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

М.И. Митягина*

Институт космических исследований РАН



IKN

г. Таруса



ФРОНТ ОКЕАНСКОГО ТЕЧЕНИЯ

We see a number of surface local convergence fronts

ERS-2 SAR Lombok Straits





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).





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 form ed 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.



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

ДОННАЯ ТОПОГРАФИЯ + ФРОНТ ОКЕАНСКОГО



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, 19975 at 04:39 Indian Ocean

ДОННАЯ ТОПОГРАФИЯ

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

11.07.95 / 22:38:06 The Bering Stait

ERS-1 SAR

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

1.33

n

-5

- 10

-15

0.00

Backscatter depression

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

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

IK

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

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

ОКЕАНСКИЕ ВИХРИ

China China Northern Korea Sea Sea Sea Sea Sea Sea Sea Sea Sea

ERS-2 May 13, 2002 Okhotsk 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

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 Novorossijsk-Ghelendjik region

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

IKU

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

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

ВИХРИ В МОРЕ +РЕЧНОЙ «ПЛЮМ»

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.

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

АТМОСФЕРНЫЙ ФРОНТ

The image shows a strongly pronounced atmospheric front.

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

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.

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

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.

IK

АТМОСФЕРНЫЙ ФРОНТ + ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В МОРЕ

2010-09-11 06:52

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.

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).

ОКЕАНСКИЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ

AN-24/RAR		
Flight altitu de/speed	2150 m / 355 km/h	
Image partition	No	
Wavelength(s)/Frequency(ies) /Band(s)	2,25cm/13,6GHz/Ku	
Polarization(s)	НН	
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,

КИ

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВВ

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

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

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.*

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/ λ , 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
Р	Previous	< 300 МГц	> 1 M	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»
С	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 и</i> 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>
Ku	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 Схи Ан-24.

поляризация вектора электрического поля

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)

Вектор электрического поля при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирующего сигнала

РЕЗОНАНСНЫЙ (БРЕГГОВСКИЙ) МЕХАНИЗМ РАССЕЯНИЯ

Механизм формирования резонансного рассеяния радиолокационного сигнала на взволнованной морской поверхности, где λ- длина зондирующей волны, Λ-длина резонансной спектра компоненты волнения, поверхностного 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 ° – 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 \pm 4 см.

ДВУХМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Схематичное представление двухмасштабной модели поверхности

Дву хмасшта бную или ком позитную модель морской поверхности квалифицируют также как «рябь на крупной волне»

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

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

Такой комбинированный подход известен как двухмасштабная модель рассеяния

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ОТ УГЛА ЗОНДИРОВАНИЯ (1)

При обратном рассеянии

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

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

$$Q_{vv}(\mathbf{n}_{i}) = \frac{1}{16} \left| (\varepsilon - 1)(1 + R_{v}) \left[1 + R_{v} + \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} (1 - R_{v}^{2}) \sin^{2} \theta \right] \right|^{2}$$
$$Q_{hh}(\mathbf{n}_{i}) = \frac{1}{16} \left| (\varepsilon - 1)(1 + R_{h})^{2} \right|^{2}$$

IVRI

Завися щая от поляризации часть угловой зависимости определяется множителем

Френелевские амплитудные коэффициенты отражения

$$R_{h}(\theta) = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^{2} \theta}}{1 + \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^{2} \theta}}, \qquad R_{\nu}(\theta) = \frac{\varepsilon - \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^{2} \theta}}{\varepsilon + \sqrt{\varepsilon + (\varepsilon - 1) \operatorname{tg}^{2} \theta}}$$

є — диэлектрическая проницаем ость м орской воды



Различные механизмы воздействия внутриволновых возмущений на морскую поверхность по проявлениям в РЛрассеянии

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 волнопределяется 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 BB.

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-гравитационых волн (паразитной ряби), возбуждаемых в виде "паразитной капиллярной ряби" короткими гравитационными волнами



Паразитные гравитационнокапиллярные волны

wind

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

Ермак ов С.А., Сергиевская И.А., Щегольк ов Ю.Б.. Лаборат орное исслед ование 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.

Ермак ов С.А., Сергиевская И.А., Зуйкова Э.М., Кияшк о С.В., Щегольк ов Ю.Б. Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в при сутствии органических пленок на морск ой поверхности // Доклады РАН. 2003. Т. 388. №1. С. 109-112.

Седьмая международная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли». 24.02 - 29.02.2016, г. Таруса



10 cm

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 концентрация 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







ОКЕАНСКИЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ

Андаманское море



ERS-2 SAR February 11, 1997 at 03:58 GMT The Andaman Sea



ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВВ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

•Длина фронта ведущей волны достигает десятков километров, изменяясь в пределах от 15 до 65 км.

•Ширина пакетов в зависимости от количества волн в цуге варьируется от 1 до 6 км

•Длина максимальной волны в цуге от 370 до 1500 м.

•Фронт ведущей волны в подавляющем большинстве случаев проявлялся в виде сулоя, т.е. полосы усиления поверхностного волнения.





ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВВ ВБЛИЗИ КРЫМСКОГО П-ВА









Сопоставление проявлений внутренних волн в различных частотных диапазонах зондирующего СВЧизлучения



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 поверхность, которые морскую являются на определяющими для разных диапазонов зондирующего сигнала определения оптимальных методов И ППВО идентификации детек тирования И 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	
	5.6 см	
длина волны зондирующего сигнала	(С –диапазон)	
Поляризация	BB	
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 = 13.3ГГц			
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° - 84°			
Номинальная высота полета	2 км			







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

IKN



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





	Диа па зо ны	Χ	L	C:	
частота зондир диа па зонов)	ующего сигнала (для различных	9,38 ГГц	1,25 ГГц	5,26ггц	
Длина волны зондирующего сигнала		3,2см,	24см	5,6 см	
Поляризации		VV, HH			
Ширина луча ан	ленны	1,9 град	8,6 град	3,5 град	
Простра нстве нн	юе разрешение по наземной дальности	2.5 м			
Простра нстве нн	юе разрешение по азимуту	2,1 м			
Длительносьть	импульса	4 мкс			
Импульсная мо	щность передатчика	1,5 кВт	5 кВт	1,4 кВт	
Ширина полось	ы обзора	10 км (номинальная)			
Углы обзора		0° - 70°			
Номинальная в	ысота полета	3 км			

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



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





L-диапазон - проявления определяются кинематическим резонансным механизмом, который предсказывает знакопеременные контрасты вариаций спектров ветровых волн при резонансном взаимодействии дм-волн с BB

>Х-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 Хдиапазоне.



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



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

Отличительной особенностью сечения РЛИ К_идиапазона на ВВ поляризации является отсутствие области пониженного рассеяния в зоне выглаживания, что вероятно связано с обрушения ми более длинных, дециметровых волн

Модуляция РЛ-сигнала σ_{max} / σ_0 в сулое по отношению к среднему невозмущенному фону в K_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_и-диапазоне на ГГ поляризации составляет ~ 4.6 (6.6дБ).







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

ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ:

≻ПОДОБНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ППВВ В К_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 *θ*=74-82°.

≻ 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 нерезонасном (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 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 (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_{ζ} (**q**).

Из пропорциональности σ_h и σ_v одной и той же величине $F_{\zeta}(\boldsymbol{q})$ 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 нерезонанасного 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 океа на // Радиотехника. 2000. №1. С. 61-73.



НЕРЕЗОНАНСНОЕ (НЕБРЕГГОВСКОЕ) РАССЕЯНИЕ

В работах [Voronovich et al., 2001; Kudryavtsev et al., 2003; Kudryavtsev et al., 2005] было предложено дальнейшее развитие модели проявления течений в спектре ветровых волн, учитывающей влияние обрушения волн как на спектр ветрового волнения, так и на обратное рассеяние радиоволн.

В работе [*Козлов, Сычёв,* 2008] рассчитывались вклады обрушений волн в проявления ВВ на РЛ изображениях в Х, С, S, L-диапазонах. Сделан вывод, что вклад волновых обрушений в проявления ВВ на РЛИ при определенных условиях может являться определяющим.

Voronovich A. G., Zavorotny V. U. Theoretical model for scattering of radar signals in Ku- and C-bands from a rough sea surface with breaking waves // Waves in Random Media. 2001. V. 11. P. 247–269.

Kudryavtsev V., Danièle Hauser, Gérard Caudal and Bertrand Chapron A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108. No. C3. P. FET 3-1–FET3-16

Kudryavtsev, V., D. Akimov, J. Johannessen, and B. Chapron. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations// Journal of Geophysical Research. 2005. V. 110. C07016. doi:10.1029/2004JC002505

Козлов И.Е., Сычёв В.И. Реанализ проявлений океанских внутренних волн на изображениях РСА спутника «Алмаз-1» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 108-116.





ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАЗЛИЧИЙ ВКЛАД НЕБРЕГГОВСКИХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

Поляризационная разность

Деполяризационное соотношение Polarization Difference, PD, short Bragg waves : $\Delta \sigma_0 \equiv \sigma_0^{\nu\nu} - \sigma_0^{hh} = \sigma_{0B}^{\nu\nu} - \sigma_{0B}^{hh}$ NP contribution from breaking waves : $\sigma_{wb} = \sigma_0^{\nu\nu} - \Delta \sigma_0 / (1 - p_B)$ where $p_B = \sigma_{0B}^{hh} / \sigma_{0B}^{\nu\nu}$ is PR for Bragg scattering

Polarized scattering: Bragg waves





Non - polarized scattering: Wave breaking










Работа поддержана РФН в рамках проекта № 14-17-00555.

Для иллюстраций использованы РЛИ, представленные в базах данных, созданных нами в ходе выполнения ряда проектов INTAS: <u>http://simp.iki.rssi.ru</u> <u>http://adidas.iki.rssi.ru</u>

В составлении коллекции РЛИ принимали участие команды ИКИ РАН ТОИ РАН Университета Гамбурга (Германия) Университета Лиссабона (Португалия)



Седьмая международная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли». 24.02 - 29.02.2016, г. Таруса