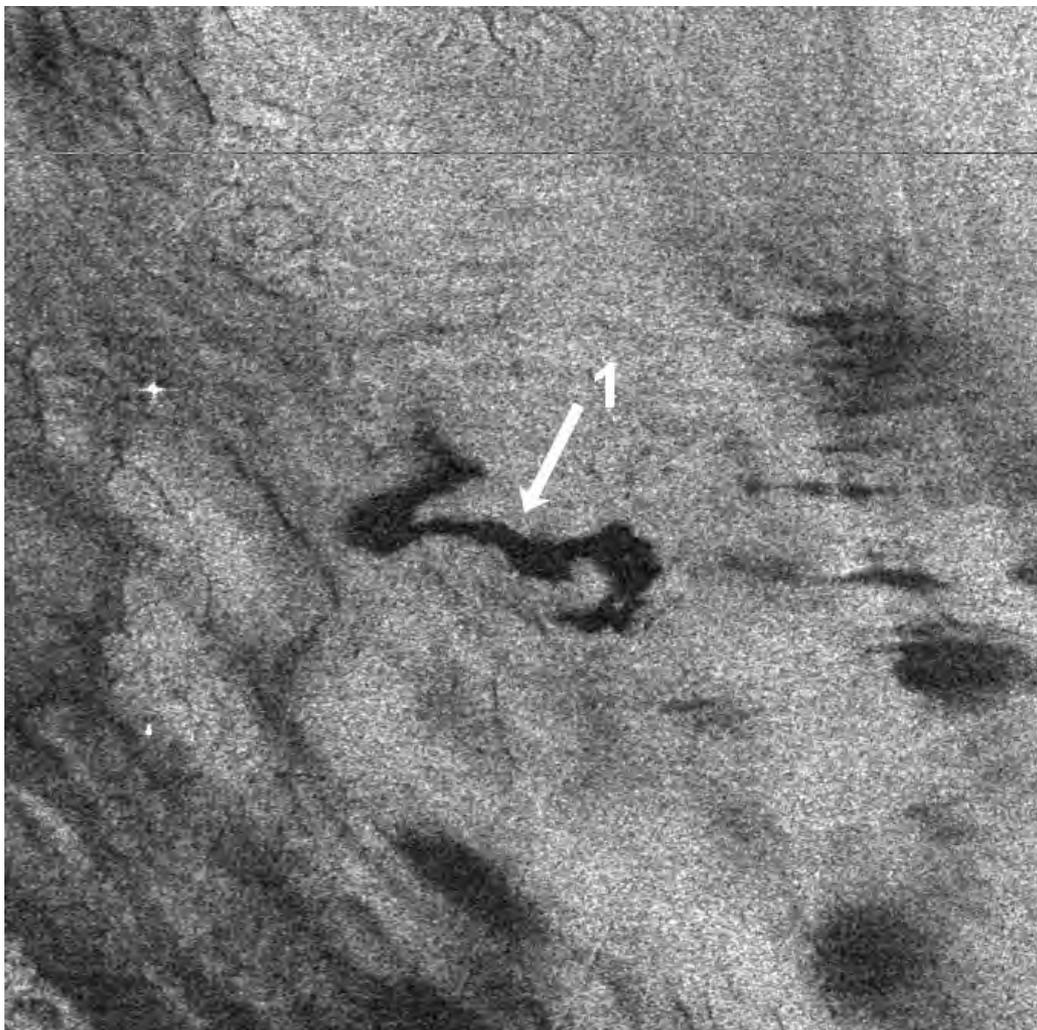
Биогенные пленки - результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом, фито и зоопланктона, а также бактерий.

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

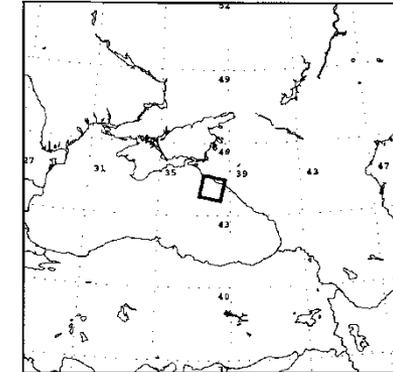
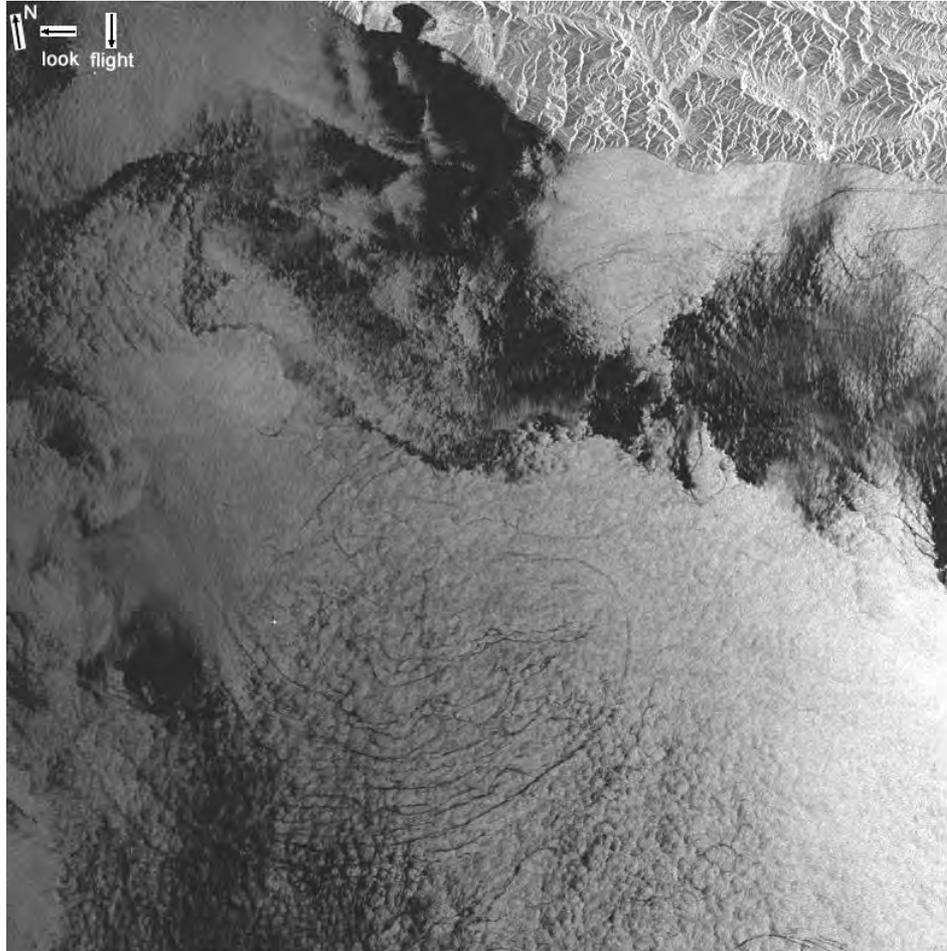
Comment

