

**Доплеровские спектры  
сигналов, рассеянных морской  
поверхностью при настильных  
углах зондирования  
(результаты натурального эксперимента)**



**М.Г. Булатов, М.Д. Раев, Е.И. Скворцов**

Институт космических исследований РАН  
117977, Москва, Профсоюзная ул. 84/32.  
Факс: 7-095-333-10-56, Тел.: 7-095-333-35-33.  
E-mail: [mbulatov@mx.iki.rssi.ru](mailto:mbulatov@mx.iki.rssi.ru)

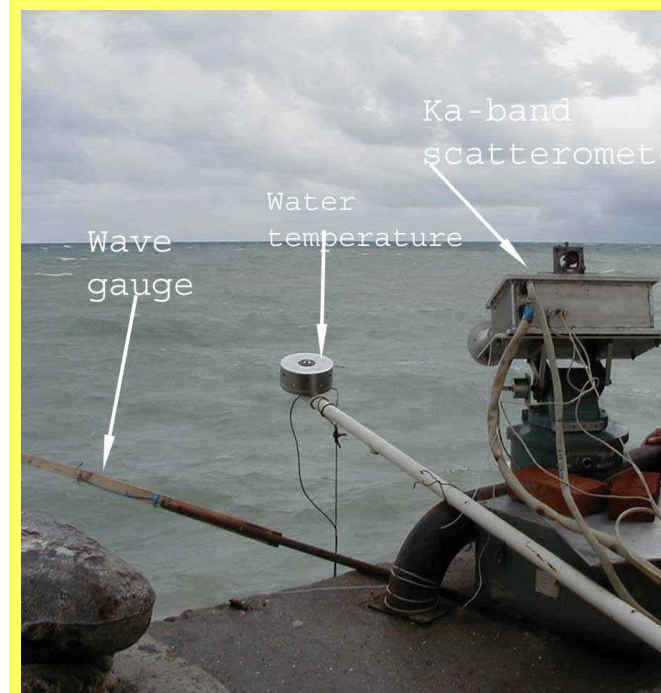
ПРОЕКТ, в рамках которого выполнена настоящая работа:

«МИКРОВОЛНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
ВОЛН».

- На основе данных когерентных двухполяризационных измерений планируется:
- А) исследование распределения фазовых и групповых скоростей нелинейных поверхностных волн,
- Б) исследование возможности детектирования таких эффектов, как модуляционная неустойчивость цуга волн, «переброс» фазы, «слияние» хребтов волн и др. эффектов.

## Параметры скаттерометра

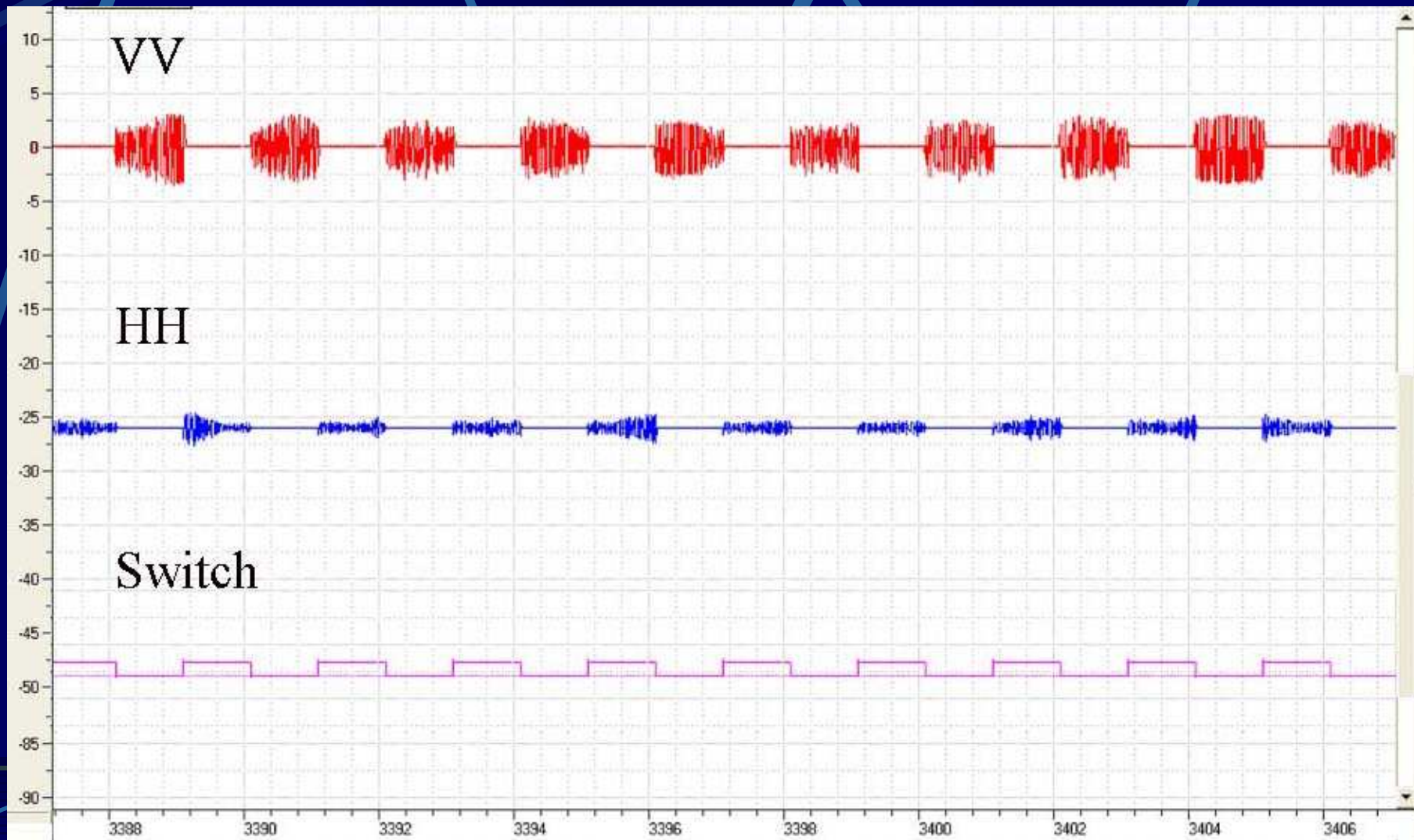
Parameter	Unit	Value
Transmission frequency	GHz	38.7
Transmission Power	W	0.5
Polarization		HH, VV
Antenna beam width	°	6
Receiver sensitivity	dB/W	-130
Operation Mode		CW

