

Оценка дополнительного источника генерации коротких поверхностных волн при недостаточном ветровом возбуждении

Ирина Сергиевская, Станислав Ермаков

**Институт прикладной физики РАН
Волжский государственный институт водного транспорта**

Мотивация

Развитие методов определения природы приповерхностных процессов по их проявлениям в радарных изображениях поверхности

Развитие методов оценки характеристик приповерхностных процессов (например, характеристик пленок ПАВ и ПЭ пленок)

Два пути для развития методов:

1. Теоретическая модель (радиолокационное изображение морской поверхности, исследование влияния процессов на волнение)
2. Регрессионных зависимостей – чисто эмпирическая модель

Наш подход:

- Анализ экспериментальных данных о степени гашения волн пленками ПАВ
- Использование теоретических основ для описания генерации ветровых волн

Экспериментальные данные об изменчивости Брегговской компоненты в областях искусственно создаваемых пленочных сливков с известными характеристиками ПАВ

[Ermakov et al., 2018, 2021, 2023; Sergievskaya et al, 2019, 2020, 2024]

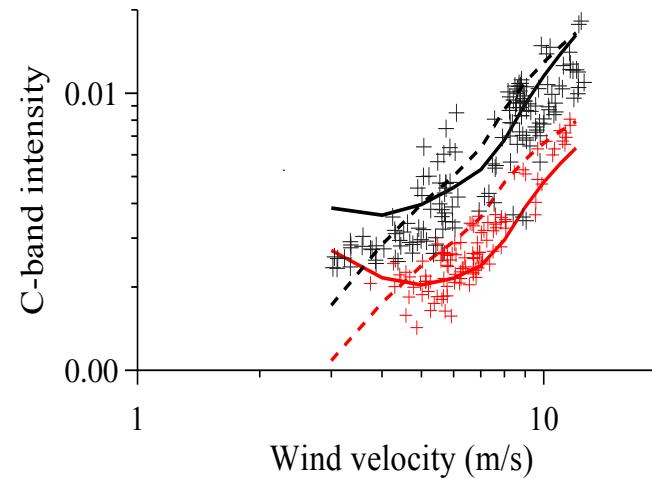
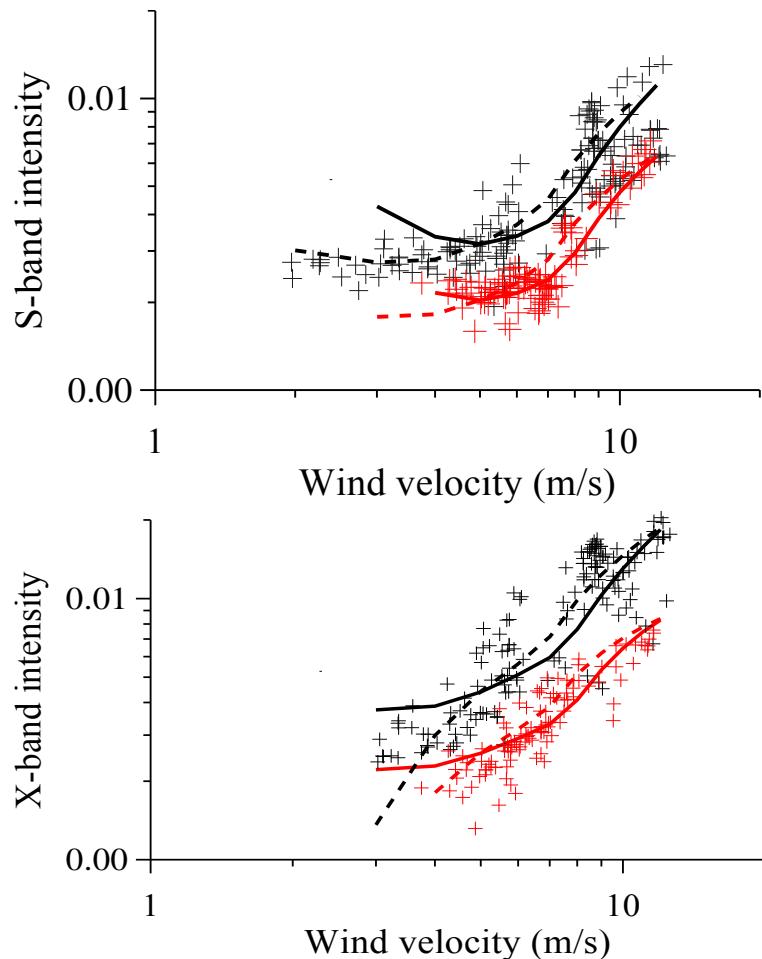


