

# Моделирование влияния ориентации доминантной волны на параметры отраженного альtimетрического импульса.

СЛОБОДЯНЮК  
Александр Олегович

ЛЕБЕДЕВ  
Сергей Анатольевич

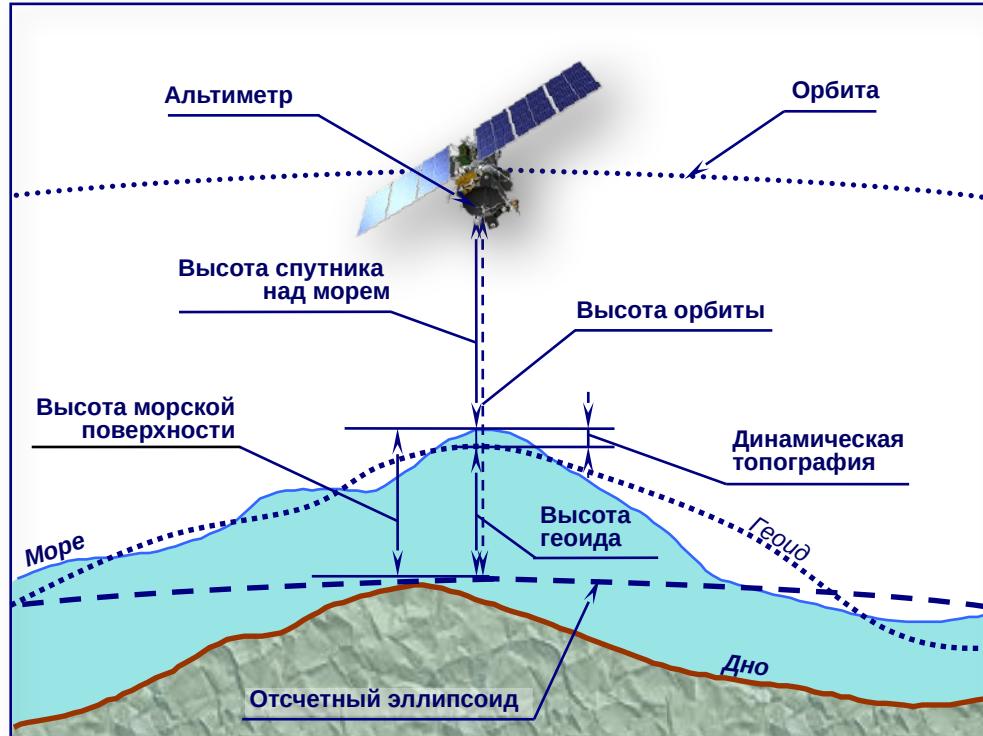


Национальный исследовательский  
университет «МИЭТ»



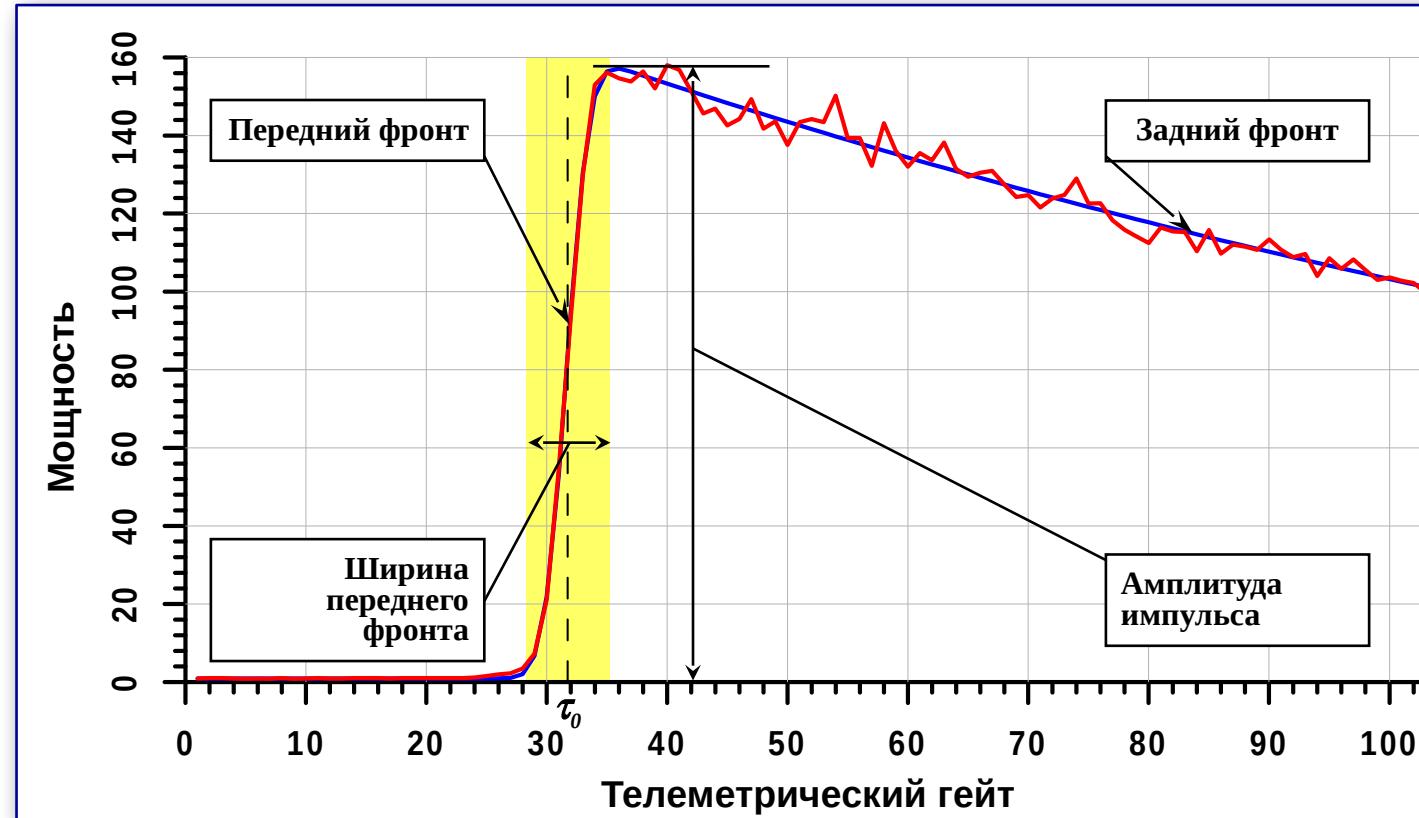
Геофизический Центр РАН

# Основы спутниковой альtimетрии



На борту аппарата альтиметром по времени возврата отраженного импульса («трекер») определяется «предварительное» расстояние от спутника до подстилающей поверхности, которое при дальнейшей обработке формы отраженного импульса в наземном сегменте уточняется за счет процедуры ретрекинга.

