

КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВАЛИДАЦИИ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

Бондур В.Г., Дулов В.А., Мурынин А.Б.

*19-я Международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли
из космоса»*

ЦЕЛЬ ПРОВОДИМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Восстановление спектров ветровых волн по спутниковым оптическим изображениям морской поверхности сверхвысокого разрешения (~1 м) имеет очевидную практическую и научную ценность.

Хотя подходы к восстановлению спектров описаны в литературе и применены в единичных тематических исследованиях, проблема получения спектров из спутниковых изображений остается открытой.

Реальные продвижения в ней могут быть достигнуты, в частности, в результате целенаправленных подспутниковых экспериментов с прямыми измерениями спектров в натуральных условиях.

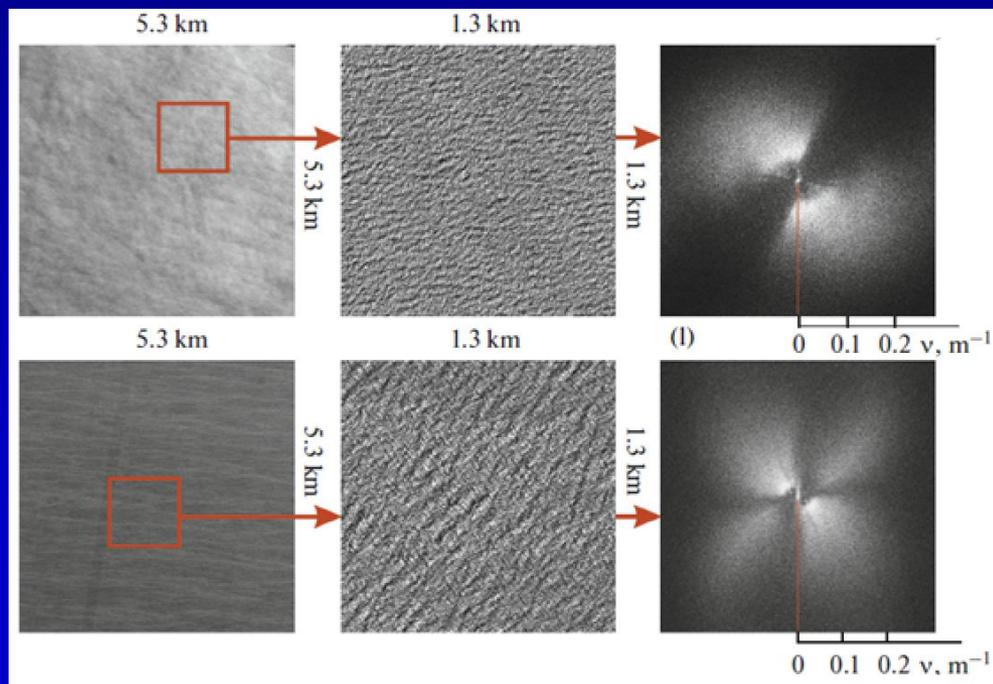
Валидация методов необходима для изучения аномальных процессов и явлений на морской поверхности.

ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ СПЕКТРОВ МОРСКИХ ВОЛН

Пространственные и частотные спектры волн характеризуют пространственно-временную структуру случайно меняющейся поверхности океана.

Эти спектры дают важную информацию о различных процессах и явлениях, происходящих на поверхности и в приповерхностных слоях моря и океанов, об энергетических свойствах морских волн и параметрах поверхностного воздушного слоя и ветрового режима.

Они также позволяют выявлять зоны неблагоприятного природного и антропогенного воздействия на водную среду и чрезвычайные ситуации в океане.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГО ОПЕРАТОРА

Для получения спектра уклонов $\Psi_\phi(k_x, k_y)$ из спектра изображения $S(k_x, k_y)$ вводится восстанавливающий оператор R :

$$\Psi_\phi(k_x, k_y) = R(k_x, k_y)S(k_x, k_y)$$

$R(k_x, k_y)$ может быть определен как передаточная функция, пространственно-частотный фильтр, зависящий от освещения, условий наблюдения, характеристик оборудования.

