

Исследование брэгговской компоненты рассеяния микроволн под умеренными углами

И.А. Сергиевская^{1,2,3}, С.А. Ермаков^{1,2,3}, Л.М. Плотников^{1,3},
И.А. Капустин^{1,2,3} А.В. Купаев¹

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

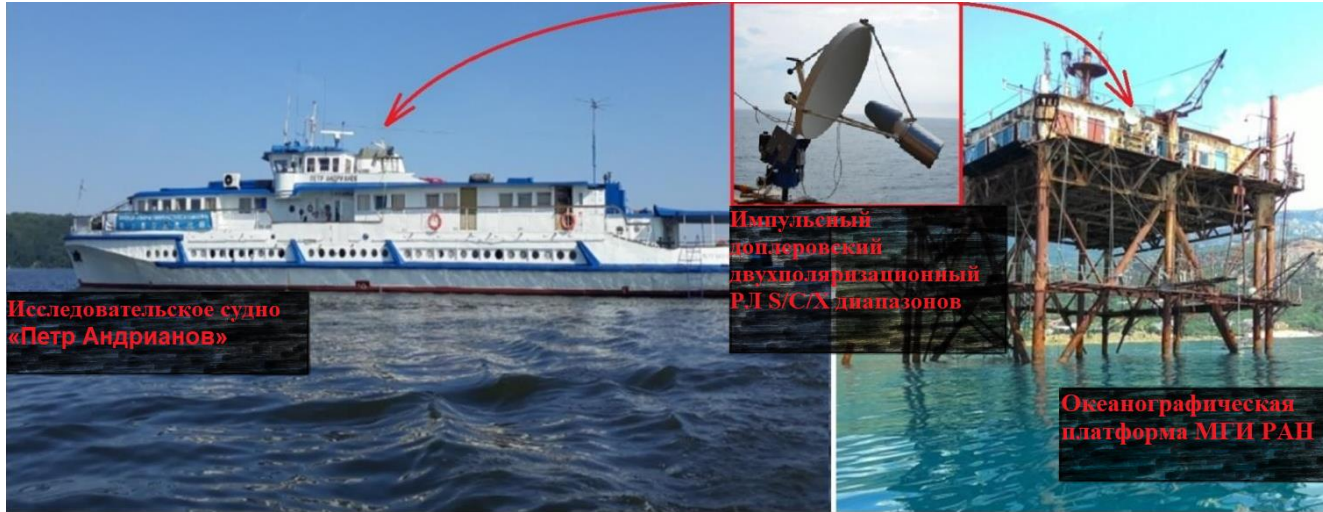
²*Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород*

³*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород,*

E-mails: i.sergia@ipfran.ru, l.plotnikov@ipfran.ru

В работе проведен анализ результатов натуральных экспериментов по радиолокационному мониторингу сликов ПАВ на Черном море с платформы МГИ РАН и на Горьковском водохранилище с борта исследовательского судна, полученных в 2017-2022 годах. Используемые данные были получены с помощью двухполяризационного радара, работающего в S/C/X диапазонах, что позволяло в рамках композитной модели рассеяния определять брэгговскую компоненту сигнала. Наблюдения проводились при отражении радиоволн от чистой поверхности и от поверхности, покрытой пленкой олеиновой кислоты, физические характеристики которой известны, в направлении навстречу и поперек ветру под углом падения порядка 60° при скоростях ветра 4-12 м/с. Характерной особенностью используемых данных была сильная зависимость степени уменьшения брэгговской компоненты в сликах с увеличением скорости ветра при наблюдении навстречу ветру по сравнению с наблюдениями поперек. На основе *анализа затухания брэгговских волн*, распространяющихся поперек ветра, когда их возбуждение непосредственно ветром практически отсутствует, получено эмпирическое выражение для дополнительного источника, связанного с более длинными, чем брэгговские, волнами. Показано, что дополнительный длинноволновый источник изотропен. Найденное эмпирическое выражение имеет вид степенной функции инкремента ветрового возбуждения волн, распространяющихся по ветру. Полученное выражение может быть использовано для развития моделей гашения волн пленками ПАВ, пластиковым мусором, начальными формами льда и т.д. и для создания систем обнаружения и распознавания загрязнений и других неоднородностей на морской поверхности.

