



# **Восстановление азимутальной зависимости сечения обратного рассеяния и дисперсии уклонов крупномасштабного волнения по данным спектрометра SWIM**

**В.Караев , М.Панфилова, Ю.Титченко,  
М.Рябкова, Е.Мешков**

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

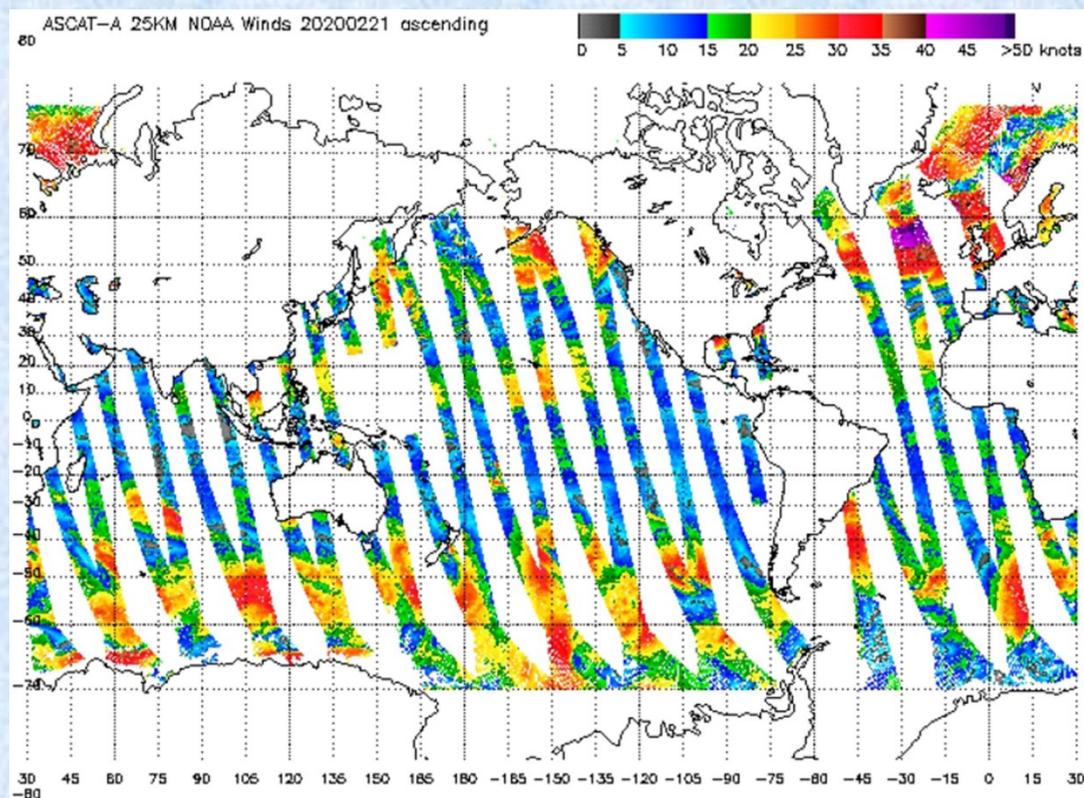
## **Аннотация**

**В настоящее время на околоземной орбите находятся радиолокаторы, измеряющие сечение обратного рассеяния при малых углах падения, когда доминирующим является квазизеркальный механизм обратного рассеяния. Известно, что по зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения, измеряемой дождевыми радиолокаторами, установленными на спутниках TRMM и GPM, определяется дисперсия уклонов крупномасштабного, по сравнению длиной волны излучения, волнения вдоль направления зондирования. В 2018 году на орбиту был выведен французско-китайский спутник CFOSAT на борту которого размещены китайский скаттерометр RFSCAT и французский спектрометр SWIM. Благодаря особенностям схемы измерения SWIM впервые выполняет измерения сечения обратного рассеяния при малых углах падения под разными азимутальными углами. В данном исследовании рассматривается новый подход к определению дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, отличающийся тем, что впервые в алгоритме используется азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния, измеренная под одним углом падения. В разработанном алгоритме входными параметрами являются сечения обратного рассеяния под разными азимутальными углами, но под одним углом падения, и сечение обратного рассеяния при нулевом углом падения. Процедура обработки состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляются коэффициенты модели, описывающие азимутальную зависимость сечения обратного рассеяния. На втором этапе обработки модель используется для вычисления сечения обратного рассеяния для азимутальных углов  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , что позволяет определить полную дисперсию уклонов крупномасштабного волнения используя аналитические формулы. Тестовая обработка данных SWIM подтвердила работоспособность предложенного подхода.**

# Введение

Интенсивность процессов тепло- и газообмена между атмосферой и океаном зависит от скорости ветра и интенсивности поверхностного волнения, поэтому информация о скорости приводного ветра и параметрах волнения крайне важна для решения оперативных задач метеорологии и океанологии.