Место проведения натурных экспериментов	Черное море, ОП МГИ Горьковское в/х, «Петр Андрианов»
Радар	Трехчастотный доплеровский двухполяризационный (VV и HH) радар S/C/X диапазонов, ИПФ РАН
ПАВ	Олеиновая кислота, растительное масло

Определение Брэгговской компоненты с использованием композитной модели

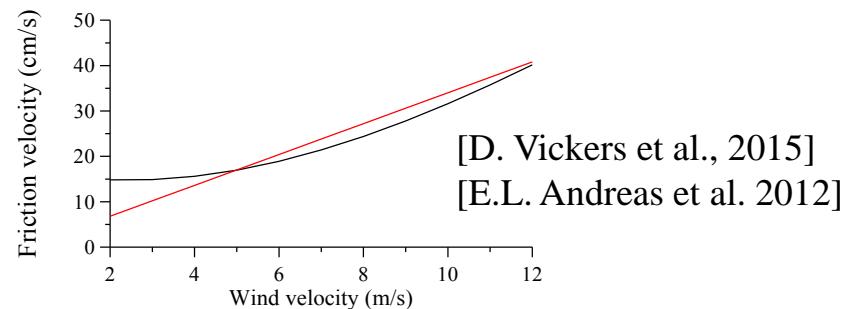
$$\begin{aligned} PD = \sigma_{VV}^0 - \sigma_{HH}^0 &= 16\pi k_e^4 \langle (g_{VV}^2(\theta + \eta) - g_{HH}^2(\theta + \eta)) F(k_{br}(\theta + \eta), \varphi) \rangle_\eta \\ &\approx 16\pi k_e^4 \langle (g_{VV}^2(\theta) - g_{HH}^2(\theta)) / k_{br}^4 \rangle_\eta B(k_{br}, \varphi) \end{aligned}$$

Зависимости интенсивности измеренной брэгговской компоненты от скорости ветра в S/C/X диапазонах



Черные символы, кривые – навстречу ветру
Красные символы, кривые – поперек ветра

[T. Elfouhaily et al., 1997]



Теоретические основы

Уравнения баланса для волнового воздействия $N(k, \varphi) = F(k, \varphi) \omega(k) / k$

Инкремент
ветрового роста волн

$$[\beta(u^*, k, \varphi) - 2\gamma(0/f, k)]N(k, \varphi) - \alpha^{*n} N(k, \varphi)^{n+1} + I_s^*(k, \varphi) = 0$$

Вязкое затухание
[V.G. Levich, 1962]

Нелинейное ограничение волн
[W. Plant, 2002]

Дополнительный
источник волн

Для спектра насыщения волн

$$[\beta(u^*, k, \varphi) - 2\gamma(0/f, k)]\alpha B(k, \varphi) - (\alpha B(k, \varphi))^{n+1} + \alpha I_s(k, \varphi) = 0$$

$$\alpha = \alpha^* \cdot \omega(k) / k^5$$

$$I_s = I_s^* k^5 / \omega(k)$$

$$\beta_{\gamma,0} \alpha_0 B_0 - (\alpha_0 B_0)^{n_0+1} + \alpha_0 I_{s,0} = 0 \quad \text{Для чистой поверхности}$$

$$\beta_{\gamma,f} \alpha_f B_f - (\alpha_f B_f)^{n_f+1} + \alpha_f I_{s,f} = 0 \quad \text{В слике}$$

$$K = F_0 / F_f = B_0 / B_f \quad \text{Контраст (степень гашения) волн в области слика}$$

Предположения:

- $I_{s,f} = I_{s,0}$

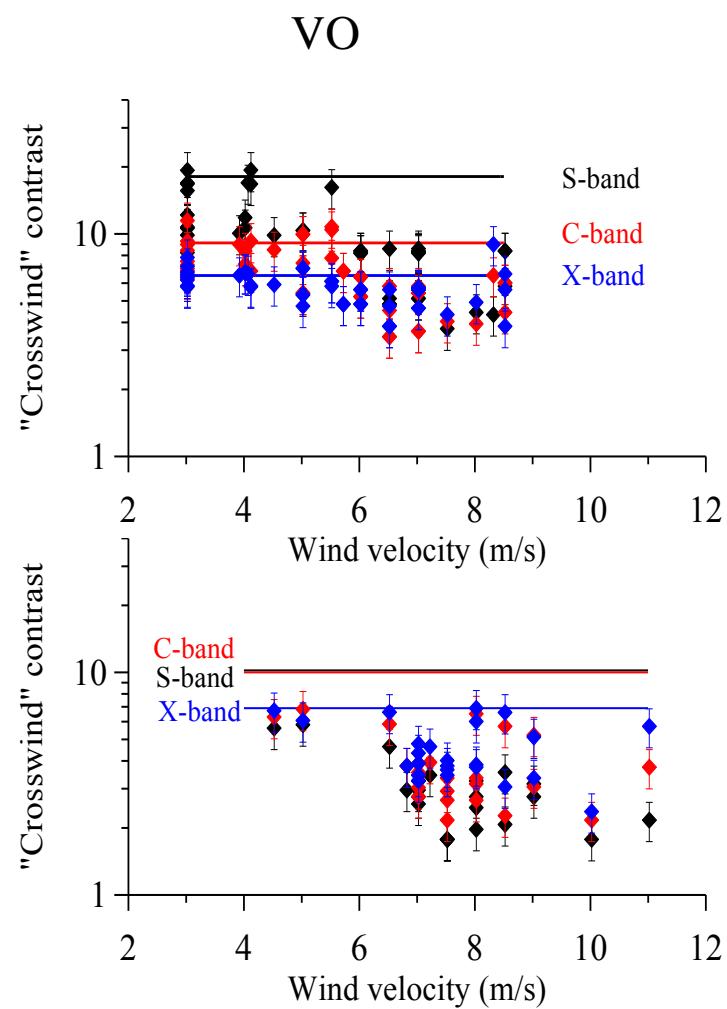
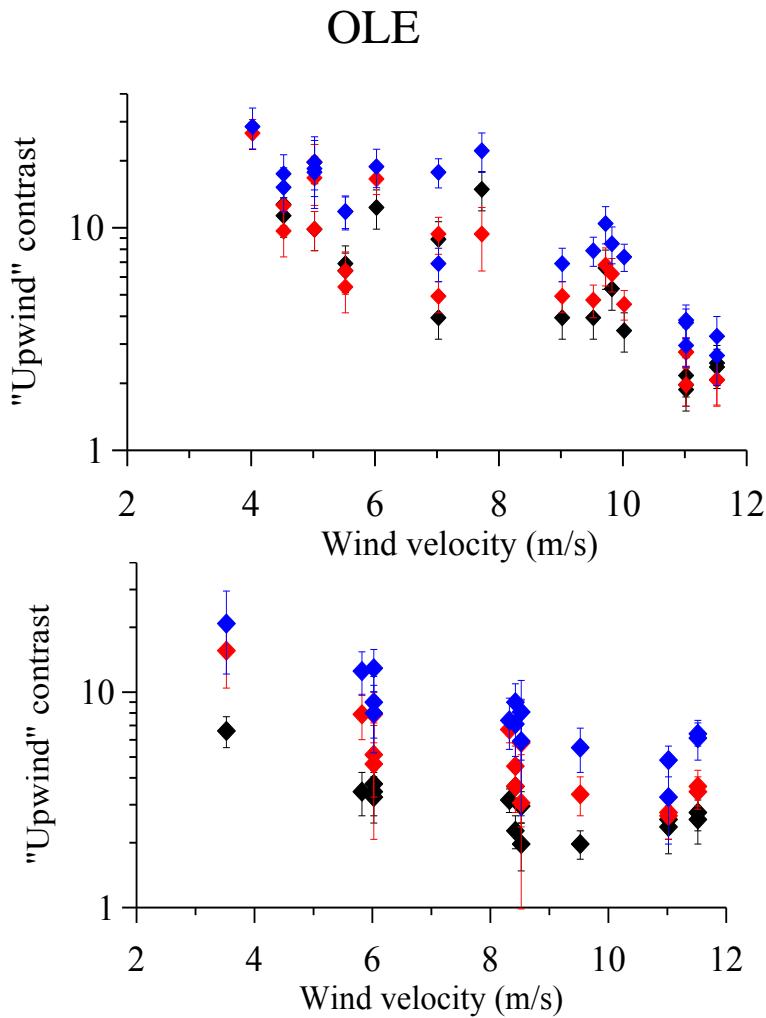
- $n_0 = n_f = n(k)$

