



# **К вопросу об азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния при малых углах падения**

Д.Ковалдов, М.Рябкова, Ю.Титченко, В.Караев, К.Понур,  
Е.Мешков, Э.Зуйкова

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

## **Аннотация**

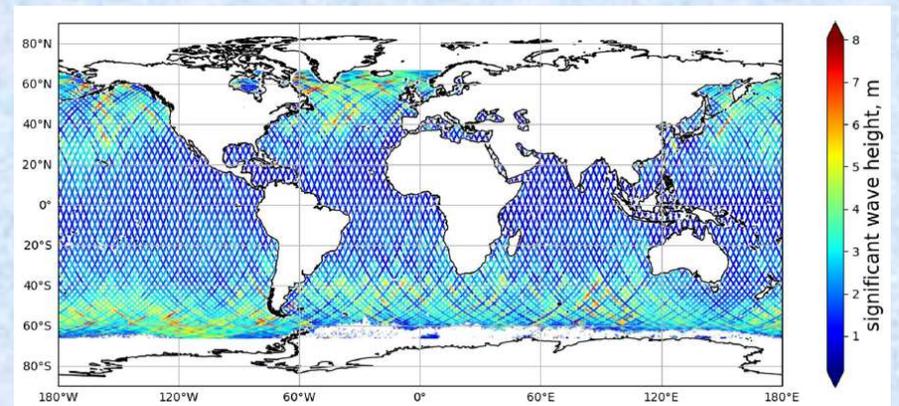
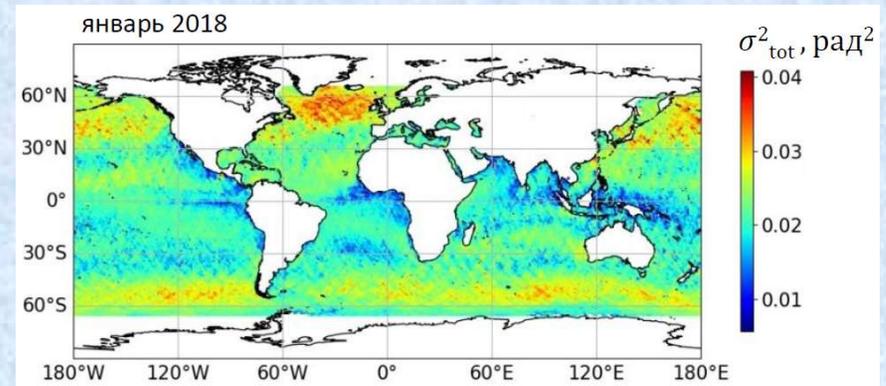
**При малых углах падения микроволнового излучения на морскую поверхность доминирующим механизмом обратного рассеяния является квазизеркальное рассеяние. В этом случае отражение происходит от участков волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Был разработан теоретический алгоритм определения дисперсии уклонов по азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния.**

**В данной работе приведены результаты эксперимента по измерению азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния в ходе эксперимента на реке Ока в черте г.Н.Новгород. Для измерений использовались два радиолокатора Ka-диапазона, установленные на метромосту. Для определения дисперсии уклонов использовалась азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния, измеренная при одном угле падения. Проведенное сравнение дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, восстановленной новым алгоритмом, с результатами обработки известным алгоритмом, использующим зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения, подтвердило эффективность нового подхода.**

# Введение

Радиолокационное зондирование морской поверхности является эффективным инструментом для получения информации о параметрах волнения. Измеряемые параметры зависят от используемого интервала углов падения и алгоритмов обработки.

При малых углах падения электромагнитного излучения на морскую поверхность доминирующим механизмом обратного рассеяния является квазизеркальное рассеяние и отражение происходит от участков волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Для количественного описания отраженного сигнала применяется метод Кирхгофа, который в явном виде связывает статистические характеристики поверхностного волнения и мощность отраженного сигнала.