Для получения глобальной и оперативной информации применяются орбитальные радиолокаторы среди которых наиболее известными являются **скаттерометр, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) и радиовысотомер**. Все перечисленные радиолокаторы определяют скорость приводного ветра, но отличаются полосой обзора и пространственным разрешением. Кроме того, радиовысотомер измеряет высоту значительного волнения, а по данным РСА, с учетом определенных ограничений, связанных с высотой волнения, длиной доминантной волны и направлением распространения относительно направления зондирования, можно оценить высоту значительного волнения и доминантную длину волны в спектре волнения.



*Поле приводного ветра по данным скаттерометра ASCAT METOP-A*

# Введение

Менее известными, применительно к измерению параметров морской поверхности, являются дождевые радиолокаторы, установленные на спутниках миссии TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) и GPM (Global Precipitation Measurement) Японского космического агентства. Их основной задачей является измерение осадков в полосе обзора с помощью одночастотного (Precipitation Radar – PR) и двухчастотного (Dual-frequency Precipitation Radar – DPR) дождевых радиолокаторов.

При движении спутника по орбите зондирование выполняется в направлении перпендикулярном направлению полета. При сканировании измеряется зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения. Проведенные исследования показали, что используя зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения можно восстановить дисперсию уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны радиолокатора, волнения вдоль направления сканирования (далее дисперсия уклонов крупномасштабного волнения) или полную дисперсию уклонов крупномасштабного волнения.

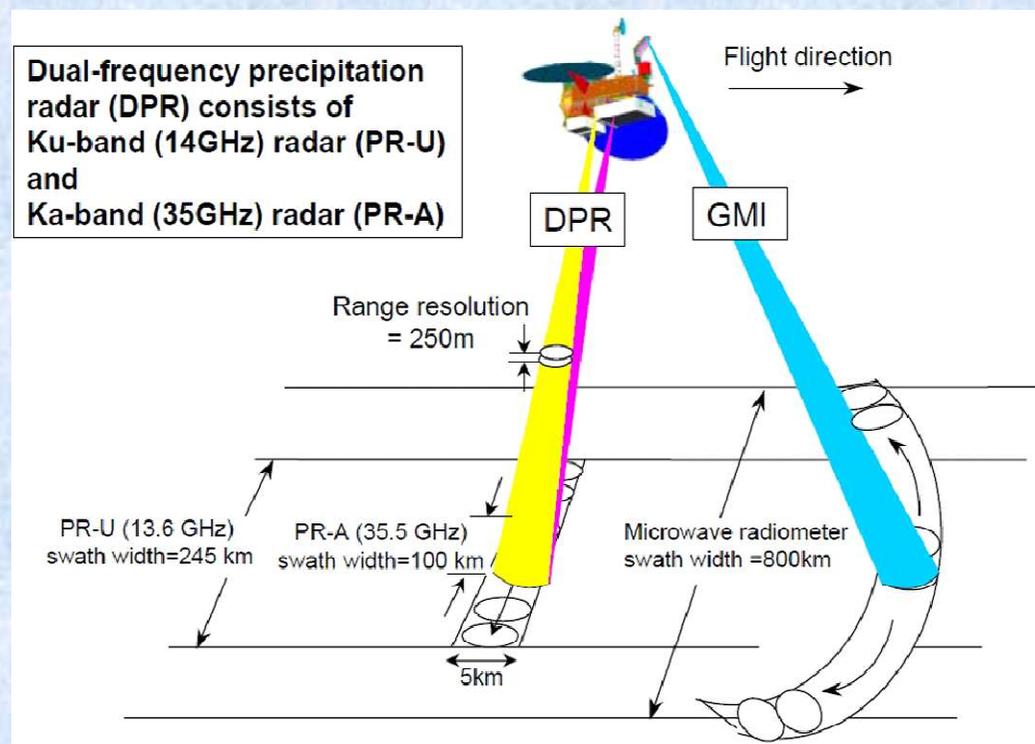


Схема измерения дождевого радиолокатора

## Введение

В конце октября 2018 года на орбиту был выведен спутник CFOSAT (Chinese-French Oceanic SATellite) на борту которого установлены французский спектрометр SWIM и китайский скаттерометр с ножевой диаграммой направленности антенны. Скаттерометр с ножевой диаграммой направленности антенны измеряет поле приводного ветра.

