

# Исследования нерезонансного механизма радиолокационного рассеяния от взволнованной водной поверхности с использованием доплеровских радиолокаторов СВЧ-диапазона

И.А.Сергиевская, В.А. Ермошкин, И.А. Капустин, А.В. Купаев  
ИПФ РАН, Нижний Новгород [i.sergia@ipfran.ru](mailto:i.sergia@ipfran.ru)

Исследования вклада небрэгговского рассеяния в полное рассеяние волн микроволнового радиодиапазона на НН и VV поляризациях при умеренных углах падения проводились в овальном ветро-волновом бассейне ИПФ РАН и с океанической платформы МГИ РАН (п. Кацивели, Крым).

## Теоретический Background

Вклад небрэгговской компоненты оценивался в рамках модели [Kudryavtzev, 2003], исходя из предположения, что полное рассеяние есть сумма Брэгговской и небрэгговской компонент  $\sigma_{VV,HH}^0 = \sigma_{B\_VV,HH}^0 + \sigma_{NBC}^0$ .

Небрэгговская компонента  $NBC = \sigma_{NBC}^0 = \frac{\sigma_{VV}^0 - R\sigma_{HH}^0}{1-R} = \sigma_{HH}^0 \frac{PR-R}{1-R}$ , здесь поляризационное отношение

$PR = \sigma_{VV}^0 / \sigma_{HH}^0$ , где  $R = \frac{g_{VV}^2}{g_{HH}^2}$  - поляризационное отношение в рамках Брэгговской модели.  $1 < PR < R$

Относительный вклад небрэгговской компоненты (NBC) в рассеяние на НН поляризации

$$NBC_{-HH} = \frac{R-PR}{R-1}$$

Относительный вклад небрэгговской компоненты (NBC) в рассеяние на VV поляризации

$$NBC_{-VV} = \frac{R-PR}{R-1} \cdot \frac{1}{PR}$$

## 1. Лабораторные исследования

Проводились с помощью доплеровского скаттерометра Ка-диапазона, работающего на одной поляризации. Для определения усредненной интенсивности РЛ сигнала на разных поляризациях скаттерометр поворачивали на 90 град.

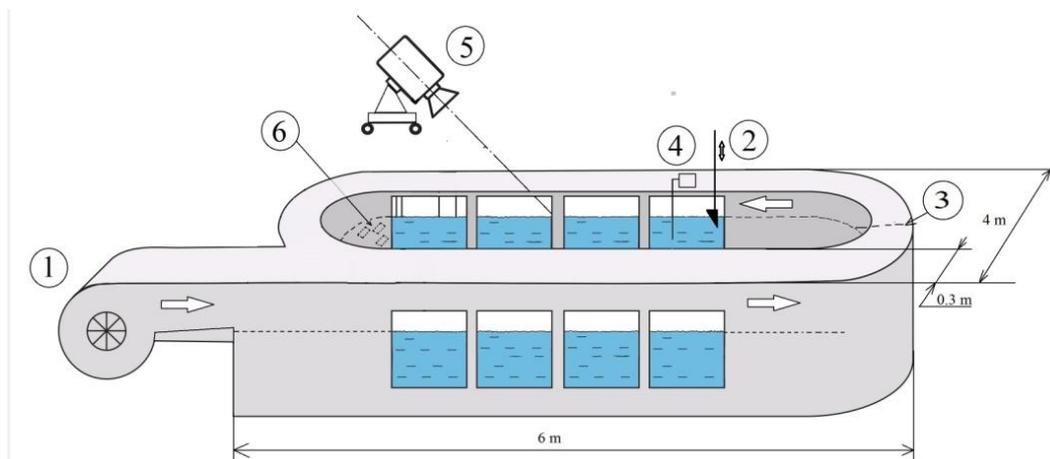
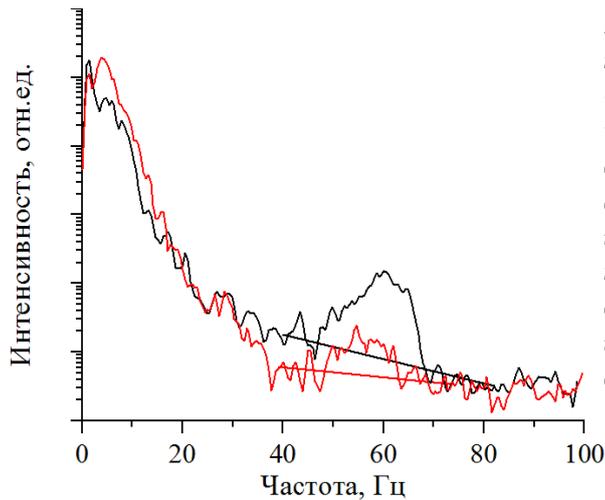
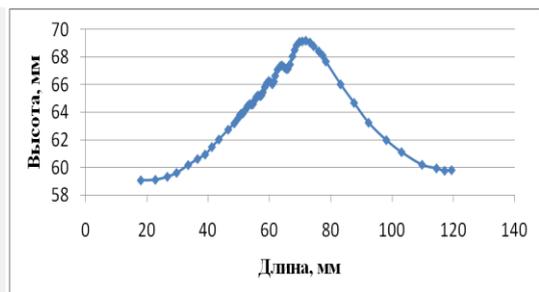
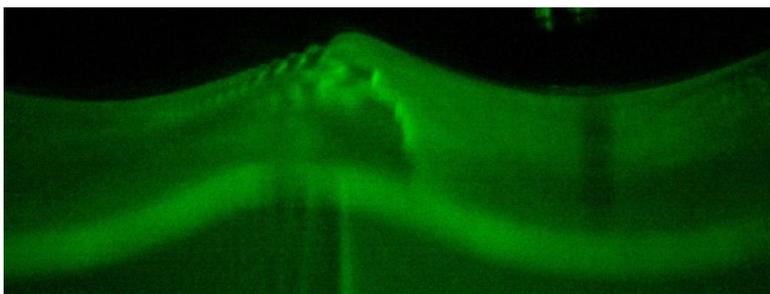


