



СВЯЗЬ НЕБРЭГГОВСКОЙ КОМПОНЕНТЫ МИКРОВОЛНОВОГО РЛ РАССЕЯНИЯ С КОРОТКИМИ ДМ ВЕТРОВЫМИ ВОЛНАМИ

И. СЕРГИЕВСКАЯ(1), С.ЕРМАКОВ(1,2), И. КАПУСТИН(1), О. ШОМИНА(1)
(1) ИПФ РАН, (2) ВГУВТ



Работа посвящена исследованию обратного рассеяния микроволнового излучения от ветровых волн. Натурные исследования проводились в прибрежной зоне Черного моря с использованием двухполяризованных доплеровских скаттерометра X-диапазона и X-, C-, S - радара . Углы падения локаторов составляли от 50 до 60 градусов, скорость ветра менялся в широком диапазоне. Согласно используемой модели предполагается, что микроволновое обратное рассеяние на VV и HH поляризациях определяется брэгговской (поляризованной) компонентой, связанной с брэгговскими волнами, и неполяризованной компонентой (NBR). Анализ доплеровских спектров NBR позволяет удалить из временного ряда рассеяние на сильных редких обрушениях (опрокидывающиеся гребнях волн) и изучать обратное рассеяние из областей вне обрушений. Одновременно с РЛ мониторингом проводились измерения ветровых волн с помощью струнного волнографа. Показано, что скорости небрэгговских рассеивателей, не связанных с сильным обрушениями, в X-, C-, S - диапазонах соответствуют скоростям коротких дм волн и слабо зависят от диапазона. Интенсивность NBR растет с увеличением скорости ветра, также как и интенсивность дм-волн, измеренная струнным волнографом. В работе приведен пример одновременного сильного понижения NBR и уменьшения интенсивности коротких дм волн в пленочных сликах, что подтверждает тот факт, что интенсивность NBR X-, C-, S -диапазонах определяется дм волнами.

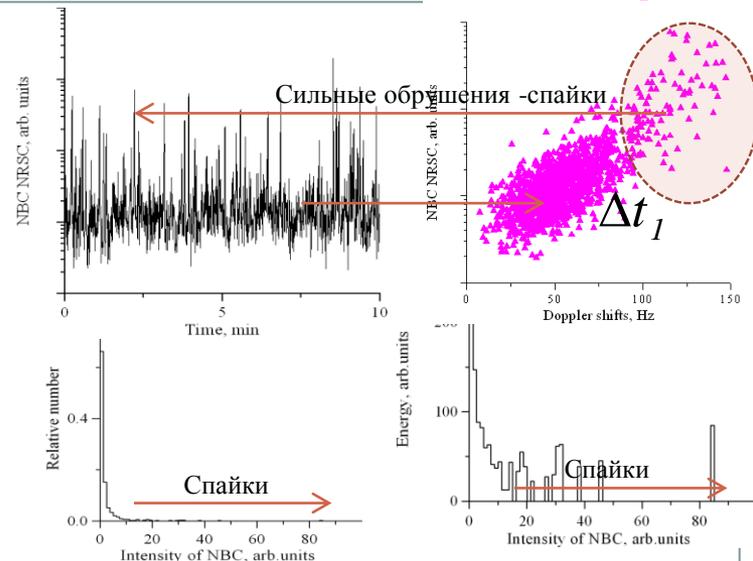
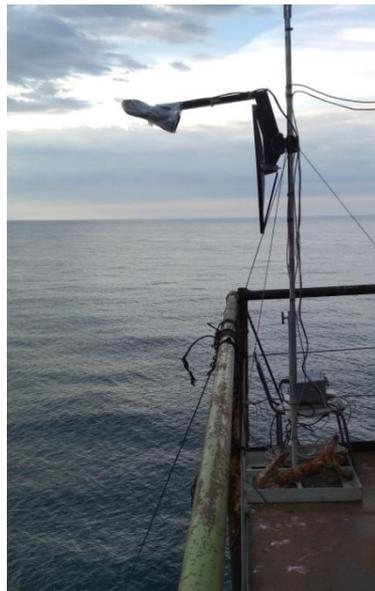
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (19-05-00605, 18-45-520008) и ФАНО (0030-2021-0006).