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

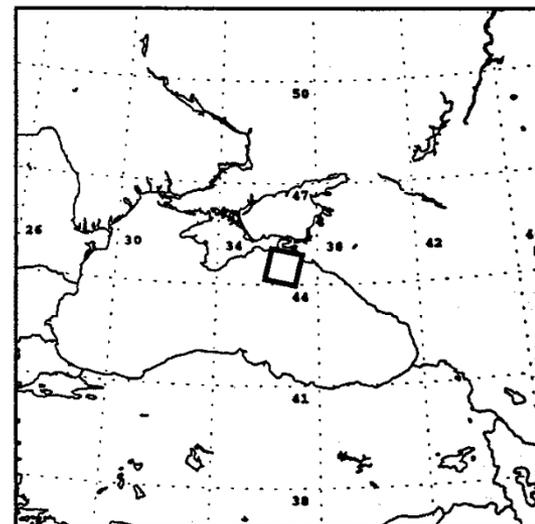
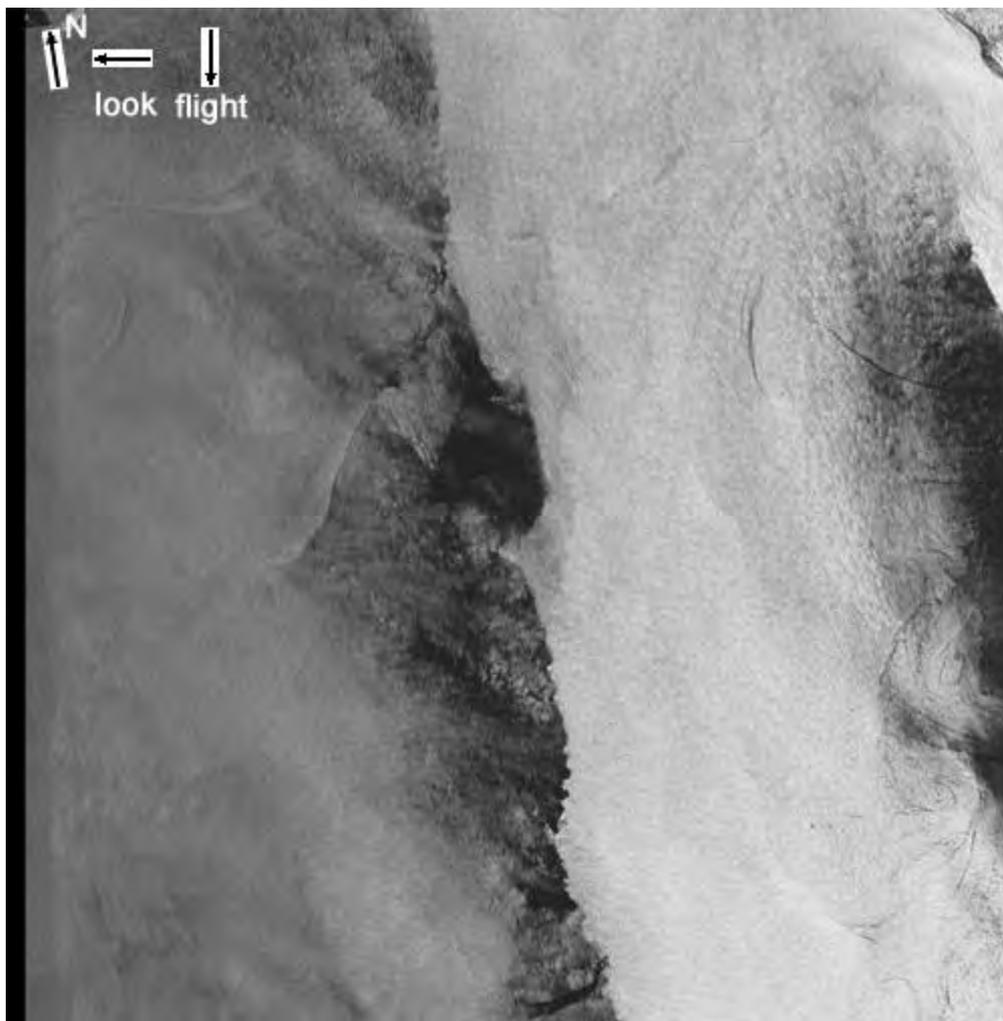
ФАКТОРЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (3) АТМОСФЕРНЫЕ /ОКЕАНИЧЕСКИЕ ФРОНТЫ