Схема лабораторного бассейна: 1-генератор воздушного потока, 2- волнопродуктор, 3 – пляж для ограничения разгона, 4-струнный волнограф, 5- радиолокатор Ка- диапазона (угол падения излучения 55 град.), 6 – пляж для гашения ГКВ.

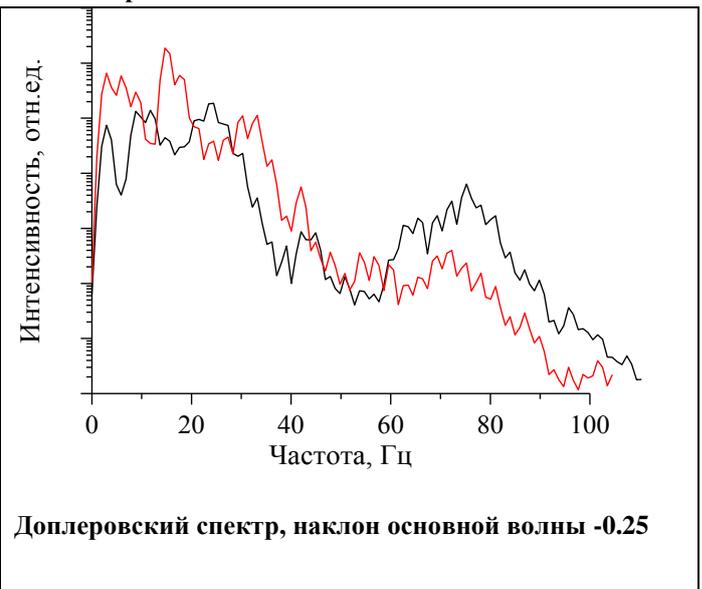
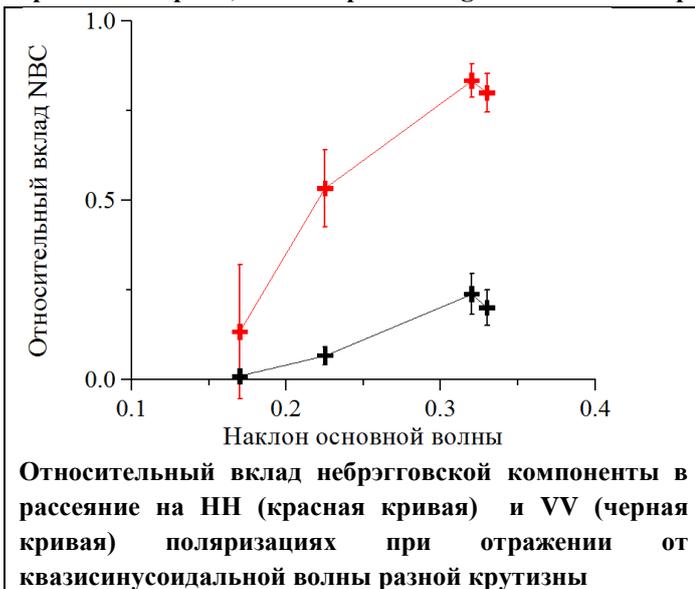