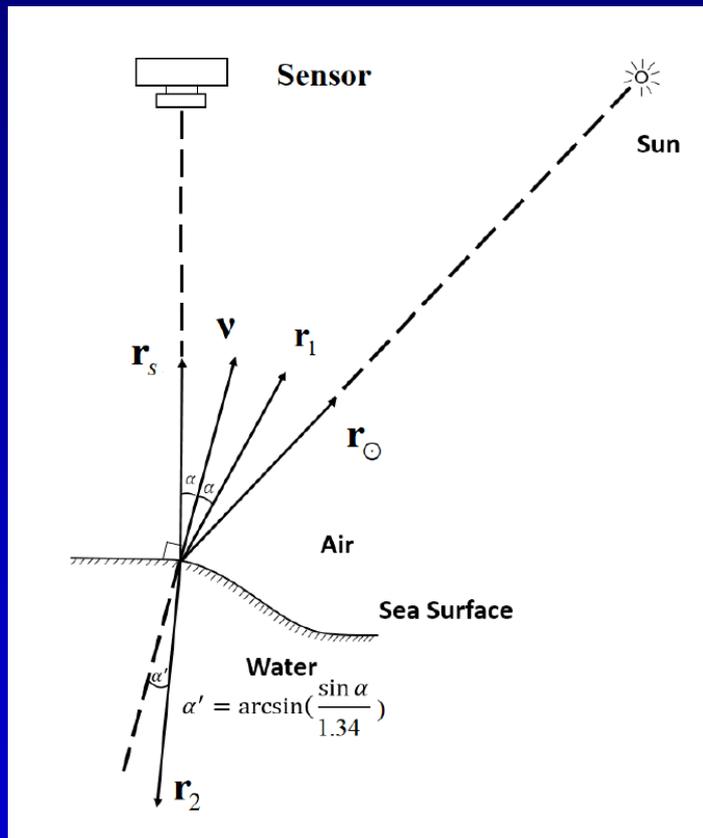
Можно показать, что в линейной аппроксимации, когда N не зависит от уклонов поверхности, спектр изображения пропорционален спектру уклонов поверхности.

В общем случае для получения спектров волнения необходимо учитывать нелинейные эффекты, которые играют заметную роль в формировании изображений.

Определение нелинейного восстанавливающего оператора является задачей настоящей работы.

ПОЛЕ ЯРКОСТИ

$$L(x,y) = C_x \xi_x(x,y) + C_y \xi_y(x,y) + N'(x,y, \xi_x(x,y), \xi_y(x,y))$$



L – яркость на изображении, ξ_x ξ_y – уклоны поверхности в точке x, y ,
 C_x C_y – константы, зависящие от условий освещения и съемки
 N – составляющая, нелинейно зависящая от уклонов

Спектры ветровых волн из спутниковых изображений. Проблемы

Работа в солнечном блике

- Кудрявцев В.Н. и др. 1989, 1990, ...,
- Kudryavtsev, Yurovskaya et al., 2017, ...

Полная модель яркости морской поверхности

- Мурынин А.Б. 1990, ...,
-
- Bondur, Murynin, 2021

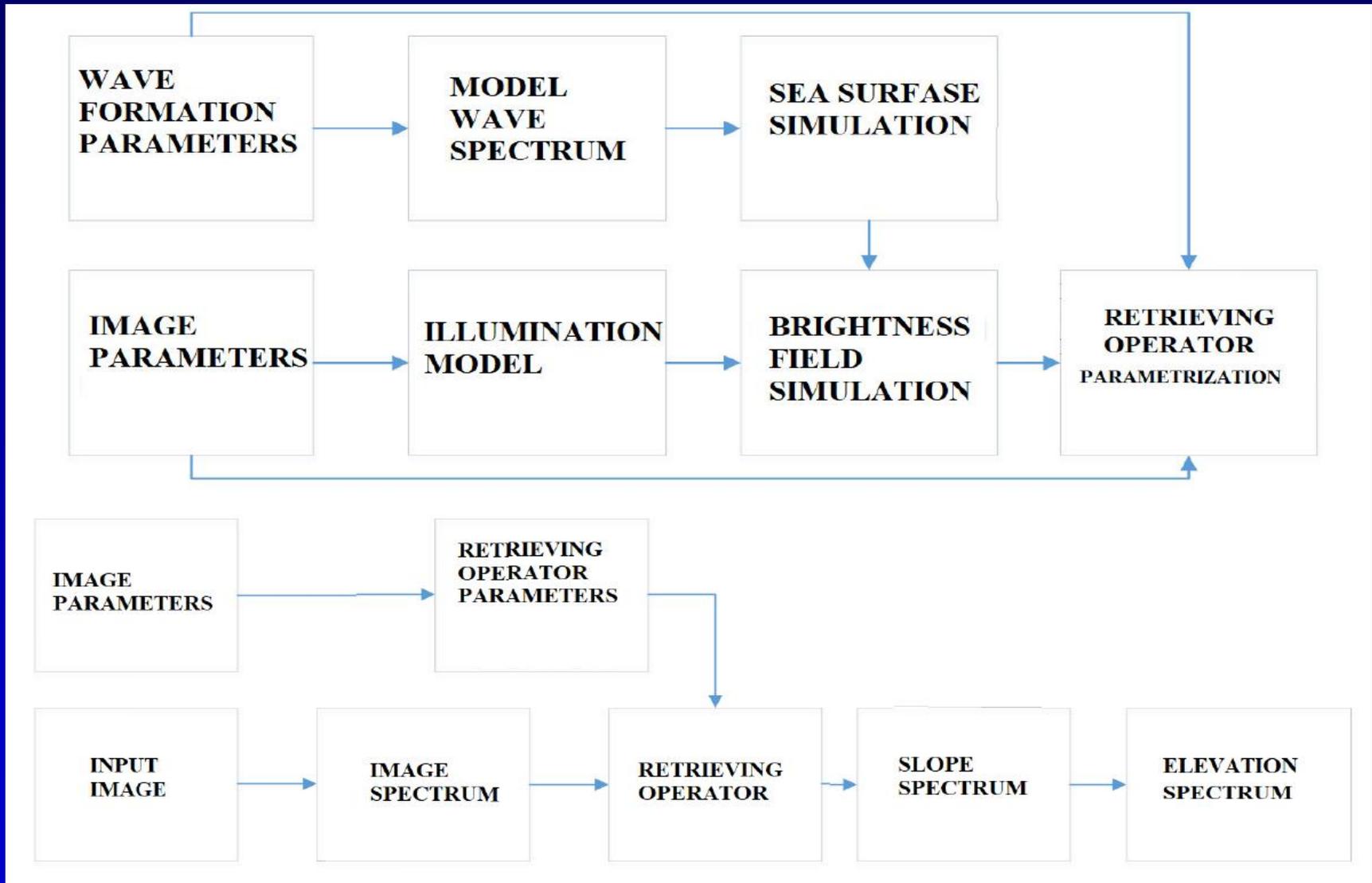
$$B = B_0 + C_x \zeta_x + C_y \zeta_y + \dots$$

