

IV ОТКРЫТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
Москва, ноябрь, 2006 г.

Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование

С.А. Ермаков

Институт прикладной физики РАН

Нижний Новгород





Слики на морской поверхности. Черное море.

Содержание

- Введение. Почему важно изучать пленки на морской поверхности? - Радиолокационные наблюдения проявлений динамических процессов на МП, поверхностные загрязнения.
- Естественные слики в океане. Спутниковые наблюдения. Натурные исследования сликов (внутренние волны, конвергентные течения, неоднородный ветер).
- Физический механизм затухания волн на поверхности воды, покрытой поверхностно-активной пленкой
- Воздействие пленок на короткие ветровые волн дециметрового-миллиметрового диапазонов. Эксперименты и теоретические модели.
- Проявления нелинейности ветровых волн при радиолокационном зондировании пленок на морской поверхности.
- Перспективы дистанционной диагностики пленок.

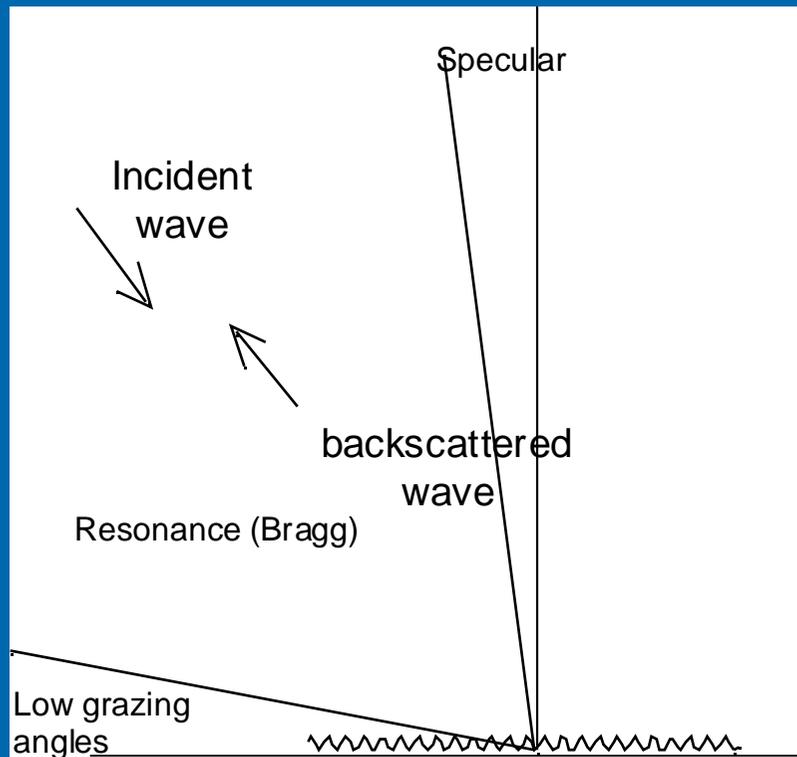


Радиолокатор с синтезированной
апертурой космического базирования

Почему при исследовании пленок эффективны спутниковые РСА?

- всепогодность
- панорамные изображения (в т.ч. из космоса) с высоким разрешением
- высокая чувствительность при РЛ СВЧ-зондировании пленочных сликков из-за эффекта сильного подавления см-волн пленкой, возможность зондирования пленок вплоть до мономолекулярных (10-100 А)

Брэгговский механизм рассеяния р.л. сигнала на морской поверхности



Интенсивность P сигнала обратного рассеяния (УЭПР):

$$P \sim F(k_B)$$

$$\vec{k}_B = 2\vec{k}_{radar} \sin \theta$$

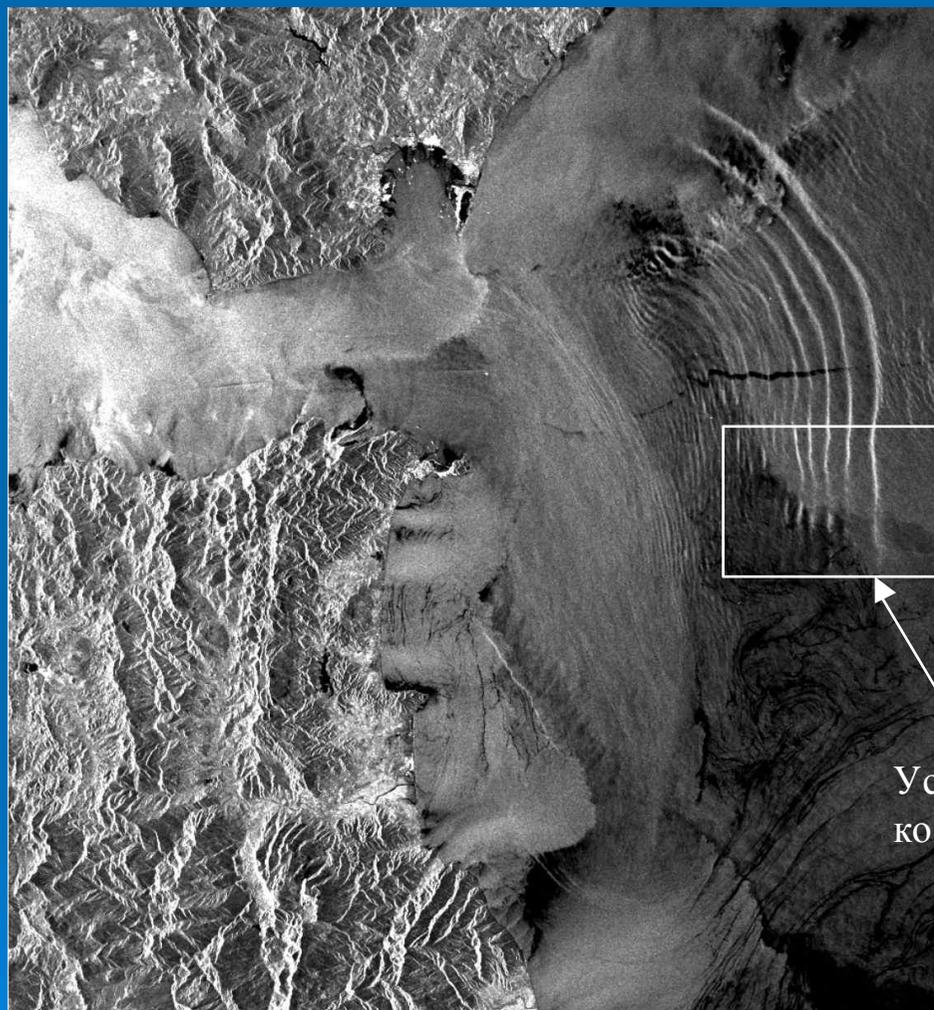
$$\lambda_B = \frac{\lambda_{radar}}{2 \sin \theta}$$

ERS-1,2, Envisat: $\lambda_{radar} = 5.6$ см, $\theta = 23^\circ$, $\lambda_{Bragg} = 7$ см

Сигнал РЛС БО С-/Х-/К-диапазонов определяется ветровыми волнами см-мм-диапазонов.

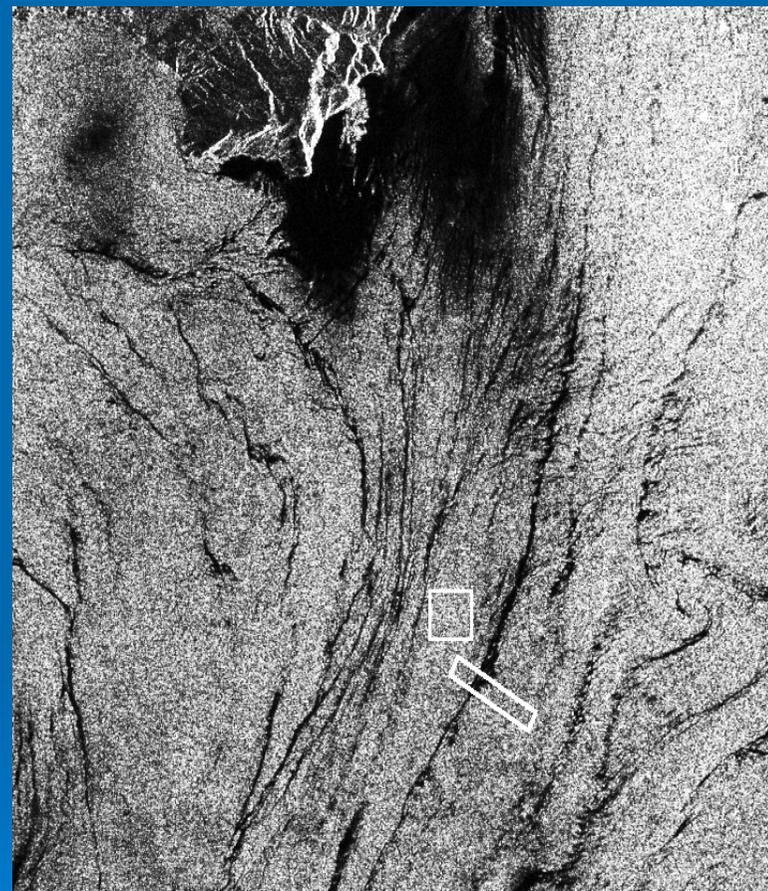
Волны именно этих диапазонов наиболее сильно подавляются пленками → эффективность СВЧ-локаторов при зондировании сликов