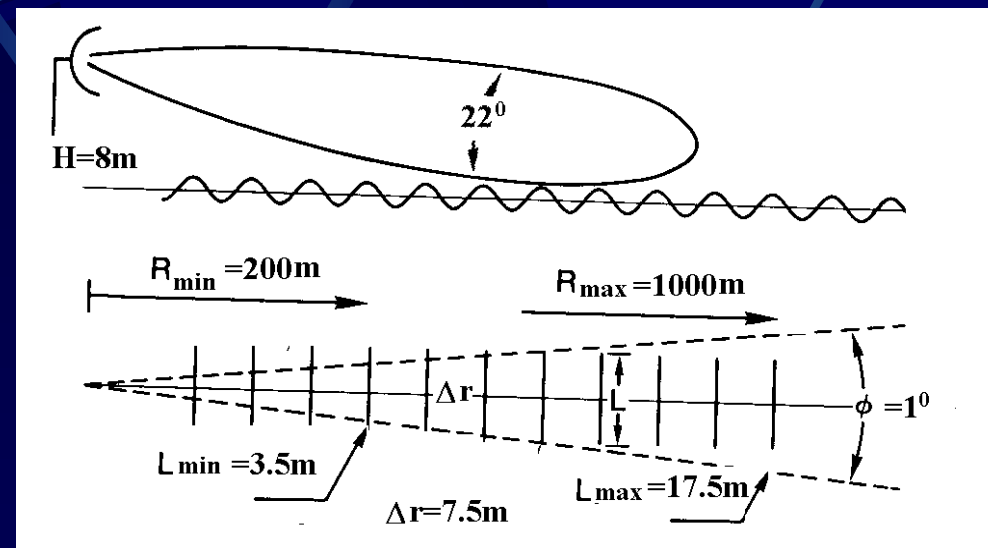


## Параметры выходного сигнала и цифровой обработки

Центральная частота	2500 Гц
Полоса частот выходного фильтра	(1000 – 4000) Гц
Частота опроса АЦП	10000 Гц
Разрядность АЦП	10 (4096 уровней)
Разрешение выходного спектра	0.4 Гц

# Сигналы скаттерометра после преобразования в АЦП (VV, HH) и сигнал управления переключателем поляризаций





### ПАРАМЕТРЫ РАДИОЛОКАТОРА

Частота

Мощность

Длительность импульса

Частота повторения

Ширина диаграммы направленности

Число стробов дальности

Поляризация:

Угол зондирования

9800 МГц

6 кВт

50нс

2000 Гц

10 x 220

256

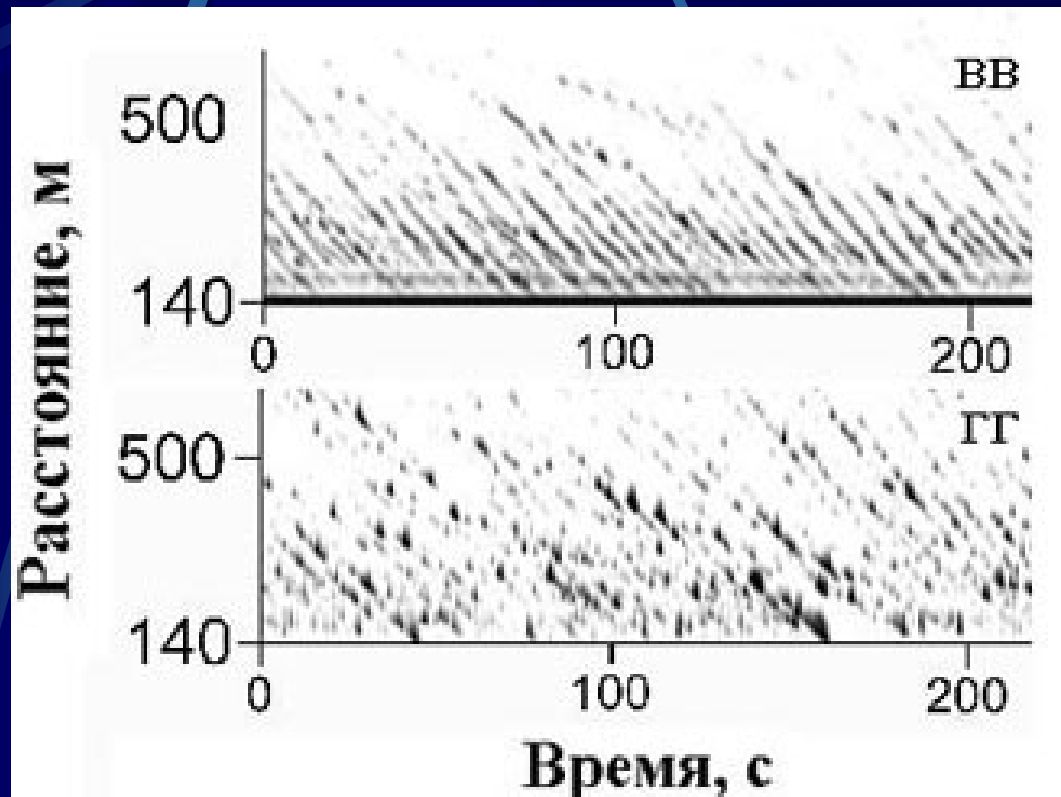
НН и VV

88.8 град

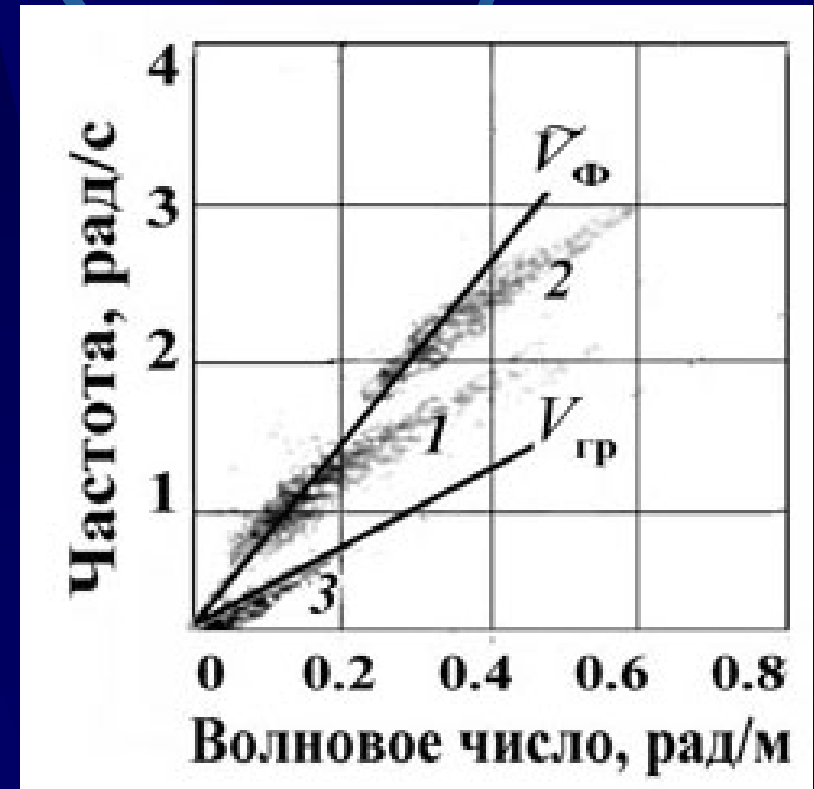