Спектрометр 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 высотомер и измеряет сечение обратного рассеяния. При последующей обработке определяется высота значительного волнения.

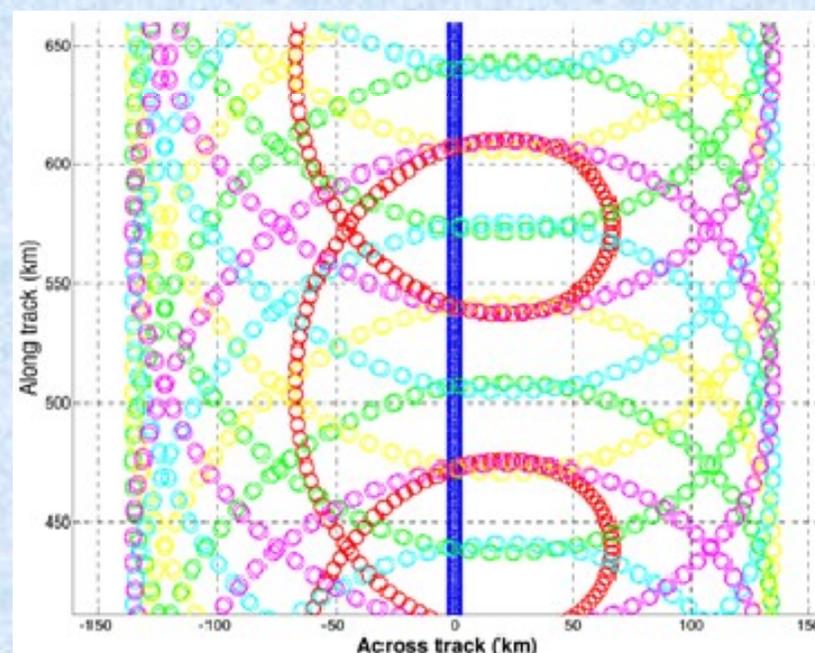
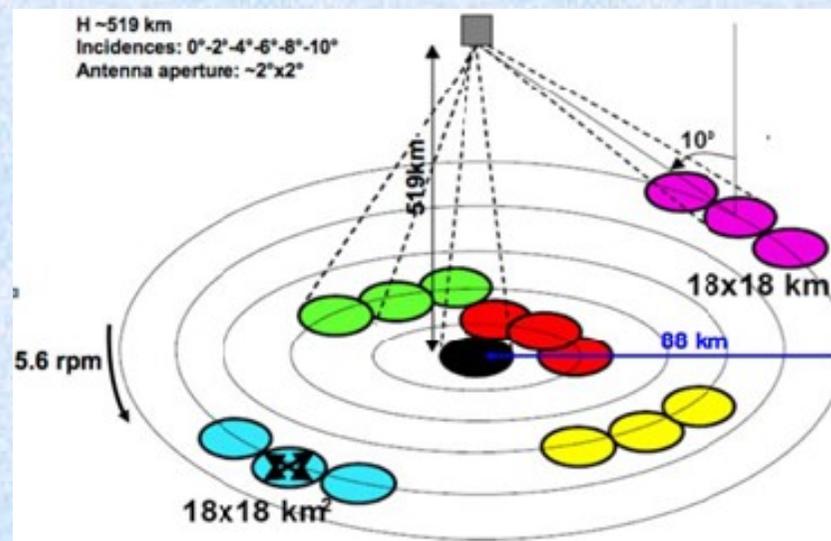


Схема измерения SWIM

# Алгоритм

Как известно, при малых углах падения для вычисления отраженного морской поверхностью радиолокационного сигнала используется метод Кирхгофа. В рамках двухмасштабной модели морской поверхности сечение обратного рассеяния записывается в следующем виде

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R_{eff}(0)|^2}{2 \cos^4 \theta \sqrt{mss_{xx} mss_{yy} - mss_{xy}^2}} \times \exp \left[ -\frac{\tan^2 \theta}{2(mss_{xx} mss_{yy} - mss_{xy}^2)} mss_{yy} \right], \quad (1)$$

где  $mss_{xx}$  и  $mss_{yy}$  дисперсии уклонов крупномасштабного волнения вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно;  $mss_{xy}$  - ненормированный коэффициент корреляции уклонов вдоль осей  $X$  и  $Y$ ;  $\theta$  - угол падения;  $R_{eff}$  эффективный коэффициент отражения, который вводится вместо коэффициента Френеля, чтобы учесть влияние мелкой ряби на амплитуду отраженного сигнала.