Методология измерений и обработки



Композитная модель [Phillips, 1988]

Брэгг

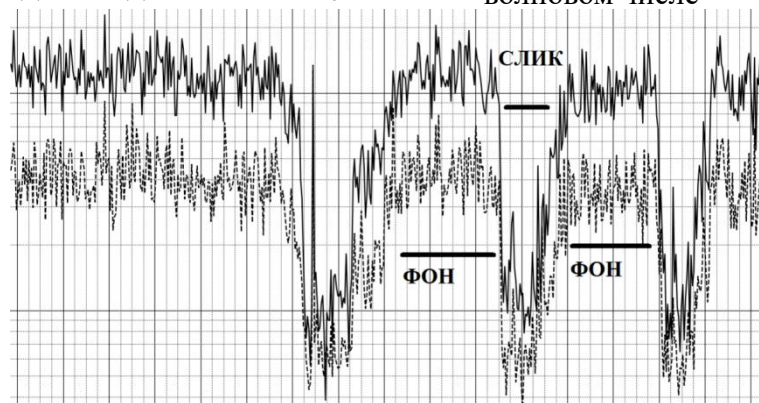
Небрэгг

Измеренная УЭПР $\sigma_{VV,HH}^0 = \sigma_{B_VV,HH}^0 + \sigma_{NBC}^0$

Поляризационная разность $PD = \sigma_{VV}^0 - \sigma_{HH}^0 = 16\pi k_e^4 (g_{VV}^2 - g_{HH}^2)(\theta) F(k_{br})$

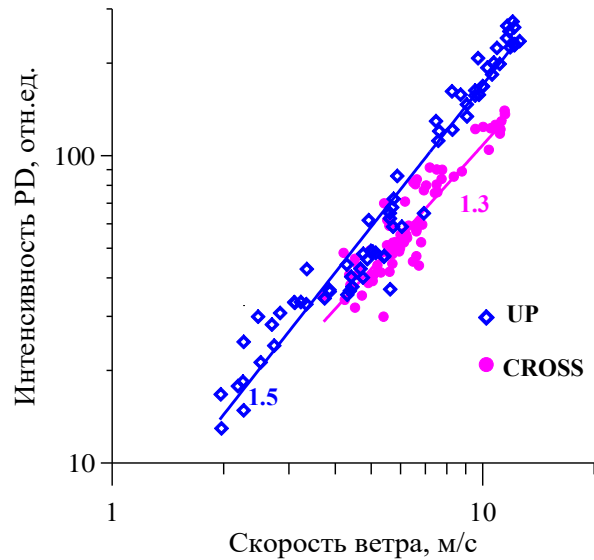
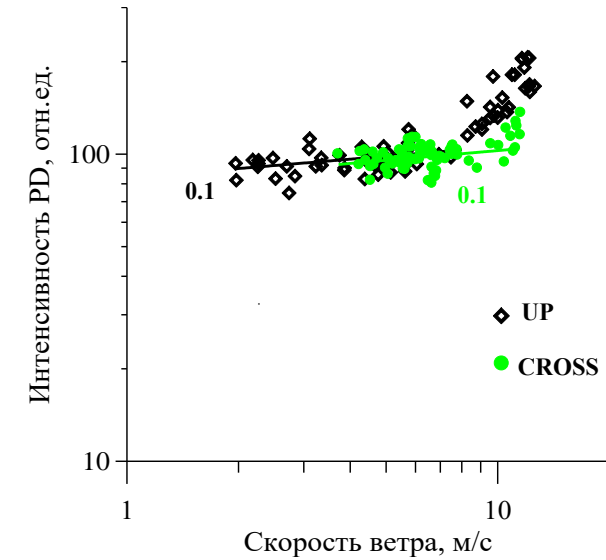
Спектр на брэгговском волновом числе $k_{br} = 2k_e \sin \theta$