Пример определения интенсивности рассеяния на HH (красная кр.) и VV (черная кр.) поляризациях по доплеровским спектрам. Скорость ветра 1.2 м/с, малый разгон. Сигнал на низких частотах (до 40 Гц) связан с переотражением от оборудования в лаборатории. Интенсивность отражения от волнения определяется в частотном диапазоне 45 – 75 Гц. Прямые в интервале 40 – 75 Гц – выбранный уровень шума, вычитается при обработке. Ошибка при определении уровня шума (в основном на HH поляризации) приводит к ошибке в определении интенсивности около 20%. В данном примере поляризационное отношение равно 15.

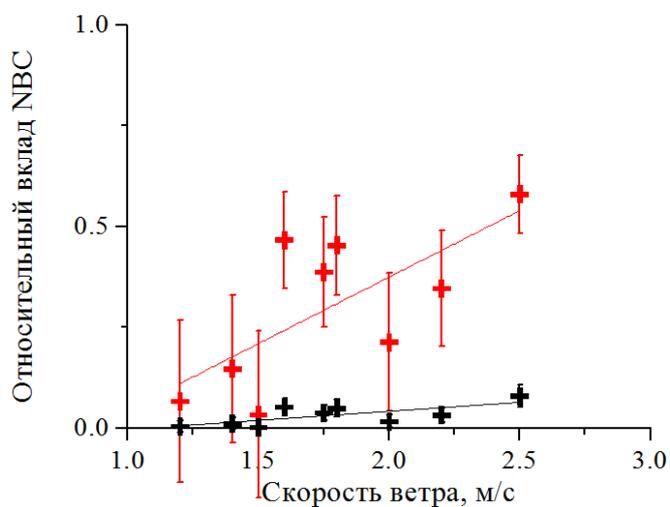
### Квазисинусоидальные волны



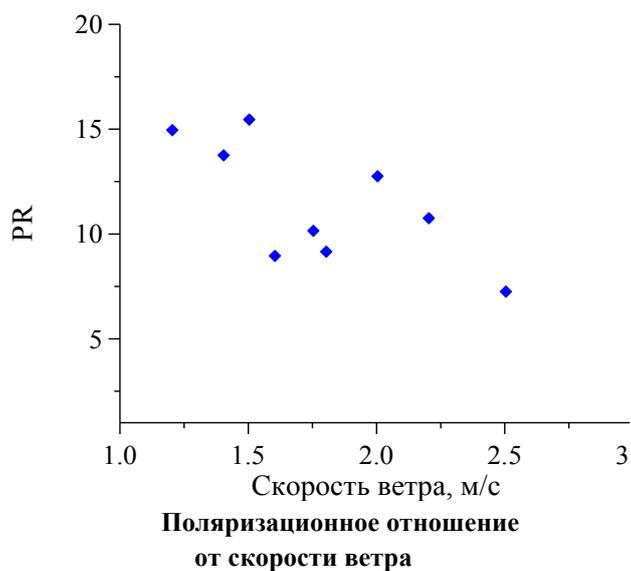
[Ермаков и др., 2019] Волна 4 Гц, волна движется справа налево, крутизна 0.3. На переднем склоне видна брэгговская рябь, вблизи гребня bulge – источник небрэгговского рассеяния



## Ветровые волны. Малый разгон (1.5 м).



Относительный вклад небрэгговской компоненты в рассеяние на HH (красные символы) и VV (черные символы) поляризациях. Визуальная оценка длины волны на поверхности до нескольких см