# Радиоизобржение морской поверхности и его пространственно-частотный спектр

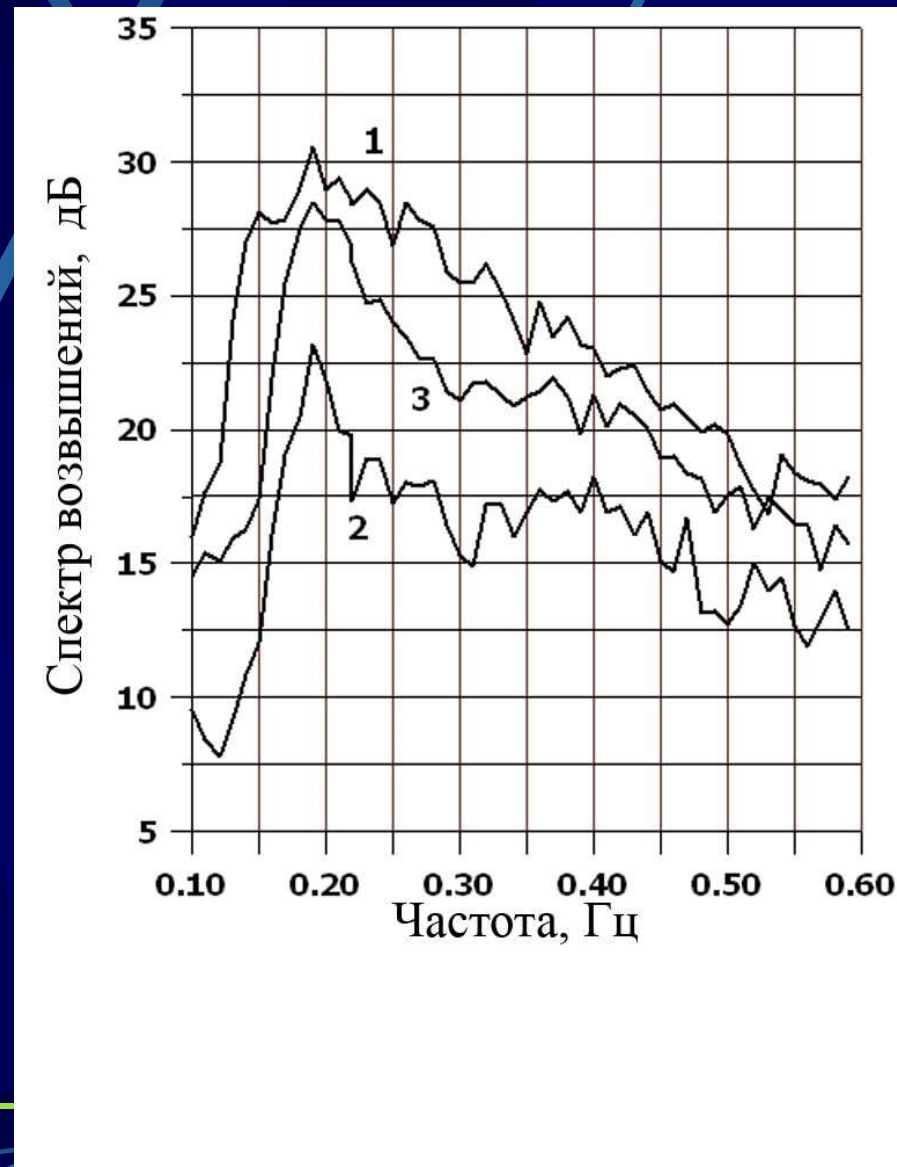
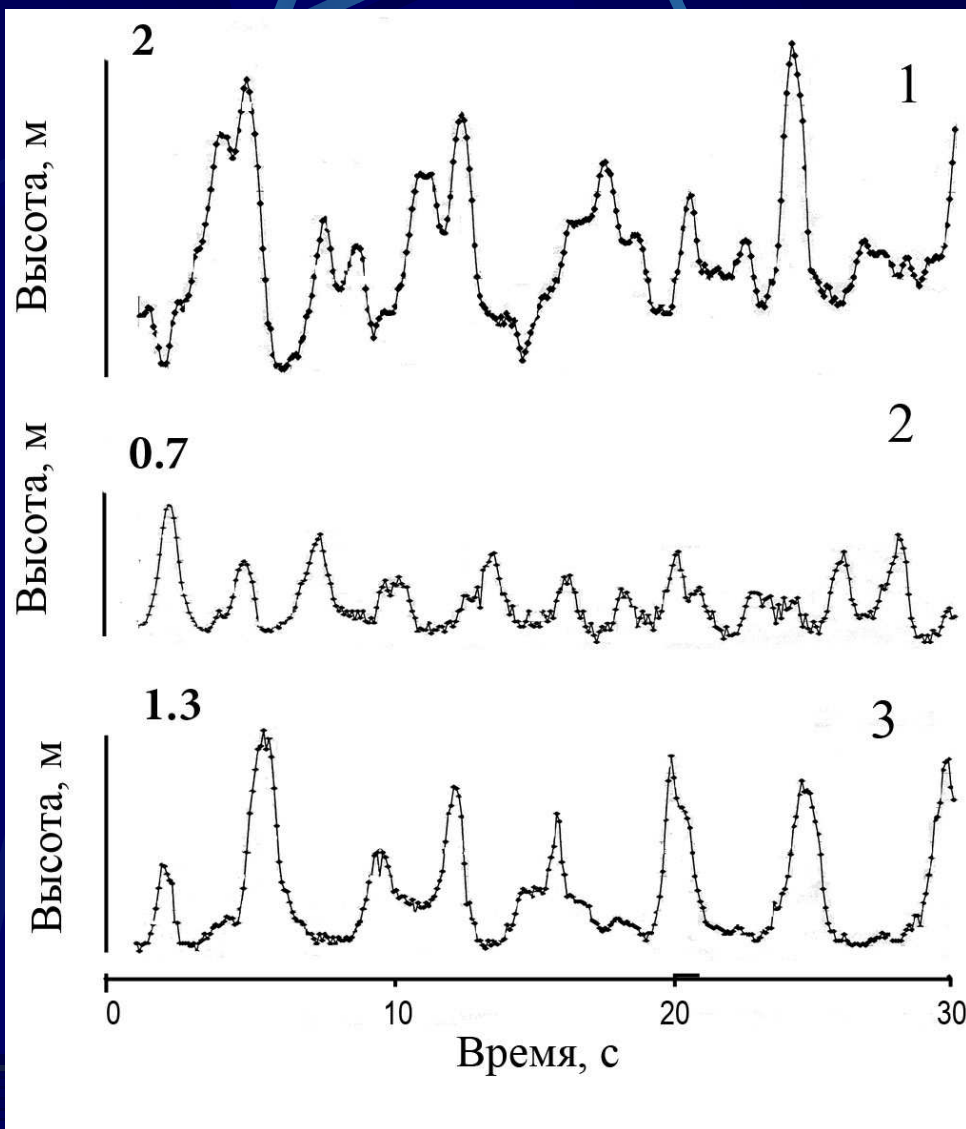
$$\sigma(x, t)$$