# Основы спутниковой альtimетрии. Форма отраженного импульса



Форма импульса, отраженного от безграничной подстилающей поверхностью, аппроксимированная по формуле Брауна (синяя линия) и осредненная за 1 с форма отраженного импульса для условий открытого океана (красная линия), где  $\tau_0$  — середина переднего фронта или «эпоха».

Желтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимых высот волн ( $h_{swh}$ )

# Модель формы отраженного импульса

При малых углах отклонения оси антенны от положения надира среднюю форму принятого альтиметром отраженного от морской поверхности сигнала можно описать свёрткой, вывод которой базируется на модели некогерентного (по мощности) рассеяния радиоволн шероховатой поверхностью

$$P(t) = P_{FSI}(t) \otimes s_r(t) \otimes q_s(t)$$

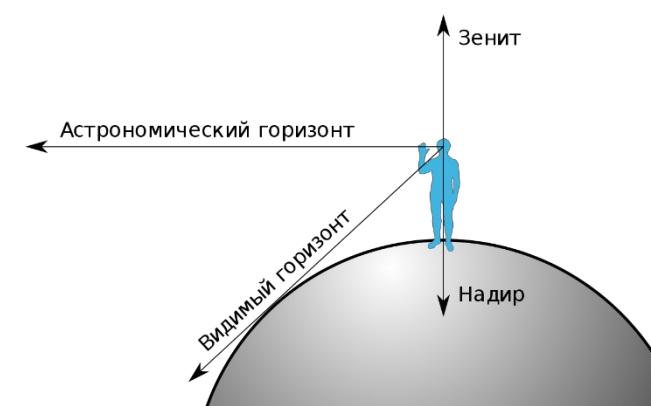
$P_{FSI}(t)$  – средняя мощность сигнала, отраженного плоской поверхностью

$s_r(t)$  – форма импульса, отраженного от плоской поверхности

$q_s(t)$  – плотность вероятности распределения высот зеркальных точек

Модель Брауна построена в рамках следующих предположений:

- отражающая поверхность содержит достаточно большое число независимых отражающих элементов;
- статистики возвышений поверхности являются постоянными в пределах освещаемой радаром поверхности;
- отражение является скалярным процессом без эффектов поляризации;
- нормированное сечение обратного рассеяния является постоянным для всей освещаемой площади, т.е. в пределах диаграммы направленности не зависит от угла падения;
- эффектом Доплера можно пренебречь.



# Численная модель формы отраженного импульса

Интегрирование по рассеивающей площадке для сферической волны с учётом длительности зондирующего импульса позволяет найти профиль отражённого импульса.

Механизм обратного рассеяния при малых углах падения является квазизеркальным, при этом отражение импульса происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению.

Формула поля, излучаемое антенной радиолокатора в зеркальную точку с радиус-вектором

$$E_s(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} \exp(i(wt - kR)) U(t) G(\theta),$$

где  $U(t)$  – некоторая функция, ограничивающая длительность импульса;  $G(\theta)$  – диаграмма направленности антенны.

# Численная модель формы отраженного импульса

$$E = \frac{E_0}{R^2} \exp(-2ikR) \overset{\leftrightarrow}{\sigma^0} G^2(\theta)$$

Уравнение амплитуды поля вблизи приемной антенны где – сечение обратного рассеяния площадки., которое при малых углах зондирования рассчитывается по методу Киргофа.

$$E \sim \sum_{j=1}^M \frac{E_0}{R_j^2} \exp(-2ik_j R_j) G^2(x_j, y_j, \theta_0)$$

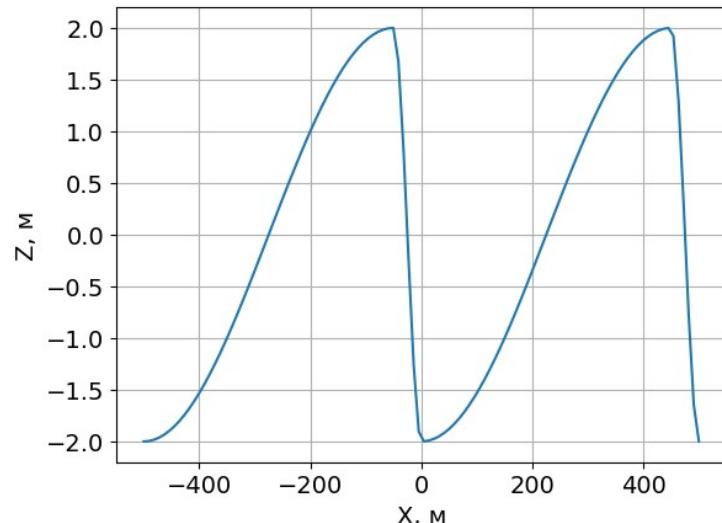
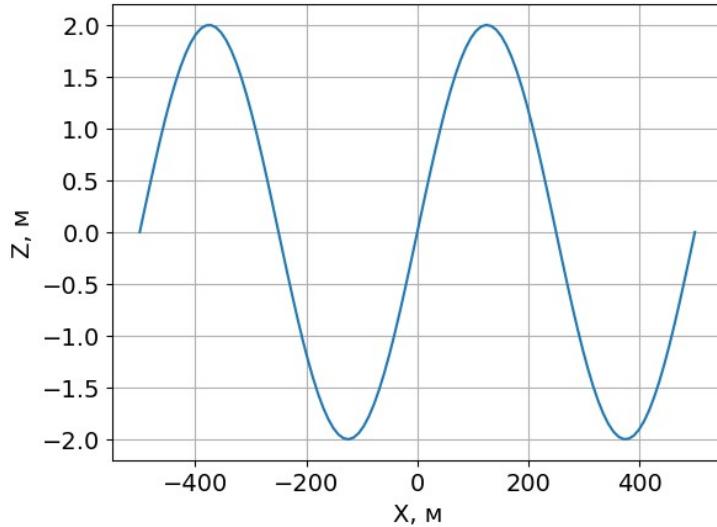
Результат интегрирования уравнения по всем отражающим точкам где  $M$  – количество точек,  $x_j, y_j$  – координаты  $j$ -ой отражающей точки,  $R_j$  – расстояние от спутника до  $j$ -ой точки.