Что было известно. Исследования NBR (X-band) при умеренных ветрах показали, что существуют два типа рассеивателей: сильные редкие всплески, глазом ассоциируемые с сильными обрушениями (барашками) и рассеиватели на микрообрушениях

1. Sergievskaya, I.; Ermakov, S.; Ermoshkin, A.; Kapustin, I.; Molkov, A.; Danilicheva, O.; Shomina, O.V. Modulation of Dual-Polarized X-Band Radar Backscatter Due to Long Wind Waves. *Remote Sens.* 2019, 11(423).

2. I.A. Sergievskaya, S.A. Ermakov, A.V. Ermoshkin, I.A. Kapustin, O.V. Shomina, A.V. Kupaev, The Role of Micro Breaking of Small-Scale Wind Waves in Radar Backscattering From Sea Surface *Remote Sens.* 2020, 12(24).

3. S. A. Ermakov, I. A. Sergievskaya, V. A. Dobrokhotov and T. N. Lazareva, "Wave Tank Study of Steep Gravity-Capillary Waves and Their Role in Ka-Band Radar Backscatter," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, doi: 10.1109/TGRS.2021.3086627.



Гистограммы числа точек с заданной интенсивностью (слева) и суммарной интенсивности (справа)

КМРЛ – доплеровский двухполяризационный радиолокатор X-, C-, S- диапазонов

σ_{VV}^{RR} σ_{HH}^{RR} интенсивности

$$R(\theta) = \frac{g_{VV}^2(\theta)}{g_{HH}^2(\theta)}$$

U_{HH} U_{VV} скорости рассеивателей (ц.т. доплеровских спектров)

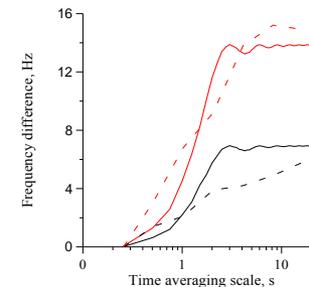
$$PR = \sigma_{VV}^{RR} / \sigma_{HH}^{RR}$$

$$F(k_{br}) = \frac{\sigma_{HH}^{RR} - \sigma_{VV}^{RR}}{16\pi k_r^4 (g_{VV}^2 - g_{HH}^2)}$$

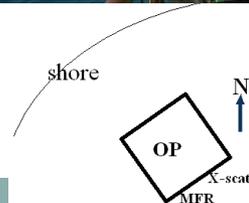
$$U_{BR} = \frac{U_{VV}\sigma_{VV}^{RR} - U_{HH}\sigma_{HH}^{RR}}{(\sigma_{VV}^{RR} - \sigma_{HH}^{RR})}$$

$$\sigma_{NBR} = \frac{R\sigma_{HH}^{RR} - \sigma_{VV}^{RR}}{R-1}$$

$$U_{NBR} = \frac{U_{VV}\sigma_{VV}^{RR} - U_{HH}\sigma_{HH}^{RR} \cdot R}{(\sigma_{VV}^{RR} - \sigma_{HH}^{RR} \cdot R)}$$