РСА изображение внутренних волн и течений



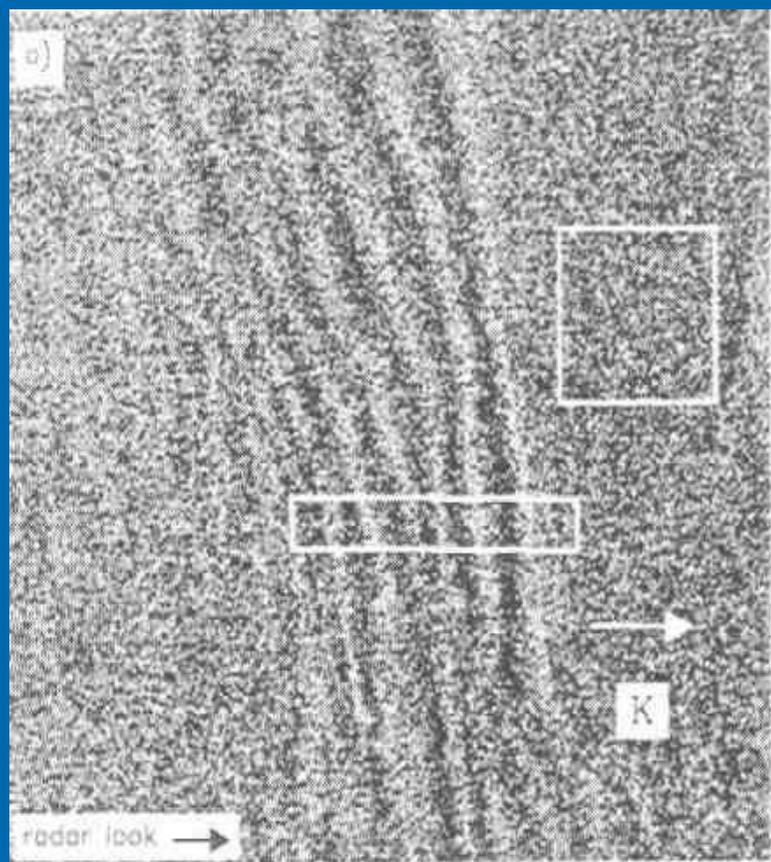
Усиление
контраста

Internal waves, Strait of Gibraltar

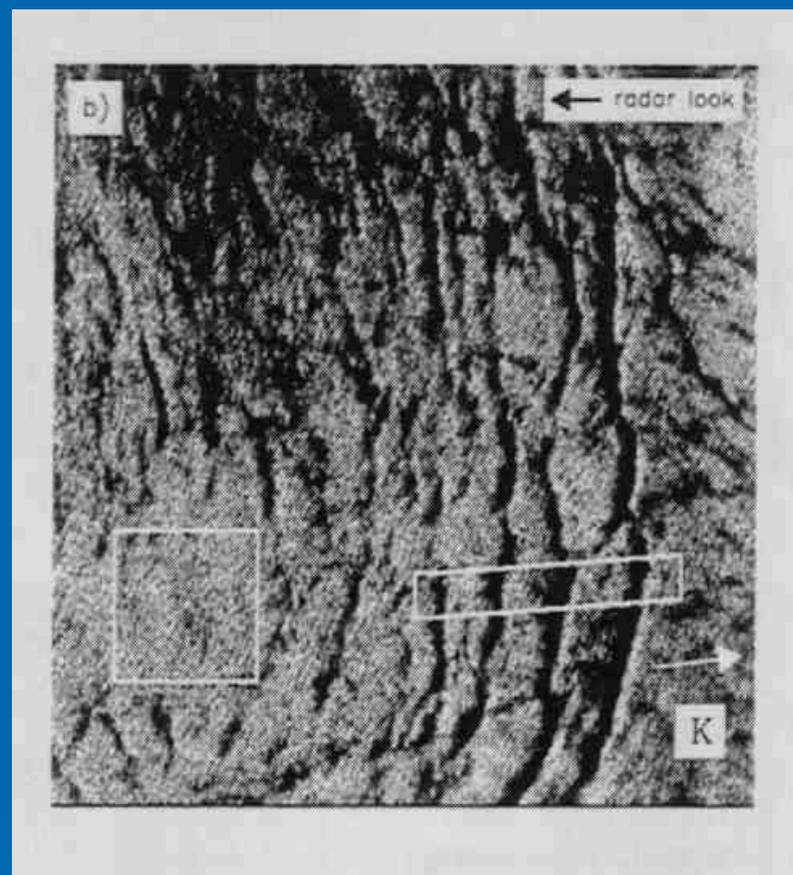


Internal waves and currents, Black Sea

РСА-изображения внутренних волн



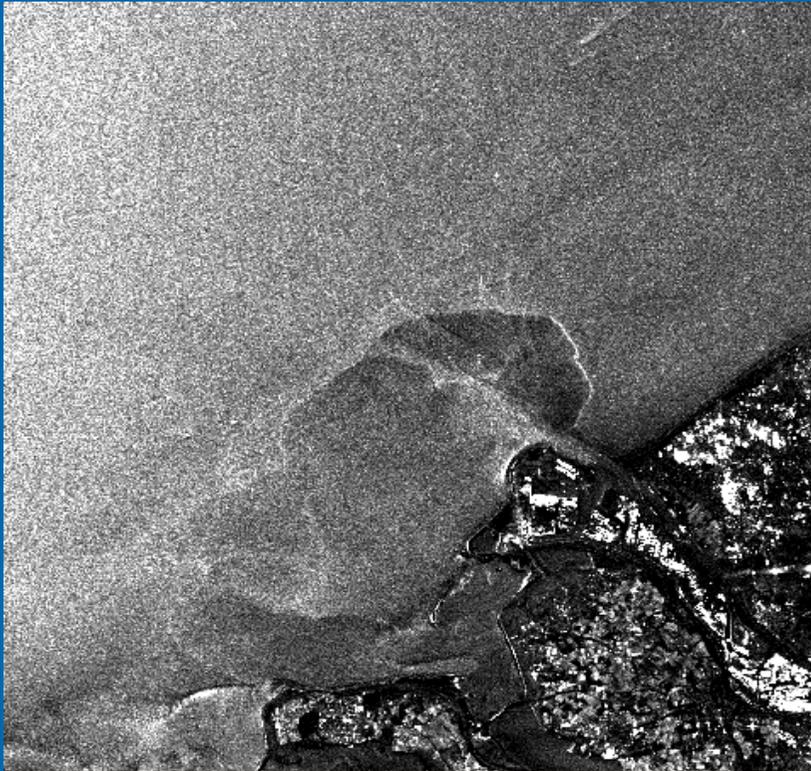
без пленки



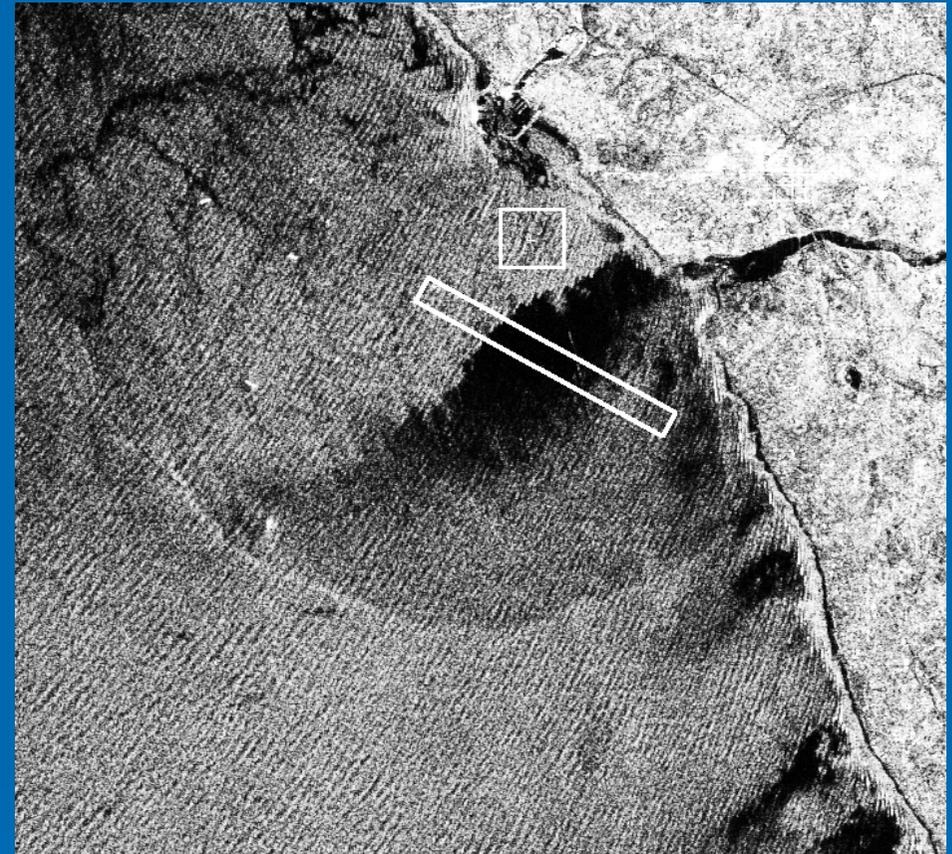
с пленкой

Пленка, в силу эффекта гашения коротких ветровых волн является “усилителем” проявлений океанических и атмосферных процессов на морской поверхности

Слики, связанные с речными стоками в прибрежных зонах

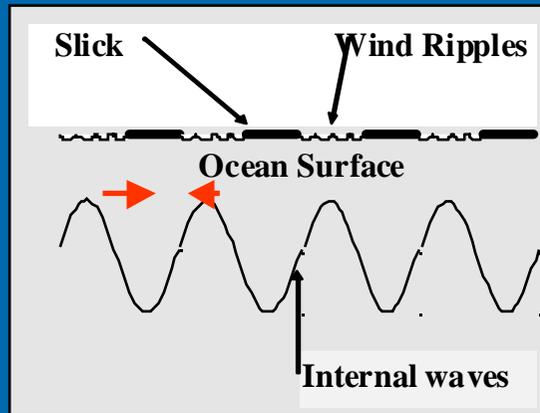
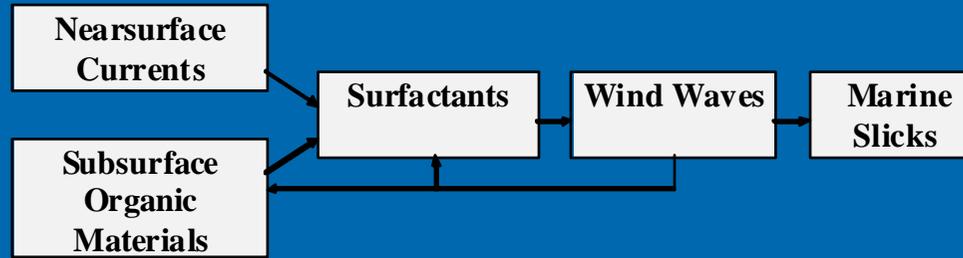


48 km × 48 km section of an ERS-1 SAR image of the mouth of the Rhine river at the Dutch coast, 13 October 1993, 21:46 UTC (orbit 11740, frame 1035, © ESA).