Глобальные поля высот морского волнения (SWH) по данным радиовысотометров (верх) и уклонов крупномасштабного волнения по данным DPR.

## Введение

При малых углах падения выполняет измерения волновой скаттерометр SWIM, установленный на борту спутника CFOSAT (Chinese-French Oceanic SATellite).

SWIM это первый орбитальный радиолокатор с реальной апертурой, способный измерять спектр морского волнения. Радиолокатор выполняет измерения под шестью углами падения:  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$  и  $10^\circ$ . Ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности равна примерно  $2^\circ$ . Антенна вращается вокруг вертикальной оси со скоростью 5,6 оборотов в минуту. Вертикальный луч работает как обычный радиовысотометр и измеряет сечение обратного рассеяния. При последующей обработке определяется высота значительного волнения.

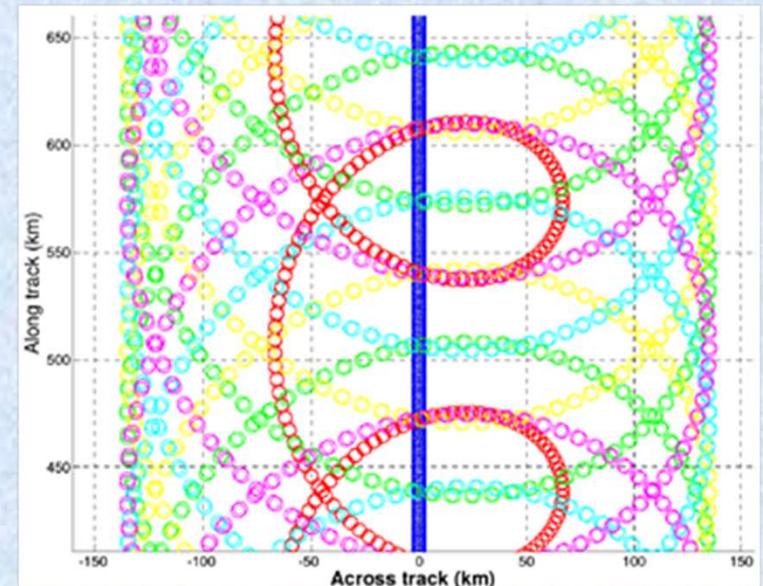
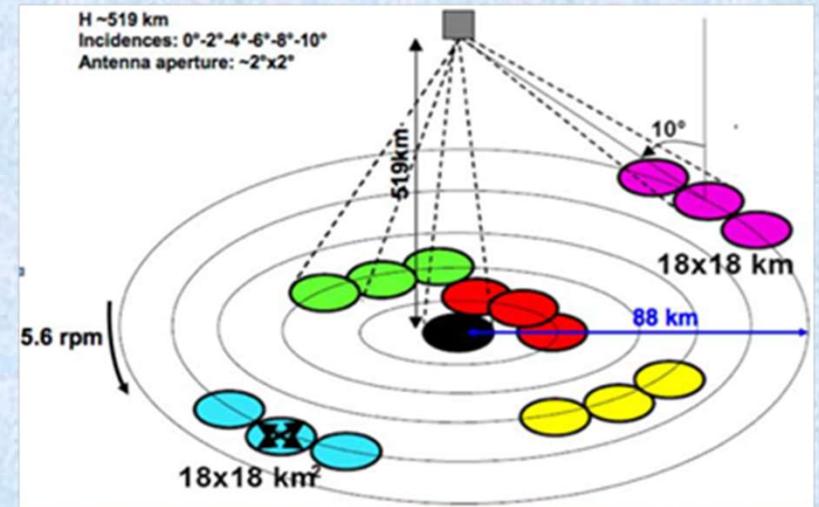


Схема измерения SWIM

## Введение

SWIM является первым орбитальным радиолокатором, который выполняет измерения под разными азимутальными углами. Это позволило разработать теоретический алгоритм восстановления двумерного поля уклонов.