- $\alpha_0 = \alpha_f = \alpha(k)$

$$\alpha B_0 = \left((-\beta_{\gamma,f} / K + \beta_{\gamma,0}) / (1 - 1 / K^{n+1}) \right)^{1/n}$$

$$\alpha I_s = -\beta_{\gamma,f} \alpha B_f + (\alpha B_f)^{n+1} = -\beta_{\gamma,0} \alpha B_0 + (\alpha B_0)^{n+1}$$

Контрасти в сликах ПАВ



Прямые $K_\gamma = \gamma(E, \sigma, k_{br}) / \gamma(0, \sigma, k_{br})$

Интенсивность дополнительного источника, определенная по контрастам «поперек ветра»

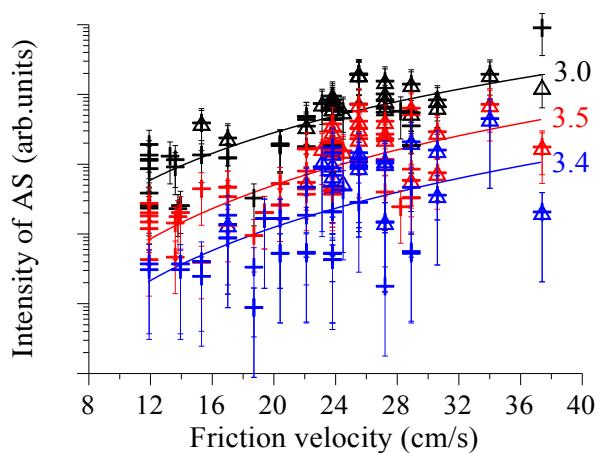
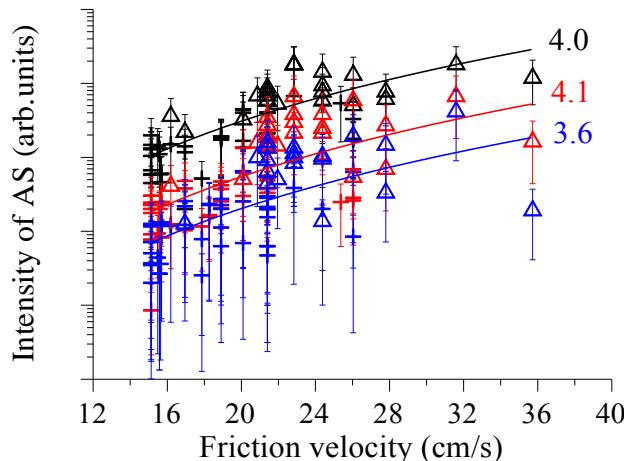
$$I_s \approx 2.6 \cdot 10^{-11} \cdot u^{*3.8} k_{br}^{0.8}$$