$$K = \frac{PD_{фон}}{PD_{слик}} = \frac{F_{фон}(k_{br})}{F_{слик}(k_{br})}$$

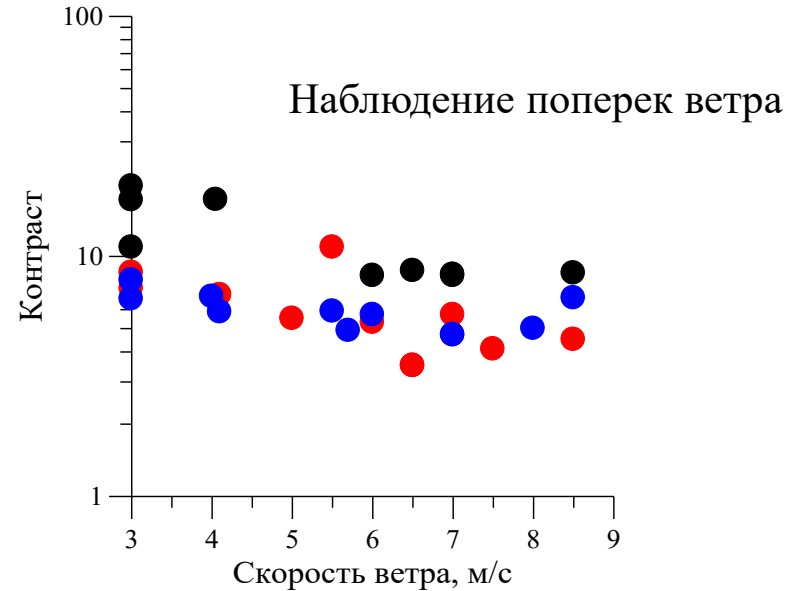
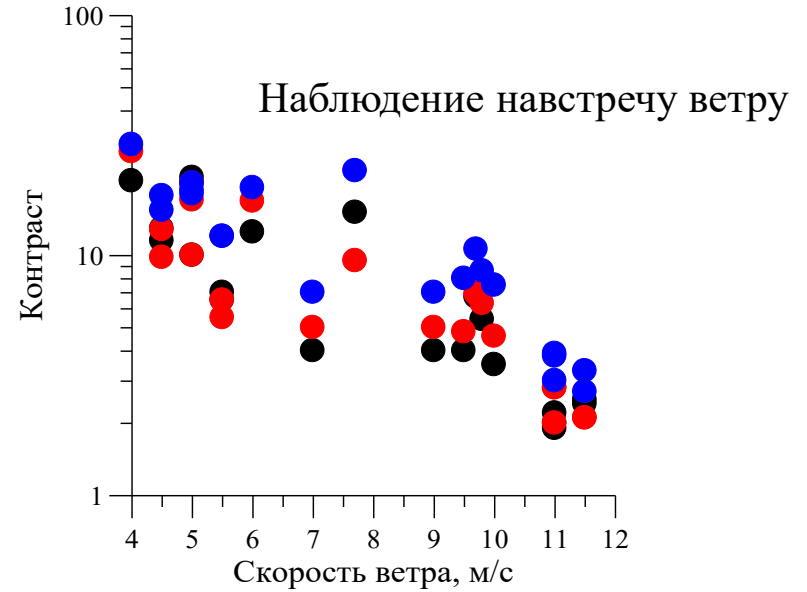


Результаты обработки

Зависимость интенсивности PD от скорости ветра на чистой поверхности. S-диапазон (сверху) и X-диапазон (снизу)



Контрасты PD, полученные в экспериментах с олеиновой кислотой



Полуэмпирическая модель

Баланс волновой энергии брэгговских волн

Спектральная плотность
волнового действия

$$N(k_{br}) = F(k_{br})\omega(k_{br})/k_{br}$$

Безразмерный инкремент
волнового роста

$$\beta(u^*, k_{br}, \varphi) = C_\beta \frac{(k_{br}u^*)^2}{\omega^2(k_{br})} \cos(\varphi)$$