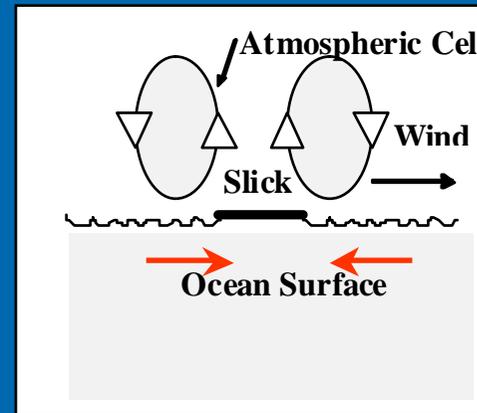


ERS-2 SAR image of the Douro River Plume, Portuguese Shelf, 15 November, 2000

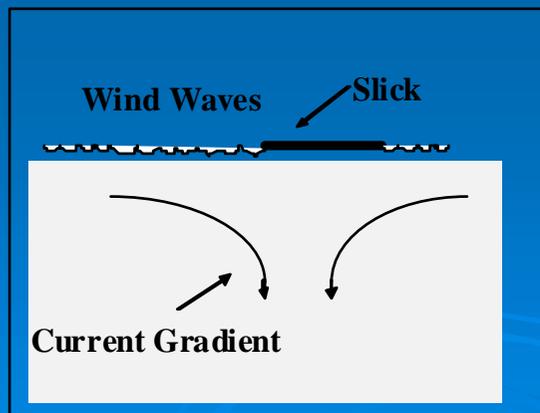
Physical Mechanisms of Slick Formation



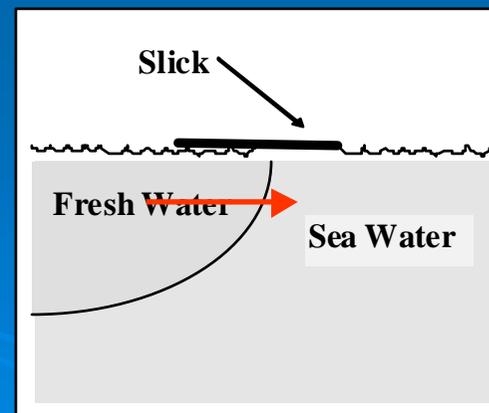
Slicks due to Internal Waves



Slicks due to Wind Cells

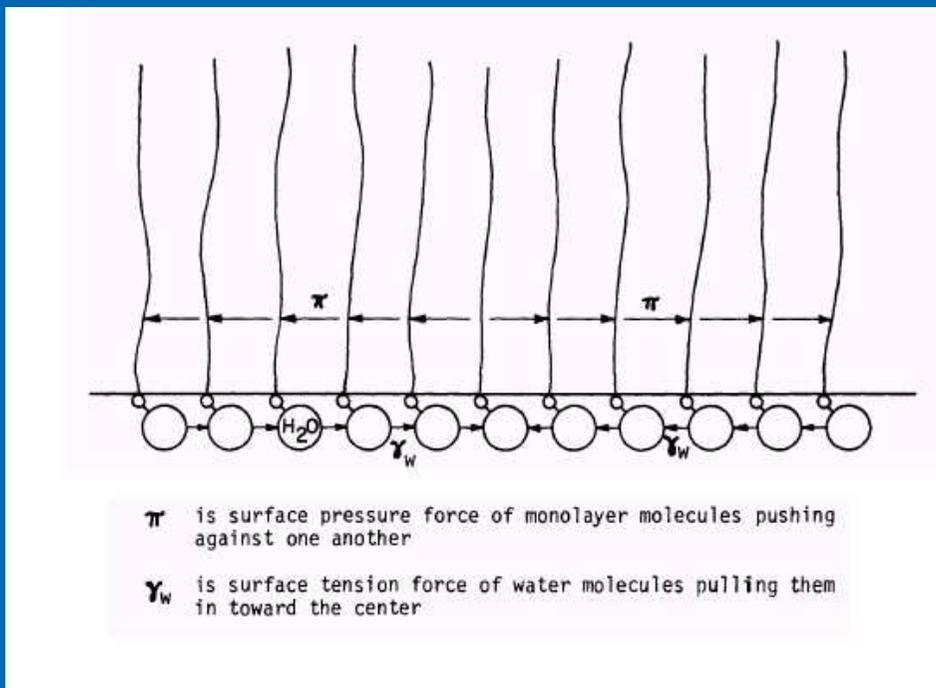
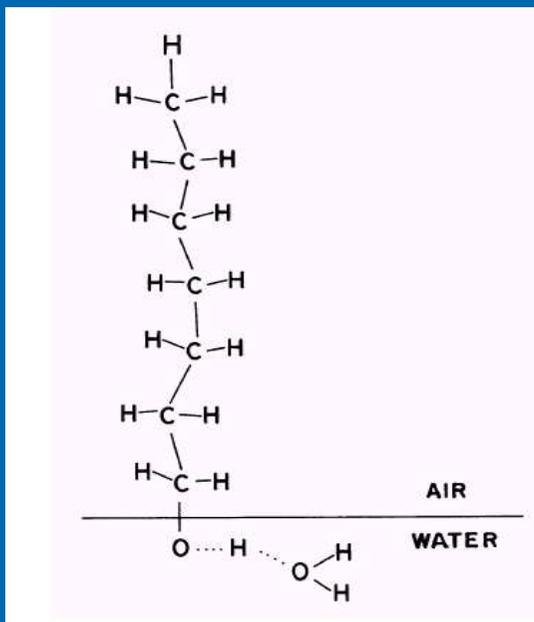


Slicks due to Current Gradients



Slicks due to River Plumes

Пленки поверхностно-активных веществ



Характеристики пленок: давление $\pi = \sigma_0 - \sigma_{\text{film}}$, упругость $E = -\Gamma_0 \frac{d\sigma}{d\Gamma}$

$\sigma_0 - \sigma_{\text{film}}$ коэффициенты поверхностного натяжения чистой воды и воды с пленкой

Физический механизм затухания волн на поверхности воды, покрытой поверхностно-активной пленкой

Поле скорости в ГКВ :
 потенциальная U_p и вихревая U_r
 компоненты

вихревая компонента – в
 вязком погранслое толщиной

$$d = (2\nu/\omega)^{1/2}$$

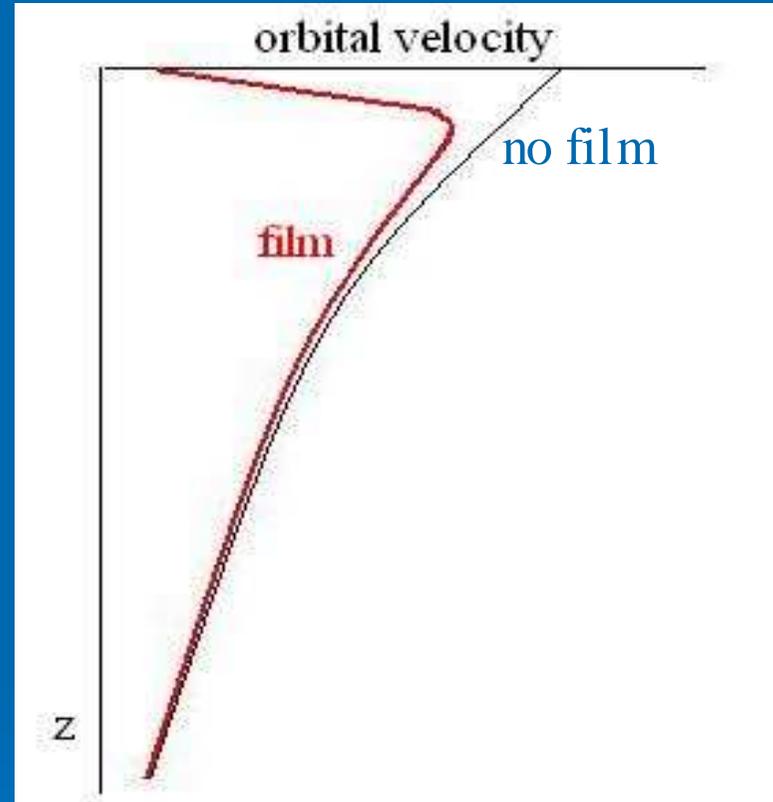
Чистая поверхность: $U_r \ll U_p$

Пленка с упругостью: $E = -\Gamma_0 \frac{d\sigma}{d\Gamma}$

$$\left| \frac{U_r}{U_p} \right|^2 \approx 2 \frac{e^2}{1 - 2e + 2e^2}$$

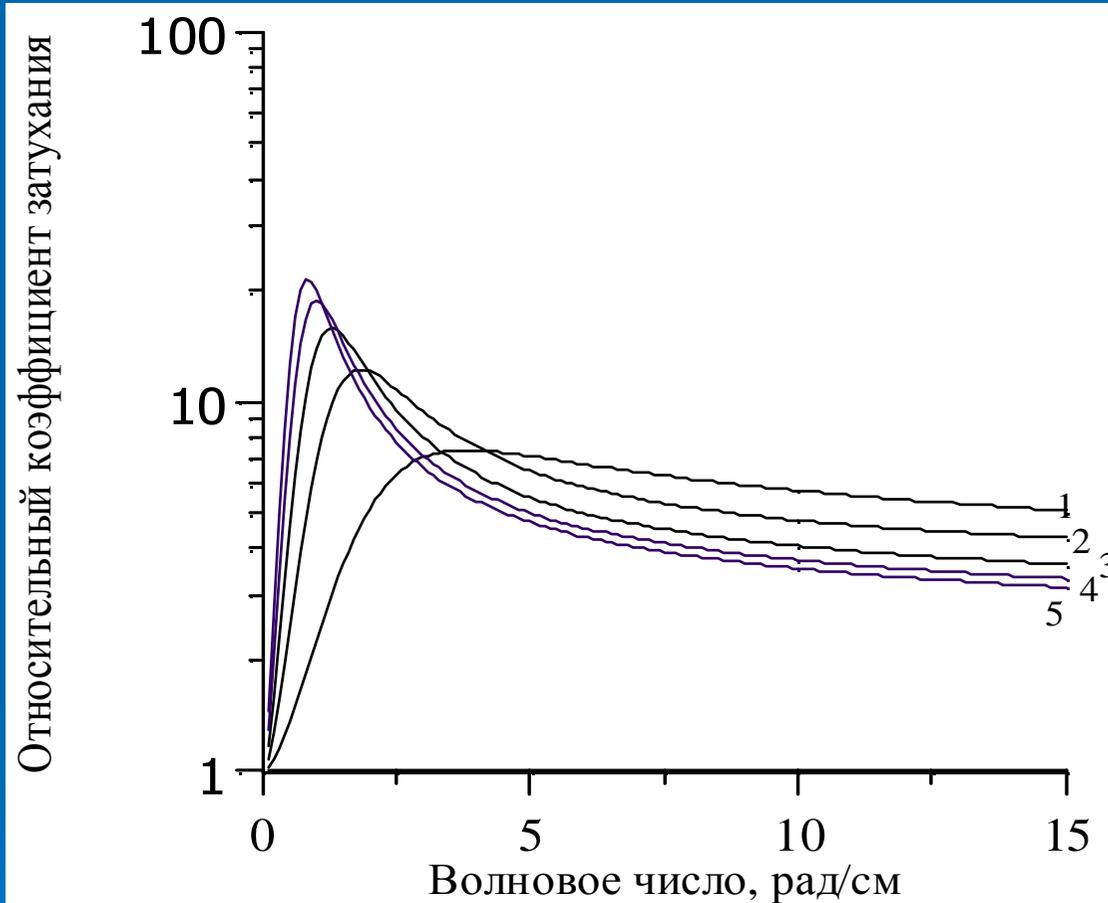
$e = E/E_0$ - безразмерная упругость

$$E_0 = \frac{(2\eta\rho\omega^3)^{1/2}}{k_s^2}$$



Физический механизм
 затухания ГКВ - большие
 градиенты орбитальной
 скорости в вязком погранслое

Коэффициент затухания ГКВ



1,2,3,4,5 – упругость 5, 10, 15, 20, 25 мН/м

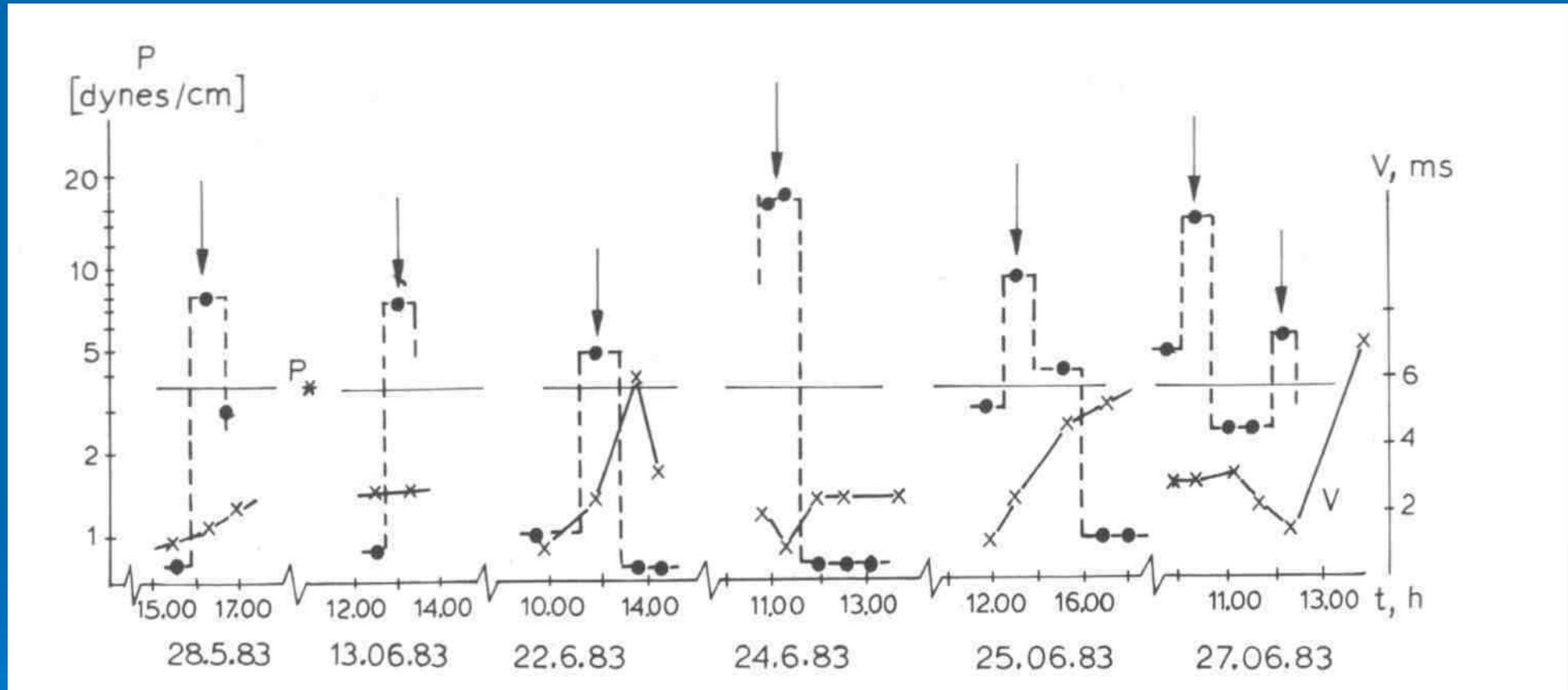
$$\gamma \approx 2\nu k_g^2 + \frac{\gamma_m}{2} \left| \frac{U_r}{U_p} \right|^2$$