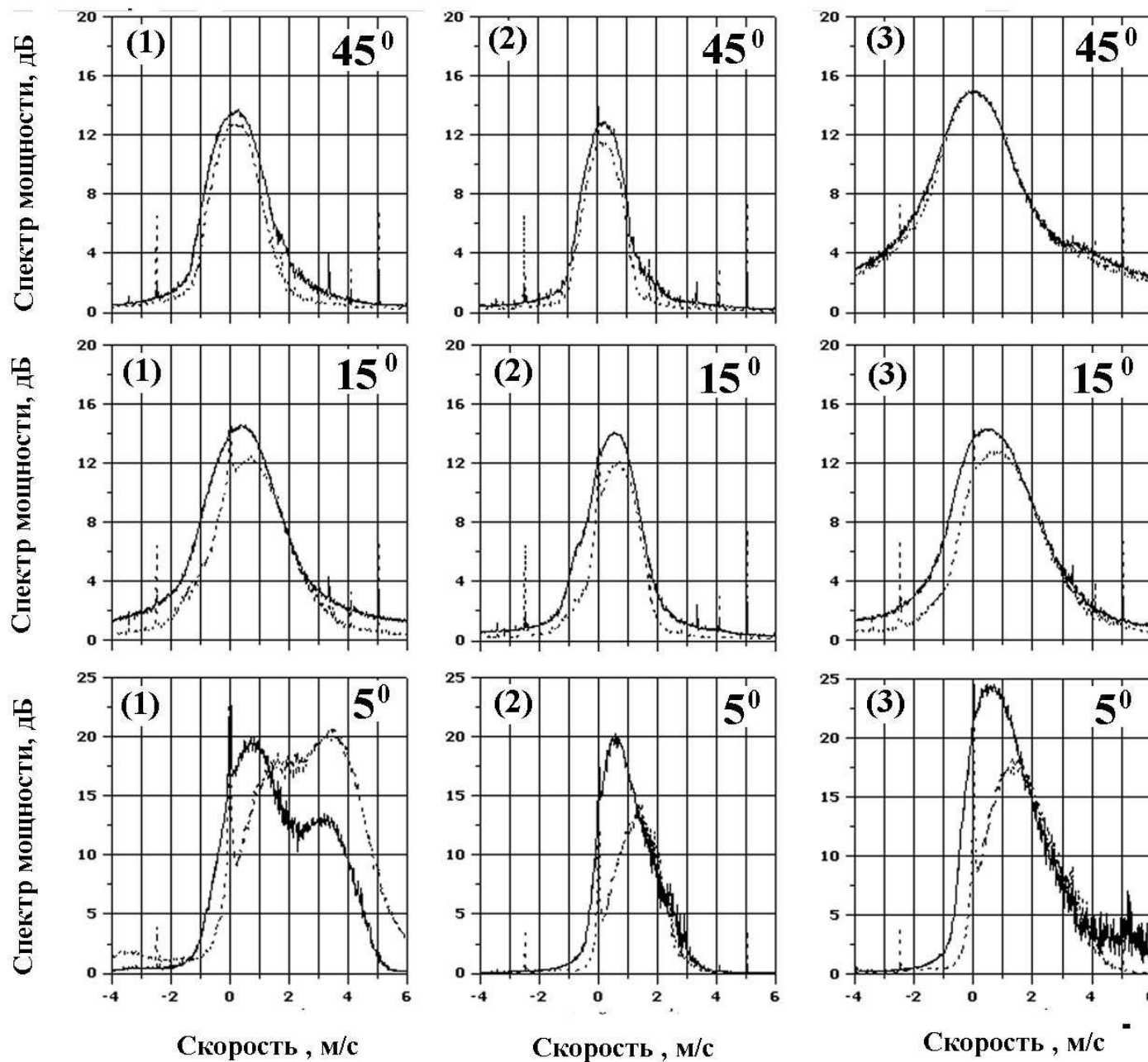
$$S(\omega, k)$$



# Волнограммы и спектры возвышений морской поверхности

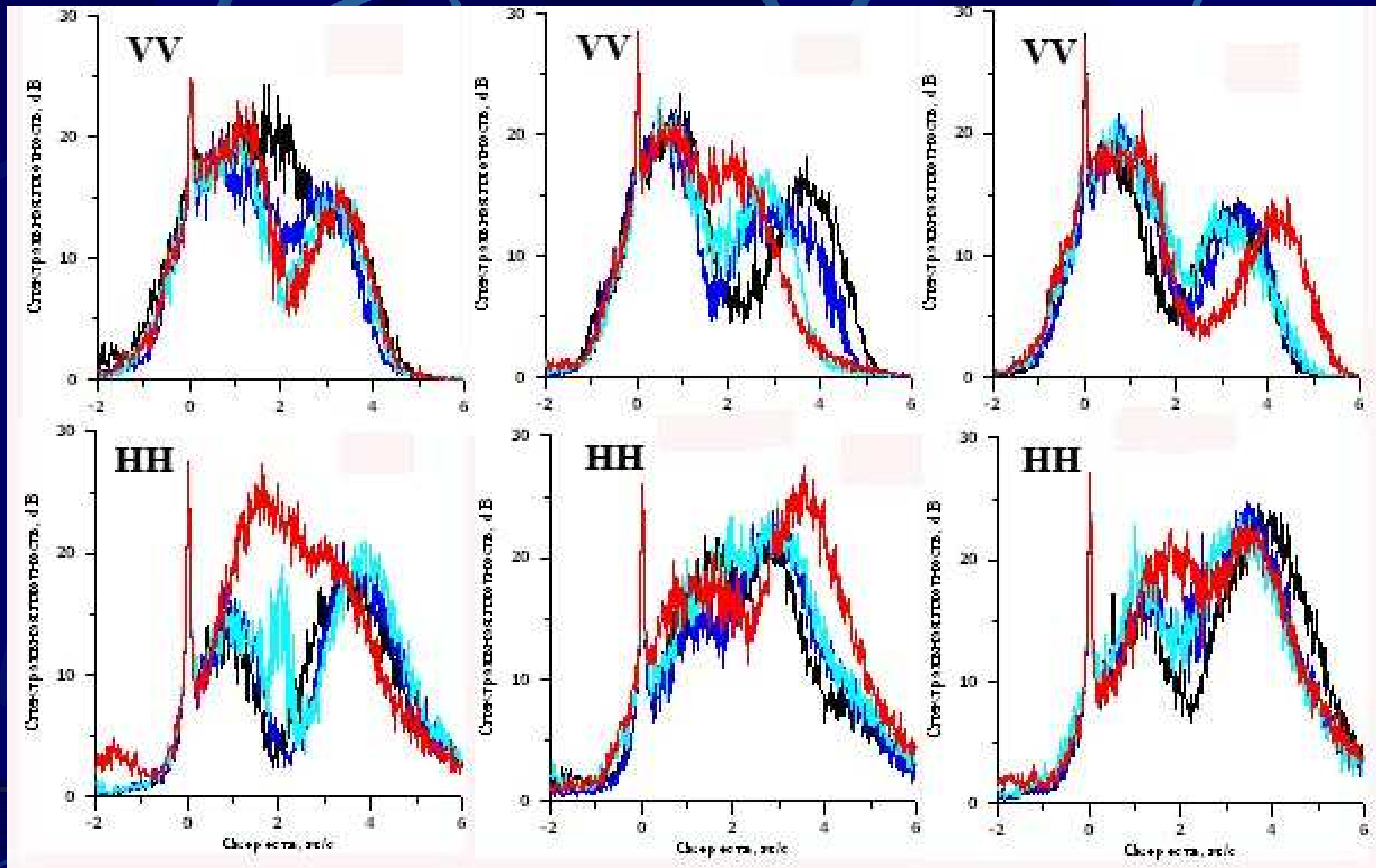


# Допплеровские спектры при различных углах скольжения (сплошная линия –VV, пунктир – НН )





# Изменение формы спектра во времени (интервал между спектрами 5 с, последовательность: черный, синий, голубой, красный)



# Особенности экспериментальных данных

- ✓ Доплеровские спектры при угле скольжения  $5^\circ$  имеют два максимума, когда волнение достаточно развито и высоты волн достигли определенного значения. В этих же условиях при углах скольжения, больших  $10^\circ$ , спектры имеют один максимум.
- ✓ Пространственно-частотный спектр радиоизображения, совпадающий по времени с двухмодовым Доплеровским спектром, содержит линии высших гармоник и групповых скоростей.
- ✓ Спектральные плотности в области низкочастотного и высокочастотного пиков ( $G_1(f)$  и  $G_2(f)$ ), полученные на вертикальной и горизонтальной поляризациях, удовлетворяют следующим соотношениям:
  - на вертикальной поляризации  $G_1(f) > G_2(f)$ ,
  - на горизонтальной поляризации  $G_1(f) < G_2(f)$
- ✓ Характерные периоды временных флуктуаций (почти периодических) центральной частоты одномодовых Доплеровских спектров близки значениям периодов энергонесущих волн
- ✓ Характерные временные интервалы флуктуаций (случайные выбросы) центральной частоты двухмодовых Доплеровских спектров близки значениям периода огибающей волновых пакетов.

## Двухмасштабная модель

(V. Zavarotny and A. Voronovich, **Two-scale Model and Ocean Radar Doppler Spectra at Moderate- and Low-Grazing Angles** //IEEE Trans. of AP./ v46, 1, 1998.)

$$h(\vec{p}, t) = h_1(\vec{p}, t) + h_2(\vec{p}, t) \quad (1)$$

где  $h_1(\vec{p}, t)$  - крупномасштабная (плоский фацет),  $h_2(\vec{p}, t)$  - мелкомасштабная компонента

$$W(\vec{k}) = W_1(\vec{k}) + W_2(\vec{k}) \quad (2)$$

где  $W_1(\vec{k}) = W_1(\vec{k})\theta(k_* - k)$ ,  
 $W_2(\vec{k}) = W_2(\vec{k})\theta(k - k_*)$ ,  $\theta(k)$  - ступенчатая функция

Часть спектра  $W_2(\vec{k})$  должна удовлетворять условиям

а)  $k = k_B = 2K \cos \theta'_g$  (Брегг)

б)  $K \sigma_{h_2} \sin \theta'_g \ll 1$ , где  $\sigma_{h_2}^2 = \iint W_2(\vec{k}) d^2k$  - (Рэлей)