Дополнительный
«длинноволновый» источник

$$\beta(u^*, k_{br}, \varphi)N(k_{br}) - 2\gamma(E, \sigma, k_{br})N(k_{br}) - N(k_{br}) \cdot (\alpha N(k_{br}))^{n(k_{br})} + I_s = 0$$

Коэффициент гашения

$$\gamma(E, \sigma, k_{br}) = 2\nu k_{br}^2 D(E, \sigma)$$

Нелинейные взаимодействия

φ - Угол между направлением наблюдения и ветром

Наблюдение поперек ветра

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \quad \beta(u^*, k_{br}, \pi/2) = 0$$

Волны напрямую ветром не возбуждаются,
Единственный источник энергии волн –
длинноволновый источник

$$-\gamma_0 F_0 - F_0 (\alpha F_0)^{n(k_{br})} + I_s = 0 \quad \text{Баланс волновой энергии на чистой поверхности}$$

$$-\gamma_f F_f - F_f (\alpha F_f)^{n(k_{br})} + I_s = 0 \quad \text{Баланс волновой энергии в слике}$$

Контраст волн в слике $K = F_0 / F_f$



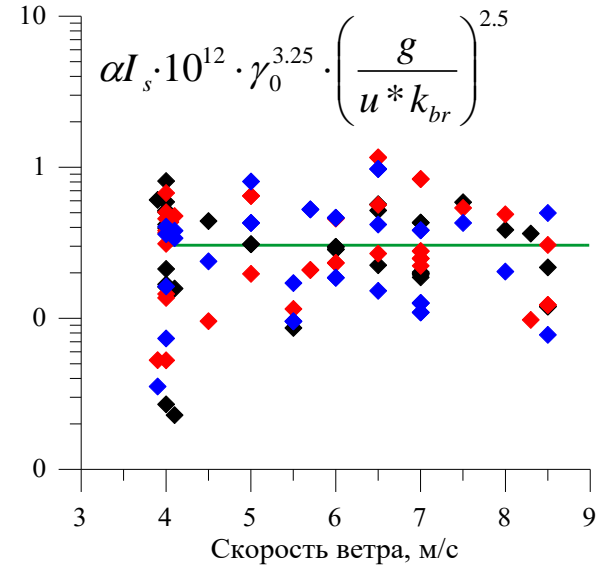
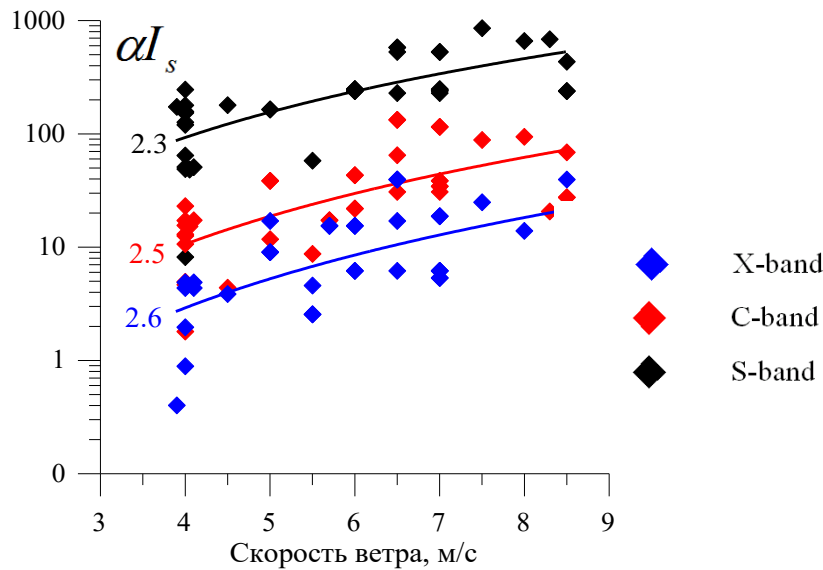
МОЖНО ОПРЕДЕЛИТЬ

$n(k_{br}) = 1; 1.2; 2.5$ (X/C/S -bands)

