

Александр О. Слободянюк

Сергей А. Лебедев



Национальный исследовательский университет «МИЭТ»



Геофизический Центр РАН



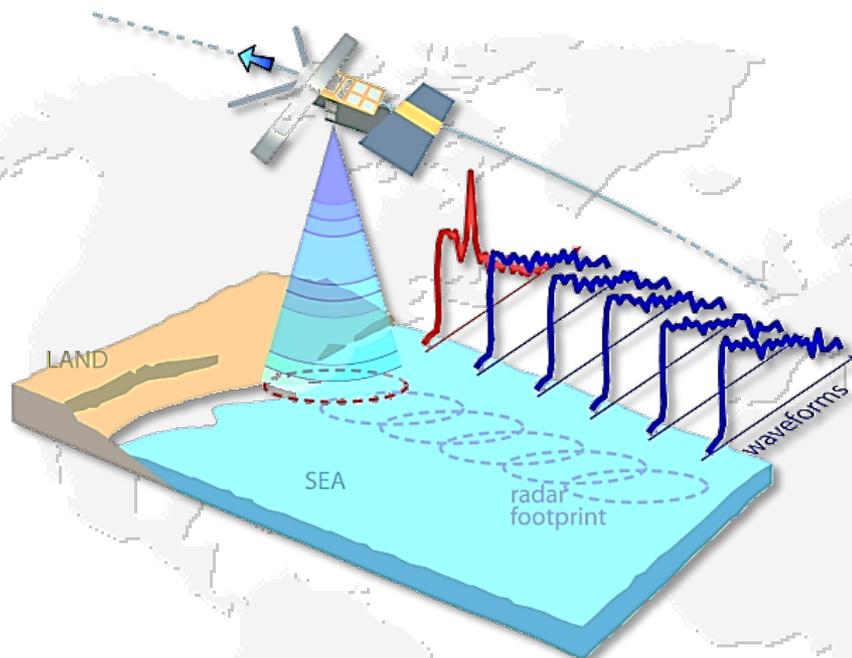
Майкопский государственный технологический университет



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМЫ
ОТРАЖЁННОГО ИМПУЛЬСА ОТ
ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ
ОТКЛОНЕНИИ ОСИ АНТЕННЫ
АЛЬТИМЕТРА ОТ ПОЛОЖЕНИЯ НАДИРА**