$$\gamma_m = \left(\frac{\nu \alpha k_g^2}{2} \right)^{1/2}$$

$$\gamma_m \gg 2\nu k^2$$

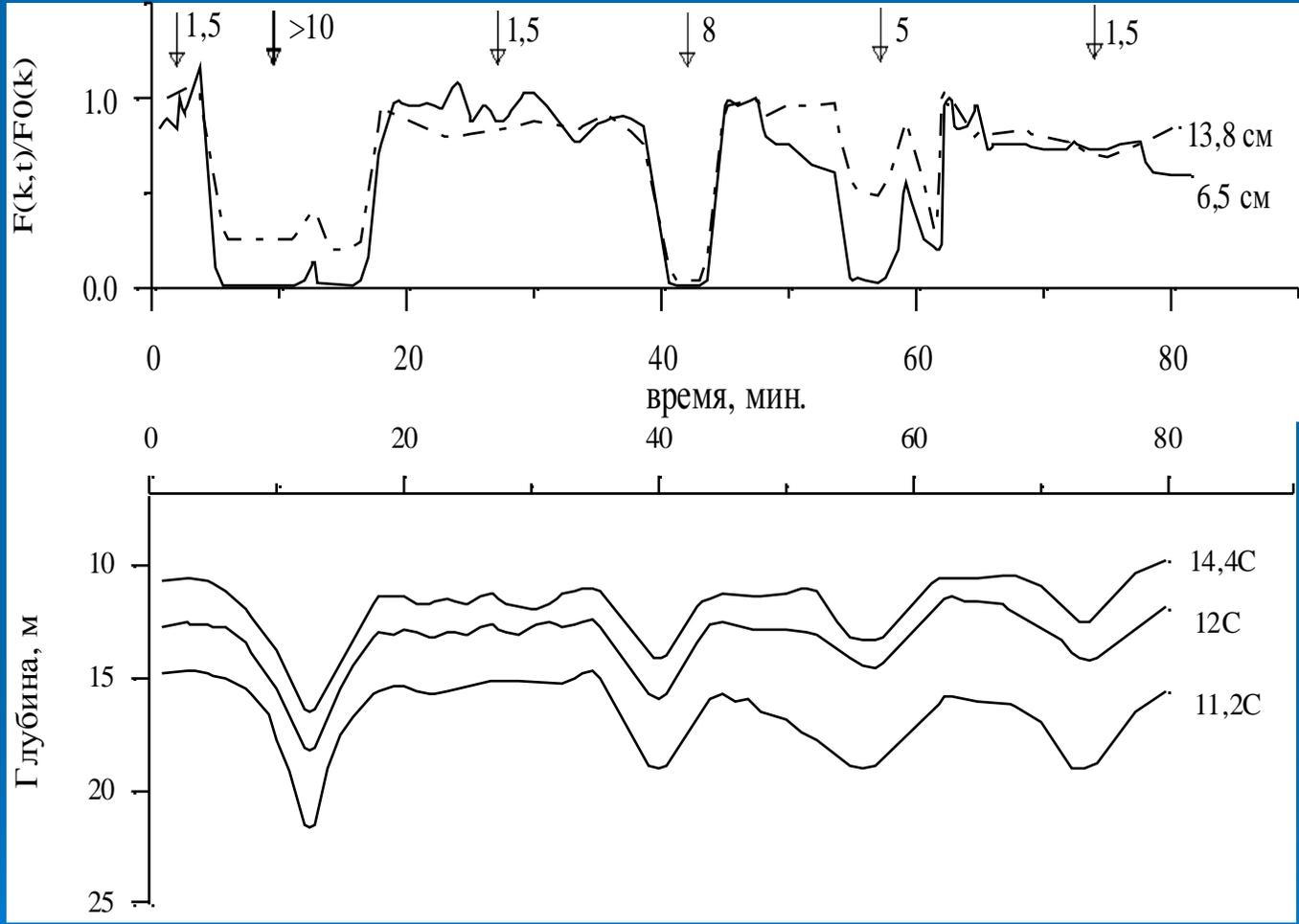
Относительный коэффициент затухания максимален для см-волн

Упругости пленок в сликах на морской поверхности



Натурные исследования связи сликов на морской поверхности с океаническими и атмосферными процессами.

Внутренние волны



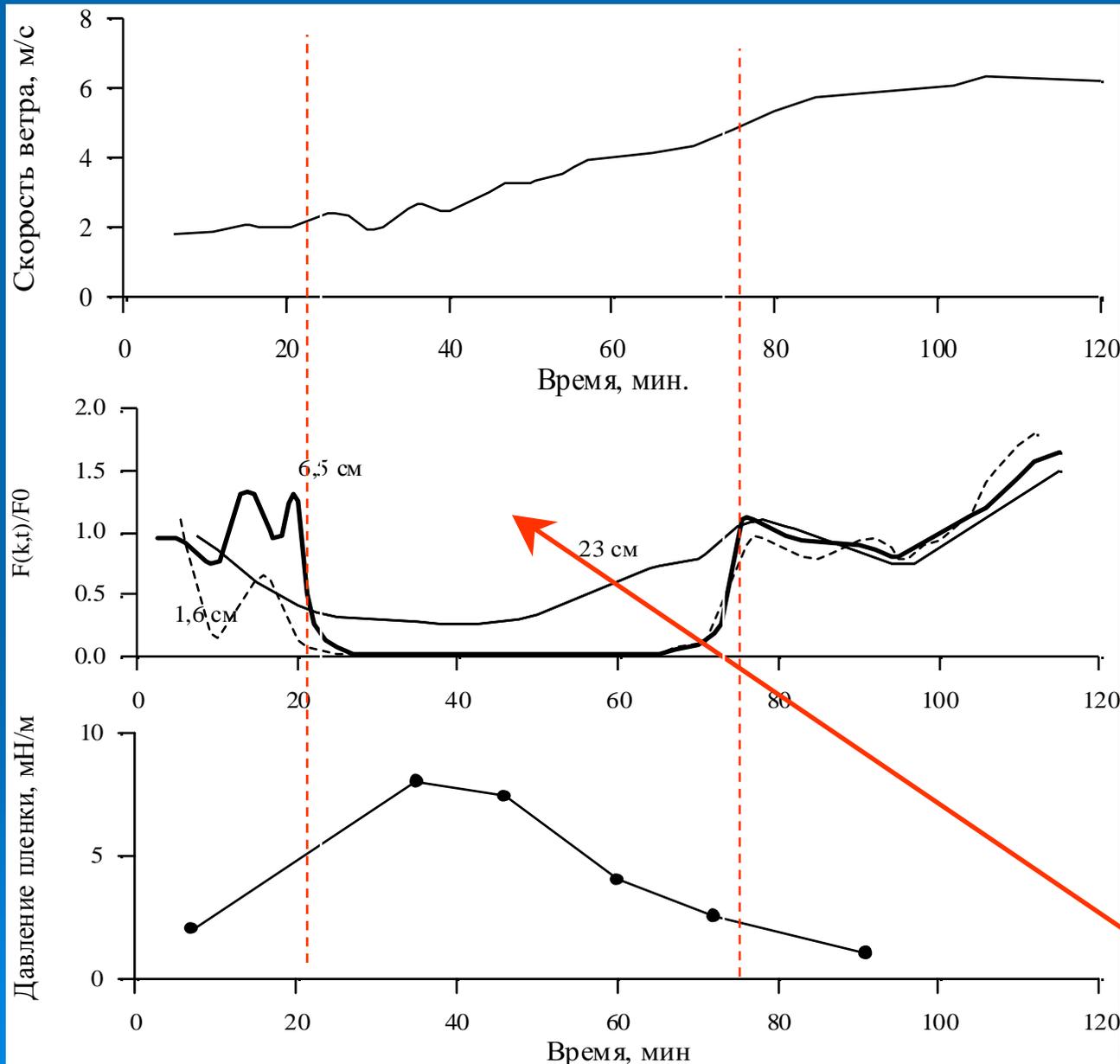
Спектр ветрового волнения на длинах волн 6,5 см и 13,8 см

Колебания изотерм в поле внутренних волн

Измеренное давление пленки в сликах 5-10 мН/м, упругость 15-20 мН/м

Наблюдения с океанографической платформы на Черном море

Слики в поле ветровых неоднородностей



Скорость ветра

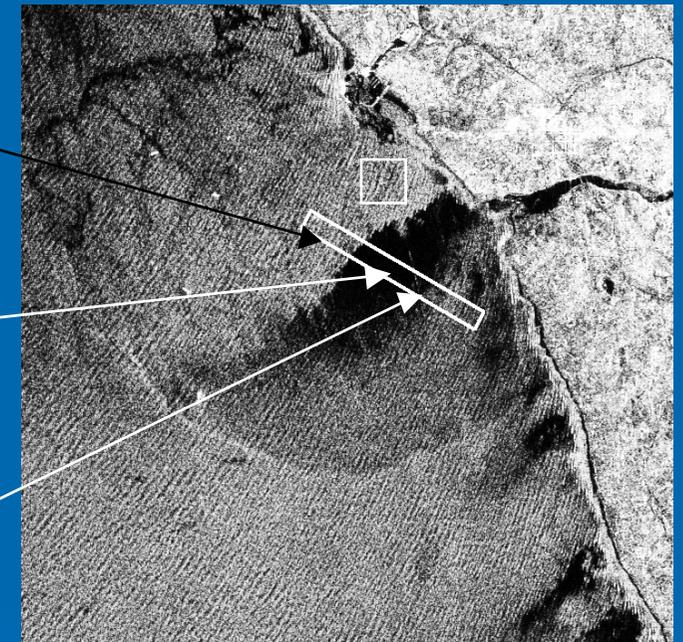
Спектр ветровых волн на
длинах 1,6 см, 6,5 см, 23
см

Давление пленки

Область ветрового слика

Характеристики пленок в области речного стока

Sample number	Surface tension, mN/m	Elasticity, mN/m
d10 outside plume slick	69.8	2
d11 outside plume slick	69.8	1.8
d8 inside plume slick	65.1	14.3
d3 outside plume slick	69.8	1.7
d5 inside plume slick	65.1	13.8
d7 up the river, strong current/mixing	72.2	1.2
a2 up the river, weak current, slicks	62.9	17.7



ERS-2 SAR image. The Douro River Plume, Portuguese Shelf, 15 November, 2000

Гашение ветровых волн пленками. Модель локального баланса

A local balance model for the spectrum of wind waves (Pelinovsky, Donelan&Pierson, Ermakov et.al.)