$$S_B(\mathbf{k}) = T(\mathbf{k}) S_\zeta(\mathbf{k})$$

$$T(\mathbf{k}) = C k^2 \cos^2(\varphi - \varphi_0)$$

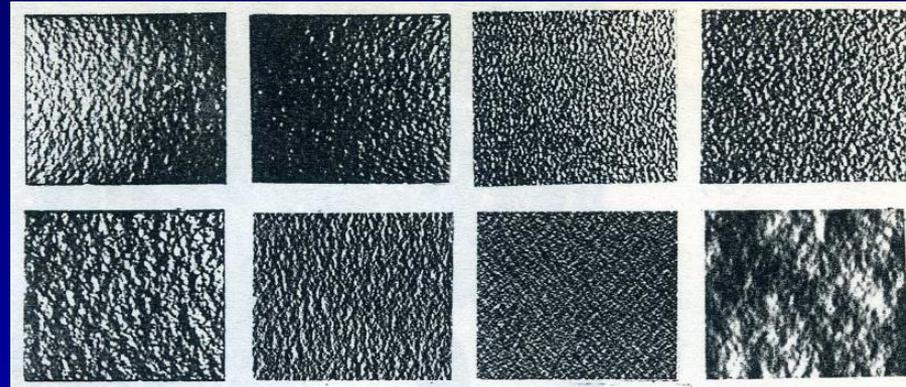
$$C = C_x^2 + C_y^2$$

АЛГОРИТМЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

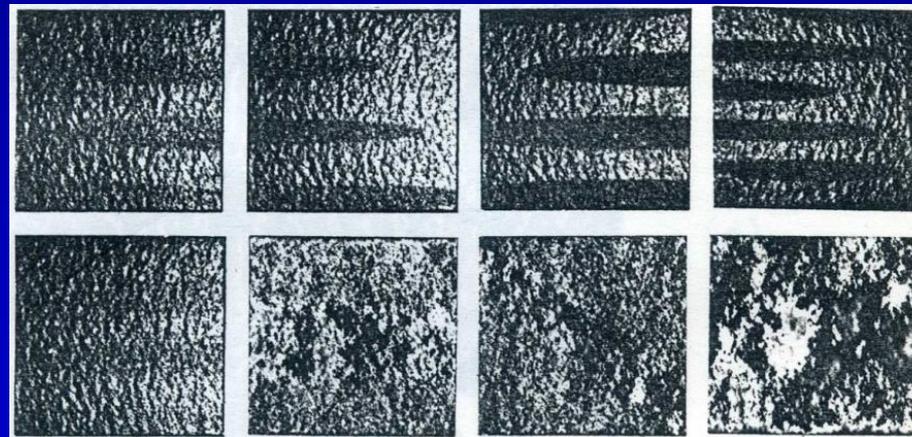


МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Фоновая
поверхность**



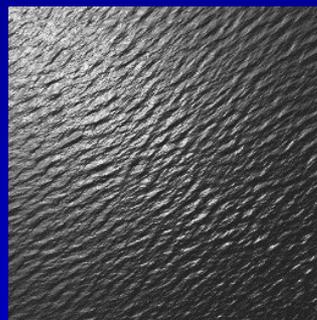
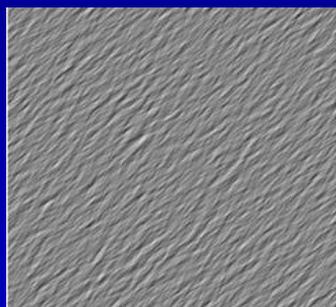
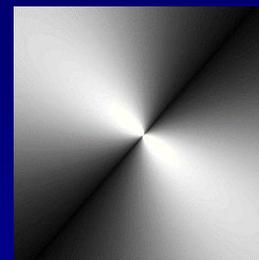
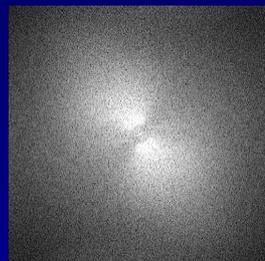
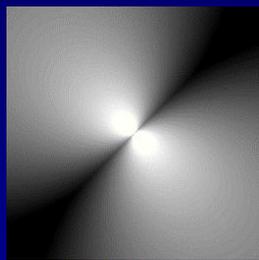
**Явления на
морской
поверхности**



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕГО ОПЕРАТОРА

МОДЕЛЬНЫЙ
СПЕКТР

$$\Phi_G(\mathbf{k})$$



$$R(\mathbf{k}) = \frac{\Phi_G(\mathbf{k})}{S_M(\mathbf{k})}$$