$$I_s \approx 1.5 \cdot 10^{-10} \cdot u^{*3.3} k_{br}^{0.6}$$

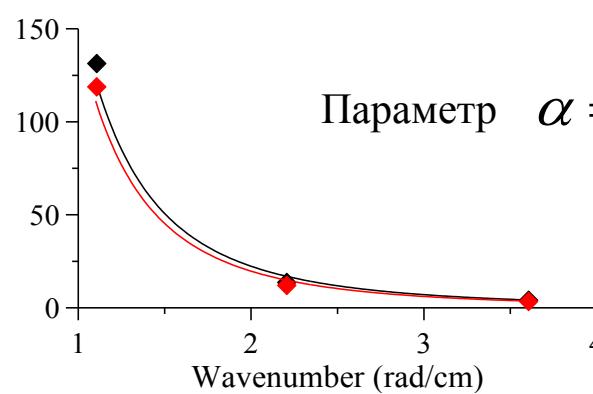
$$u^*(V_{wind}) \text{ см/с}$$

$$k_{br} \text{ rad/cm}$$

Параметр $\alpha = \alpha(k)$

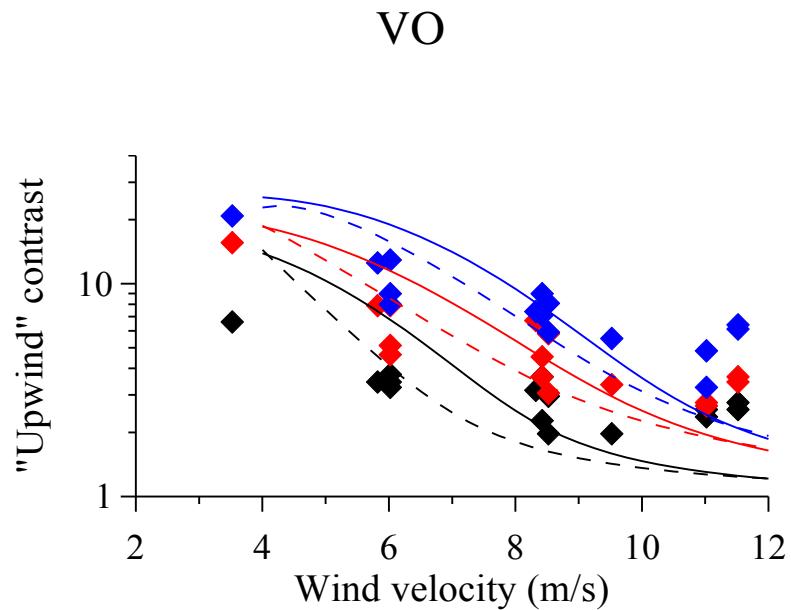
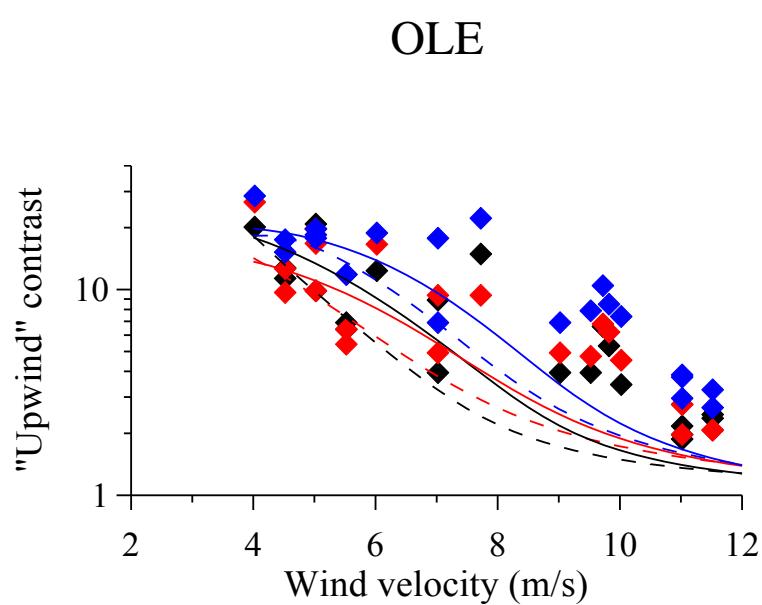


$n=2.2/1.2/1.$ S/C/X bands [V.N. Kudryavtsev et al. 2003]



Черная кривая - D. Vickers et al., 2015]
Красная - [E.L. Andreas et al. 2012]