В общем случае азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния записывается в следующем виде

$$\sigma_0(\theta, \varphi) = A_0 + B_0 \cos(\varphi_0 - \varphi) + C_0 \cos(2\varphi_0 - 2\varphi), \quad (2)$$

где  $\varphi_0$  - направление распространения волнения и  $\varphi$  - направление зондирования.

Однако было показано (Hossain and Jones, 2021), что при углах падения менее  $6^\circ$  разность между сечениями обратного рассеяния, измеренными по волнению ( $\varphi = 180^\circ$ ) и против направления распространения волнения ( $\varphi = 0^\circ$ ) мала и можно не учитывать этот эффект. В этом случае формула для азимутальной зависимости упрощается

$$\sigma_0(\varphi) = A_0 + C_0 \cos(2\varphi_0 - 2\varphi). \quad (3)$$

# Алгоритм

Процедура обработки состоит из двух этапов.

На первом этапе обработки данных SWIM измеренная азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния для фиксированного угла падения используется для вычисления коэффициентов  $A_0$  и  $C_0$ .

После нахождения коэффициентов можно определить направление, вдоль которого распространяется волнение и вычислить сечение обратного рассеяния для любого азимутального угла по формуле (3).

Пусть зондирование выполняется вдоль оси  $X$ . Тогда сечение обратного рассеяния для азимутальных углов  $\varphi_0 = 0^\circ$  and  $90^\circ$  (волнение распространяется вдоль осей  $X$  и  $Y$  соответственно) имеет следующий вид

$$\sigma_0(\theta, 0) = \frac{\sigma_0(0)}{\cos^4 \theta} \times \exp\left[-\frac{\text{tg}^2 \theta}{2mss_{xx}}\right], \quad (4)$$

$$\sigma_0(\theta, 90) = \frac{\sigma_0(0)}{\cos^4 \theta} \times \exp\left[-\frac{\text{tg}^2 \theta}{2mss_{yy}}\right], \quad (5)$$

где  $\sigma_0(0)$  - сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения.

# Алгоритм

Следовательно, формулы для дисперсии уклонов крупномасштабного волнения вдоль ( $\varphi_0 = 0^\circ$ ) и поперек ( $\varphi_0 = 90^\circ$ ) направления распространения имеют следующий вид

$$mss_{xx} = \frac{\operatorname{tg}^2 \theta}{2 \ln \left( \frac{\sigma_0(0)}{\sigma_0(\theta, 0) \cos^4 \theta} \right)}, \quad (6)$$

$$mss_{yy} = \frac{\operatorname{tg}^2 \theta}{2 \ln \left( \frac{\sigma_0(0)}{\sigma_0(\theta, 90) \cos^4 \theta} \right)}. \quad (7)$$

Чтобы вычислить дисперсию уклонов крупномасштабного волнения для произвольного азимутального угла надо воспользоваться следующей формулой

$$mss_{xx}(\varphi) = 0.5 mss_{total} + 0.5 \Delta mss \cos(2\varphi - 2\varphi_0), \quad (8)$$

$$mss_{yy}(\varphi) = 0.5 mss_{total} - 0.5 \Delta mss \cos(2\varphi - 2\varphi_0), \quad (9)$$