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЙ ФИЛЬТР ФОРМИРУЕТСЯ В ФОРМЕ ОТНОШЕНИЯ СПЕКТРА НАКЛОНА МОРСКОГО ПЛОЩАДИ, СИНТЕЗИРОВАННОГО ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ СПЕКТРА МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ЯРКОСТИ

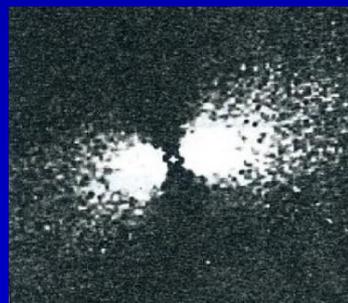
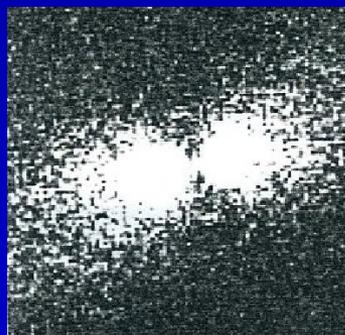
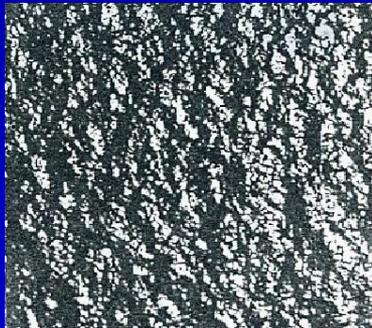
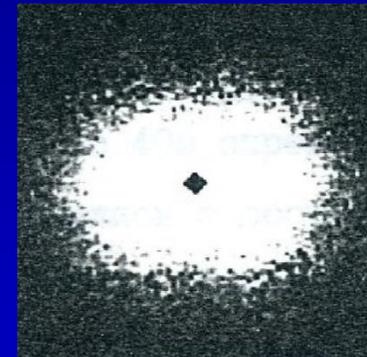
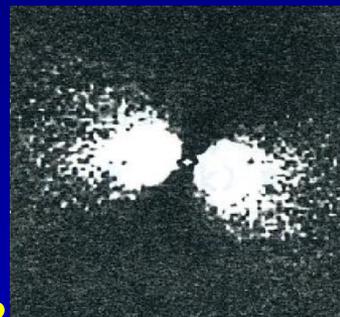
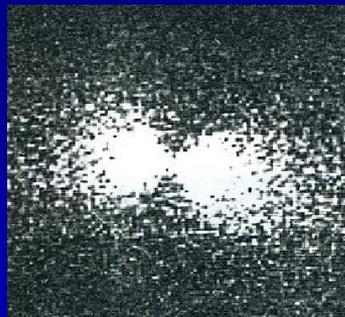
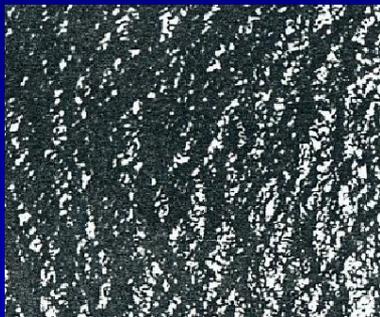
ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ВОЗВЫШЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ

Многопозиционный метод восстановления спектров возвышений.