Используя измерения под тремя азимутальными углами можно определить полную дисперсию уклонов крупномасштабного волнения ( $mss_{total}$ ), амплитуду изменения дисперсии уклонов ( $\Delta mss$ ) и направление распространения волнения ( $\varphi_0$ )

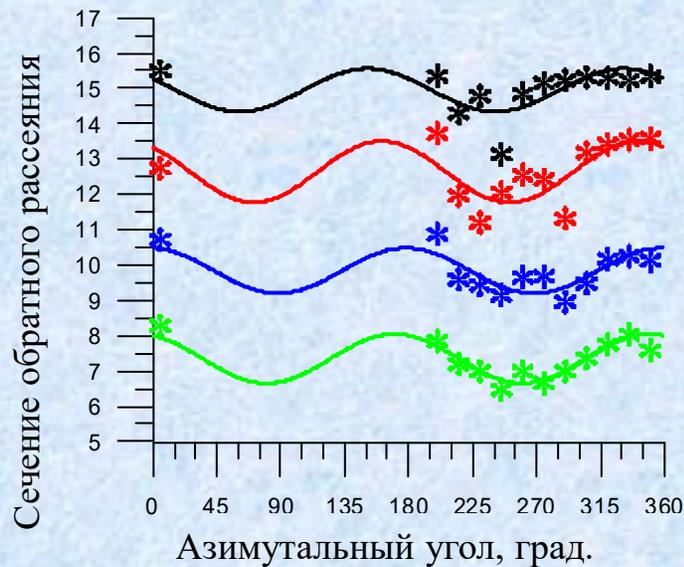
$$\varphi_0 = 0,5 \arctg \left[ \frac{(B_2 - B_1) \sin(\varphi_3 - \varphi_1) \sin(\varphi_1 + \varphi_3) - (B_3 - B_1) \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(B_2 - B_1) \sin(\varphi_3 - \varphi_1) \cos(\varphi_1 + \varphi_3) - (B_3 - B_1) \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \cos(\varphi_1 + \varphi_2)} \right]$$

$$\Delta mss = \frac{2(B_2 - B_1)}{\cos(2\varphi_0 - 2\varphi_2) - \cos(2\varphi_0 - 2\varphi_1)}$$

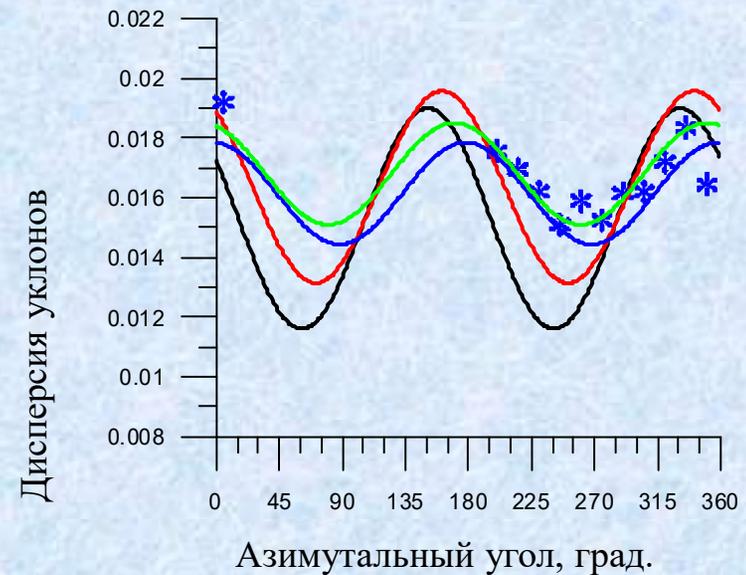
$$mss_{total} = 2B_1 - \frac{2(B_2 - B_1) \cos(2\varphi_0 - 2\varphi_1)}{\cos(2\varphi_0 - 2\varphi_2) - \cos(2\varphi_0 - 2\varphi_1)}$$

# Введение

Для оценки работоспособности алгоритма использовались данные SWIM – сечения обратного рассеяния, измеренные под разными азимутальными углами (звездочки разного цвета).



Азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния для углов падения: черная кривая – угол падения  $4^\circ$ , красная кривая –  $6^\circ$ , синяя кривая –  $8^\circ$ , зеленая кривая –  $10^\circ$ . Звездочками нанесены измеренные сечения обратного рассеяния для каждого угла падения.



Азимутальная зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения: черная кривая – угол падения  $4^\circ$ , красная кривая –  $6^\circ$ , синяя кривая –  $8^\circ$ , зеленая кривая –  $10^\circ$ . Звездочки – дисперсия уклонов крупномасштабного волнения вдоль направления зондирования, восстановленная по зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения.

## Эксперимент

Можно предположить, что параметры ветрового волнения, сформировавшегося в речных условиях, существенно отличаются от параметров морского волнения. Для исследования этого вопроса был проведен цикл измерений доплеровскими радиолокаторами Ка-диапазона, установленными на метромосту через реку Ока в черте г. Нижний Новгород.

Целью эксперимента была проверка работоспособности разработанного алгоритма и измерение дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, сформировавшегося на речном течении.

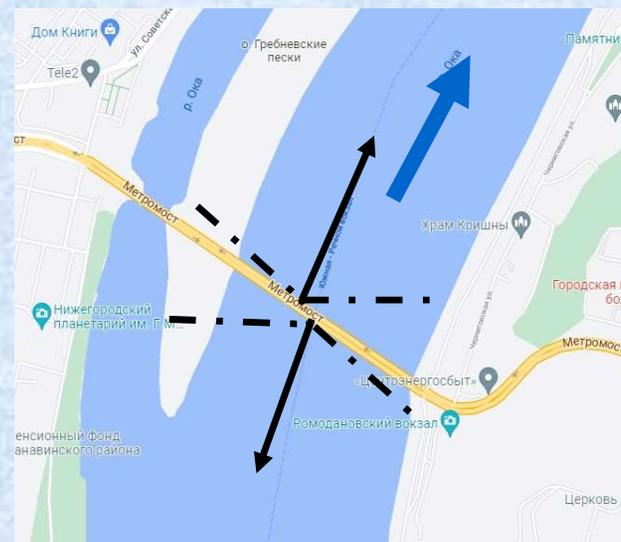


Схема эксперимента. Черные стрелки показывают направление зондирования. Синяя стрелка – направление течения.