## Спектр Доплера в двухмасштабной модели

$$G(\omega) = \int P(\vec{s}, \vec{u}) \left[ \sigma^+(\vec{s}) \delta(\omega - \omega_0 - \omega_1^+) + \sigma^-(\vec{s}) \delta(\omega - \omega_0 - \omega_1^-) \right] d^2 s d^3 u$$

где  $P(\vec{s}, \vec{u})$  есть совместная плотность распределения векторов уклонов  $\vec{s}$  и векторов орбитальных скоростей  $\vec{u}$

$$\omega_1^\pm = \pm \omega_B + 2(ku_x + qu_z), \text{ где, в трехмерном случае } \vec{u} = \vec{u}(u_x, u_y, u_z)$$

Бреговские резонансные волны

$$\omega_B = c_B k_B - \text{частота, волновое число и фазовая скорость Бреговской волны}$$

$$\text{«медленные» рассеиватели} - c_B = c_B^{sl}(k_B) = \sqrt{g/k_B + Tk_B/\rho}$$

$$\text{«быстрые» рассеиватели} - c_B = c_B^f(k_n) \approx \sqrt{g/k_{nl}}, \text{ где } k_{nl} \ll k_B$$

Три свободных параметра, характеризующие вынужденные «быстрые» рассеиватели:

$\mu$  - доля вынужденных волн в спектре возвышений резонансной ряби,

$k_0$  - максимум спектра,

$k_1$  - высокочастотная граница спектра возвышений.

Поскольку они не измеряемы, спектральная модель вынужденных волн чисто феноменологическая

**Iosif.M. Fuks** *Effective probability density function of rough surface slopes when strong shadowing is present* \ WRM, 12(2002), 401-416.

При настильных углах плотность распределения уклонов (PDF-Probability density function) затененной части шероховатой поверхности может значительно отличаться от PDF всей поверхности, если высоты и уклоны поверхности статистически не независимы. Если крутизна поверхности имеет тенденцию увеличиваться с ростом высоты, эффективный уклон освещенной части поверхности может оказаться значительно круче, чем средний для всей поверхности

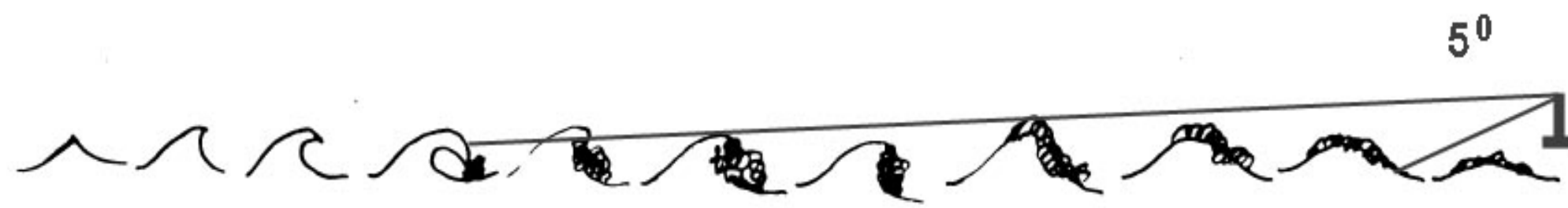
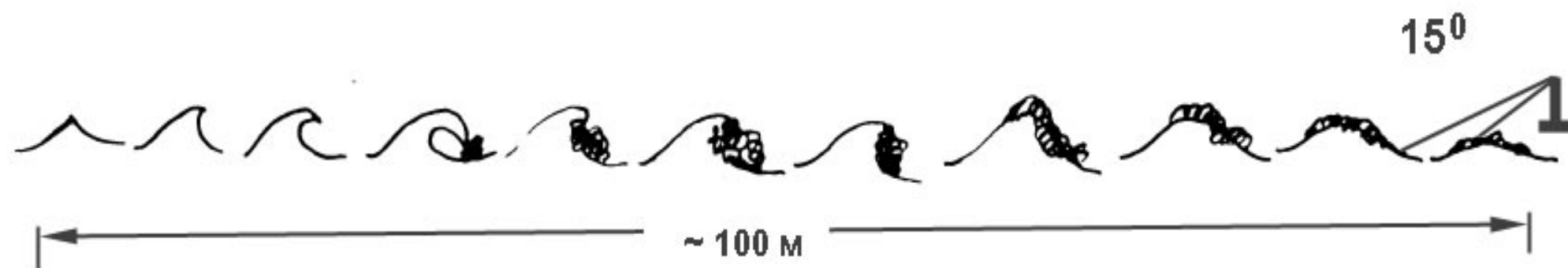
**Iosif.M. Fuks and Alexandr G. Voronovich** *Radar backscattering from Gerstner's surface wave* \ WRM, 12 (2002), 321-339.

Морская поверхность представляется, как суперпозиция нелинейных крупномасштабных волн Герстнера (трохонид) и мелкомасштабной Бреговской ряби. Средние Доплеровские сдвиги на двух поляризациях, полученные в приближении геометрической оптики, сопоставляются с результатами, полученными «точными» решениями крупномасштабной дифракционной задачи. Роль затенения и многократного рассеяния обсуждается и объясняется качественное отличие результатов, полученных при использовании этих двух подходов.

## Скорости движения рассеивателей электромагнитных волн на морской поверхности

Угол скольжения ( $\phi$ ) Размеры пятна (a,b)	№	$V^{S,F} = \int_0^{V^{S,F}} \frac{\lambda_0}{c} \cos \phi$ ( $V^S$ - «медленные», $V^F$ - «быстрые»)			Фазовая скорость резонансной ряби
		$V^S$ , см/с	$V^F$ , см/с	$V^F - V^S$	
$\phi = 15^\circ$ a=1.1м b=2м	1	39.3	65	25.7	34.51
	2	49.3	56.3	7	
	3	62	88.6	26.6	
$\phi = 5^\circ$ a=3.6м b=71м	1-1	71	164	93	34.97
	1-2	314	354	40	
	2	69	108	39	
	3	69.7	118.8	49.1	