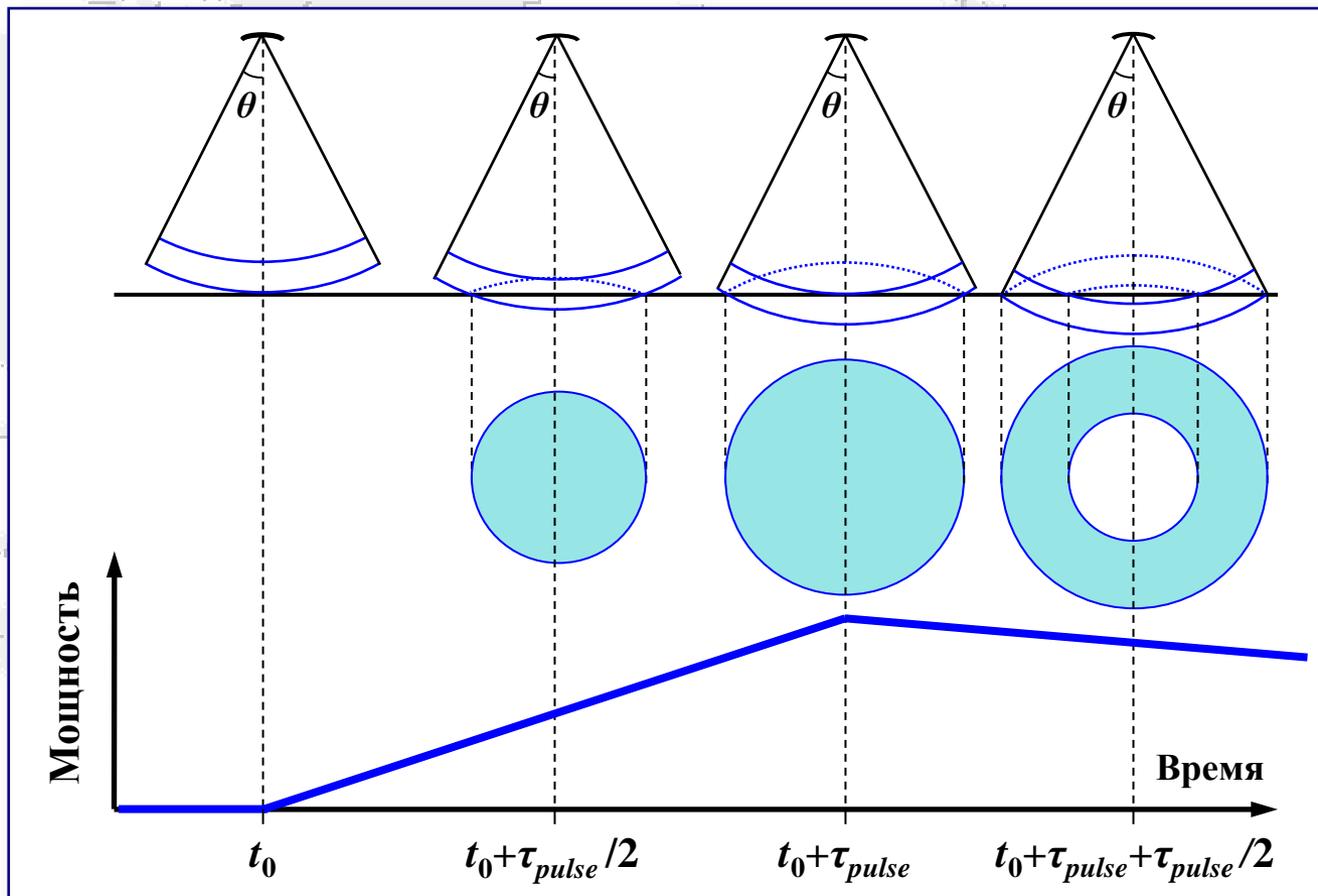


Аннотация



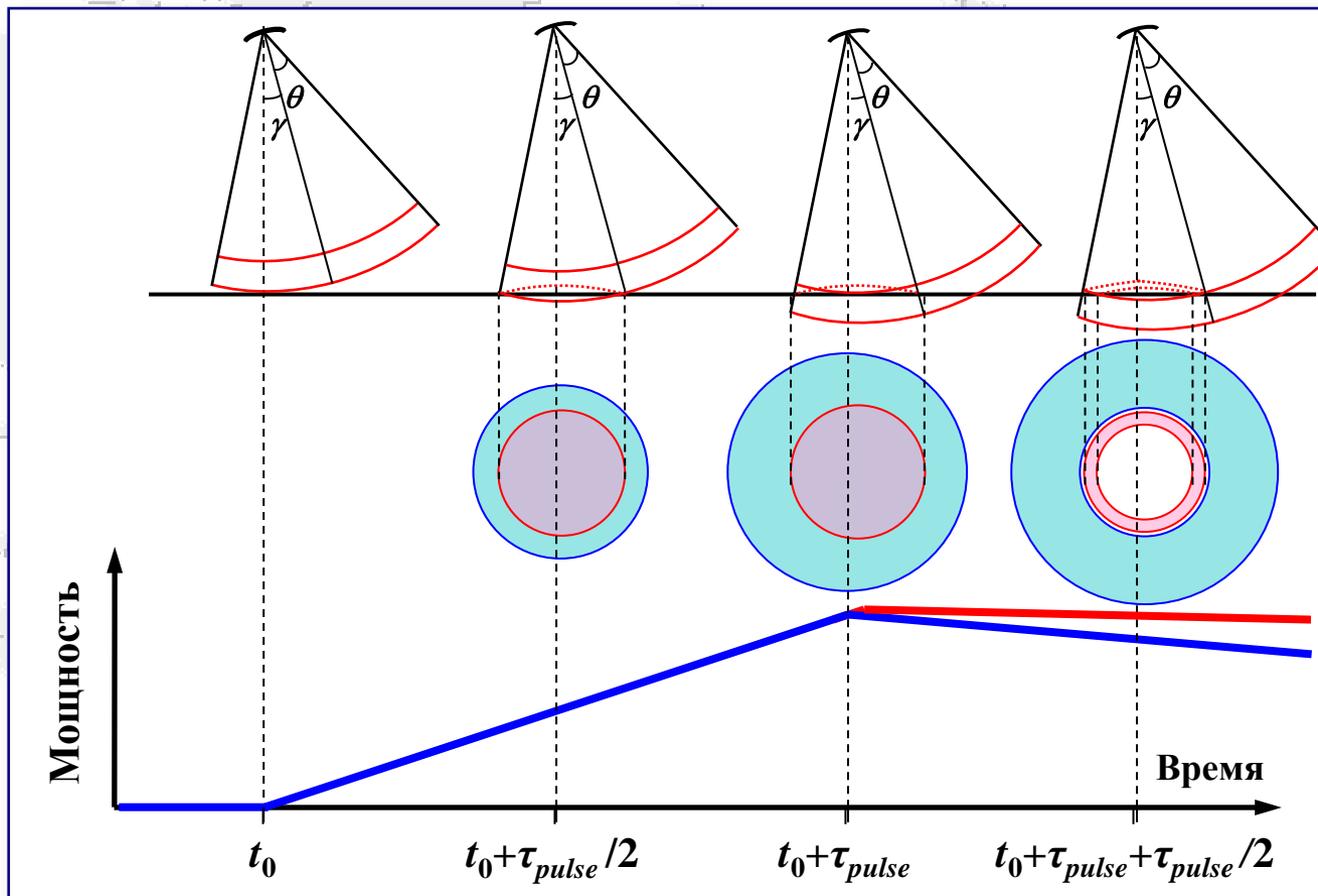
Для спутниковой альтиметрии хорошо разработаны теоретические модели рассеяния радиолокационного сигнала альтиметра, отражённого от подстилающей (морской) поверхности (Brown, 1977; Barrick, Lira, 1985). Основные алгоритмы ретрекинга базируются на этих моделях. Благодаря теоретическим моделям, численное моделирование формы отражённого импульса является эффективным инструментом для моделирования работы как альтиметра, так и отладки алгоритмов ретрекинга. Данный подход позволяет провести ряд численных экспериментов и рассмотреть по отдельности и в комплексе влияние множества факторов, которые вносят вклад в точность измерений значимых высот волн морской поверхности.