Радиолокатор на метромосту

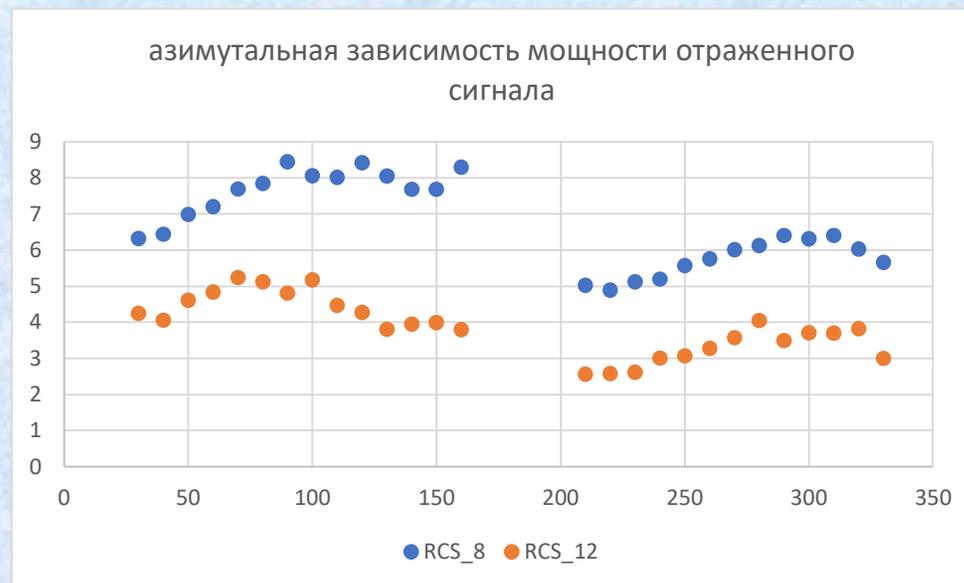
## Эксперимент

В ходе эксперимента измерялась зависимость мощности отраженного сигнала от азимутального угла для разных углов падения.

Первый радиолокатор выполнял измерения против течения и направления распространения волнения (отражение от переднего склона волны) в секторе углов  $30^\circ - 160^\circ$ .

Второй радиолокатор выполнял измерения по течению в секторе углов  $210^\circ - 330^\circ$ .

В условиях короткого ветрового разгона и изменчивости скорости ветра наблюдаются сильные флуктуации при времени измерения 2 мин.



Зависимость мощности отраженного сигнала (условные единицы) от азимутального угла при угле падения  $8^\circ$  (синие точки) и  $12^\circ$

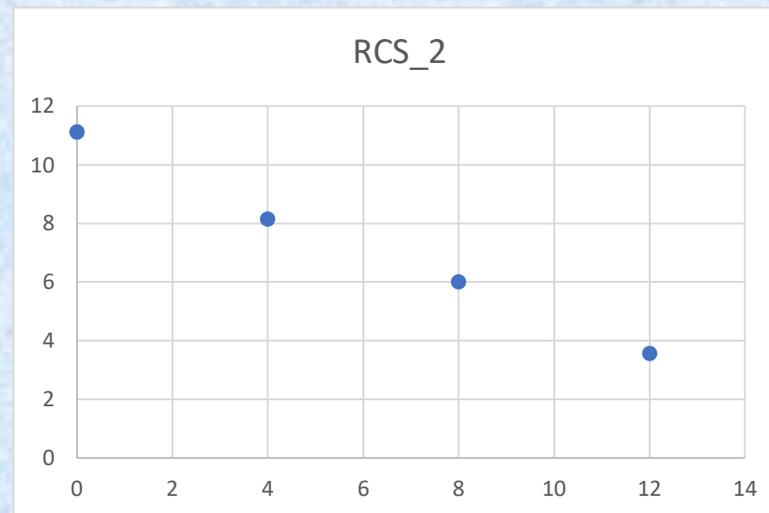
## Эксперимент

Одновременно измерялась зависимость отраженной мощности от угла падения.

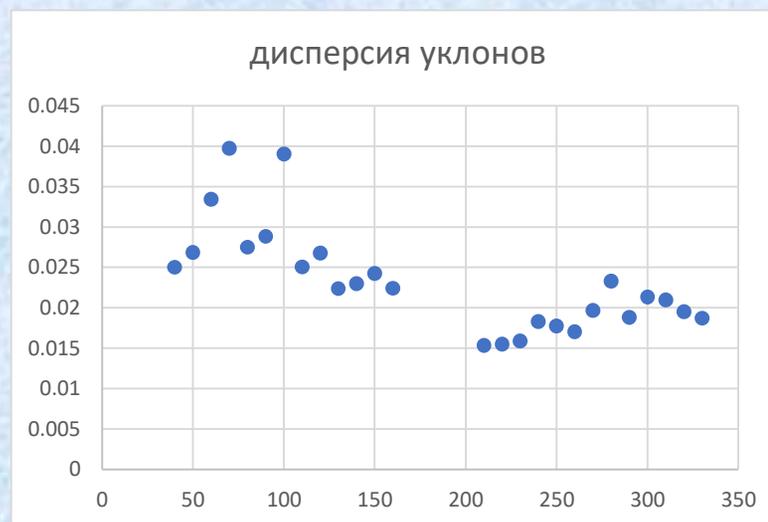
На рисунках приведен пример зависимости для второго радиолокатора (азимутальный угол равен  $270^\circ$ ).