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

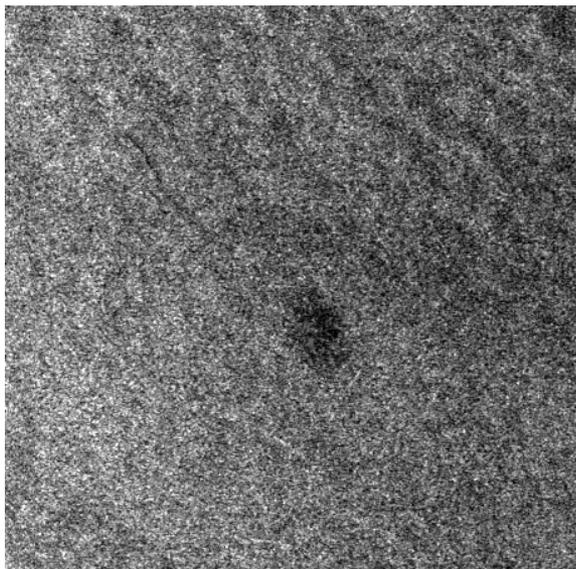
ERS SAR VV-pol, $\theta=23^\circ$
16.08.02/08:14

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



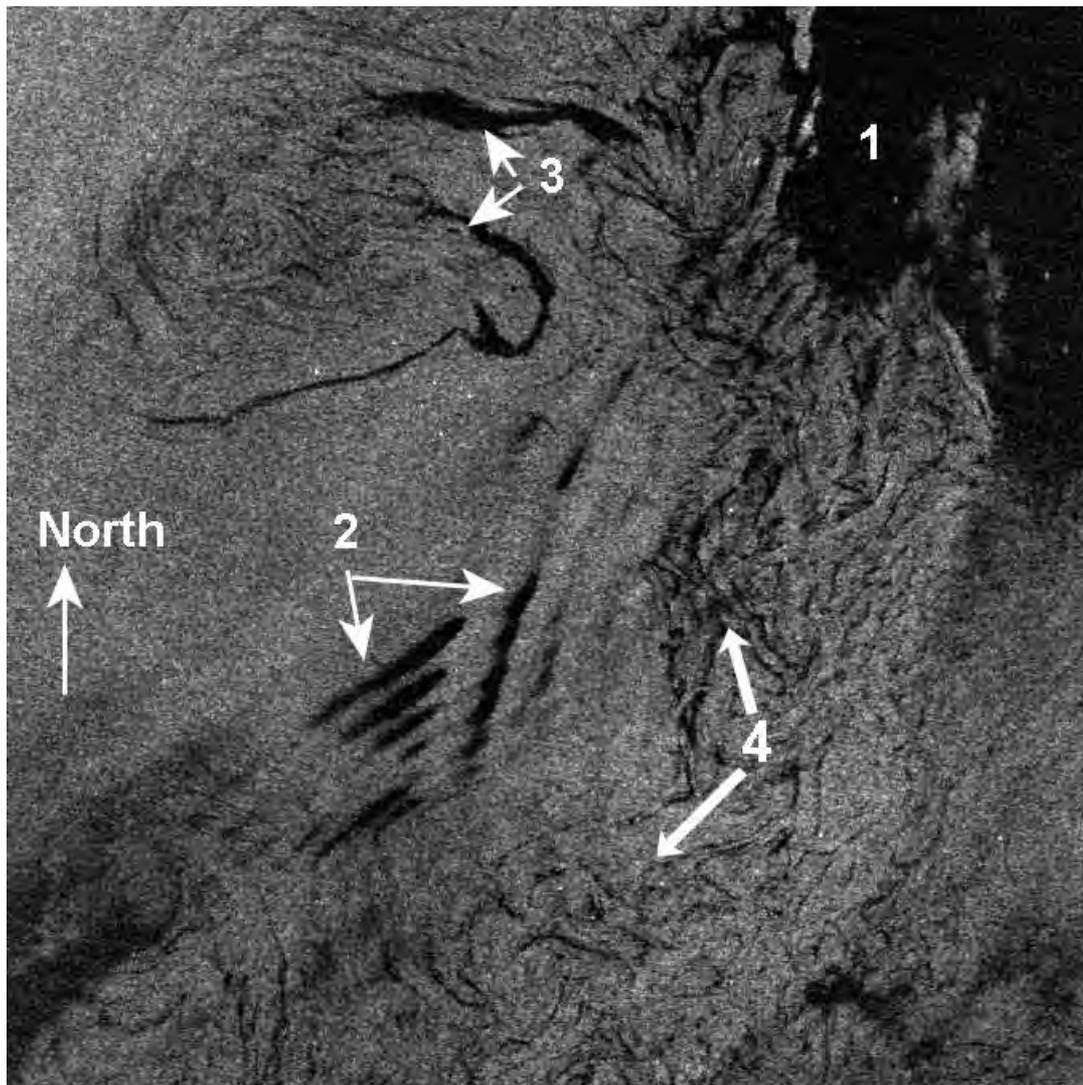
02 февраля 2010, 20:10 GMT



05 февраля 2010, 09:20 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

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

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 контролируемыми 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 ПВА.