Требуется несколько фрагментов изображений с

$$\varphi_C = \arctg(C_y / C_x)$$

$$\Psi(\mathbf{k}) = \frac{\sum_{m=1}^M \Phi_m(\mathbf{k})}{\sum_{m=1}^M (\cos \varphi_m k_x + \sin \varphi_m k_y)^2}$$



Спектр возвышений морской поверхности

Фрагменты изображения в разных условиях

Спектры фрагментов изображения

Спектры уклонов морской поверхности

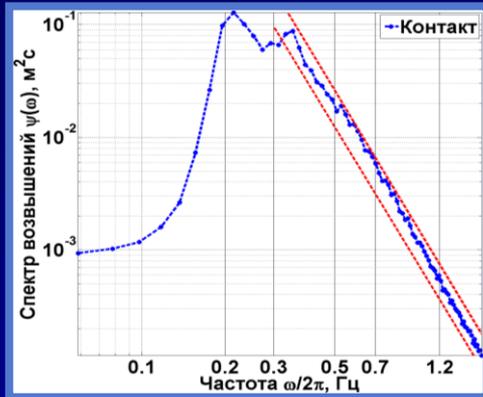
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ МОРСКИХ ВОЛН

ТИПЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

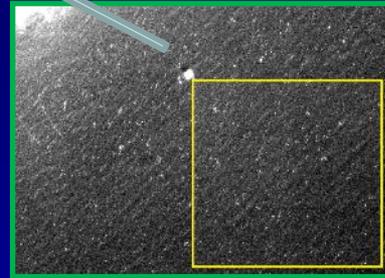
- КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА И СИНХРОННЫЕ ПОДСПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ВОЛНЫ В РАЙОНЕ СТАЦИОНАРНОЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
- ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН ($\lambda = 0,04-1,0$ М) С СТЕРЕО ФОТО СЪЕМКОЙ И КОНТАКТНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ С ПАЛУБЫ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
- СПУТНИКОВАЯ СЪЕМКА ИЗУЧАЕМОЙ АКВАТОРИИ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СПЕКТРОВ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВЫХ БУЕВ
- ИССЛЕДОВАНИЯ В АКВАТОРАХ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ИНТЕНСИВНЫМ АНТРОПОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ



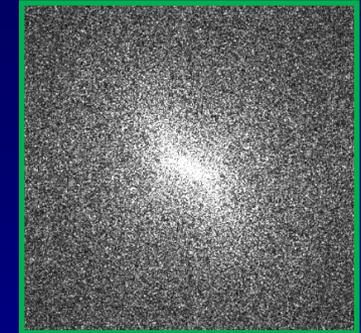
СОПОСТАВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ВОЛНЕНИЯ



ЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР ВОЗВЫШЕНИЙ
 $\Psi_{\text{конт}}(\omega)$ ОТ КОНТАКТНОГО ВОЛНОГРАФА

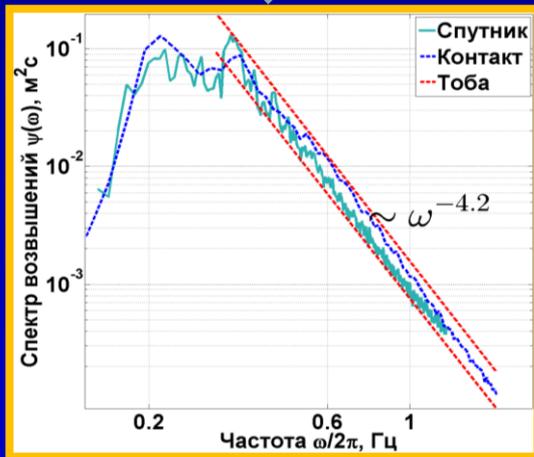


СПУТНИКОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ



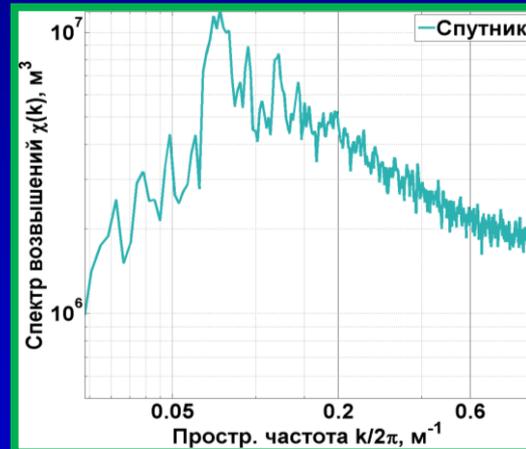
СПЕКТР ИЗОБРАЖЕНИЯ
 $S(k)$

СПЕКТР УКЛОНОВ
 $\Phi(k, \theta) = R(k, W) S(k)$



СРЕДНЕЕ РАСХОЖДЕНИЕ

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(1 - \frac{\psi_{cn}(\omega_n)}{\psi_{кон}(\omega_n)} \right)^2} \approx 0.07$$