Форма отражённого импульса от зеркальной поверхности в положении надира



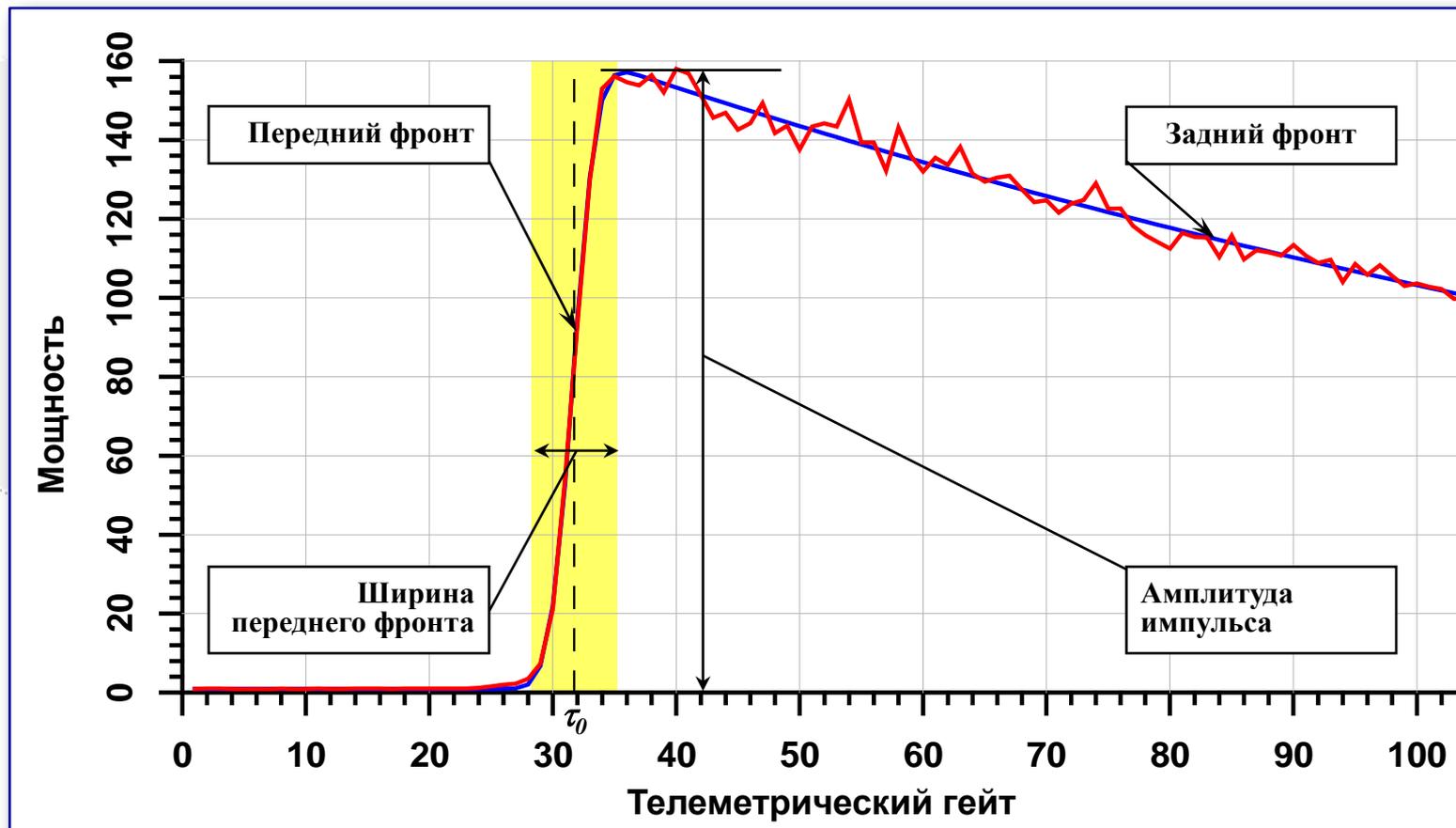
Зависимость формы и площади сегмента зеркальной подстилающей поверхности, с которого отражается зондирующий импульс альтиметра от времени (θ — угловое разрешение антенны альтиметра, τ_{pulse} — длительность зондирующего импульса)

Форма отражённого импульса от зеркальной поверхности при отклонении от положения надира