$$\frac{dN(k, x, t)}{dt} = \Pi_a + \beta(u_*, k)N - \gamma(E, \sigma, k)N + I_{nl}(N)$$

$$N(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t) = \rho F(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t) \omega(\mathbf{k}) / |\mathbf{k}|$$

F – the wavenumber spectrum of wind waves

β - wind wave growth rate, γ - wave damping coefficient, σ - surface tension, E - film elasticity, u_* - friction velocity

$$I_{nl} \sim N^n$$

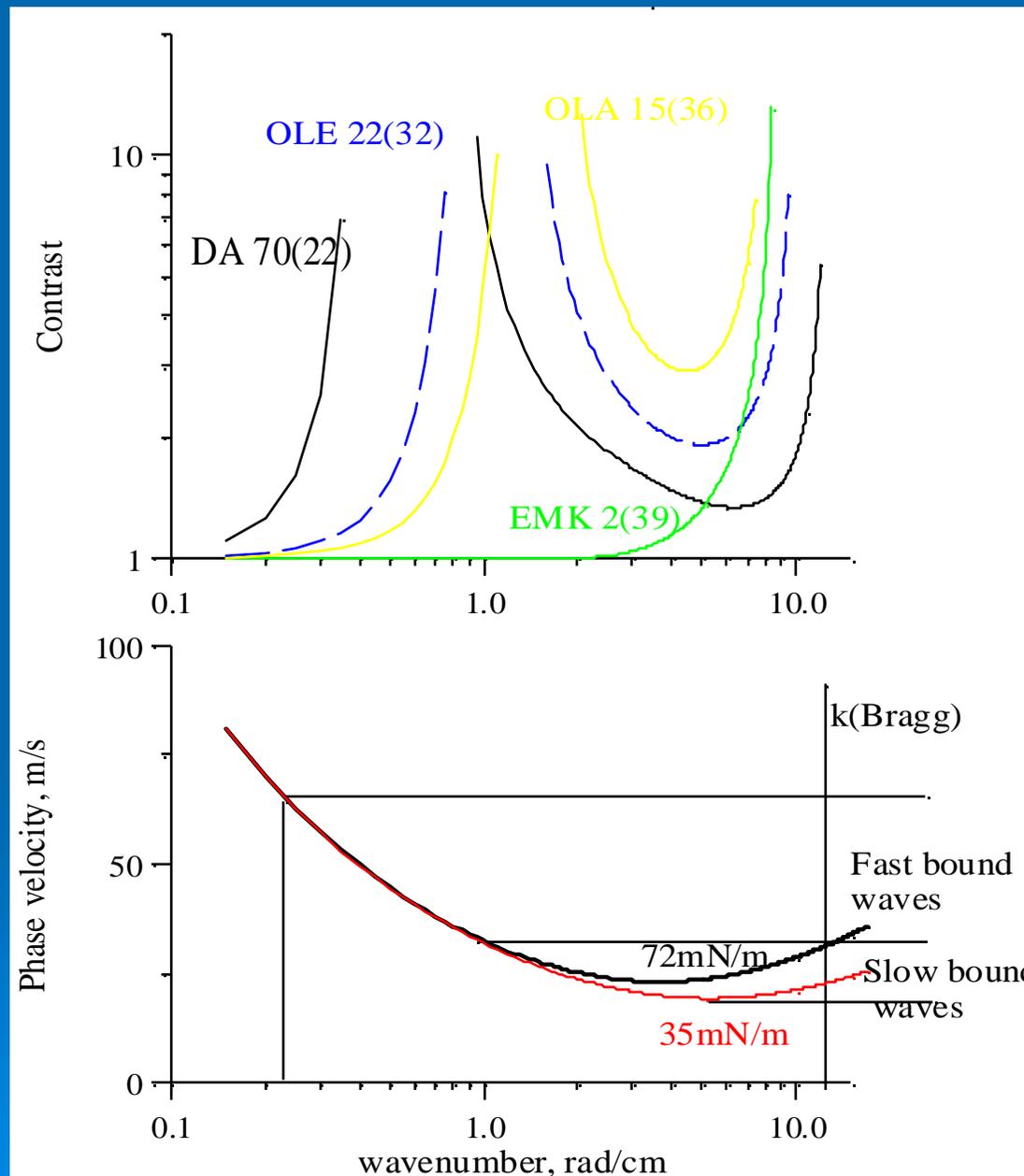
Contrast $K(k) = F_{nsl}(k) / F_{sl}(k)$ in the wavenumber spectrum of wind waves

$$K(k) = \left[\frac{\beta(u_{*nsl}, k) - \gamma(0, \sigma, k)}{\beta(u_{*sl}, k) - \gamma(E, \sigma, k)} \right]^n$$

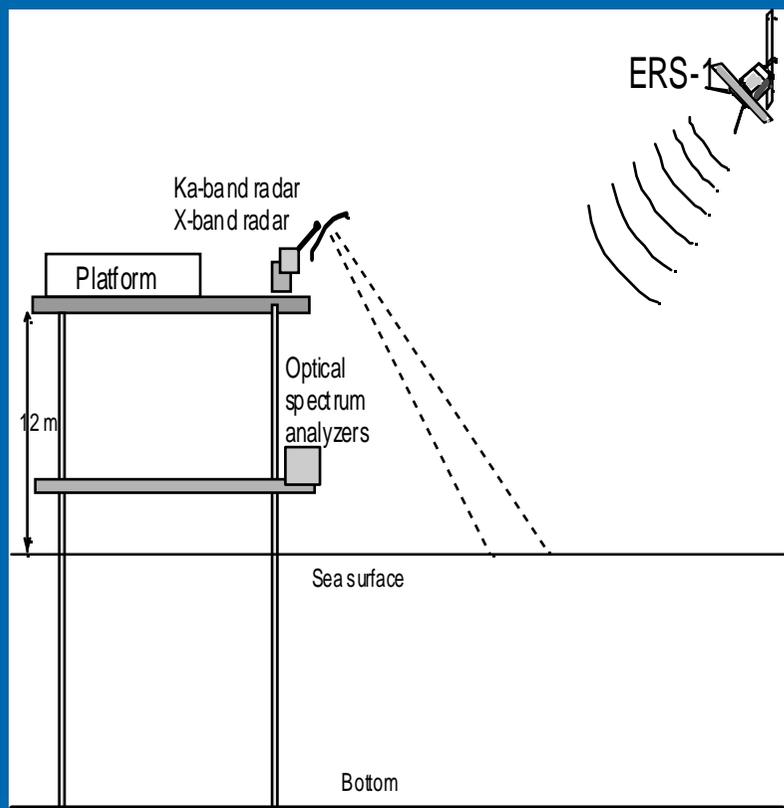
$\beta > \gamma \quad n=1; \quad \beta < \gamma \quad n=-1$

Bragg scattering : $K_{radar} = K_{hydro}$

Модельные расчеты контрастов в сликах



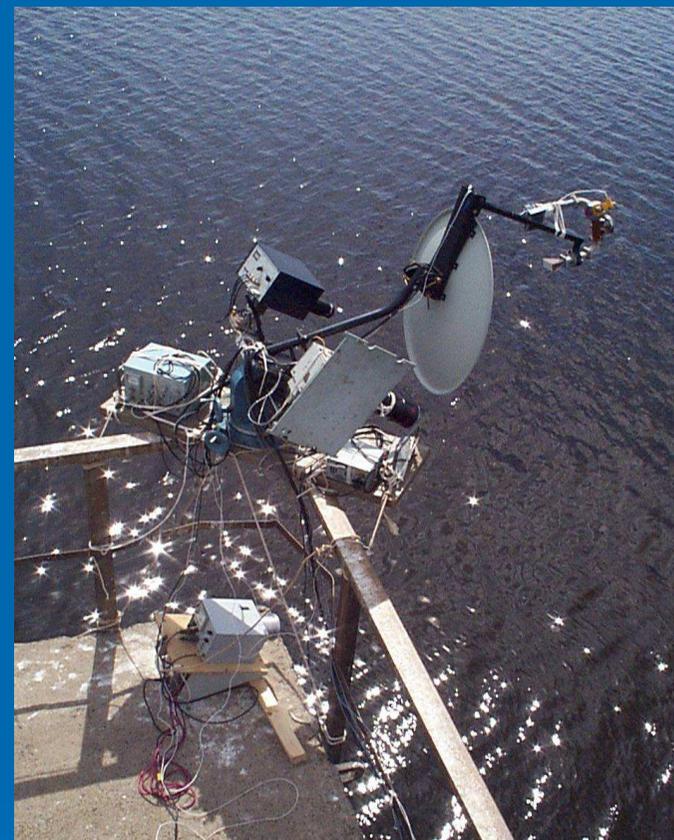
Натурные эксперименты с искусственными сликами



Океанографическая
платформа,
Черное море

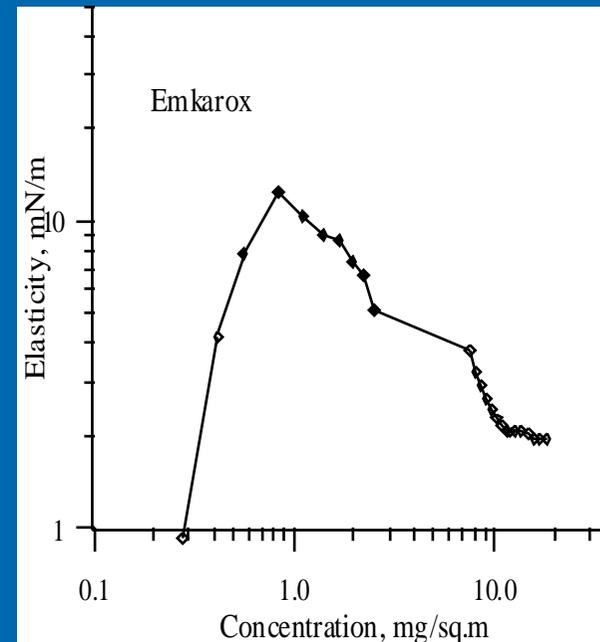
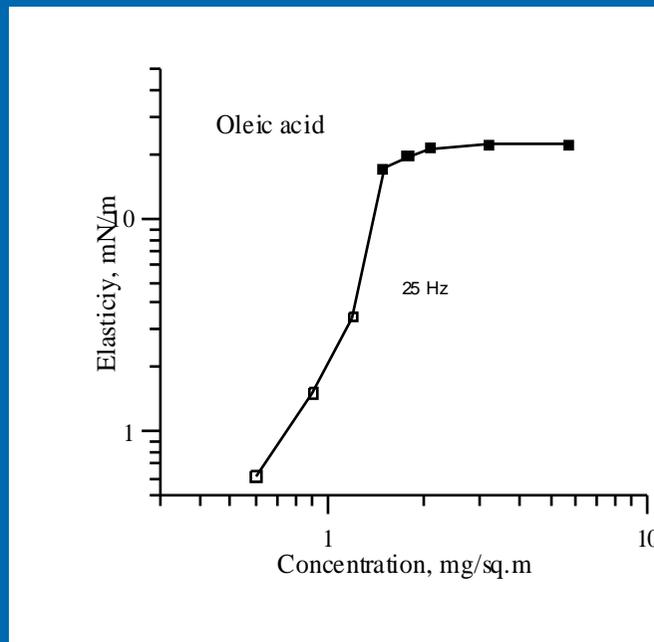
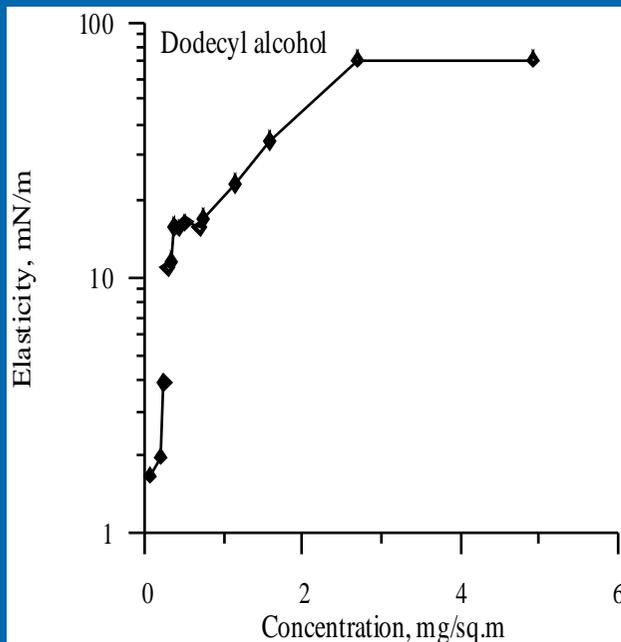
Радиолокаторы
8.7 мм; 3.2 см
**Оптические
спектраллизаторы:**
диапазон длин ветровых
волн 0.5-10см