Была проведена обработка получившихся зависимостей двумя алгоритмами: 1) алгоритмом использующим зависимость от угла падения 2) алгоритмом, использующим азимутальную зависимость.

Результат определения дисперсии уклонов первым алгоритмом показан на рисунке. Дисперсия уклонов переднего склона волнового профиля выше.



Зависимость мощности отраженного сигнала от угла падения (азимутальный угол  $270^\circ$ ).



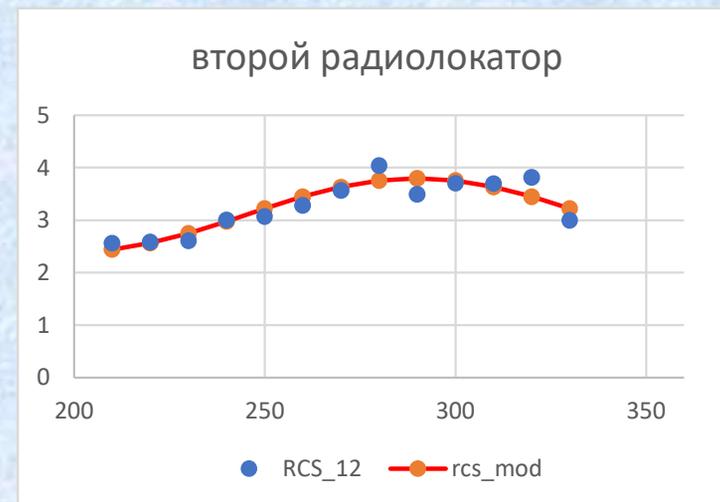
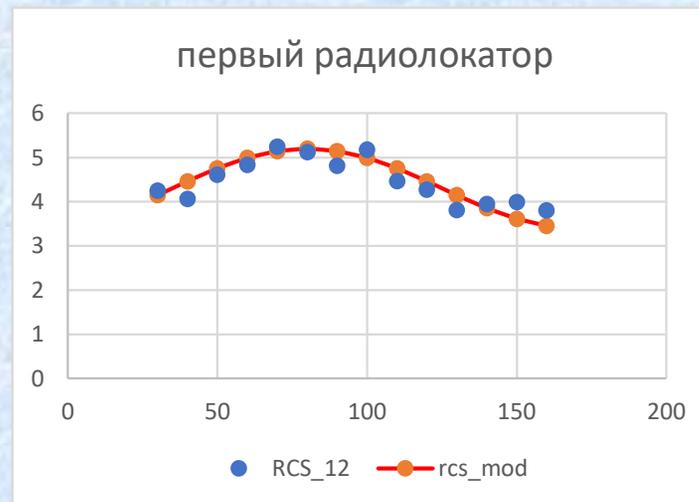
Азимутальная зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения

# Эксперимент

Второй алгоритм состоит из двух этапов и в ходе первого этапа находится модельная зависимость азимутальная зависимость мощности отраженного сигнала.

Для речного волнения присутствует асимметрия склонов, поэтому анализ проводился для каждого радиолокатора по отдельности.

Результат приведен на рисунках: на верхнем рисунке для первого радиолокатора, на нижнем – для второго радиолокатора для угла падения  $12^\circ$ .