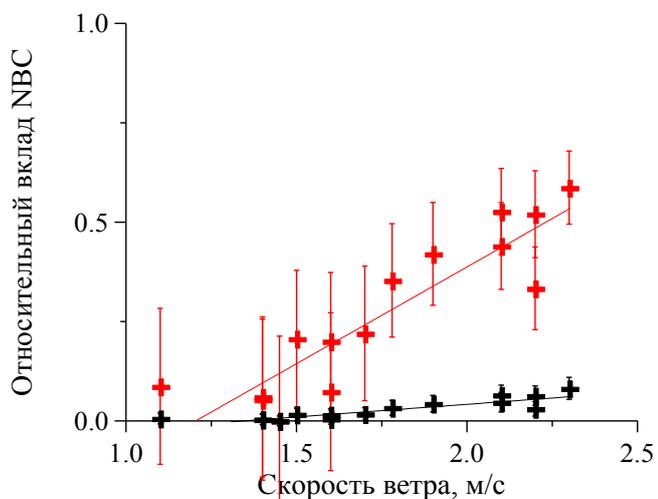


## Ветровые волны. Большой разгон (8 м).



Ветровые волны, большой разгону Скорость ветра – 2м/с, фото сверху, подсветка - точечный источник. Видны гребни дм волн и брэгговская рябь на переднем и заднем склонах.

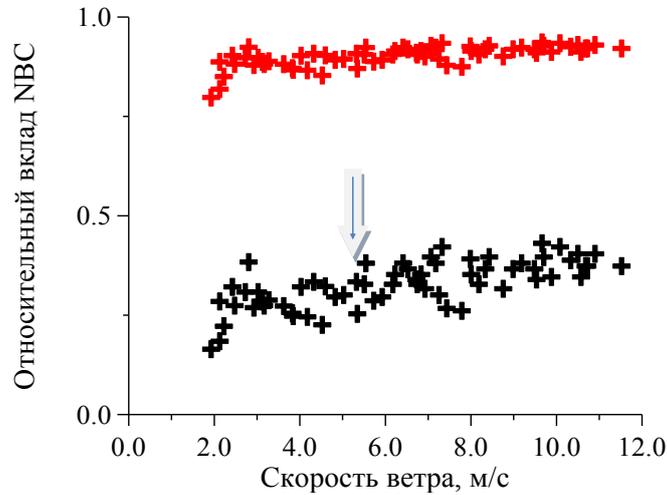
Фото Н. Богатова.



Относительный вклад небрэгговской компоненты в рассеяние на HH (красные символы) и VV (черные символы) поляризациях.

## 2. Натурные исследования

Проводились с помощью доплеровского скаттерометра X-диапазона, работающего на двух соосных поляризациях. Точность измерения поляризационного отношения 10%. Измерения проводились навстречу ветру, угол падения 55-60 градусов.



Относительный вклад небрэгговской компоненты в рассеяние на HH (черные символы) и VV (красные символы) поляризациях при разных скоростях ветра. Стрелка указывает скорость ветра, при которой появляются обрушения.

### Заключение.

1. Лабораторное исследование радиолокационного рассеяния от механически генерируемых и ветровых волн показало, что небрэгговское рассеяние возникает при появлении на поверхности крутых волн с длинами более нескольких см (например, ветровых волн и крутых квазисинусоидальных волн). Поляризационное отношение по мере увеличения крутизны и амплитуды коротких гравитационных волн уменьшается от значений, близких к значению ПО в рамках Брэгговской теории (в условиях эксперимента -16), до 6-7, относительный вклад NBC в рассеяние на HH компоненте возрастает до 50-70%, вклад NBC в рассеяние на VV компоненте возрастает до 10-20 %.
2. Эффект значительного вклада небрэгговской компоненты в РЛ рассеяние от взволнованной поверхности подтвержден в натуральных условиях при скоростях ветра от порога возбуждения ветровых волн до умеренных ветров, приводящих к сильным обрушениям. При умеренных углах падения микроволнового радио излучения вклад небрэгговского рассеяния в полное рассеяние на VV компоненте составляет 70-80% , на HH компоненте -20-30 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-05-00605 А, гранта РНФ №18-17-00224 и Минобрнауки России в рамках Соглашения №-075-15-2020-776.

### Литература

1. Kudryavtsev V., D. Hauser, G. Caudal, B. Chapron. A semi-empirical model of the normalized radar cross section of the sea surface, 1. Background model. J. Geophys. Res., 2003, 108 (C3), 10.1029/2001JC001003.
2. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Доброхотов В.А., Капустин И.А., Купаев А.В., К вопросу о физической природе рассеяния микроволнового излучения Ка-диапазона на взволнованной водной поверхности, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 235-241