$$P(t) = \frac{EE^*}{2}$$

Результирующая мощность отражённого импульса

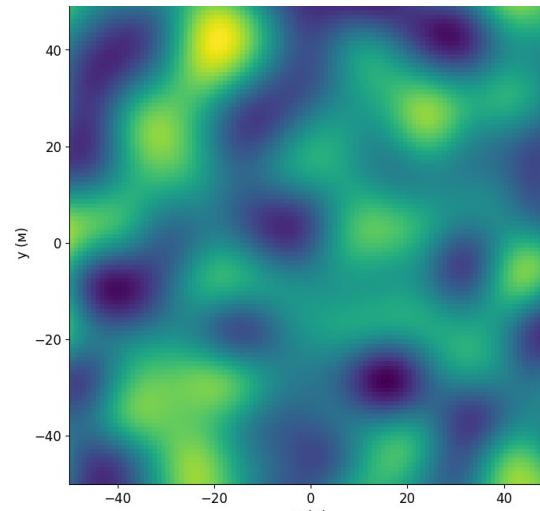
# Модель подстилающей поверхности

Модель зыби: 1) синусоида; 2) модифицированная синусоида;

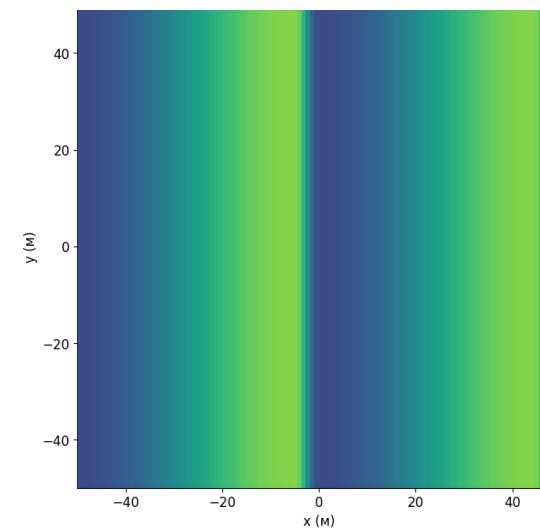


1. Интервал  $[0, \alpha * \text{length}]$  (синусоида)
  - Формула:  $A * \sin(\pi * x / (\alpha * \text{length} (\text{длина волны})) - \pi/2)$
2. Интервал  $[\alpha * \text{length}, \text{length}]$  (кубический полином)
  - Формула:  $a * x^3 + b * x^2 + A$
3. Гладкость на стыках
  - Непрерывность: Значения и первая производная совпадают в точках перехода.
  - Естественный переход: Синусоида и полином соединяются без изломов.

# Модель подстилающей поверхности



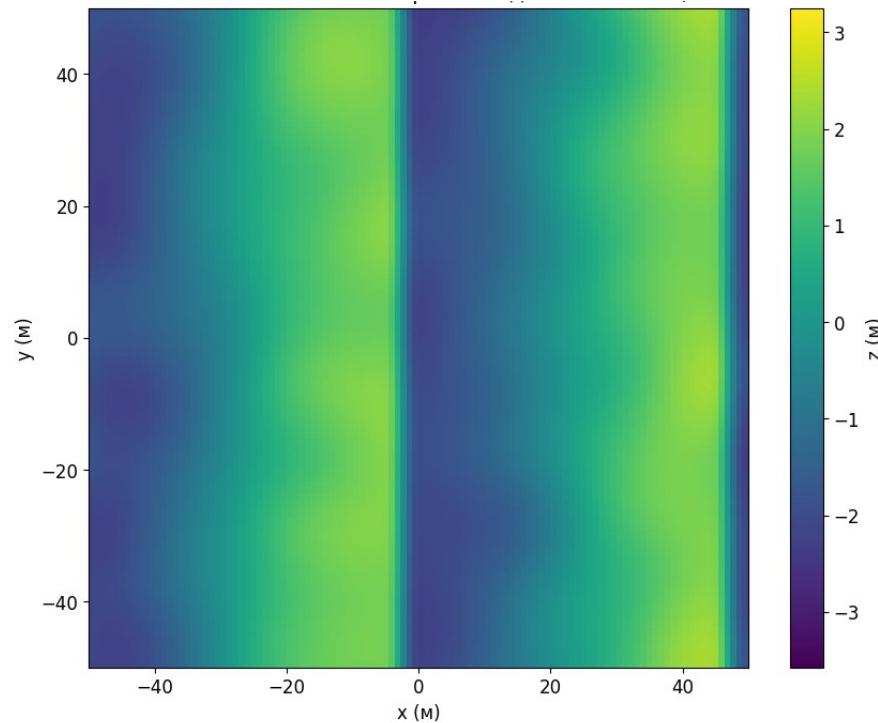
МОДЕЛЬ СПЕКТРА



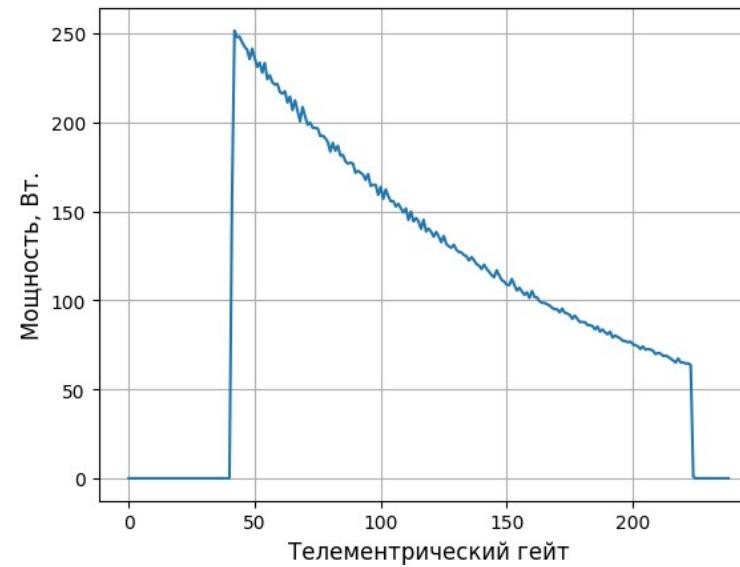
МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ