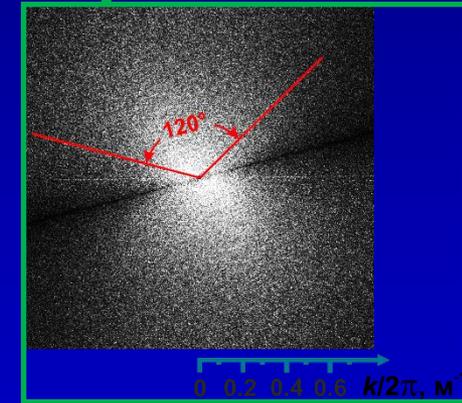


СПЕКТР ВОЗВЫШЕНИЙ

$$\chi(k) = \int \Phi(k, \theta) d\theta$$

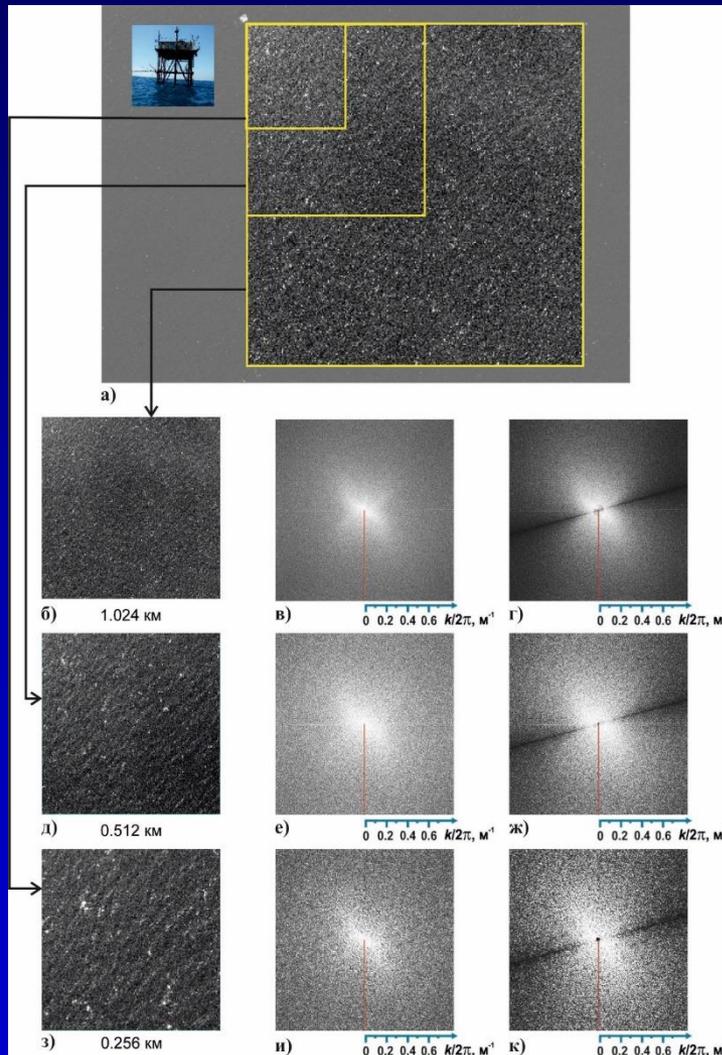
ПЕРЕХОД К ЧАСТОТНОМУ СПЕКТРУ С ДИСПЕРСИОННЫМ СООТНОШЕНИЕМ

$$\psi_{cn}(\omega) = \chi(k(\omega)) \frac{dk(\omega)}{d\omega} \quad \omega^2 = gk$$



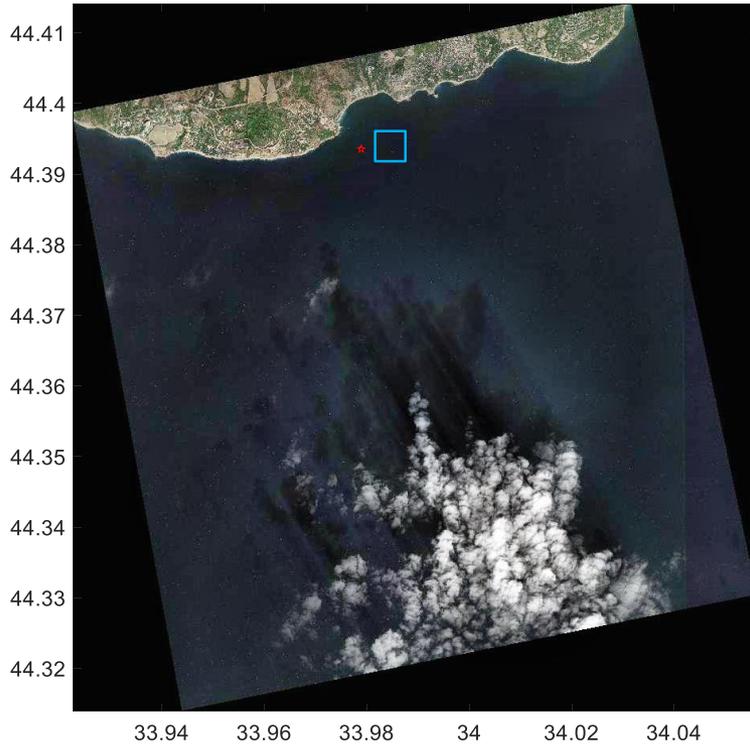
ВОССТАНАВЛИВАЮЩИЙ ОПЕРАТОР
 $R(k, W)$ ПОЛУЧЕННЫЙ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ = 11 m/s; ЗЕНИТНЫЙ УГОЛ И АЗИМУТ СОЛНЦА 46°, 165°