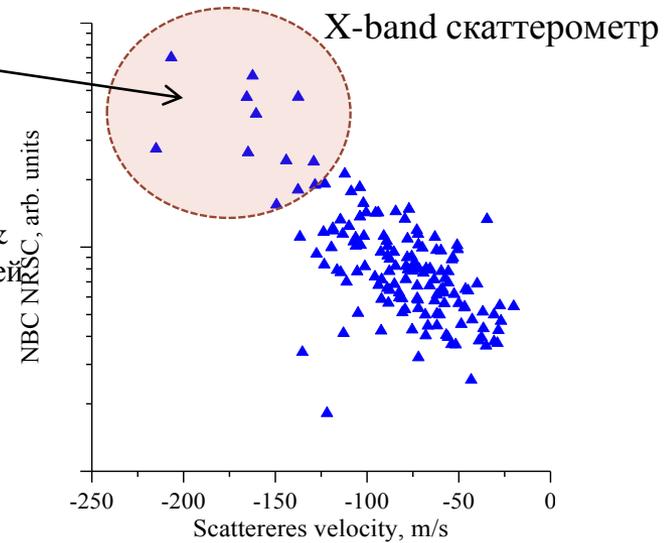
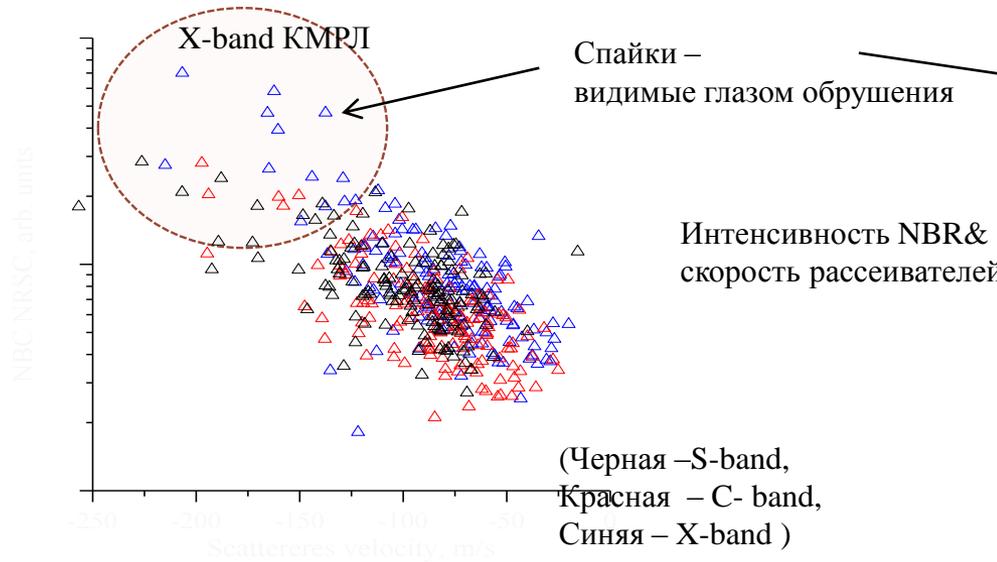
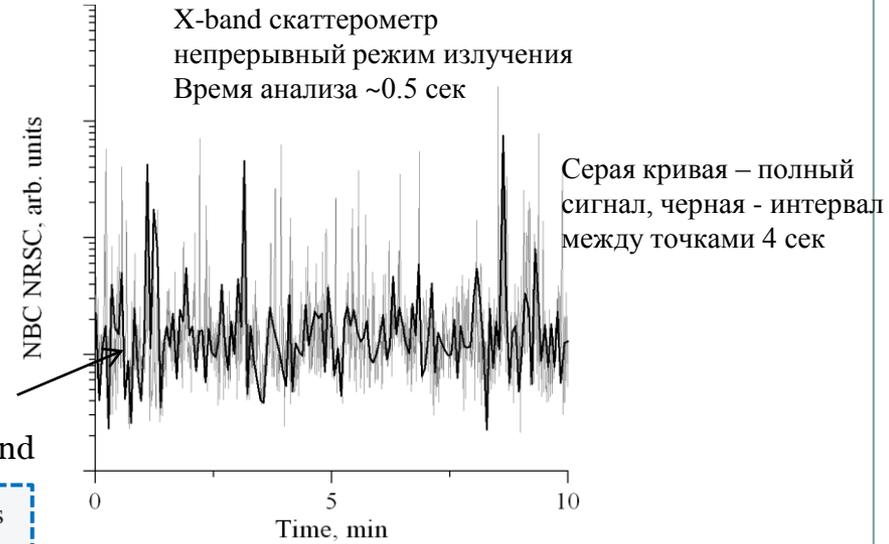
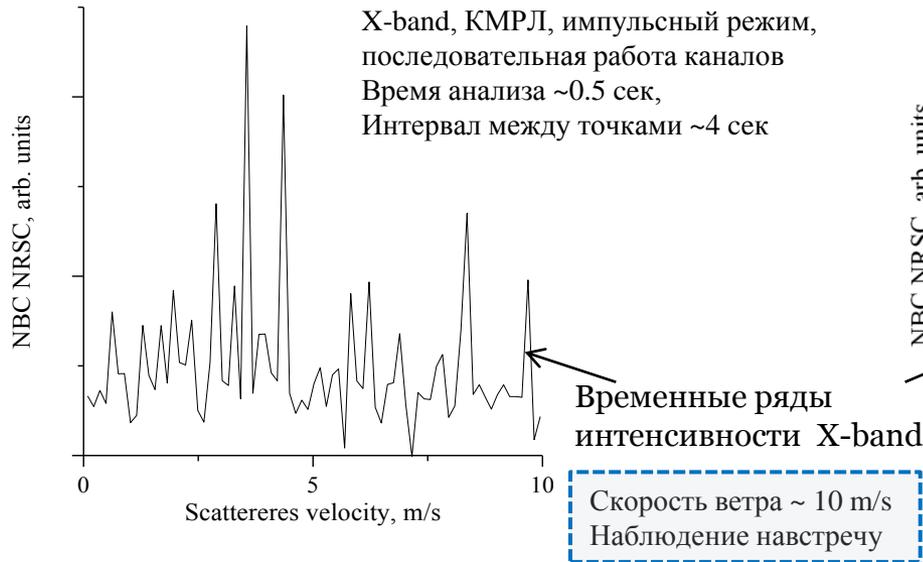