=

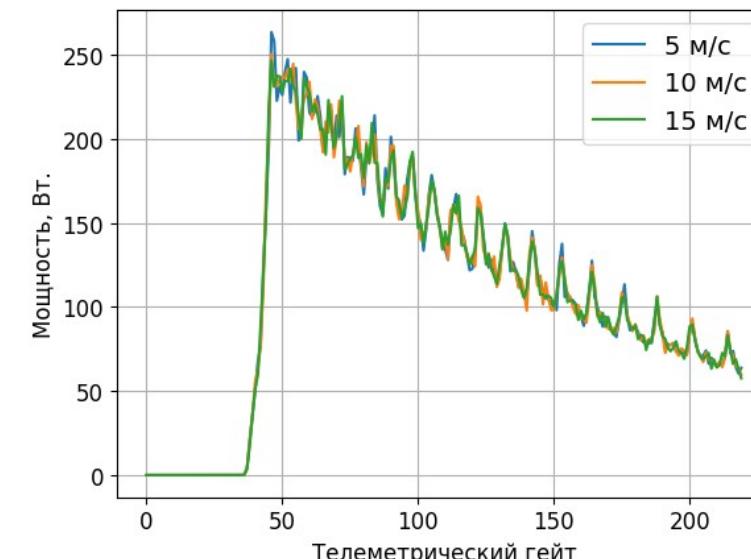
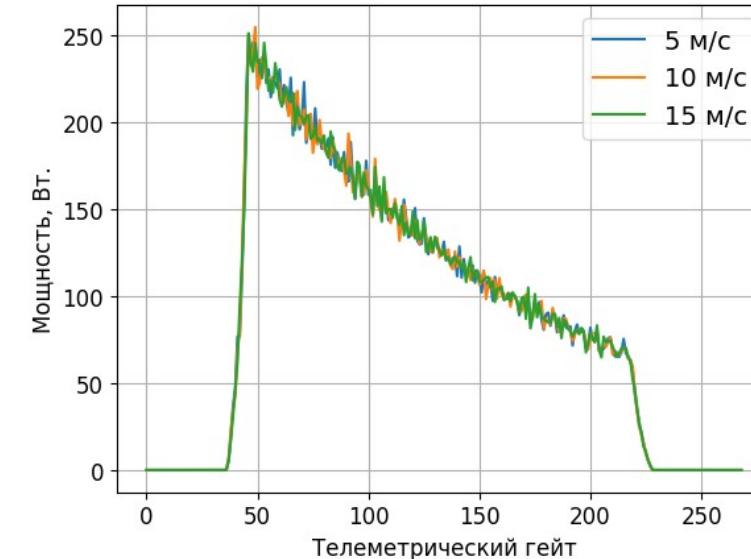
МОДЕЛЬ ДЛЯ РАБОТЫ



# Численная модель формы отраженного импульса



**Форма отражённого импульса от зеркальной поверхности (слева), от квазиреальной поверхности(синусоида) (справа сверху), от квазиреальной поверхности (модифицированная синусоиды ) (справа снизу)**



# Ретрекинг формы отражённого импульса (Ocean - 1)

$$P(t) = \frac{\sigma_0}{2} \cdot \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \cdot \sin(\xi)^2\right) \cdot [1 + \operatorname{erf}(u)] \exp(-v)$$

$$\gamma = 0,724 (\sin(\theta_{3dB}))^2,$$

$$u = \frac{t - \tau - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v = \alpha \left( t - \tau - \frac{\alpha}{2} \sigma_c^2 \right),$$

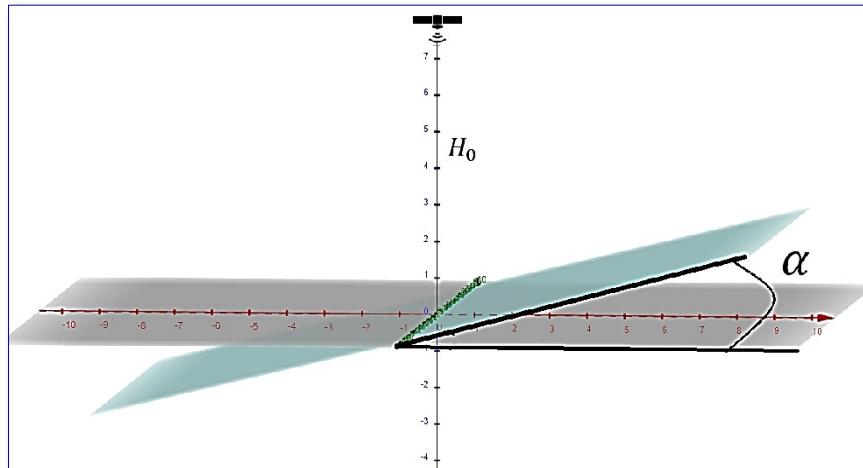
$$\alpha = \frac{4c}{\gamma H} \left( \cos(2\xi) - \frac{(\sin(2\xi))^2}{\gamma} \right),$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_P^2 + \left( \frac{h_{swh}}{2c} \right)^2}, \quad \sigma_P = \frac{0,5}{BW}.$$

$\tau$	– «эпоха», номер гейта;
$\sigma_0$	– коэффициент обратного рассеивания ;
$h_{swh}$	– значимая высота морских волн;
$\xi$	– угол отклонения антенны от положения надира;
$\theta_{3dB}$	– диаграммы направленности антенны на уровне 3 дБ по мощности;
$H$	– расстояние от спутника до поверхности;
$R$	– радиус Земли;
$c$	– скорость света;
$BW$	– ширина зондирующего импульса;