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ВОЛН ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ



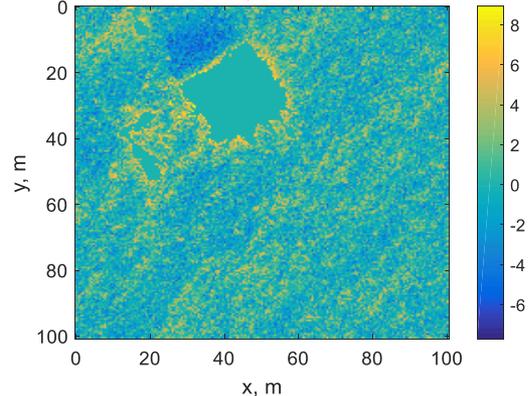
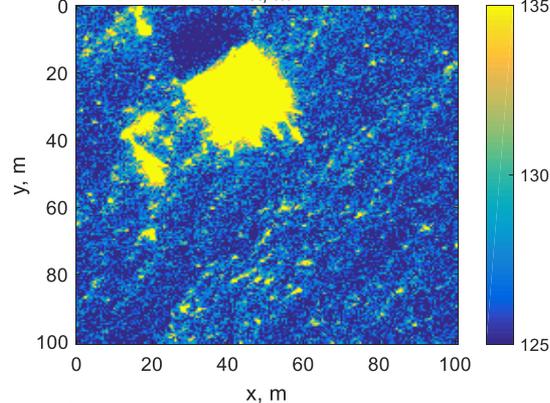
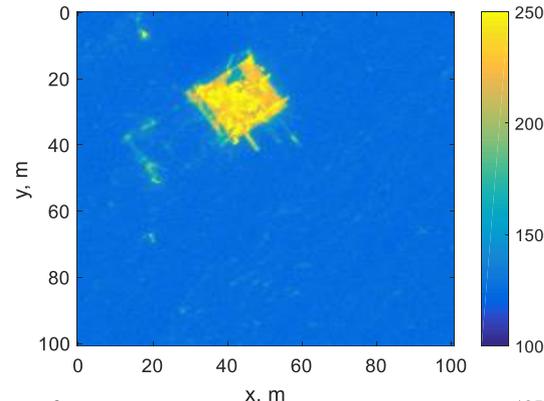
**РЕЗУЛЬТАТЫ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
СПЕКТРАЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ
СПУТНИКОВЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ СО
СПУТНИКА ГЕОЕУЕ В
ОБЛАСТИ
ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ
ПЛАТФОРМЫ**

Спутниковое изображение



GE01 2015-09-24 08:52:10

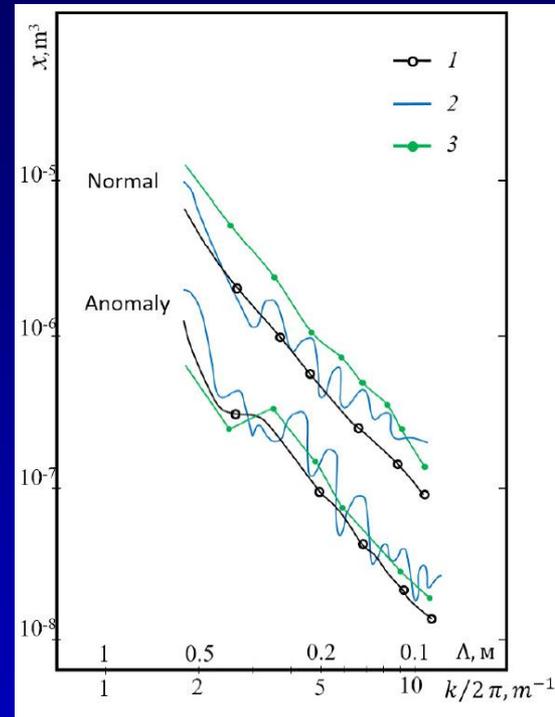
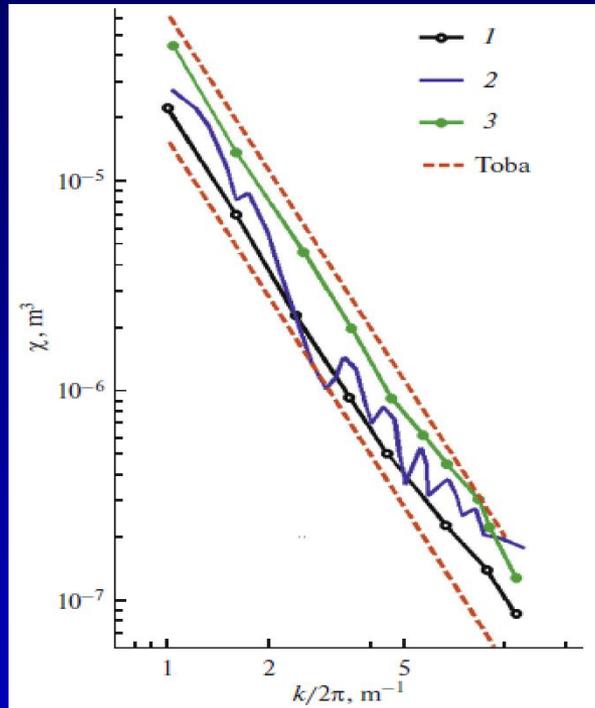
Красная звездочка – положение платформы, квадрат – фрагмент размером 512м x 512 м, использованный для оценки спектра