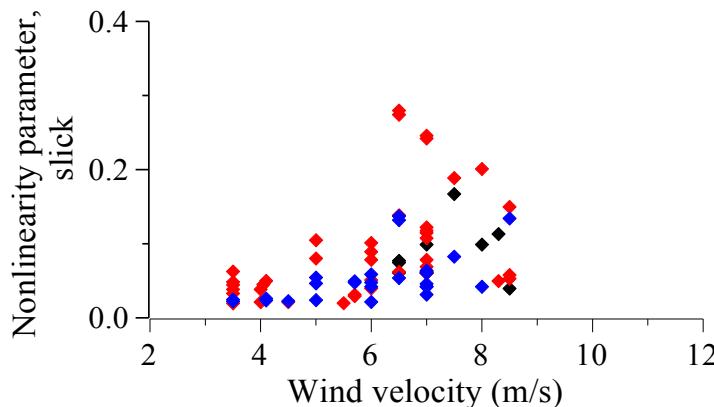
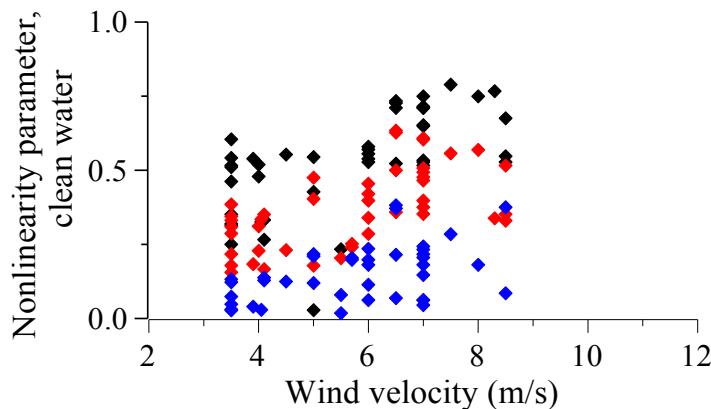
Рассчитанные контрасты в сликах для наблюдения навстречу ветру



Вклад разных слагаемых в уравнении баланса для ВД в формирование спектра волнения

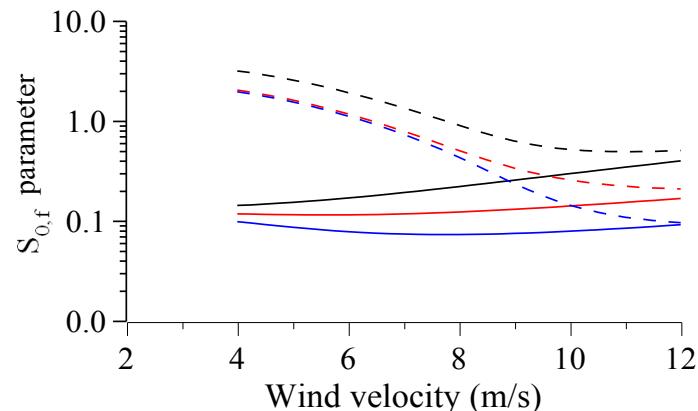
Вклад нелинейного слагаемого
при наблюдении поперек ветра