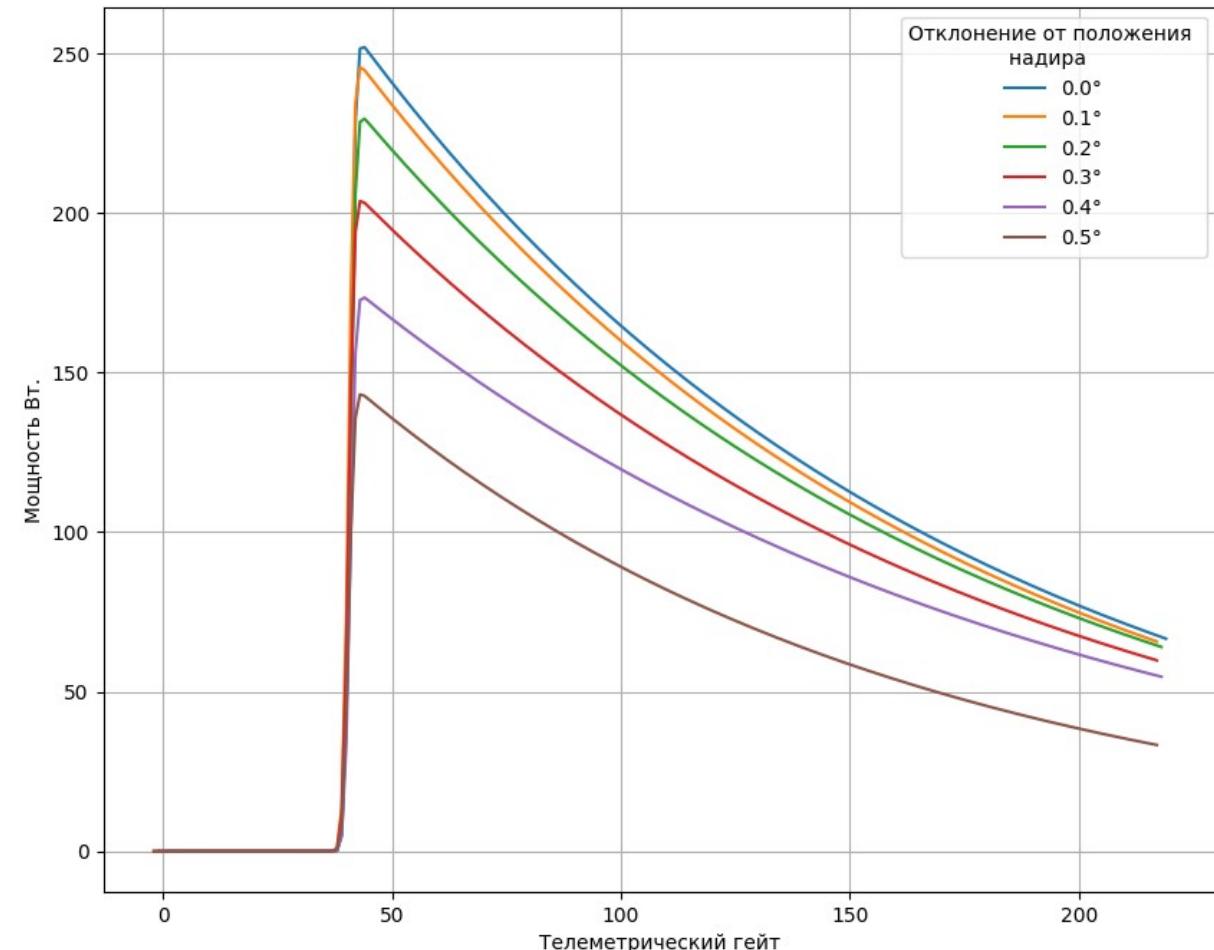
# Численный эксперимент №1

## Изменение угла

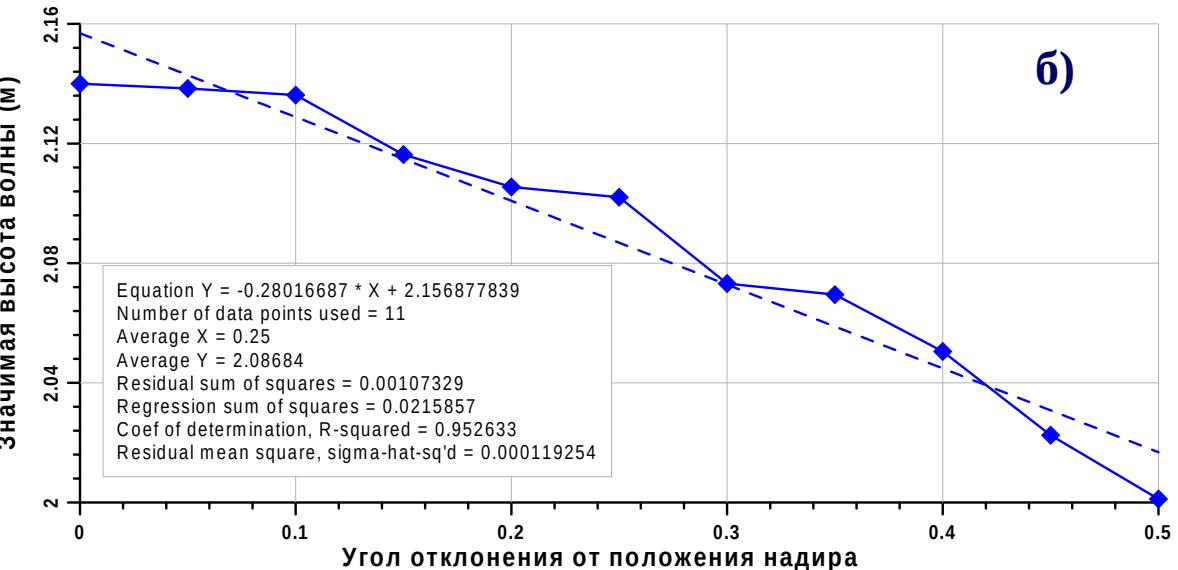
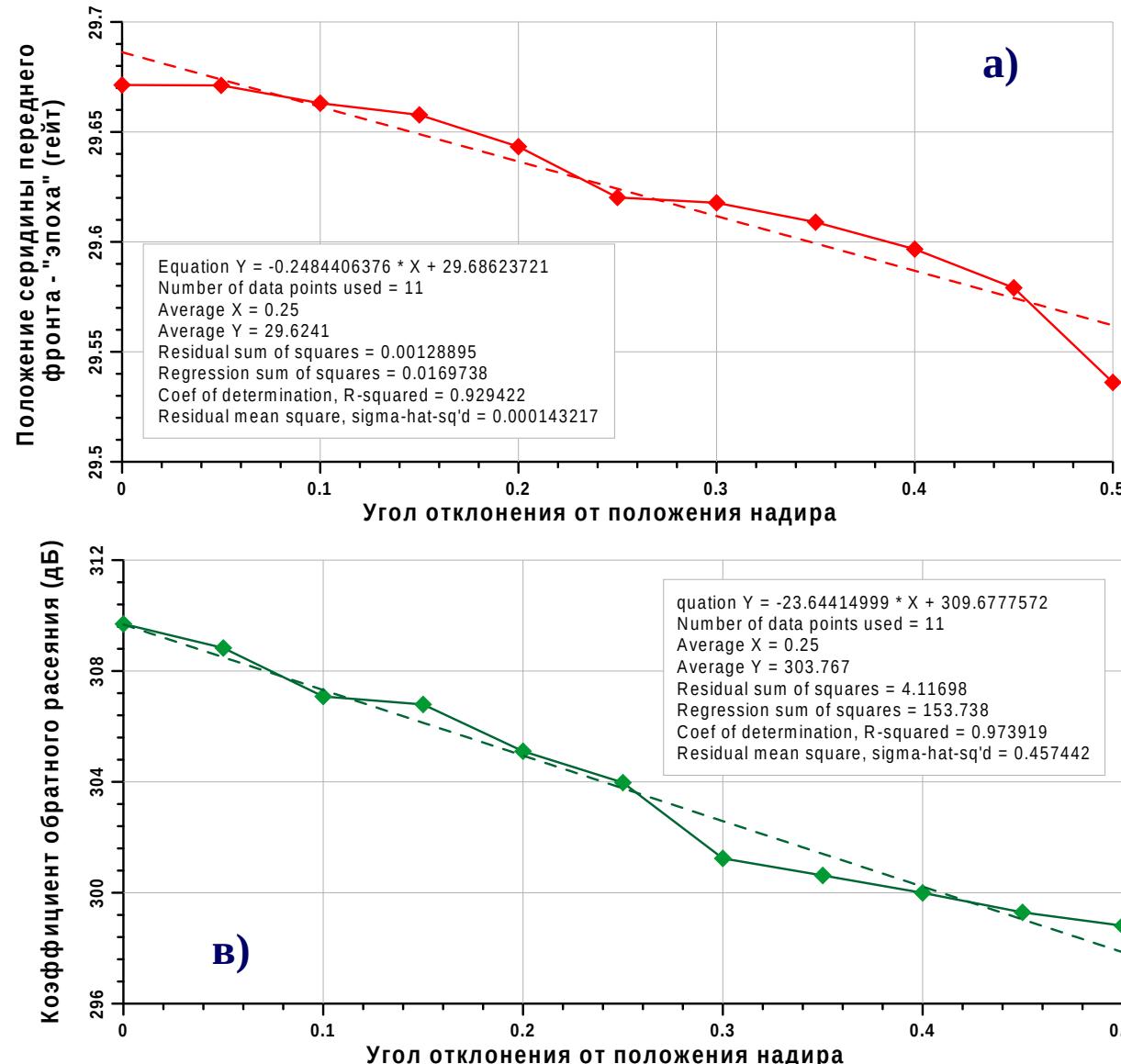