Пленки:
полимер Emkarox (Emk),
растительное масло
(VO),
олеиловый спирт (OLA),
олеиновая кислота
(OLE),
додeciловый спирт
(DA)
диз.топливо (ДТ)



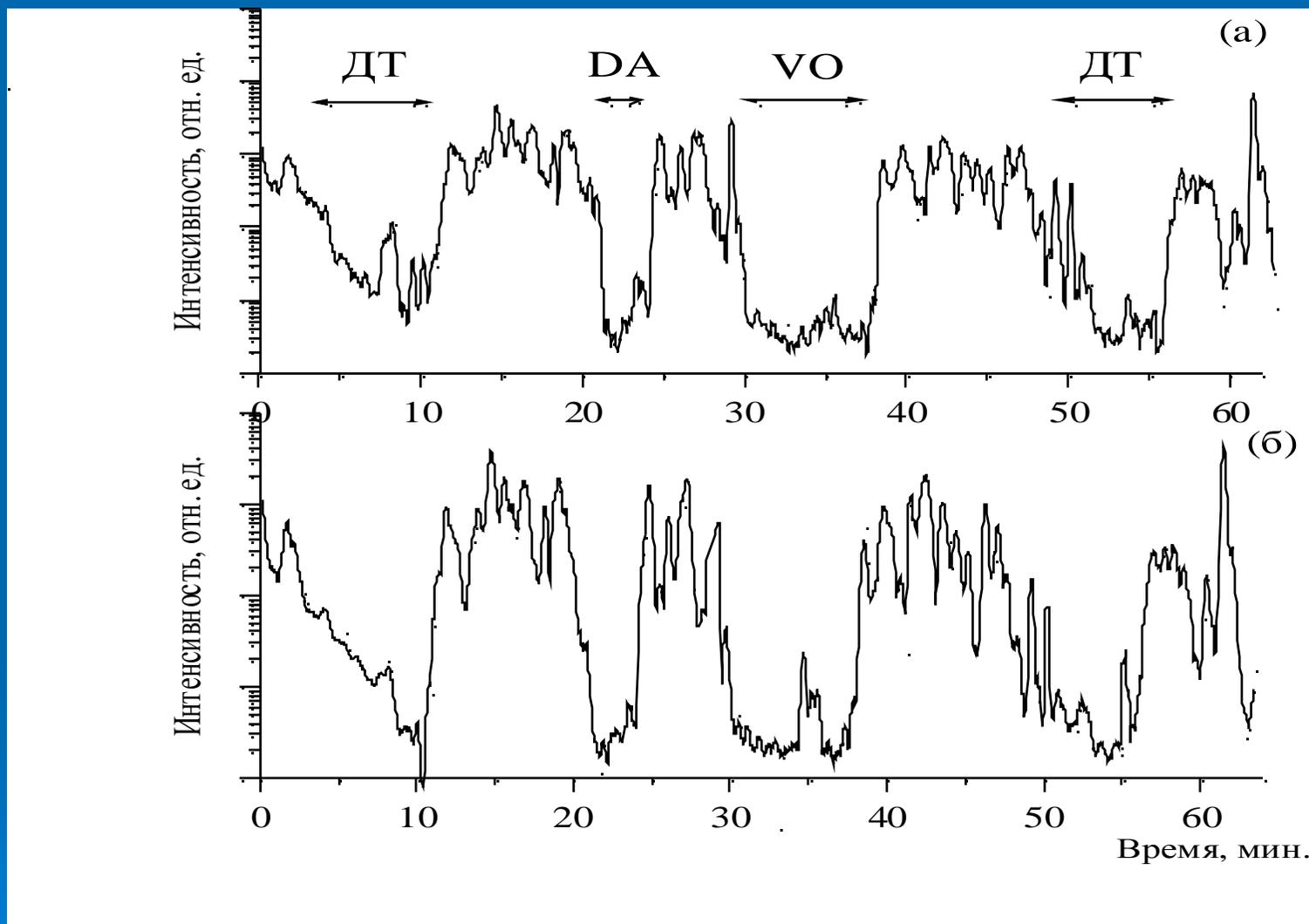
**РЛ/оптический
комплекс ИФФ РАН**

Упругости мономолекулярных пленок



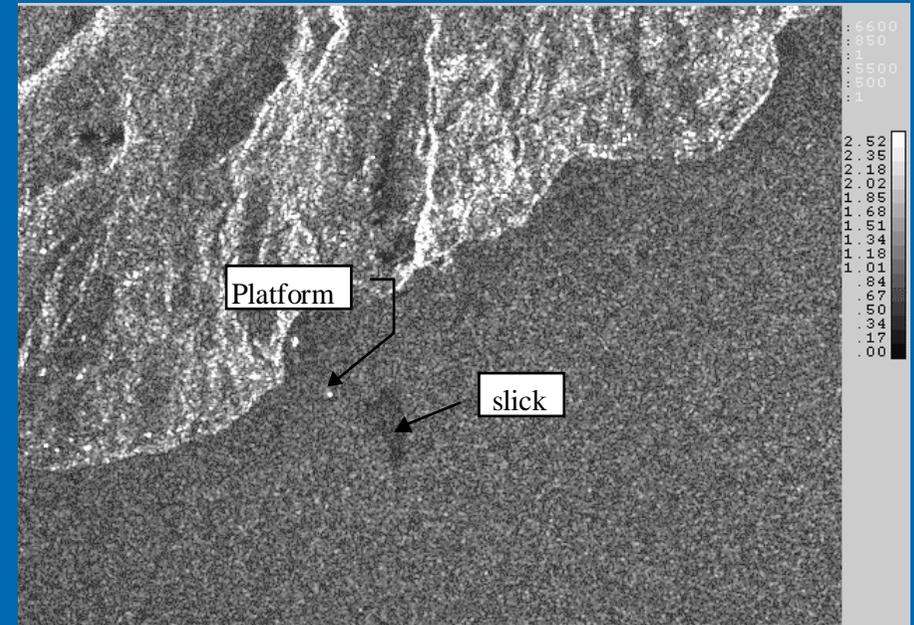
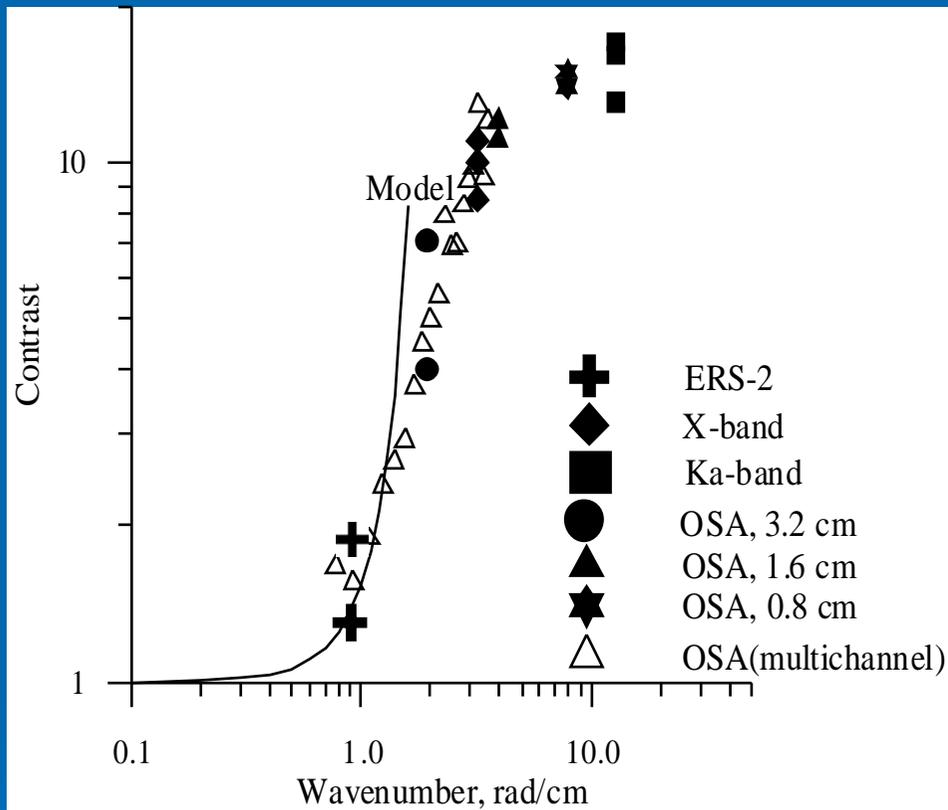
Substance	Emk	VO	OLA	OLE	DA
Surface tension, mN/m	39	40	36	32	22
Elasticity, mN/m	2-5	12	15	22	70

Гашение р.л. сигналов в сliках (органические и нефтяные пленки)



Записи интенсивностей сигналов обратного рассеяния в X и Ka-диапазонах
в экспериментах с искусственными сliками