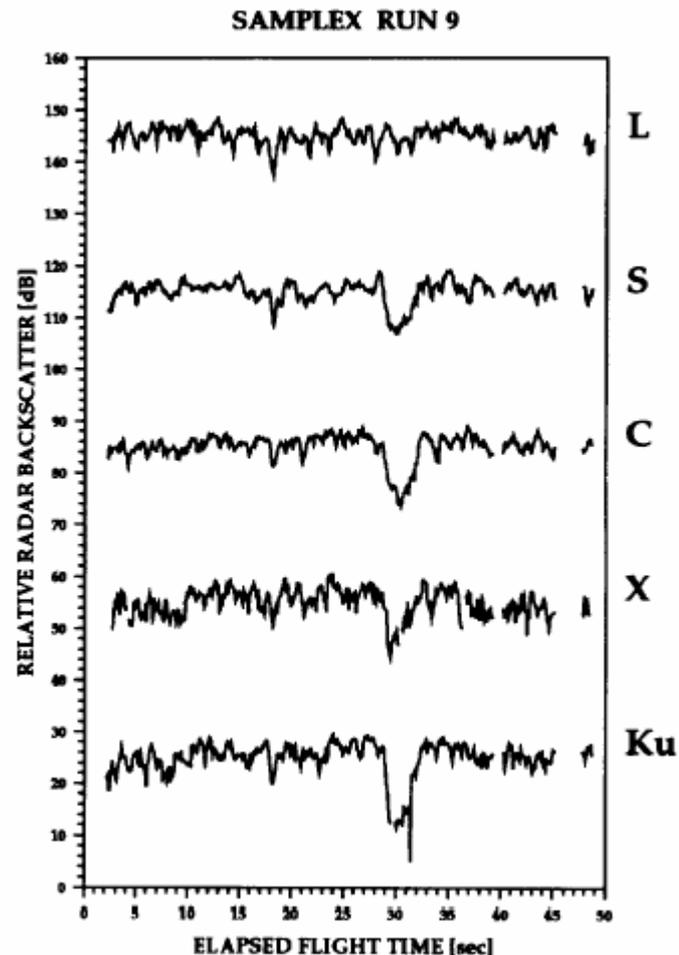
Цель экспериментов состояла в определении зависимости радиолокационных контрастов от типа пленочного загрязнения и условий наблюдения, в частности, от приповерхностного ветра.

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 C-, X- и Ku – диапазонах.

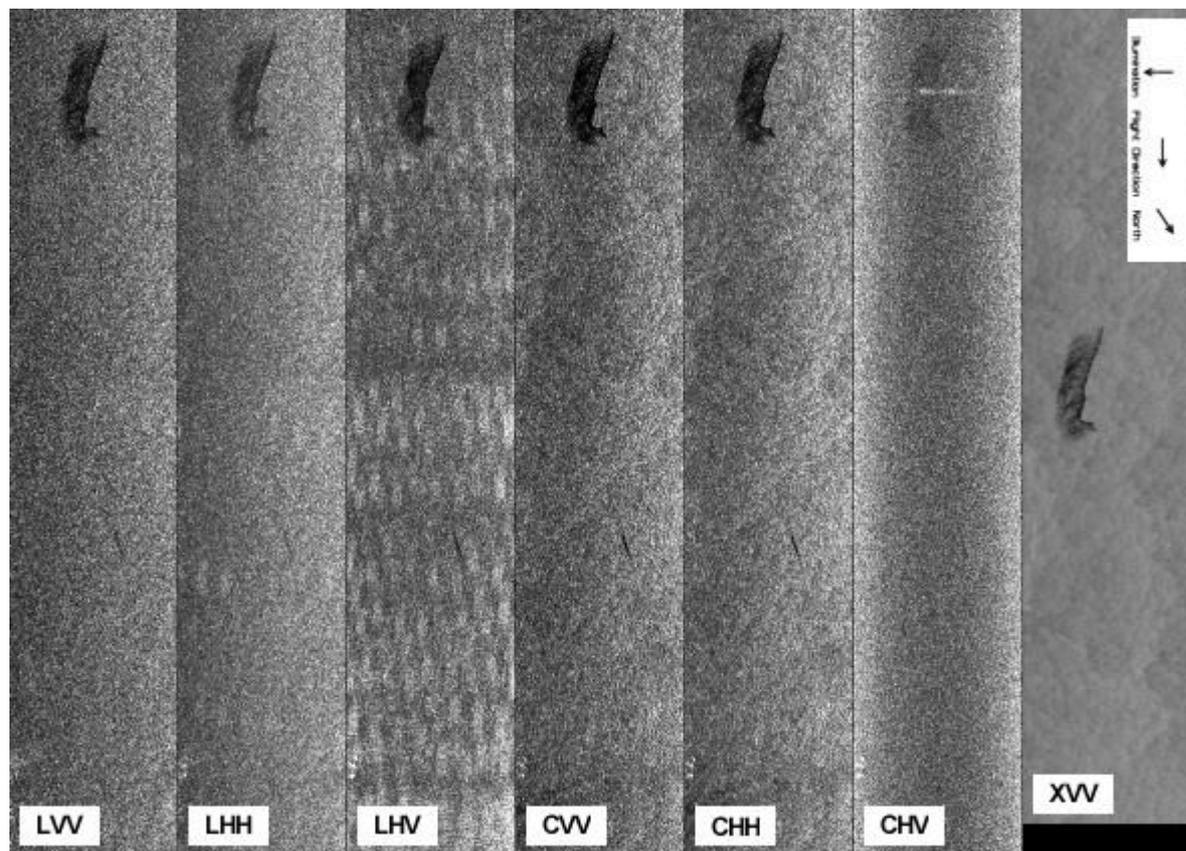
Контрасты, измеренные для разливов «легкой» нефти, составляли 5 дБ, а для разливов «тяжелого» топлива доходили до 10-15 дБ.