- $H_0$  - высота зондирования альтиметром поверхности
- $\alpha$  – угол между поверхностью и плоскостью  $xy$

## Импульс от взволнованной поверхности для разных углов

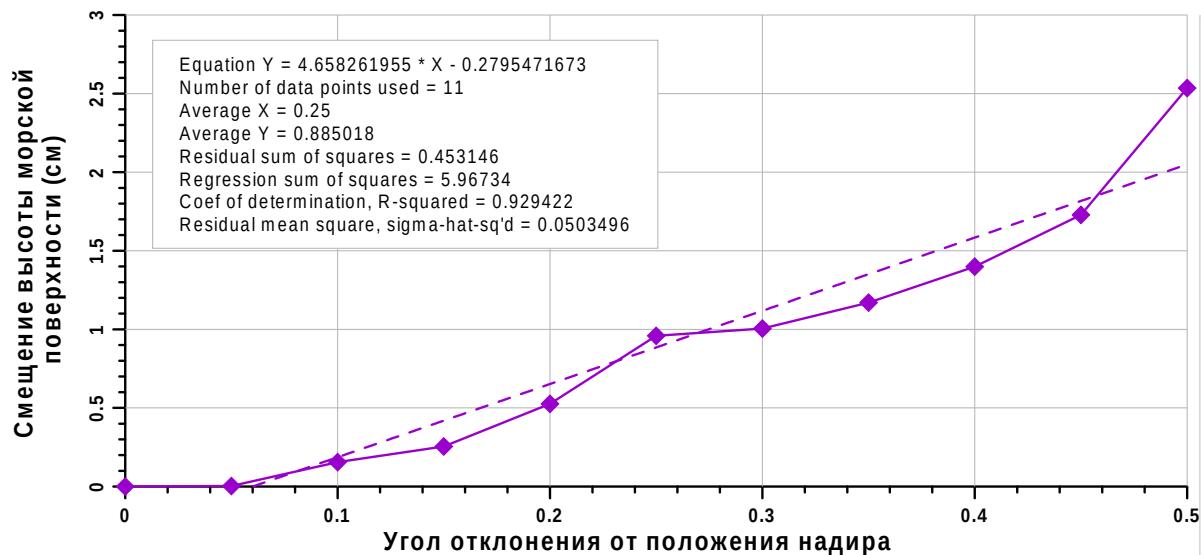


# Численный эксперимент №1

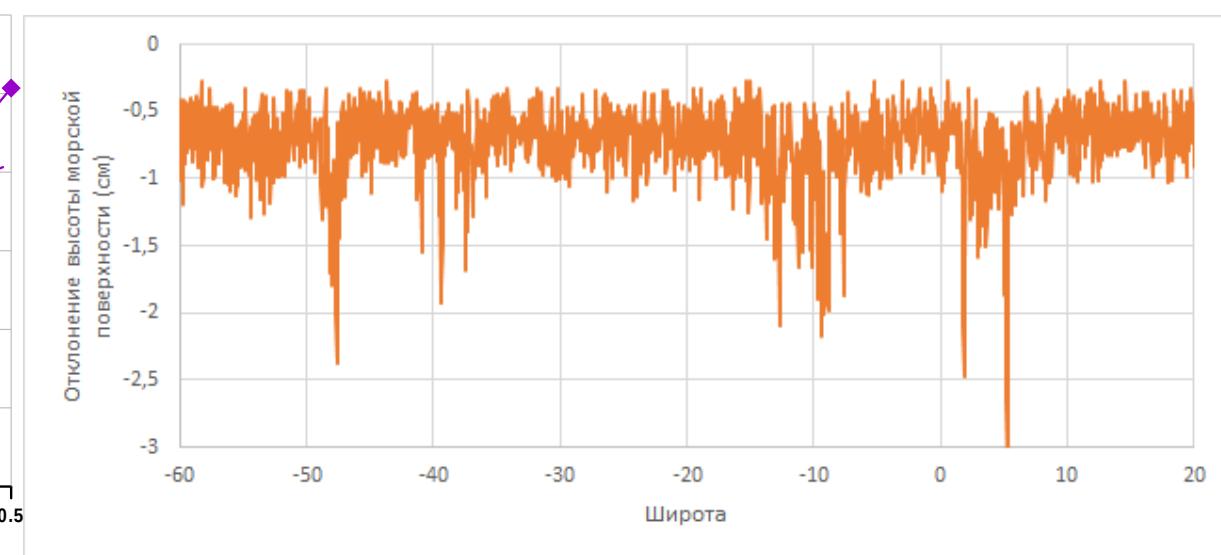


Зависимость «эпохи» (а), значимой высоты волны (б) и коэффициента обратного рассеяния (в) от угла отклонения от положения надира