Фрагмент с платформой. Виден выстрел, на конце которого висит решетка волнографов. Тот же фрагмент, но в другом диапазоне яркости. Видны волны, но контрасты, связанные с ними значительно меньше диапазона, обеспечиваемого аппаратурой спутника. Волны сильно зашумлены бликами из-за заострений волн, обрушениями, пятнами растекшейся пены.

Стоит задача оценки спектра сильно зашумленного сигнала, полезная составляющая которого лежит на пределе чувствительности аппаратуры

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Спектры возвышений поверхности моря, полученные различными методами:

1 - восстановление спектра разработанным методом;

2 - контактные измерения с помощью струнного волнографа;

3 - стереофотограмметрические измерения;

Красные линии - аппроксимация Тоба (Тоба, 1973).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Коэффициенты корреляции между оценками характеристик волнения σ_ξ и ρ_x по данным различных методов измерений в коротковолновом диапазоне ($\Lambda = 0.04-1.0$ м)

Оцениваемые характеристики	Сравниваемые методы		Коэффициенты корреляции	
			диапазон длин волн Λ , м	
			$\Lambda: 0.1-1.0$	$\Lambda: 0.04-0.4$
σ_ξ	Нелинейное восстановление по изображениям	Решетка струнных волнографов	0.73	0.91
	Нелинейное восстановление по изображениям	Стереofотосъемка	0.79	0.78
	Стереofотосъемка	Решетка струнных волнографов	0.95	0.93
ρ_x	Нелинейное восстановление по изображениям	Решетка струнных волнографов	0.89	0.64
	Нелинейное восстановление по изображениям	Стереofотосъемка	0.65	0.93
	Стереofотосъемка	Решетка струнных волнографов	0.86	0.86

$$r^{(\alpha,\beta)} = \frac{\sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\alpha)} - \bar{\eta}^{(\alpha)})(\eta_n^{(\beta)} - \bar{\eta}^{(\beta)})}{\left(\sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\alpha)} - \bar{\eta}^{(\alpha)})^2 \sum_{n=1}^N (\eta_n^{(\beta)} - \bar{\eta}^{(\beta)})^2 \right)^{1/2}}$$

$$\sigma_\xi = \sqrt{\int_{k_1}^{k_2} \chi(k) dk}$$

$$\chi(k) = a_\chi k^{-p_\chi}$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеристики поля возвышений морской поверхности по данным комплексных экспериментов и известным аппроксимациям

Источник информации	Характеристики пространственных спектров возвышений морской поверхности				
	среднеквадратичное отклонение σ_{ξ} , мм		показатель p_x		
	$\Lambda = 0.04-0.4$ м	$\Lambda = 0.1-1.0$ м	$\Lambda = 0.04-0.4$ м	$\Lambda = 0.1-1.0$ м	$\Lambda = 1.0-5.0$ м
	Комплексный эксперимент				
Нелинейное восстановление по изображениям	3.1 ± 0.7	7.8 ± 1.3	2.12 ± 0.08	2.23 ± 0.09	2.22 ± 0.08
Стереосъемка	5.4 ± 1.5	11.3 ± 2.7	2.10 ± 0.10	2.20 ± 0.17	Нет данных
Решетка струнных волнографов	3.8 ± 0.05	8.5 ± 1.7	1.93 ± 0.11	1.98 ± 0.05	2.25 ± 0.05
	Известные аппроксимации				
Филлипс (Филлипс, 1980)	3.5	8.6	3.0	3.0	3.0
Пирсон, Москович (Pierson Moskowitz, 1964)	2.8	7.1	3.0	3.0	3.0
Тоба (Тоба, 1973)	3.7	7.3	2.5	2.5	2.5
Лейкин, Розенберг (Лейкин, Розенберг 1987)	3.3	7.0	2.6	2.6	2.6

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения №075–15–2020–776.

А.Б.Мурынин
AMurynin@bk.ru