[Kudryavtzev, 2003]

$$\alpha F_0 = \left(\frac{(\gamma_f / K - \gamma_0)}{1 - 1/K^{n(k_{br})+1}} \right)^{1/n(k_{br})} \quad \alpha I_s = \alpha \gamma_0 F_0 + (\alpha F_0)^{n(k_{br})+1}$$

Выражение для длинноволнового источника



Определенная по измеренным контрастам I_S

Кривые- аппроксимация степенной функцией, цифры -степени

$$\text{Ищем } I_S \text{ в виде } f(p), \text{ где } p = \frac{u^* k_{lw}}{w} = \frac{u^* k_{br} s}{w} = \frac{u^* \sqrt{k_{br} s}}{\sqrt{g}} = \sqrt{s} \cdot \frac{u^* \sqrt{k_{br}}}{\sqrt{g}}$$

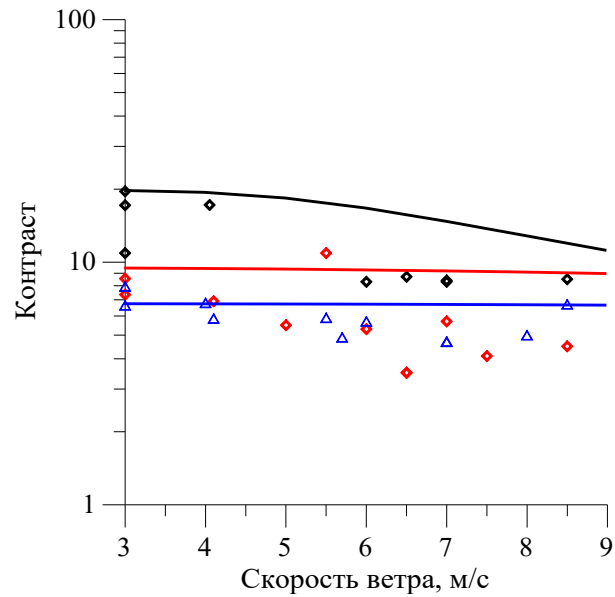
k_{br} - брэгговское в.ч.
 k_{lw} -в.ч. длинных волн

$$k_{lw} = k_{br} \cdot s$$

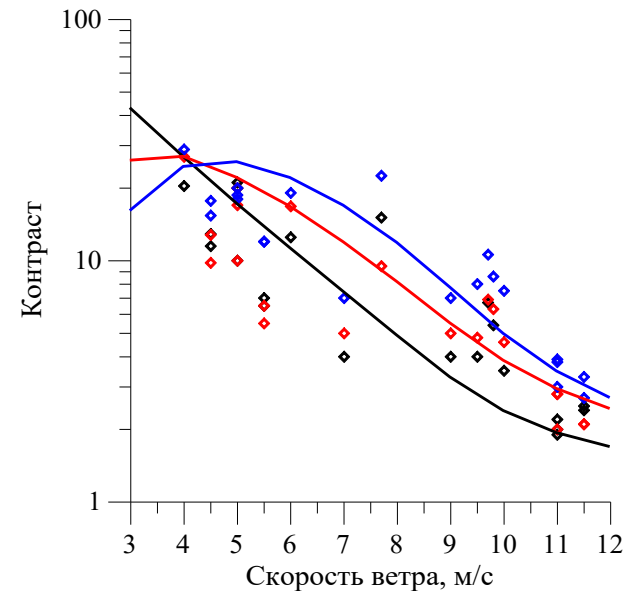
$$\alpha I_s = 0.3 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{u^* k_{br}}{g}\right)^{2.5} \cdot \frac{1}{\gamma_0^{3.25}}$$

$\frac{u^* k_{lw}}{w}$ Определяет в основном зависимость безразмерного инкремента ветрового роста для длинных волн

Сравнение измеренных (точки) и рассчитанных контрастов с использованием предложенной аппроксимации для источника