Зависимость разницы между измеренным доплеровским сдвигом и доплеровским сдвигом, определяющим среднюю скорость рассеивателей, от времени анализа спектра. Черная – чистая поверхность, красная – пленка.



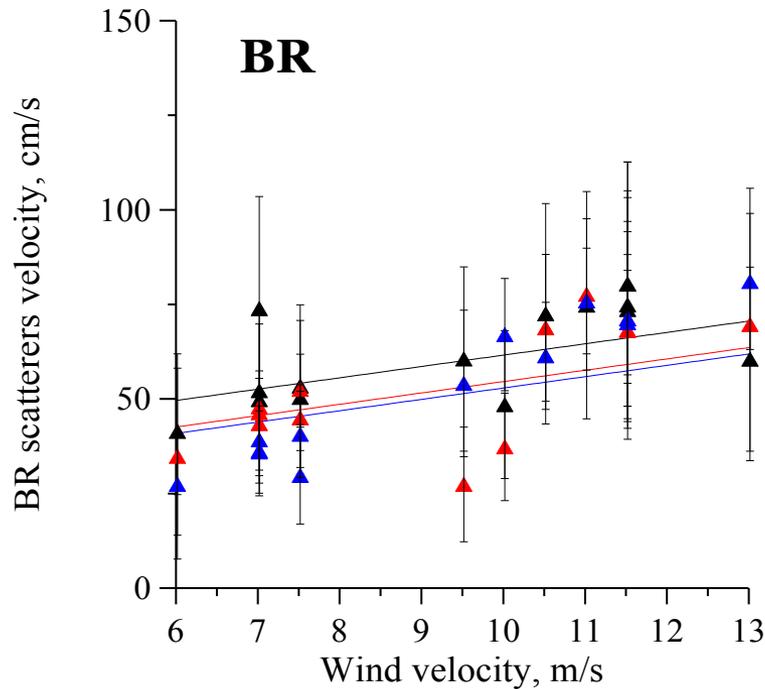
Сравнение между КМРЛ и X-скаттерометром

Направления наблюдения параллельны, радары смотрят в разные области на поверхности