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)]¹

МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НЕФТЯНЫХ СЛИКОВ

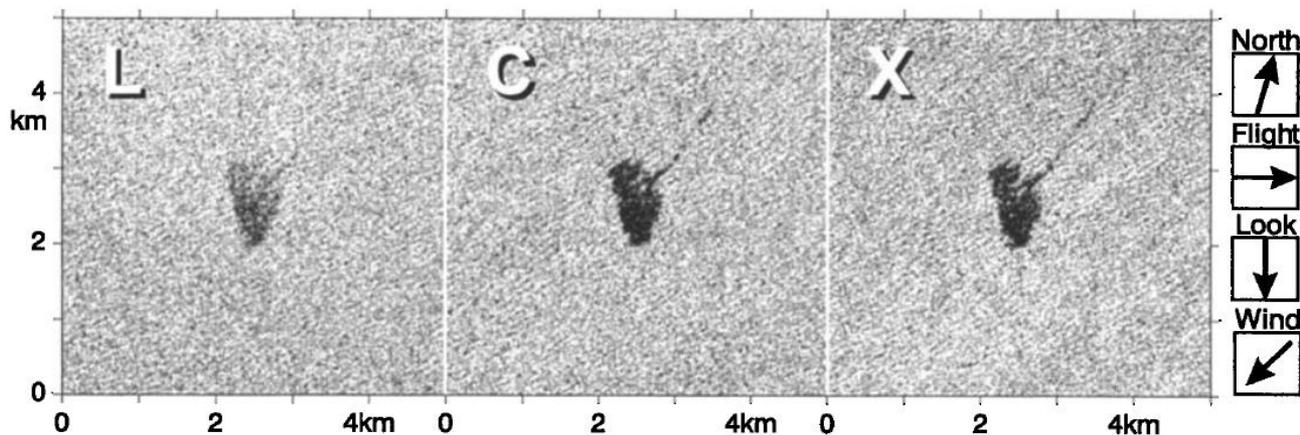


РЛ-изображение, полученное в районе течения Куроиси 04.10.1994, 20:25 UTC сенсором SIR-C/X-SAR одновременно в трех диапазонах и при различных поляризациях зондирующего сигнала. Ширина каждого фрагмента 21 км. В полосе обзора на морской поверхности находится нефтяное загрязнение, деформированное под воздействием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

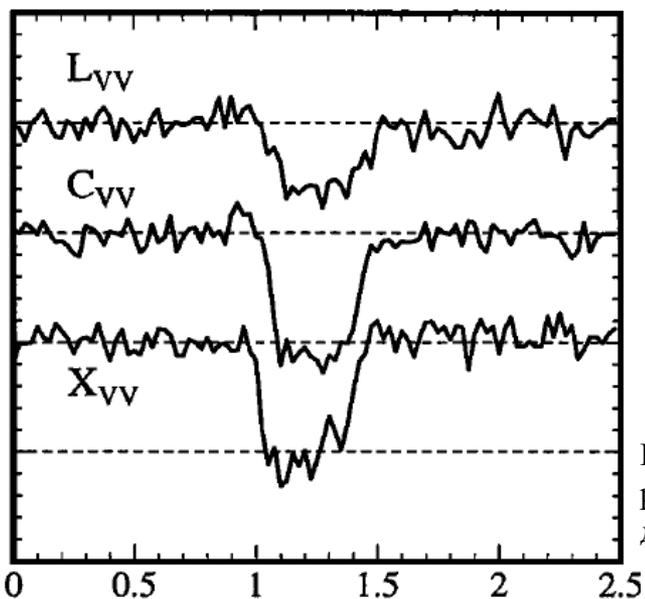
В апреле и октябре 1994 г. сенсор SIR-C/X-SAR, установленный на космическом челноке Endeavour был задействован в двух экспериментах, в ходе которых проводились измерения вариаций интенсивности обратнорассянного сигнала L-, C- и X-диапазонов на контролируемых разливах нефти и различных видов ПАВ.

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)

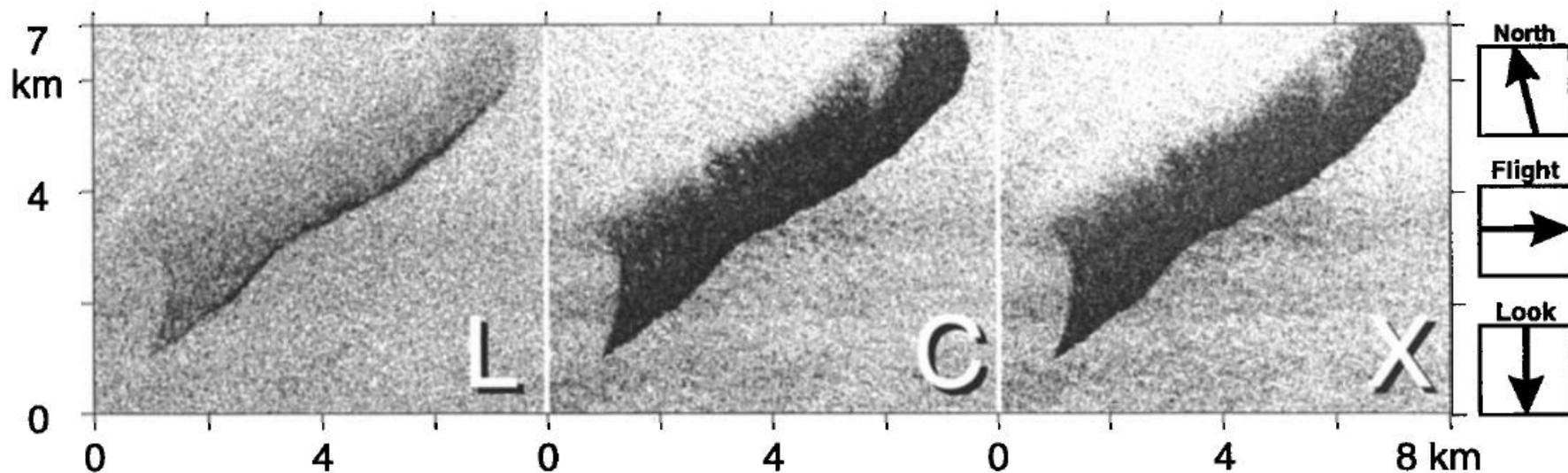


Подобные измерения проводились при различных скоростях ветра.