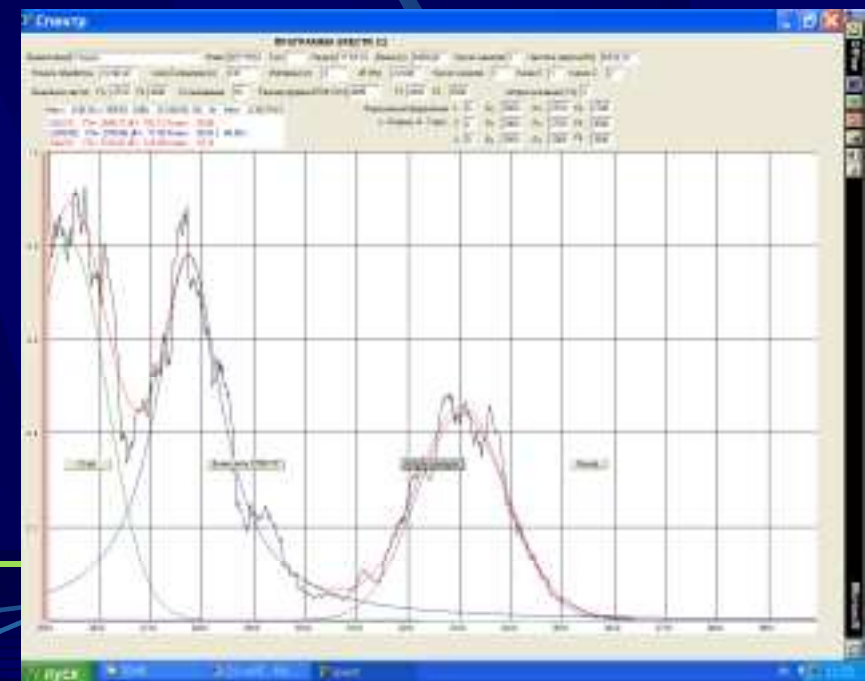
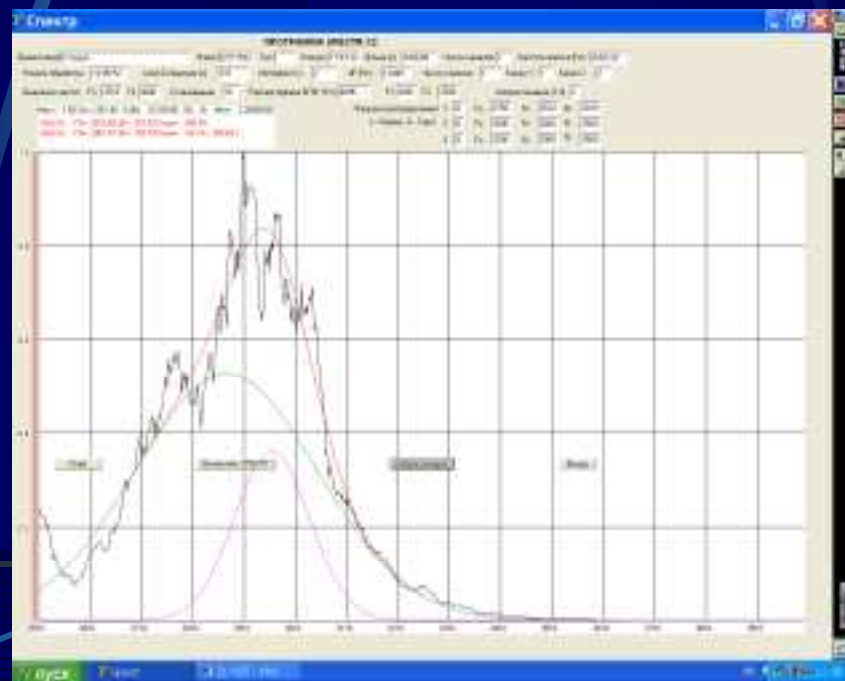
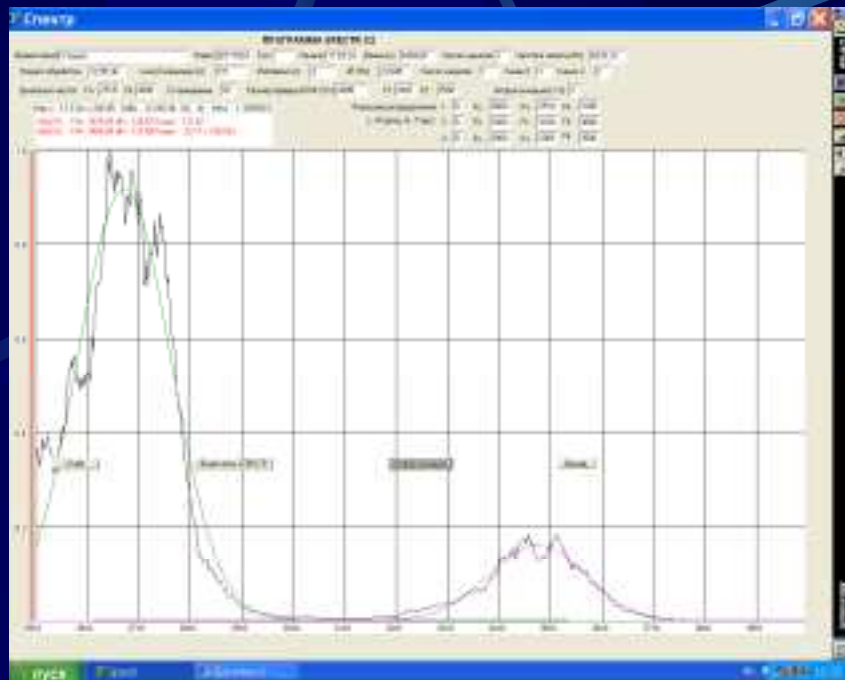


укручение      закручивание      разбрызгивание      вспенивание      сброс      распад