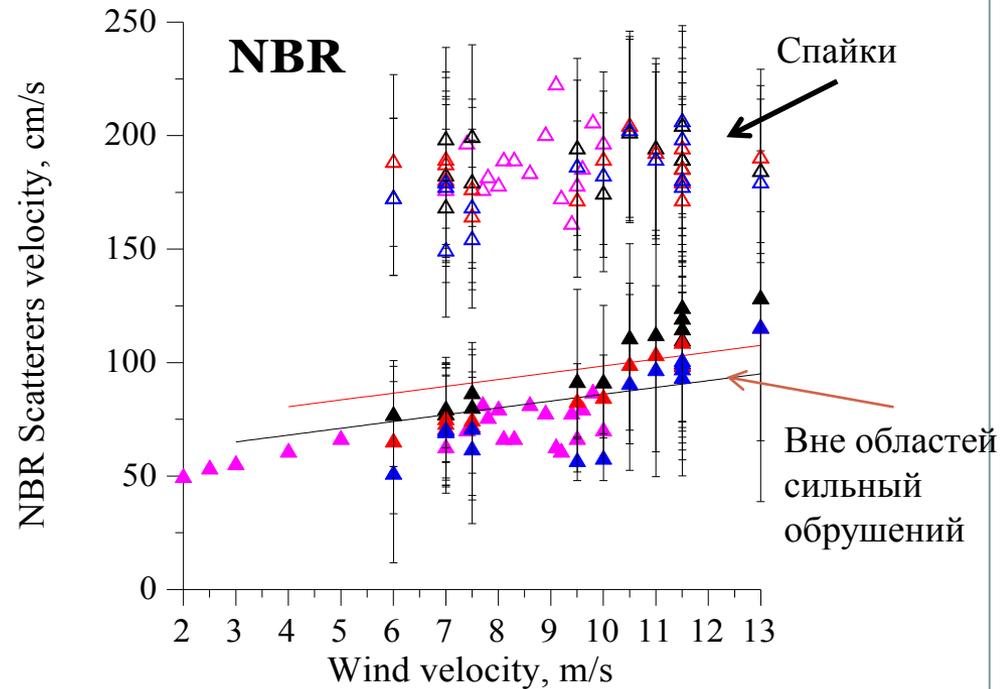


Средние скорости рассеивателей от скорости ветра

Наблюдение навстречу ветру



Линии – скорости свободных брэгговских волн + 3% от скорости ветра



Линии – скорости свободных волн длиной 20 см (черные) и 30 см (красные) + 3% от скорости ветра