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

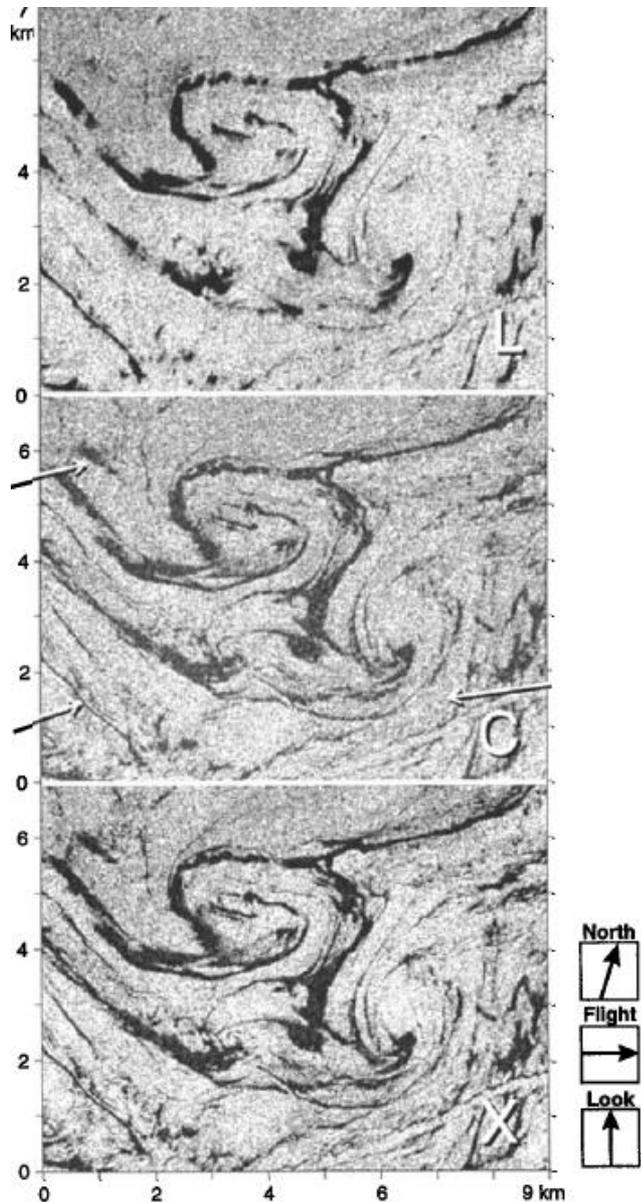
Вариации интенсивности обратно рассеянного сигнала для трех различных диапазонов на VV поляризации

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

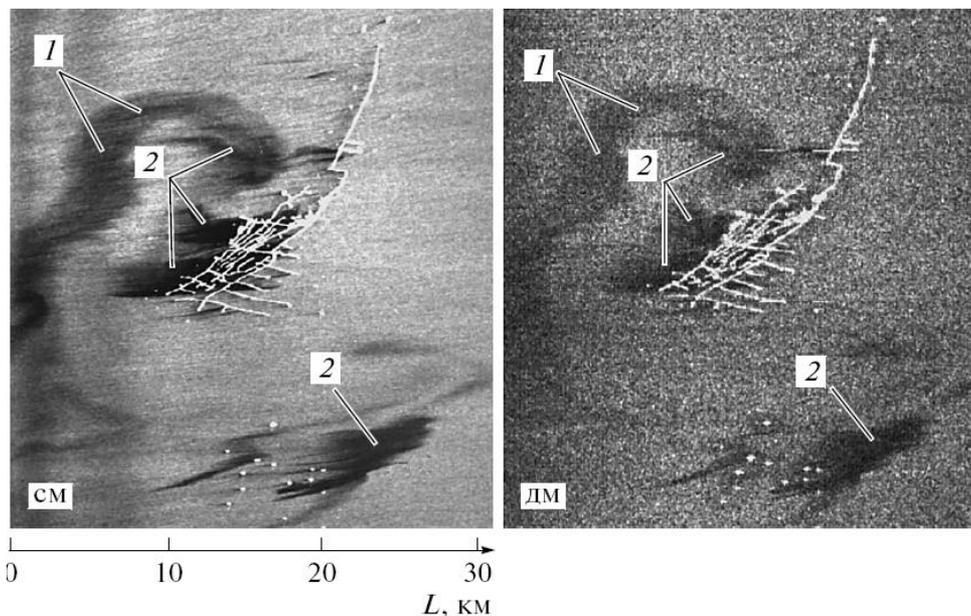
Предприняты попытки разработать методику оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности по данным многочастотного радиолокационного зондирования.

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



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.

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])

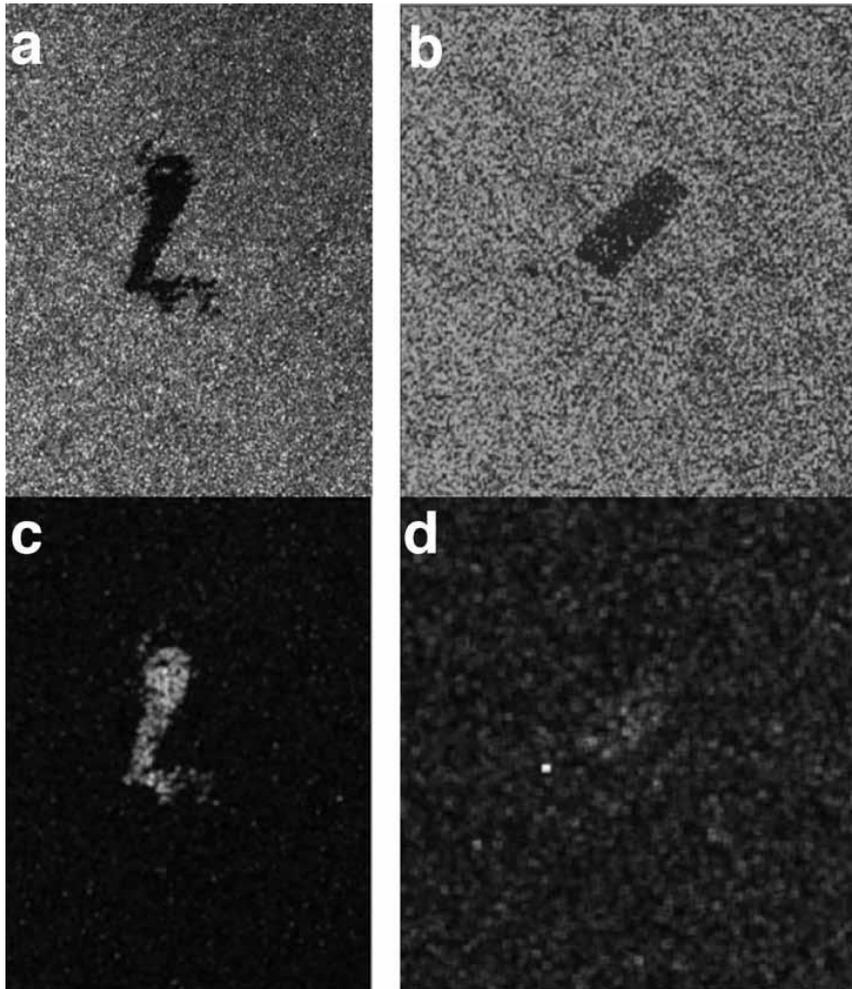
Теоретические радиолокационные контрасты рассчитывались в рамках теории взаимодействия поверхностных волн с пленкой конечной толщины [Боев, Ясницкая, 2002; Боев, Ясницкая, 2003]. В уравнениях, используемых авторами, содержится пять параметров, характеризующих пленку: активность, толщина, поверхностное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