Гашение см-ветровых волн тонкими (мономолекулярными) пленками



РСА изображение искусственного слика,
ERS-2, Черное море

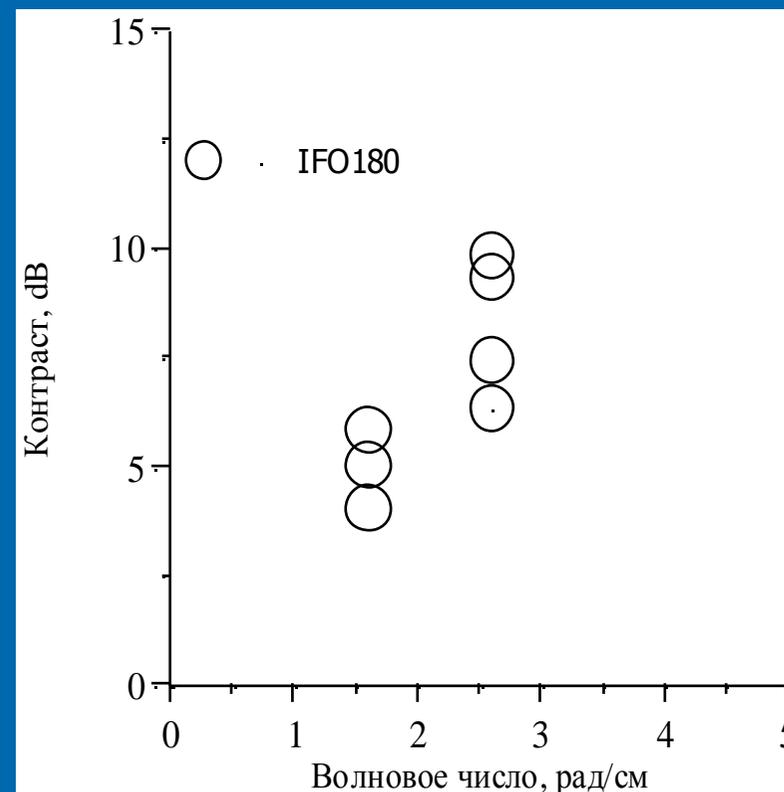
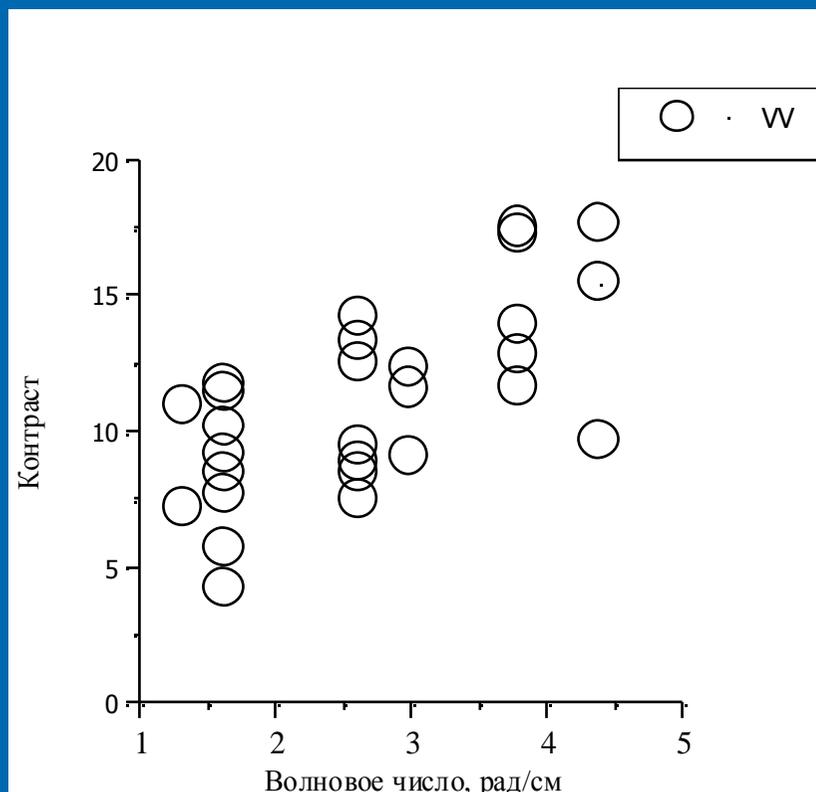
Степень гашения (контраст) в слике
для см-волн.

Скорость ветра 7 м/с

$$\text{Контраст } K(k) = F_{nsl}(k) / F_{sl}(k)$$

Вывод: степень гашения
ветровых ГКВ резко
уменьшается с ростом
длины волны

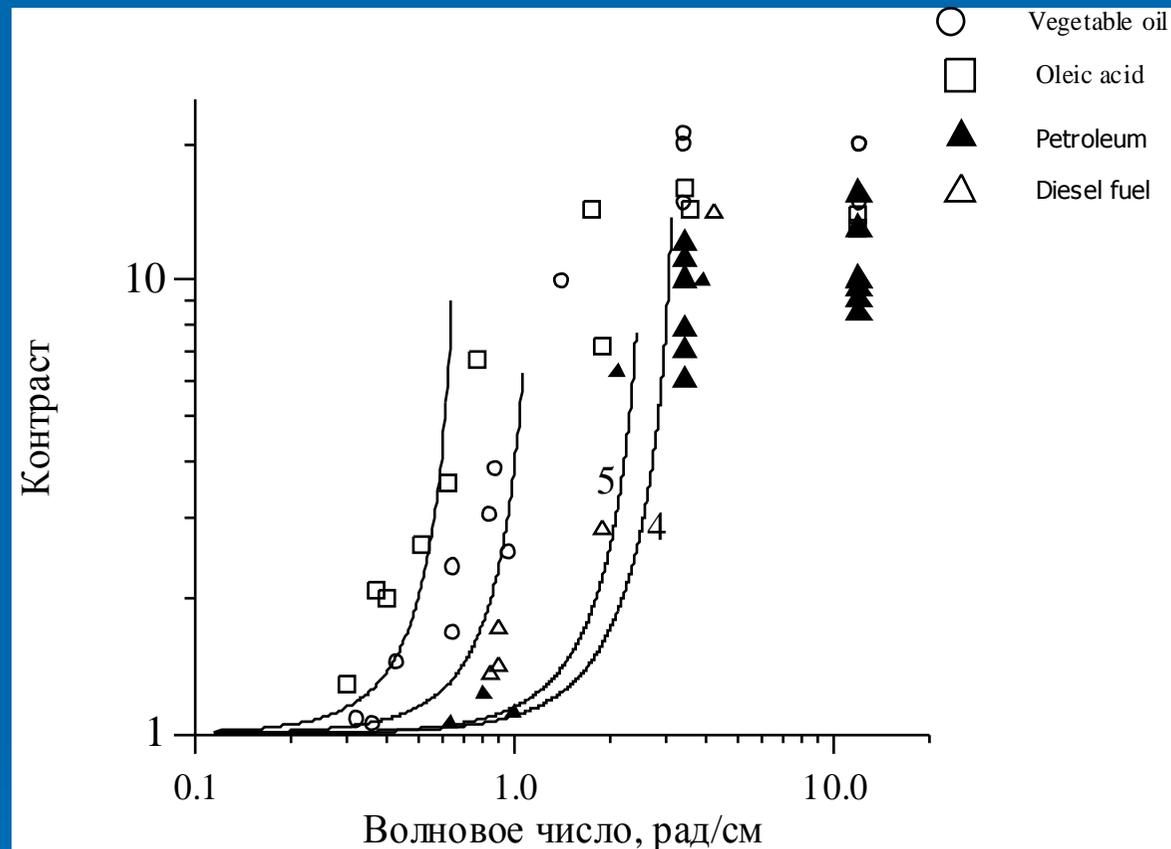
РЛ исследования гашения волн нефтяными пленками



Гашение РЛ сигнала в нефтяном разливе (IFO 180), области “сильных” и “слабых” контрастов . Результаты измерений многочастотным СВЧ-скаттерометром (Gade et.al., 1998).

Степень подавления РЛ сигнала (контраст) растет с уменьшением длины волны, предположительно с толщиной нефтяной пленки, уменьшается с ростом скорости ветра

Гашение пленками ПАВ и нефтепродуктами. Эксперименты и модель.



Контрасты для волн см-диапазона для пленок олеиновой кислоты, растительного масла, сырой нефти и диз.топлива. Скорость ветра 6 м/с.

Гашение для пленок нефтепродуктов слабее, чем для “биогенных”

Доплеровские сдвиги частоты р.л. сигналов

Спектр р.л. сигнала

$$S(\omega, t) = 1/2 \cdot P(t) [\delta(\omega - k_B V) + \delta(\omega + k_B V)]$$

V – скорость рассеивателей, $P(t)$ – рассеянная мощность, $k_B = 2k_e \sin \theta$ – брэгговское волновое число

Р.л. доплеровский сдвиг

$$f_D(t) = 1/2\pi \cdot \int S(\omega, t) \omega d\omega / \int S(\omega, t) d\omega$$

$$f_D = 1/2\pi \cdot k_B \cdot [C_{phase}(k_B) + V_{drift}]$$

Линейные гравитационно-капиллярные волны - $C_{phase}(k) = C_f = (g/k + \sigma/k)^{1/2}$

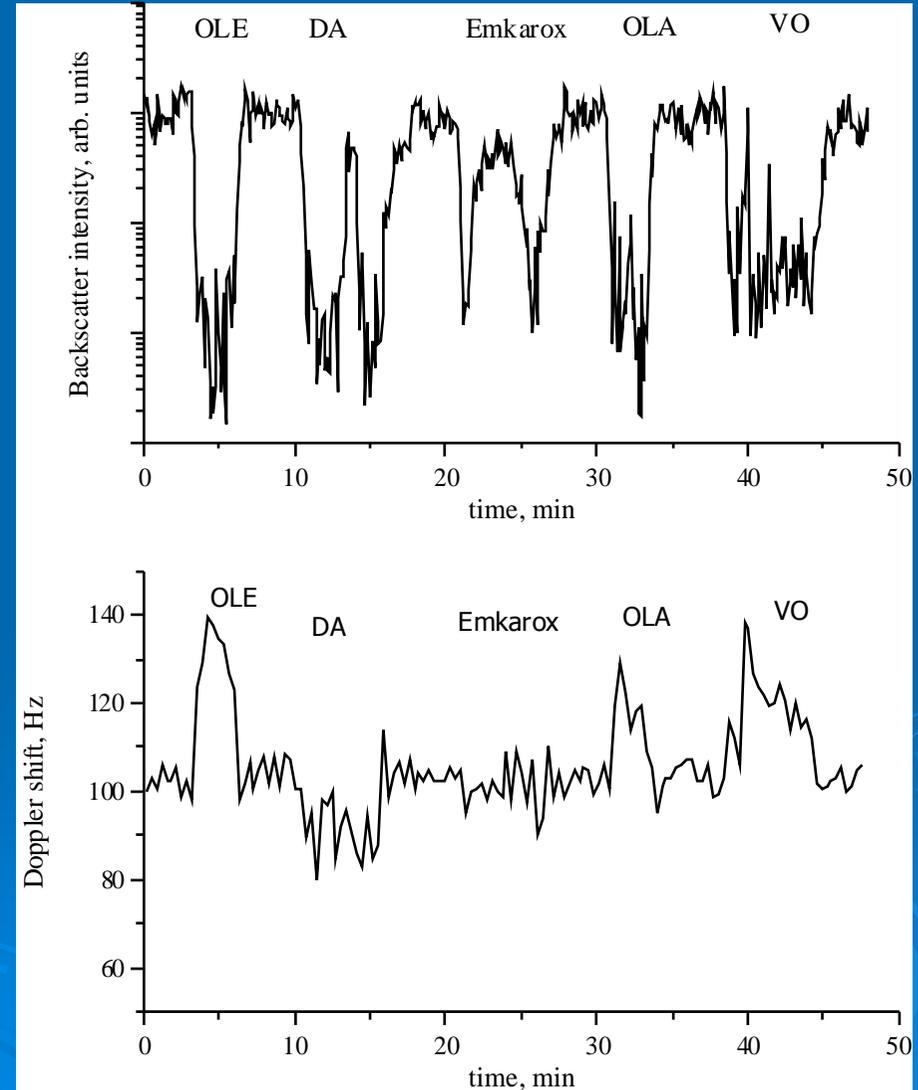
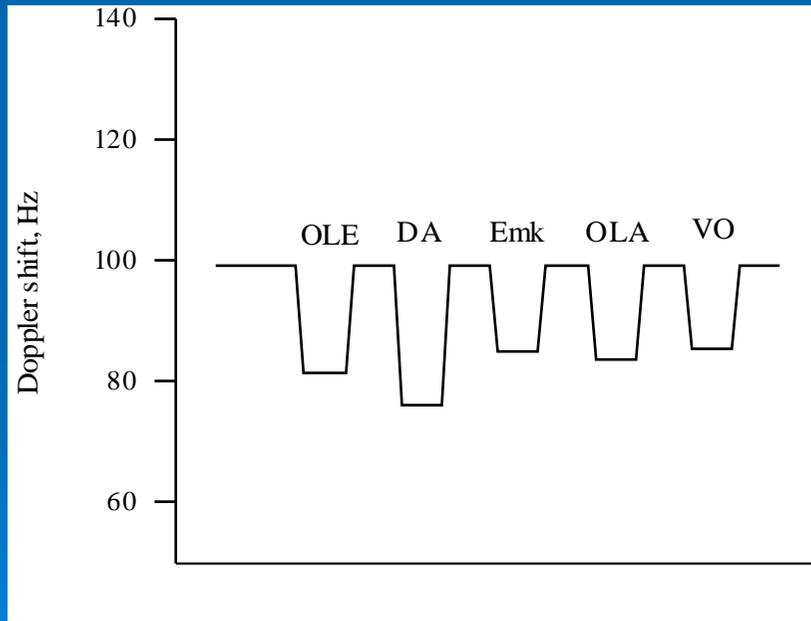
σ - коэффициент поверхностного натяжения