где

$$mss_{total} = mss_{xx}(0^\circ) + mss_{yy}(90^\circ), \quad (10)$$

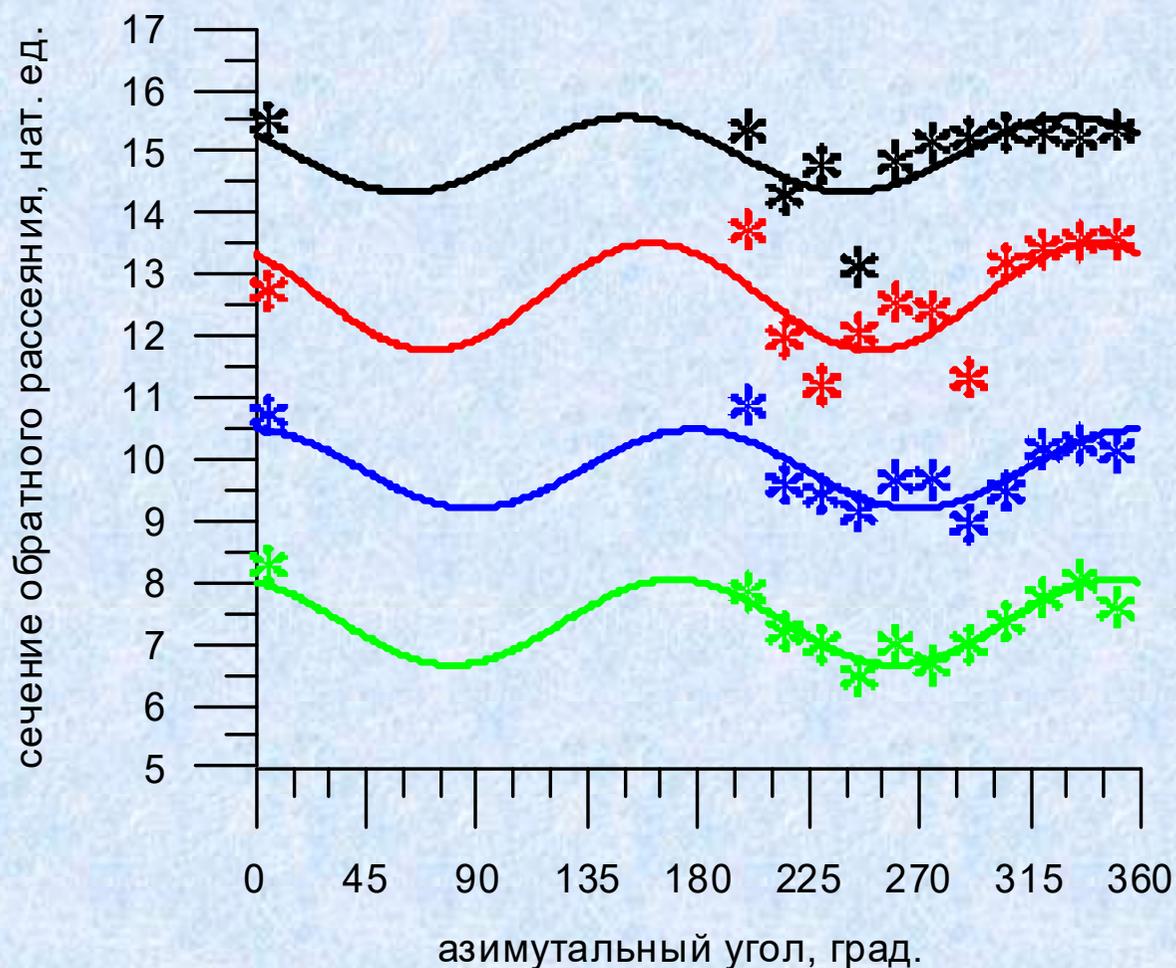
$$\Delta mss = mss_{xx}(0^\circ) - mss_{yy}(90^\circ). \quad (11)$$

# Обработка данных SWIM

Для оценки работоспособности алгоритма использовались данные SWIM – сечения обратного рассеяния, измеренные под разными азимутальными углами.

После выполнения первого этапа обработки были вычислены коэффициенты  $A_0$  и  $C_0$  формулы (3) для четырех углов падения.

Получившиеся азимутальные зависимости приведены на рисунке.