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.

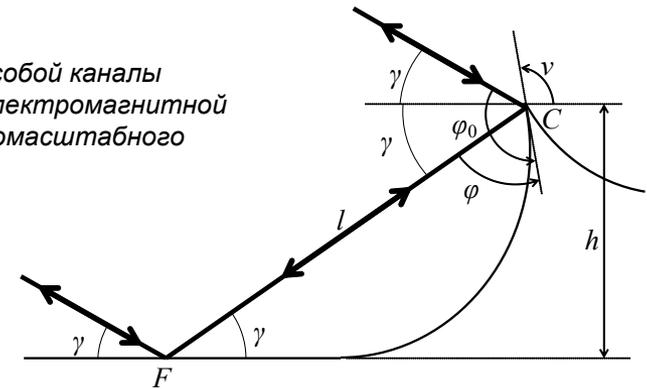
3. Двухполяризационные изображения океана на настильных углах наблюдения. Наиболее ярким доказательством существования нерезонансного механизма служат двухполяризационные изображения океана в условиях устойчивой и неустойчивой стратификации атмосферы.

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



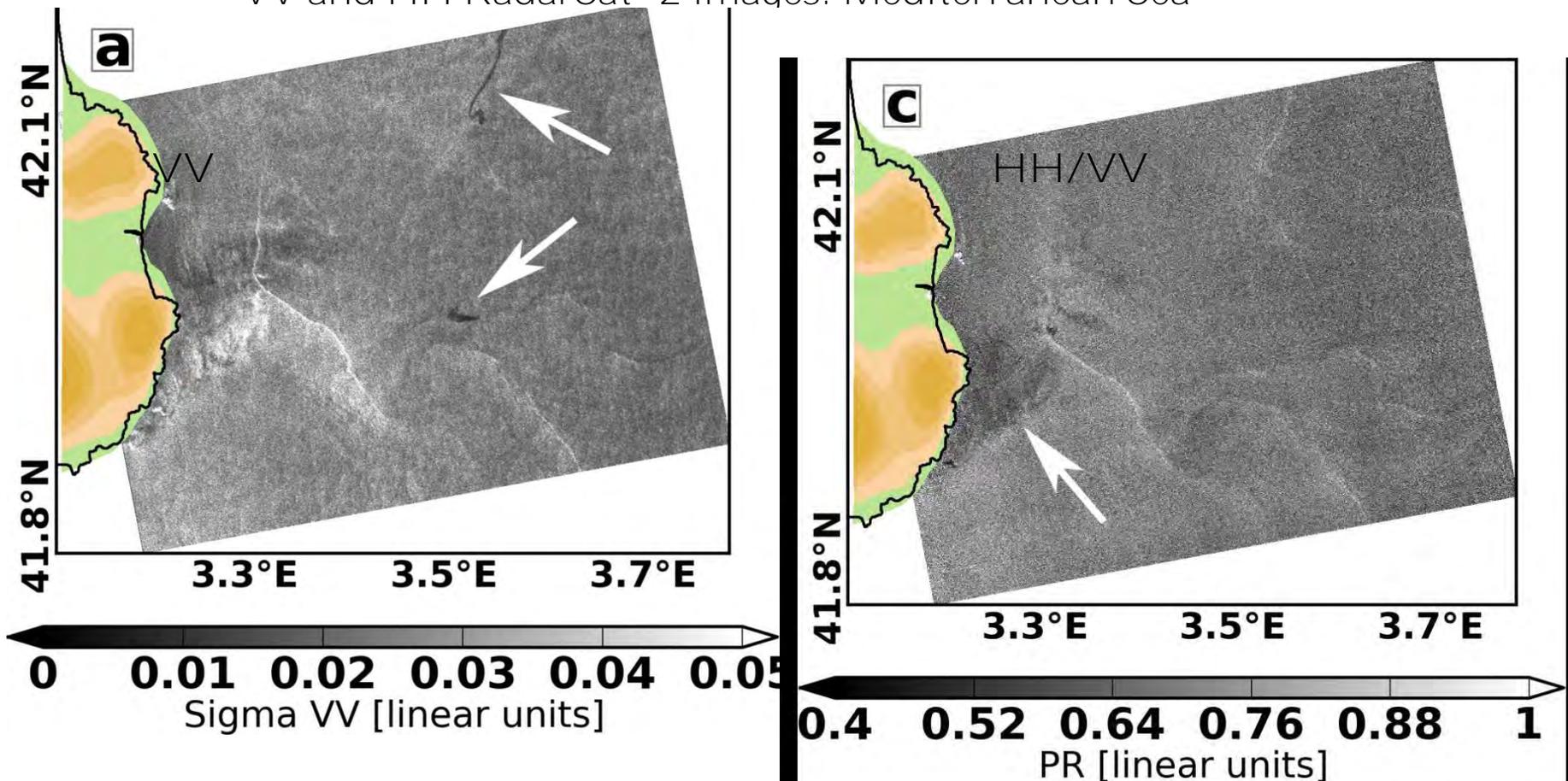
Как показано на рисунке, существуют четыре пути рассеяния, при которых падающая электромагнитная волна возвращается обратно к радару.