Зависимость мощности отраженного сигнала от азимутального угла для первого (верхний график) и второго радиолокатора

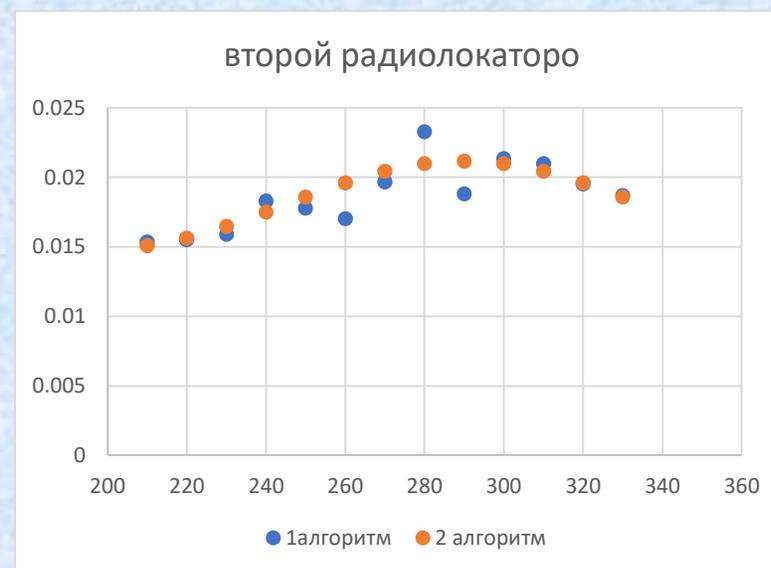
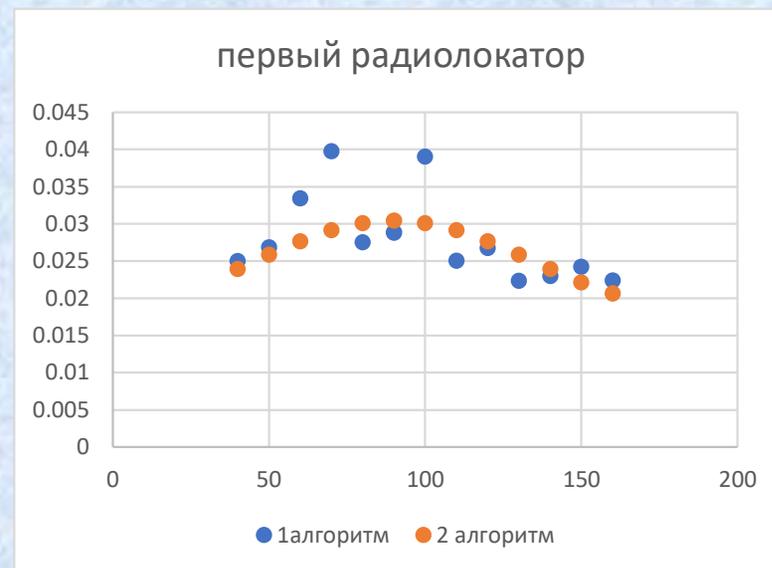
# Эксперимент

В ходе второго этапа алгоритма была восстановлена дисперсия уклонов крупномасштабного волнения.

На рисунке приведена азимутальная зависимость дисперсии уклонов крупномасштабного волнения на р. Ока. Данные получены для переднего (верхний рисунок) и заднего склонов.

Второй алгоритм более устойчив к «шумовой» составляющей, т.к. на втором этапе используются усредненные данные первого этапа обработки.

Разница между дисперсиями уклонов вдоль и поперек направления распространения волнения больше, чем у морского волнения.



Зависимость дисперсии уклонов от азимутального угла: синие точки – первый алгоритм, красные точки – второй алгоритм.

## Выводы

Проведен эксперимент на метромосту (р. Ока) в ходе которого измерялись зависимости мощности отраженного сигнала от угла падения и азимутального угла. Использование в эксперименте двух радиолокаторов позволило получить почти полную азимутальную зависимость.

Для определения дисперсии уклонов новый алгоритм, использующий азимутальную зависимость сечения обратного рассеяния, измеренную при одном угле падения. Глубина азимутальной «модуляции» дисперсии уклонов крупномасштабного волнения для волнения на реке больше, чем у морского волнения.

Проведенное сравнение дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, восстановленной новым алгоритмом, с результатами обработки известным алгоритмом, использующим зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения, подтвердило эффективность нового подхода.