# Численный эксперимент №1



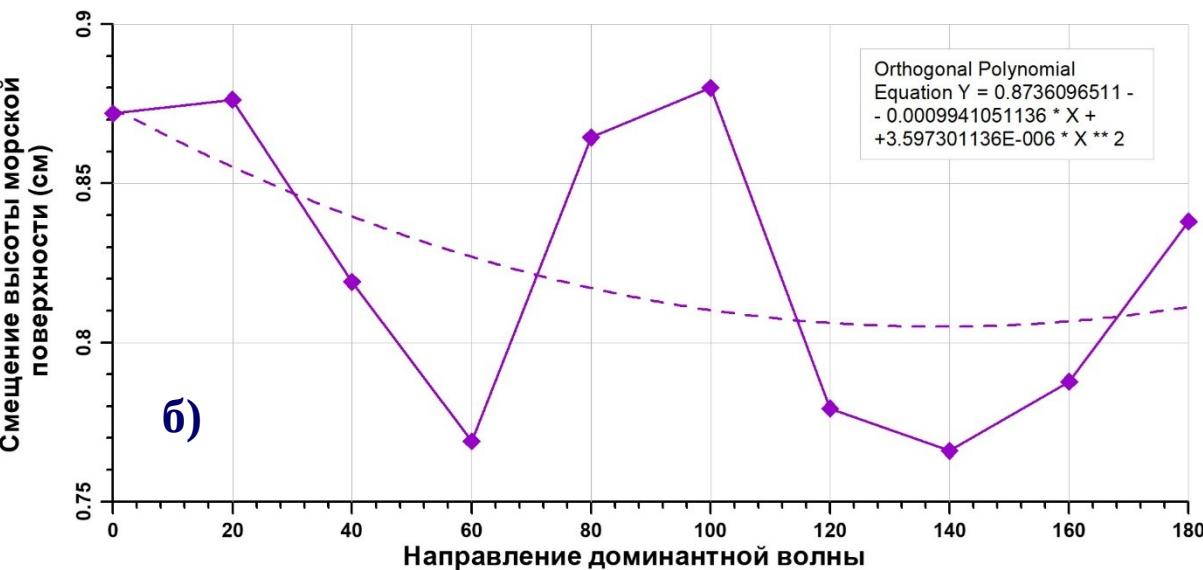
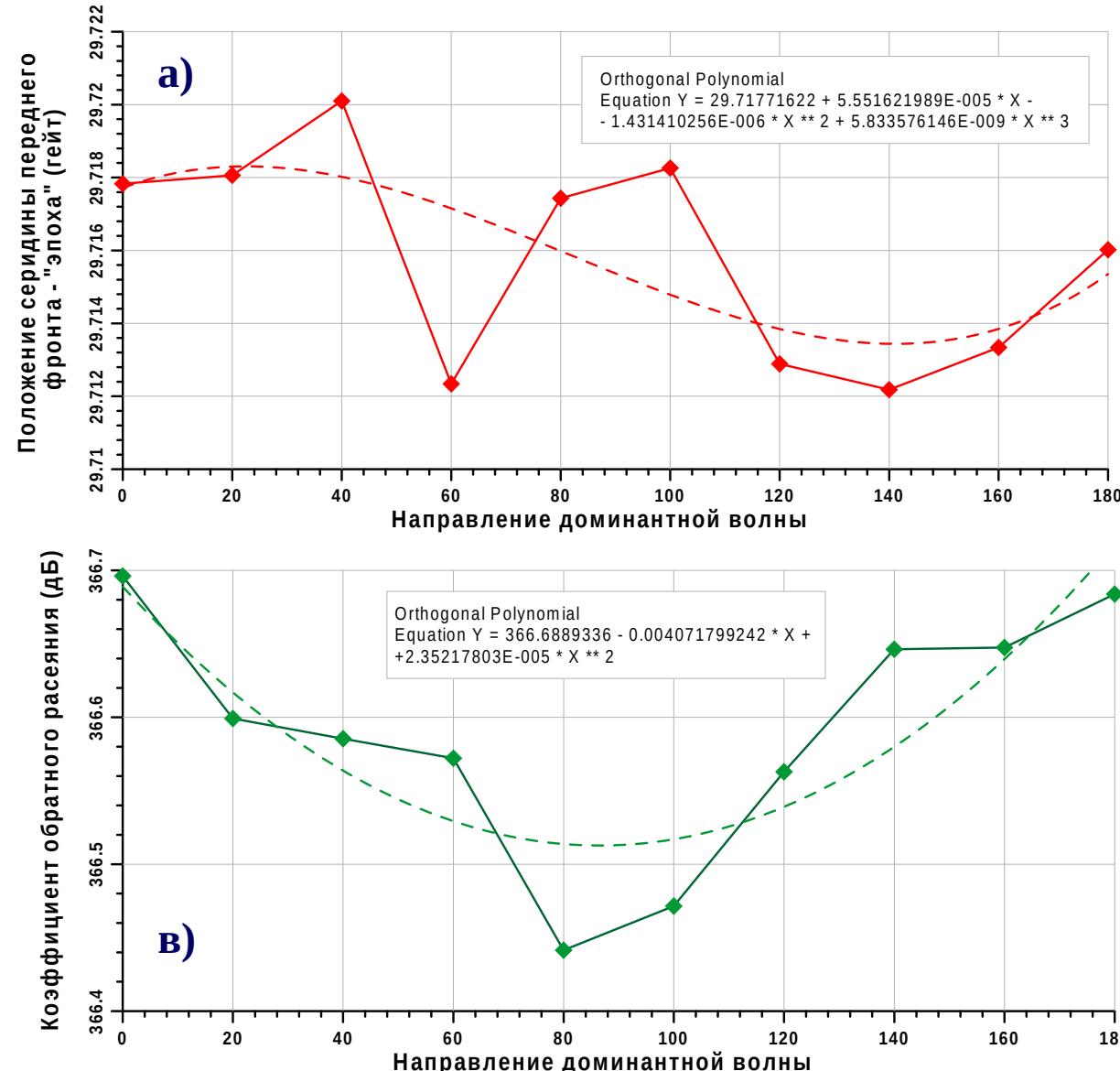
**Зависимость ошибки в расчётах высоты морской поверхности от угла отклонения от положения надира**



**Ошибки в расчётах высоты морской поверхности от угла отклонения от положения надира вдоль 53 трека 397 цикла изомаршрутной программы спутника Jason-3**

**Отклонение оси антенны альтиметра от положения надира приводит к уменьшению коэффициент обратного рассеяния, величины значимых высот волн и , середины переднего фронта отражённого импульса («эпохи»), что приводит к уменьшению времени отражения зондирующего импульса и к ошибке в расчётах высот морской поверхности. Для данных альтиметрических измерений спутника Jason-3 эта ошибка составила  $0,89 \pm 0,48$  см.**