$$R_{0,f}^{nl} = \frac{(\alpha B_{0,f})^n}{\gamma_{0,f} + (\alpha B_{0,f})^n}$$

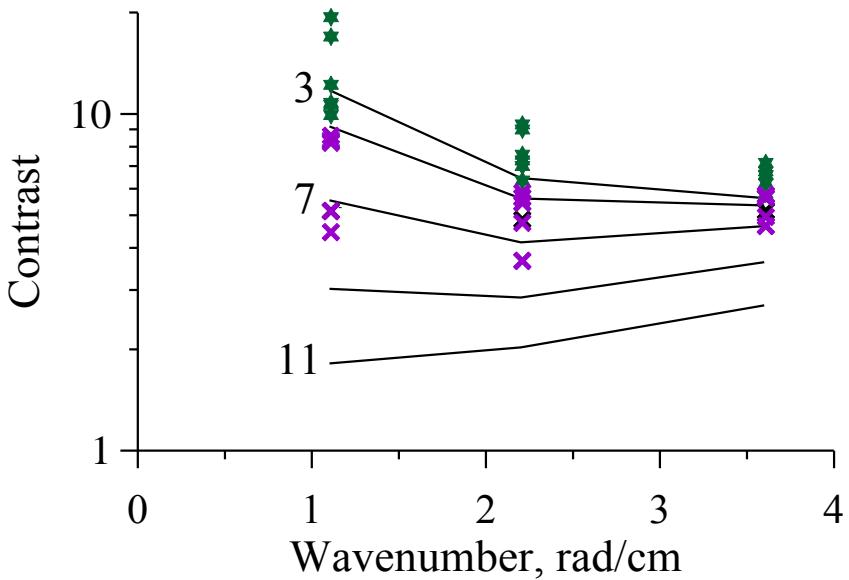


Вклад дополнительного источника
при наблюдении навстречу ветру

$$S_{0,f} = \frac{I_s}{\beta B_{0,f}}$$



Контрасты при наблюдении поперек ветра для скоростей ветра от 3 м/с до 11 м/с



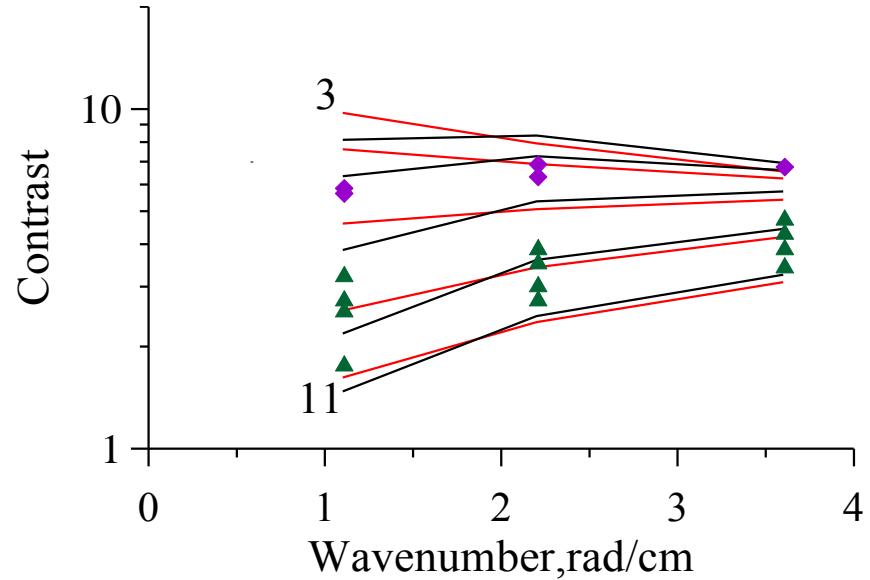
Расчет для OLE

$$E = 25 \text{ mN/m}$$

$$\sigma = 32 \text{ mN/m}$$

Зеленые звездочки – 3м/с

Фиолетовые кресты – 7 м/с



Расчет для VO

$$E = 10 \text{ mN/m}$$
 Черные кривые

$$E = 15 \text{ mN/m}$$
 Красные кривые

$$\sigma = 40 \text{ mN/m}$$

Зеленые треугольники – 11м/с

Фиолетовые ромбы – 7 м/с

Заключение

- Для случая недостаточной ветровой накачки (например, в пленочных сликах, при наблюдении поперек ветра) предложено эмпирическое выражение для дополнительного источника коротких гравитационно-капиллярных волн в виде степенной функции безразмерного параметра возраста волн. Показано, что источник можно считать изотропным и независящим от наличия пленки (до упругостей пленки ~ 25 мН/м) на морской поверхности.
- Показано, что дополнительным источником можно пренебречь при наблюдении чистой поверхности в направлении навстречу ветру при умеренных ветрах. В областях пленочных сликов вклад дополнительного источника значителен. Контраст брегговской компоненты при наблюдении поперек ветра имеет качественно различное поведение для разных упругостей пленки. При маленькой упругости (10 мН/м и менее), контраст увеличивается с увеличением волнового числа, при большой упругости уменьшается, что хорошо согласуется с результатами натурных экспериментов при умеренном ветре. Эффект может быть использован для диагностики пленок ПАВ трехчастным радаром S/C/X диапазонов.