Изменение р.л. доплеровских сдвигов в сликaх

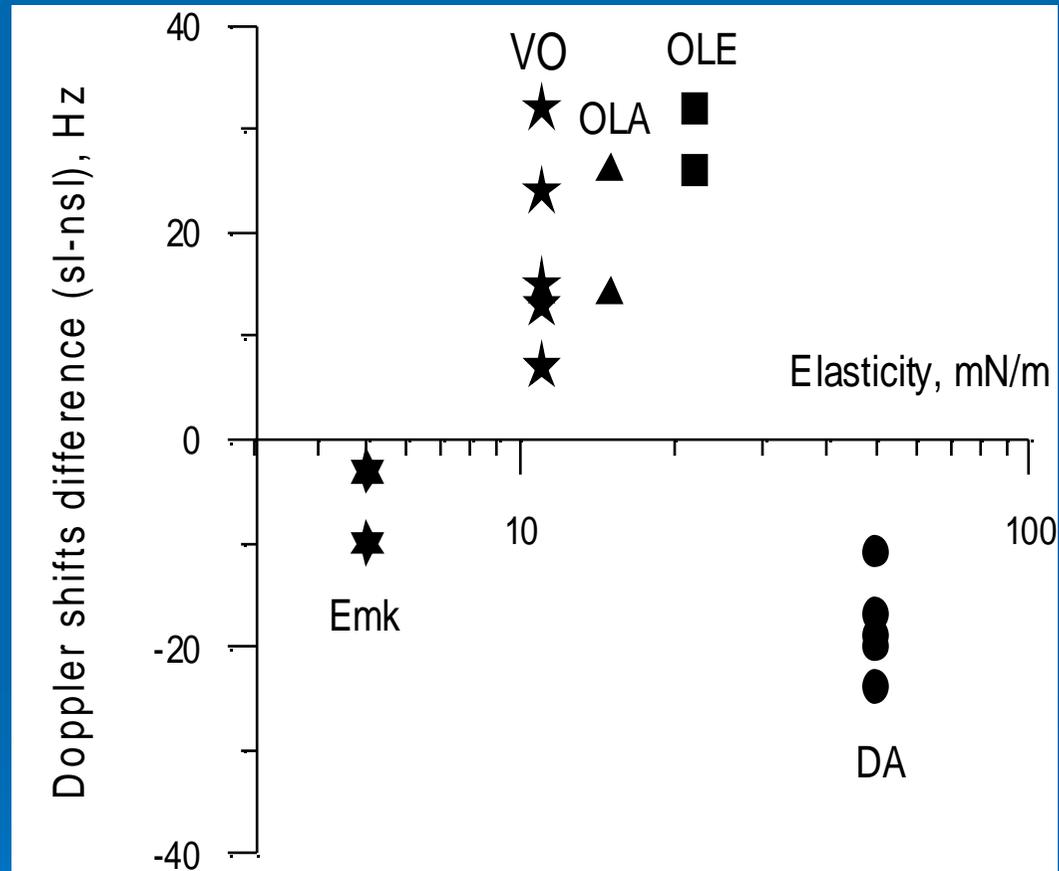
Эксперимент

Доплеровский сдвиг для линейных (свободных) брэгговских волн

$$f_D = 1/2\pi \cdot [(gk_B + \sigma k_B^3)^{1/2} + k_B V_{drift}]$$

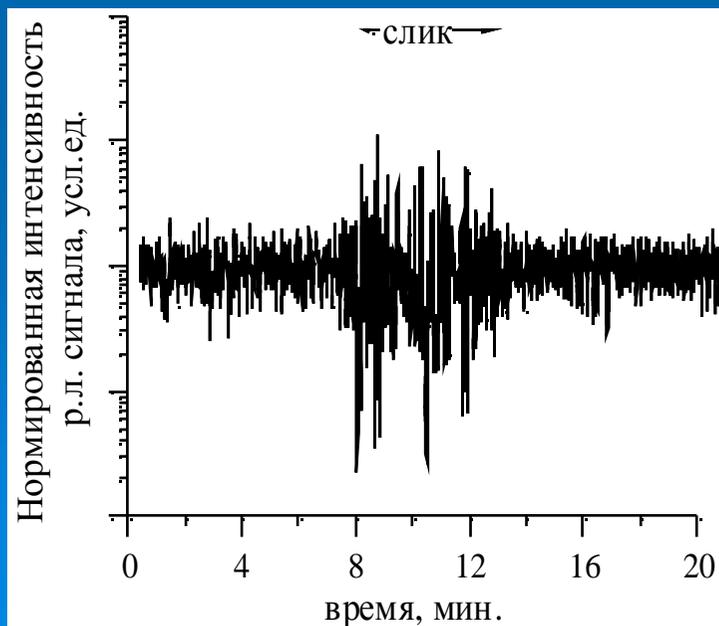
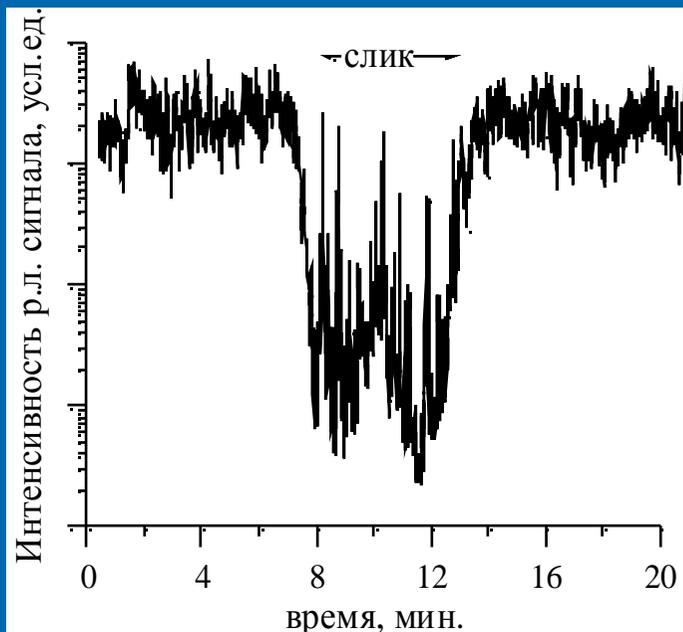


Доплеровские сдвиги частоты сигналов 8-мм скаттерометра в слайках как функции упругости пленок



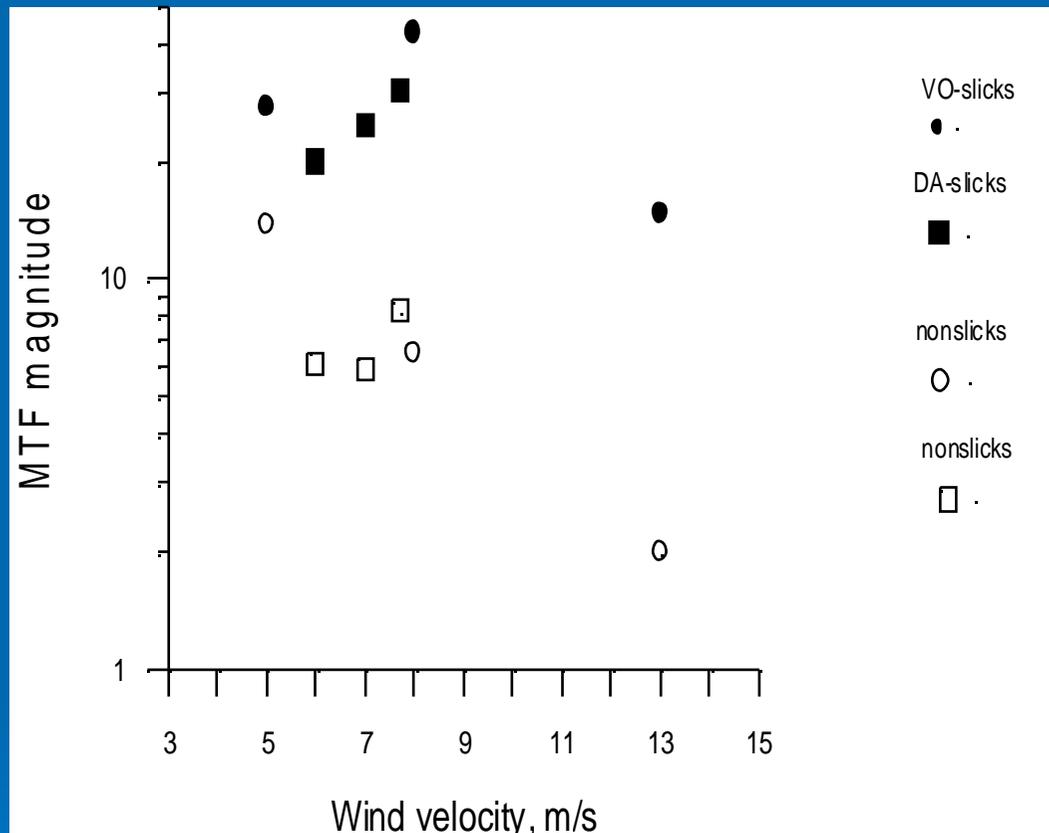
Разность доплеровских сдвигов
частоты радиолокатора в слайках и вне слайков

Сильная модуляция р.л. сигналов в сликах под действием длинных волн



Интенсивность сигнала 8 мм
скаттерометра при
Прохождении искусственного слика и та
же интенсивность,
нормированная на текущее среднее

Сильная модуляция ветровой ряби в поле длинных волн в сликах



Р.л. модуляционная
передаточная функция (МПФ)

$$R(t) = \bar{P} \left[1 + \int m(\Omega) \cdot \frac{U(\Omega)}{\alpha(\Omega)} \cdot \exp(i\Omega t) \cdot d\Omega \right] + P_r$$

$$m(\Omega) = \frac{C \overline{P(\Omega) U^*(\Omega)}}{P |U(\Omega)|^2}$$

МПФ 8-мм скаттерометра

$$m = m_{\text{geometric}} + m_{\text{kin}} + m_{\text{wind}} + m_{\text{film}} + m_{\text{nonlinear}}$$

Заключение

- Динамические процессы в океане и атмосфере перераспределяют пленки на морской поверхности, что приводит к гашению мелкомасштабных ветровых волн и образованию сликов. Пленки усиливают поверхностные проявления внутренних волн, течений, ветровых неоднородностей и т.д.
- Наиболее сильно в пленочных сликах подавляются ветровая рябь с длинами менее 10-15 см, поэтому при зондировании пленочных сликов эффективны радиолокаторы С-Х-К-диапазонов
- Гашение ветровых волн растет с уменьшением их длины, с уменьшением скорости ветра и с ростом упругости пленки. По характеру зависимости контраста от длины волны можно оценивать упругость пленок, поэтому для диагностики пленок целесообразно применять многочастотные радиолокаторы. Дополнительная информация о характеристиках пленок может быть получена из анализа доплеровских сдвигов частоты р.л. сигнала