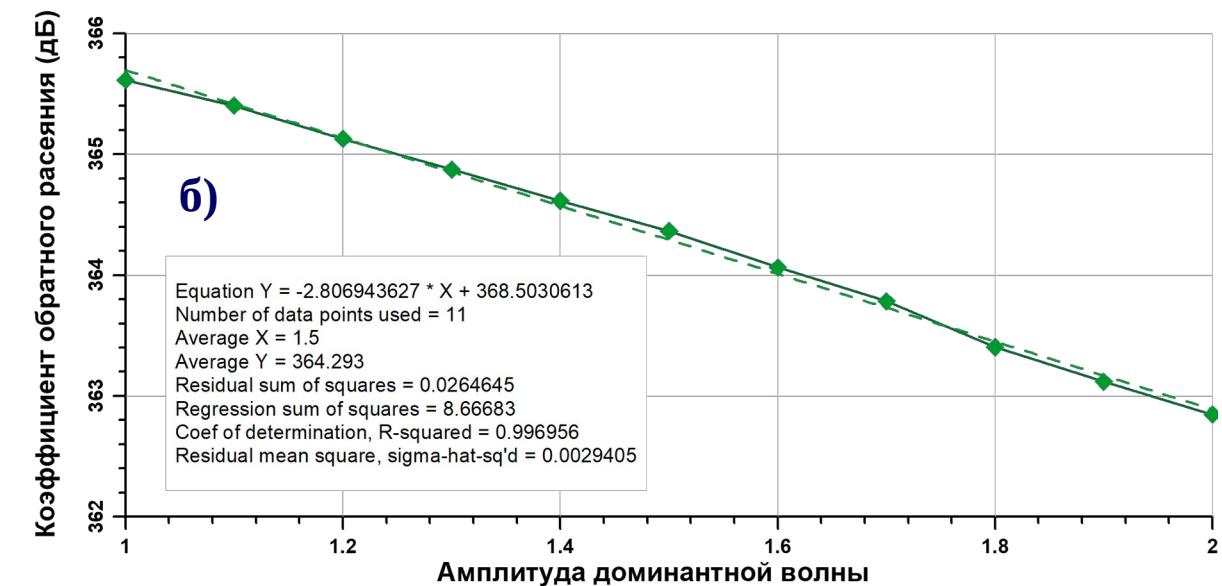
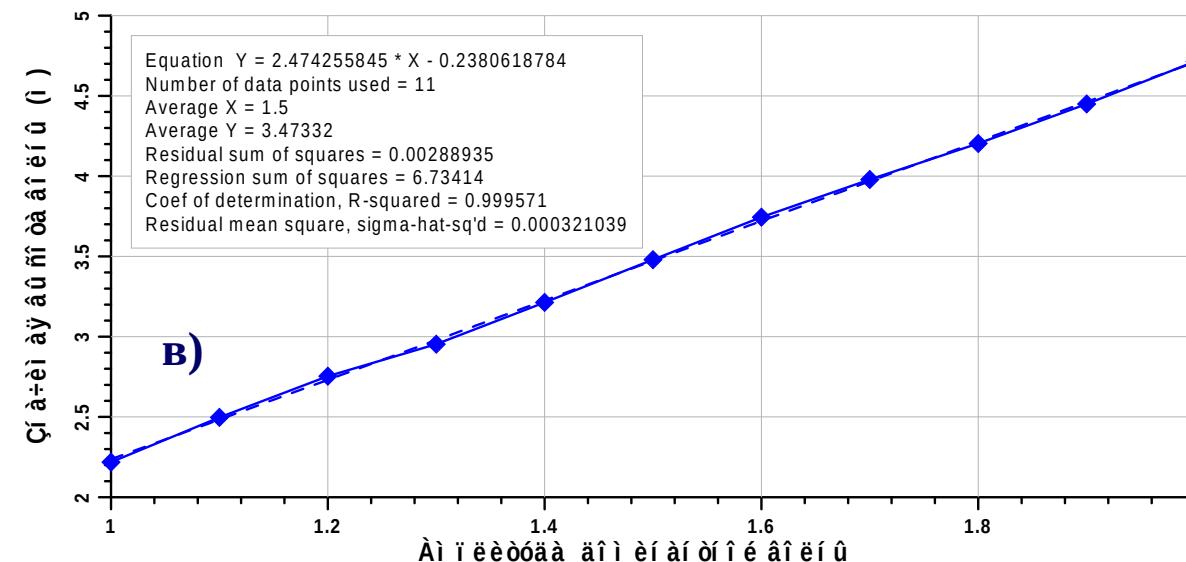
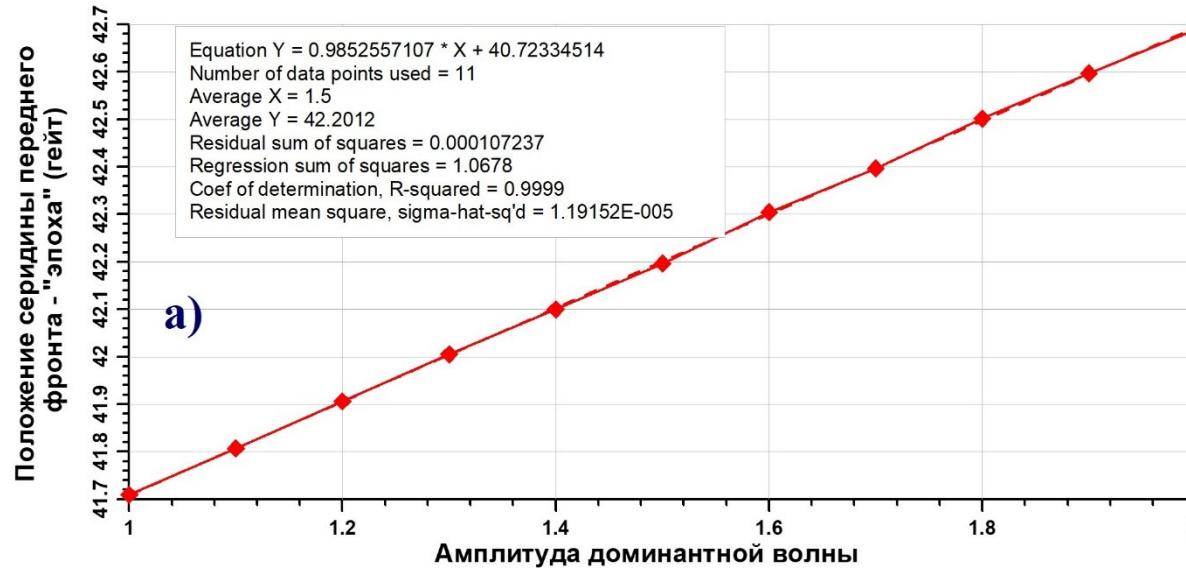
# Численный эксперимент №2



**Зависимость «эпохи» (а), ошибки в расчётах высоты морской поверхности (б) и коэффициента обратного рассеяния (в) от угла поворота поверхности,**

**Ошибка расчёта высоты морской поверхности составляет  $0,18 \pm 0,25$  см.**

# Численный эксперимент №3



Зависимость «эпохи» (а), ошибки в расчётах высоты морской поверхности (б) и коэффициента обратного рассеяния (в) от амплитуды доминантной волны,

Ошибка расчёта высоты морской поверхности составляет  $0.83 \pm 0.05$  см.

# Заключение

Результаты показали, что при отклонении антенны наблюдается смещение середины переднего фронта импульса и снижение значимой высоты волн, с ошибкой измерения высоты морской поверхности  $0,89 \pm 0,48$  см для данных спутника Jason-3. При вращении поверхности ошибка составила  $0,18 \pm 0,25$  см, а при изменении амплитуды волны —  $0,83 \pm 0,05$  см.

## **Главный вызов: поправка SSB (Sea State Bias)**

Зависит от состояния поверхности (ветровые и доминантные волны, электромагнитные эффекты).

Точный расчёт требует моделирования (математического/численного) из-за сложности натурных экспериментов.

## **Перспективы**

Оптимизация алгоритмов SSB — ключ к повышению точности данных.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