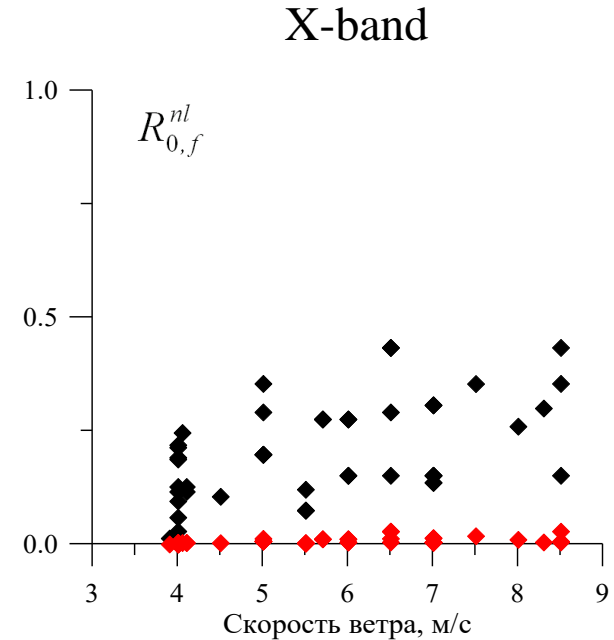
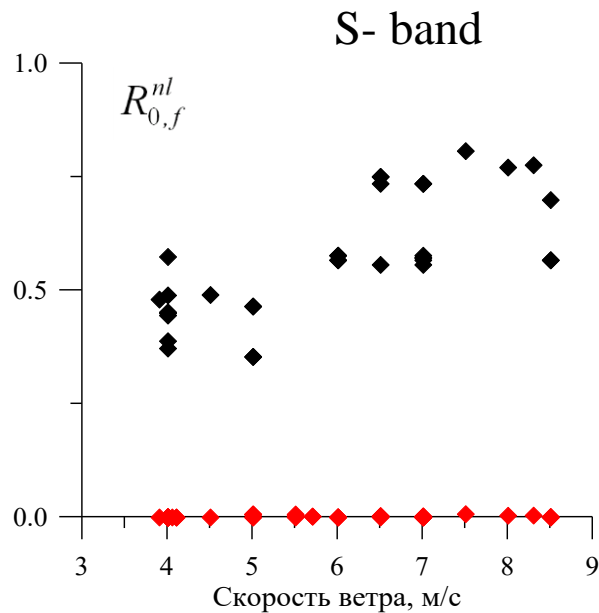
Наблюдение поперек ветра



Наблюдение навстречу ветру

Оценка вклада нелинейных взаимодействий в затухание ветровых волн, распространяющихся *поперек* ветра

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



В слике можно пренебречь собственной нелинейностью, на чистой воде - нельзя

Выводы

На основе анализа данных натуральных экспериментов по *РЛ* мониторингу чистой поверхности и областей, покрытых пленкой ПАВ, в направлении поперек ветра получено выражение для интенсивности длинноволнового источника брэгговских волн, определяющего генерацию в отсутствие ветровой накачки. Показано, что источник изотропен, о чем свидетельствует хорошее согласие измеренных и рассчитанных с использованием предложенного выражения контрастов брэгговской компоненты при наблюдении как поперек, так и навстречу ветру.

Показано, что основным механизмом гашения **ветровых** волн, распространяющихся **поперек** ветра в пленочных сликах, является вязкое затухание. На чистой поверхности затухание коротких ветровых ГКВ определяется, как вязкостью, так и нелинейными взаимодействиями, чем длиннее брэгговская волна и чем больше скорость ветра, тем больше вклад нелинейного механизма в затухание волн.

Полученные результаты могут быть использованы для корректного анализа РЛ изображений морской поверхности, для развития моделей гашения волн пленками ПАВ, в т.ч. биогенными пленками, а также пластиковым мусором, начальными формами льда и т.д. и для создания систем обнаружения и распознавания загрязнений и других неоднородностей на морской поверхности с использованием искусственного интеллекта

Данные натуральных экспериментов по радиолокационному мониторингу сликов получены в рамках проекта РФФ N 18-17-00224 и гранта Минобрнауки РФ N 075-15-2020-776. Анализ экспериментальных данных и развитие эмпирической модели дополнительного источника ветровых волн поддержано проектом РФФ N 23-17-00167.