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

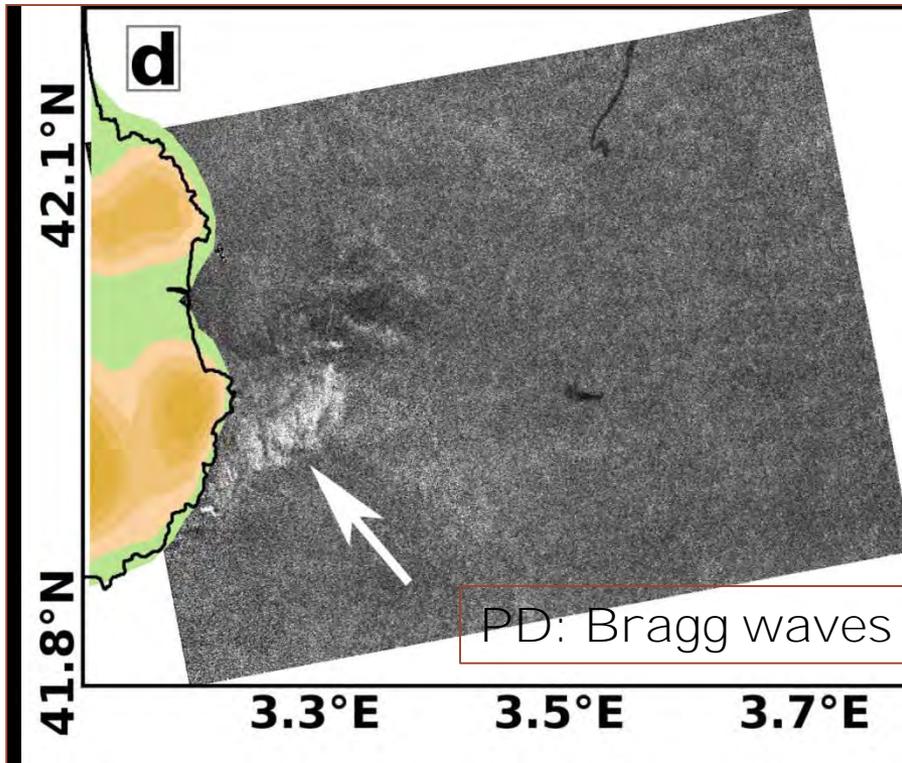
VV and HH RadarSat -2 images: Mediterranean Sea



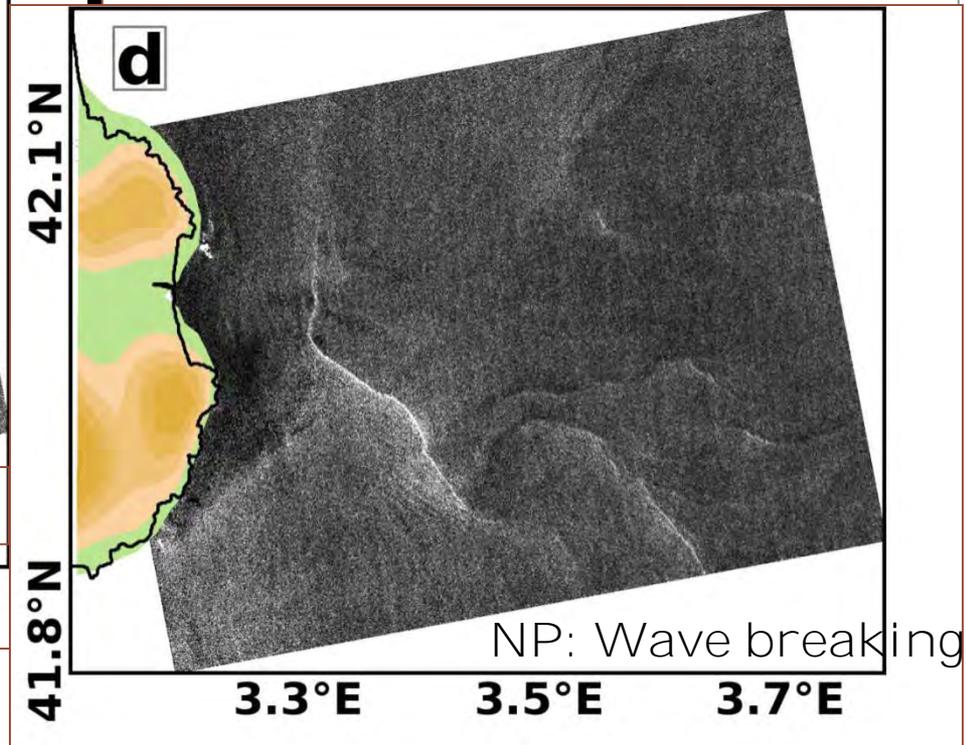
Kudryavtsev V., B. Chapron, A. Myasoedov, F. Collard, J. Johannessen, (2013). On dual co-polarized SAR measurements of the Ocean surface. *IEEE Geosci. Remote Sensing Let.*, vol. 10, issue 4, doi:10.1109/LGRS.2012.2222341

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 are detectable, but differently

Успехов в ваших изысканиях!

Работа выполнена в рамках темы «МОНИТОРИНГ»
Госрегистрация № № 01.20.0.2.00164,