КМРЛ

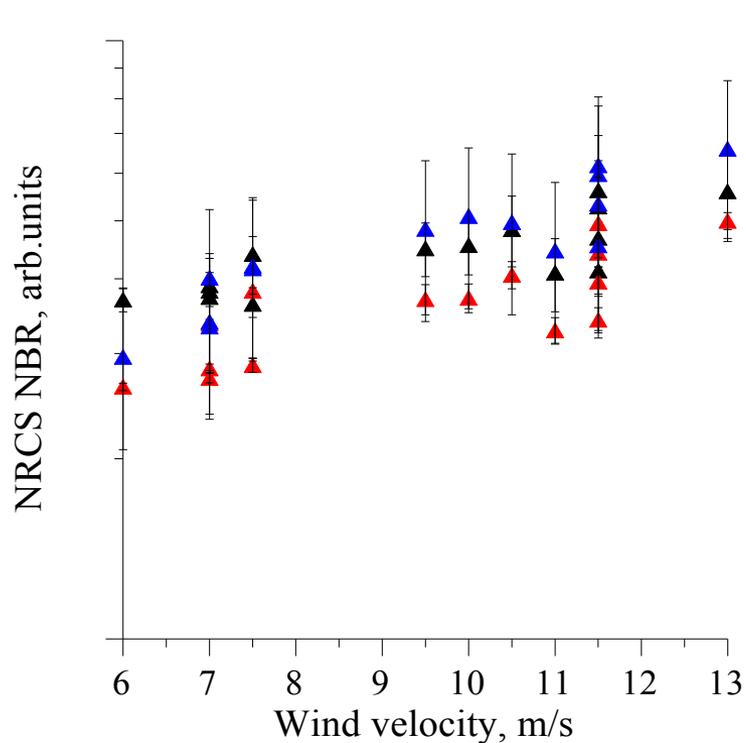
- ▲ X-band
- ▲ C-band
- ▲ S-band

▲ X-band scatterometer

Пустые точки - спайки

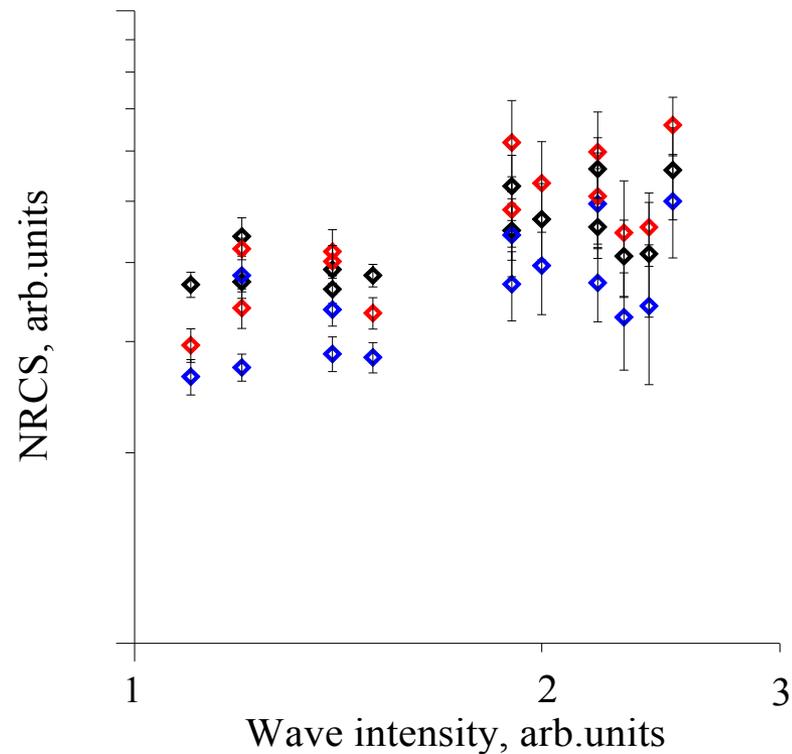
Связь между NBR и дм волнами

Наблюдение навстречу ветру



Интенсивность **NBR** & скорость ветра

- ▲ X-band
- ▲ C-band
- ▲ S-band

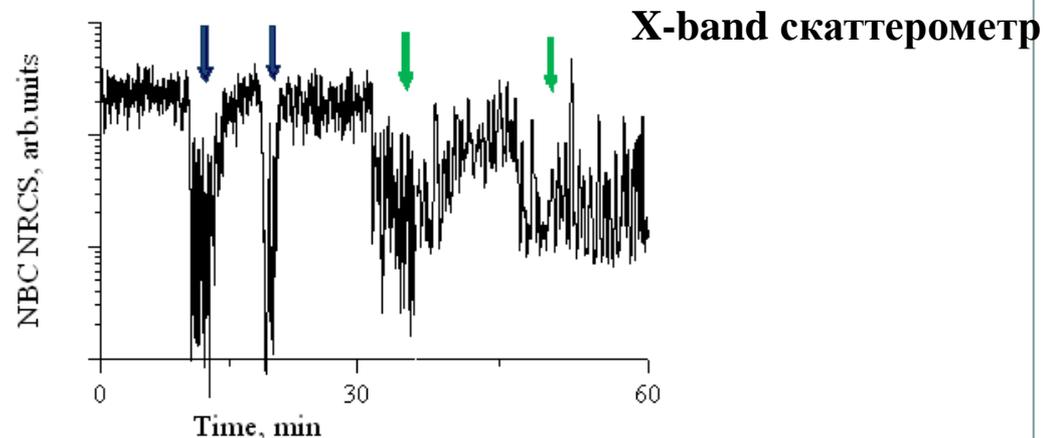
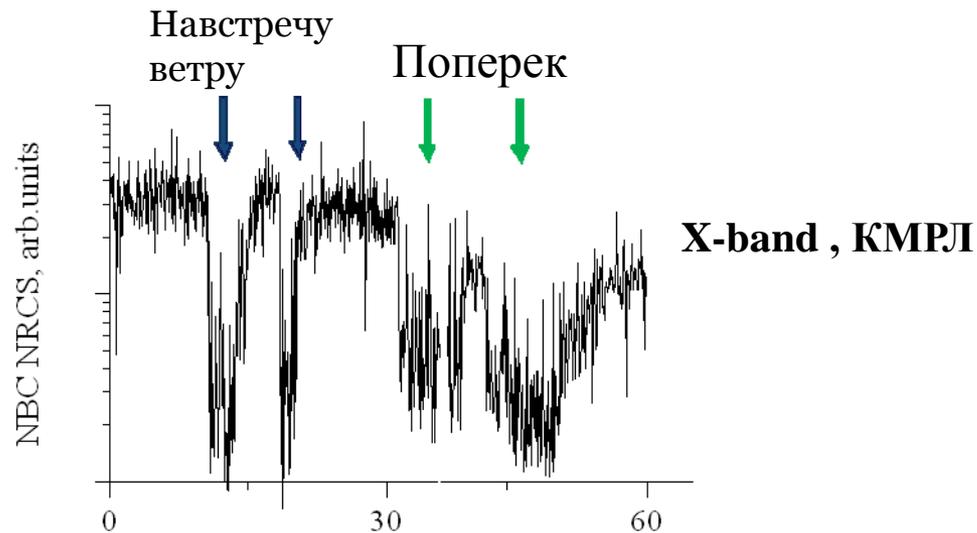
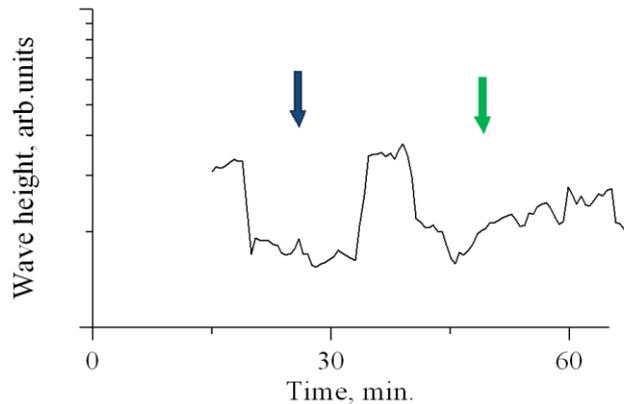


Интенсивность **NBR** & интенсивность ветровых волн в диапазоне 2-3 Гц (17-33 см) по данным волнографа

Эксперимент с искусственным сликом олеиновой кислоты



Волнограф, 2 -3 Гц (17-33 см)



Слики разливались с катера в 200 м от платформы, попарно (обозначены одним цветом) слились при подходе к платформе (место установки волнографа).

Заключение

Натурные эксперименты показали:

- **интенсивность NBR в X-, C-, S- диапазонах возрастает с увеличением скорости ветра и слабо зависит от длины волны радара;**
- **скорости брэгговских рассеивателей близки к скоростям свободных брэгговских волн с учетом ветрового сноса;**
- **скорости небрэгговских рассеивателей увеличиваются со скоростью ветра, слабо зависят от длины волны радара для обеих компонент (в зонах сильных обрушений и вне их). Близость скоростей рассеивателей NBR вне зон обрушений к скоростям коротких дм-волн позволяет сделать вывод, что возврат радара NBR в X-, C-, S- диапазонах определяется интенсивностью коротких дм-волн.**