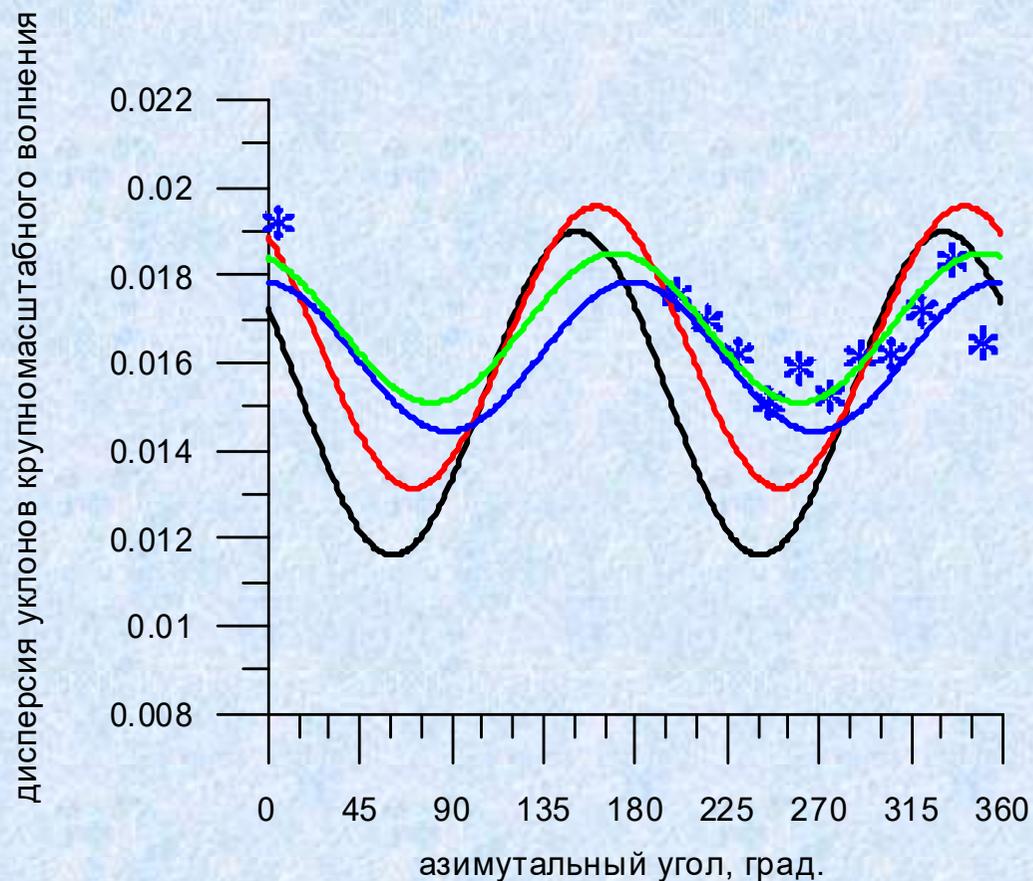


Азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния для углов падения: черная кривая – угол падения  $4^\circ$ , красная кривая –  $6^\circ$ , синяя кривая –  $8^\circ$ , зеленая кривая –  $10^\circ$ . Звездочками нанесены измеренные сечения обратного рассеяния для каждого угла падения.

## Обработка данных SWIM

Когда азимутальная зависимость для сечения обратного рассеяния построена, то можно вычислить значения сечения обратного рассеяния для углов  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , которые являются оптимальными для алгоритма, используемого на втором этапе обработки для определения дисперсии уклонов и направления распространения волнения крупномасштабного волнения.

На рисунке звездочками показаны дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, которые были восстановлены по зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения под разными азимутальными углами (известный алгоритм).



*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.*

## Обработка данных SWIM

С увеличением угла падения улучшается восстановление азимутальной зависимости. Это связано с тем, что сигнал при малых углах падения является более шумным и азимутальная зависимость хуже просматривается.

В Таблице 1 приведены восстановленные значения полной дисперсии уклонов крупномасштабного волнения для разных углов падения и направление распространения волнения.

угол падения	$mss_{total}$	$\Delta mss$	$\varphi_0$
4°	0.0306	0.00737	331°
6°	0.0327	0.00642	341°
8°	0.0323	0.00340	358°
10°	0.0361	0.0034	350°

Несмотря на то, что наблюдаются расхождения в характере азимутальной зависимости для разных углов падения, полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения и направление распространения волнения восстанавливается достаточно точно для всех углов падения.

## Выводы.

Рассмотрен новый подход к измерению дисперсии уклонов крупномасштабного волнения, использующий измерения сечения обратного рассеяния под разными азимутальными углами, но под одним углом падения. Разработан новый алгоритм входными параметрами которого являются сечения обратного рассеяния для разных азимутальных углов под одним углом падения, и сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения.

Процедура обработки включает два этапа. На первом этапе выполняется регрессионный анализ и вычисляются коэффициенты модели, описывающие азимутальную зависимость сечения обратного рассеяния. В результате можно вычислить сечение обратного рассеяния для произвольного азимутального угла. Кроме того, определяется направление распространения доминирующей системы волнения.

Второй этап обработки начинается с вычисления сечения обратного рассеяния для азимутальных углов  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Переход к оптимальным азимутальным углам позволяет получить аналитические формулы, связывающие сечение обратного рассеяния и дисперсию уклонов крупномасштабного волнения.

В результате двух этапной обработки определяется полная дисперсия уклонов крупномасштабного волнения, направление распространения волнения и можно построить двумерное поле уклонов. Тестовая обработка данных SWIM подтвердила работоспособность предложенного метода.