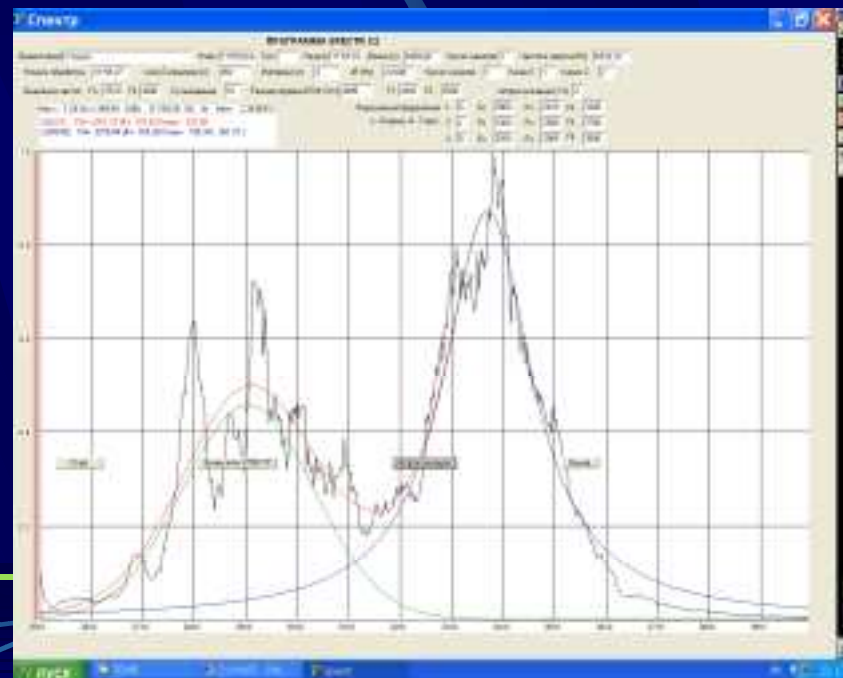
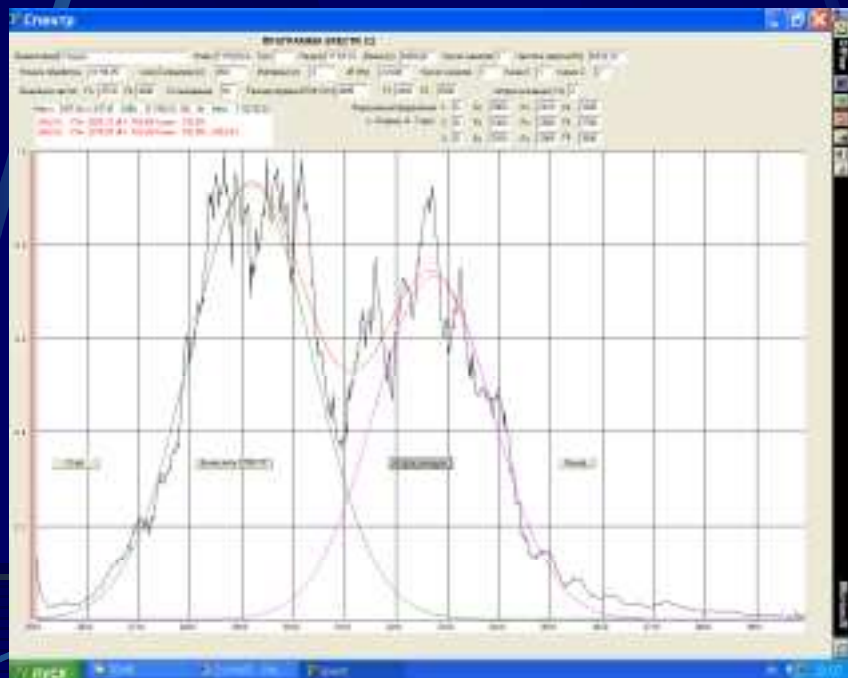
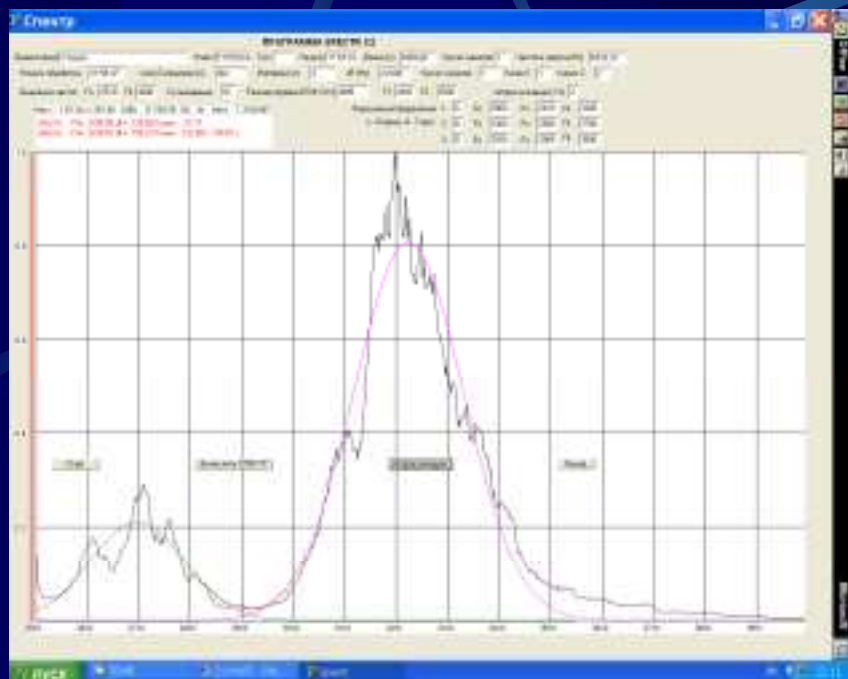
    формирование гребня      выброс

**Волновые профили обрушающейся гравитационной волны, наблюдаемые в элементе разрешения.**

# Вертикальная поляризация



# Горизонтальная поляризация



# Главные моменты следующие:

- обрушивающиеся волны создают главный вклад в рассеяние на быстрых рассеивателях
- обрушивающиеся волны есть главный источник деполяризации рассеянных сигналов
- обрушивающиеся волны приводят к формированию формы среднего доплеровского спектра в виде распределений Лоренца
- «медленные», береговые рассеиватели, для которых форма спектра – кривая Гаусса, также генерируются как фазе обрушения волны, а также и продуктами распада, возникающими после обрушения

- Работа была выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований ( проекты №05-02-16012 и №06-05-64600 ), а также благодаря поддержке Отделения ФН РАН в рамках Программы фундаментальных исследований «Проблемы радиофизики» (раздел «Радиофизические методы диагностики окружающей среды»).



# Изменение во времени значения средней частоты Доплеровского спектра (угол скольжения $5^\circ$ )

$$f_{sb}(t_i) = \frac{\int_{f_2}^{f_1} fG(f, t_i) df}{\int_{f_2}^{f_1} G(f, t_i) df}$$

1)  $f_1, f_2 = 1500-3500$   
2)  $f_1, f_2 = 3500-5000$