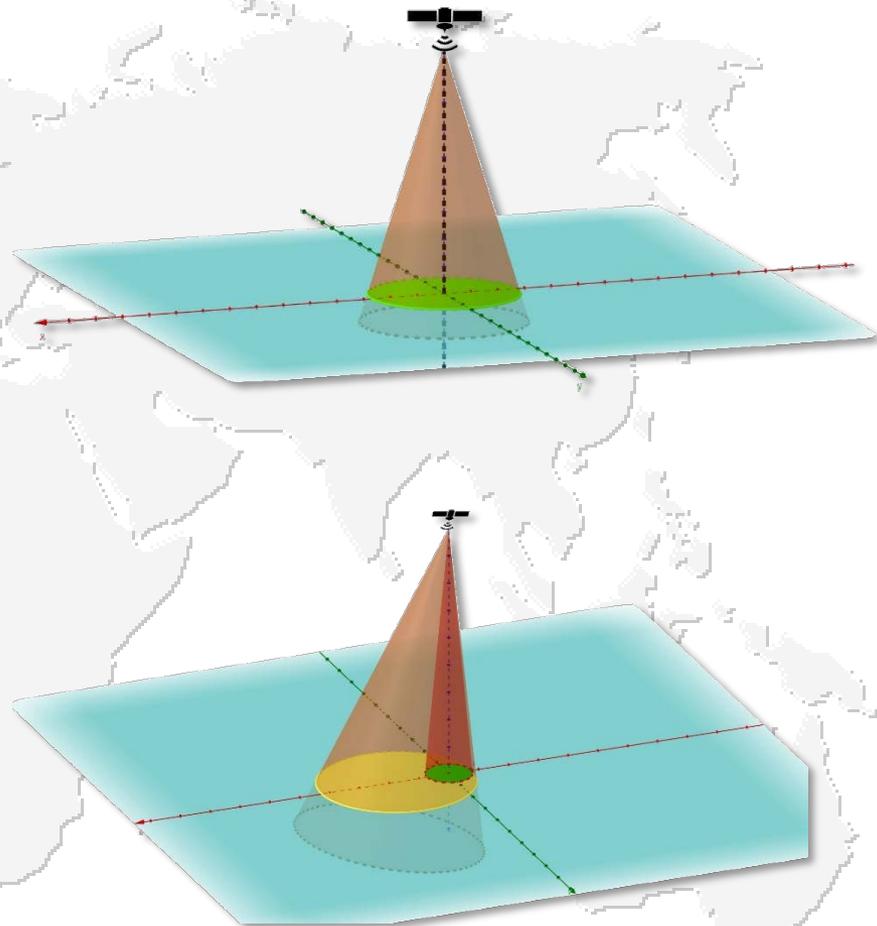
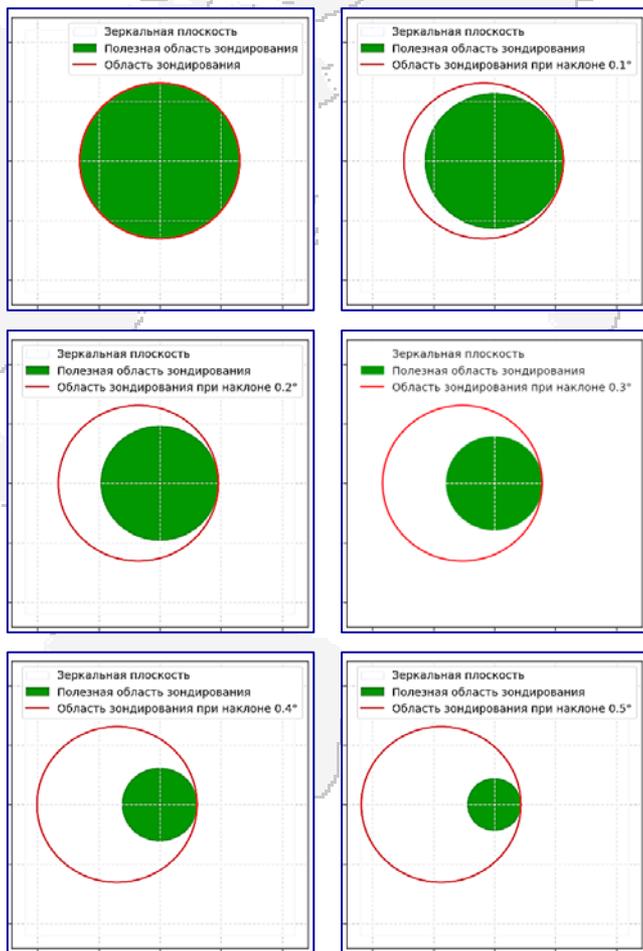
Зависимость от времени формы и площади сегмента подстилающей поверхности, с которого отражается зондирующий импульс альтиметра при отклонении антенны от положения надира на угол γ (красная линия). Синим цветом показаны формы и площади при антенне в положении надира

Элементы формы отражённого импульса



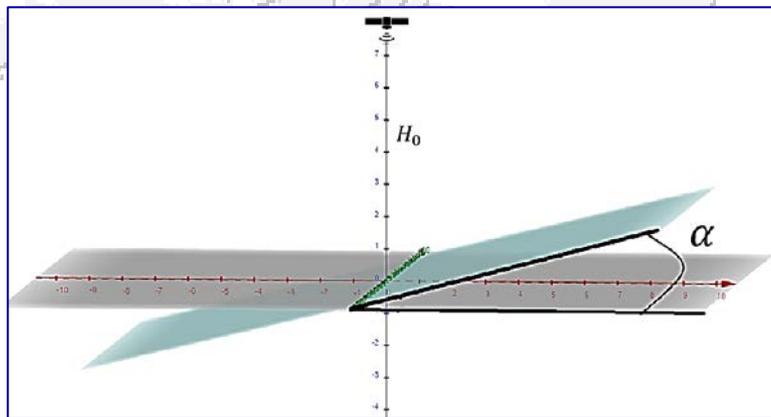
Форма импульса, отражённого от безграничной подстилающей поверхности, аппроксимированная по формуле Брауна (синяя линия) и осреднённая за 1 с форма отражённого импульса для условий открытого океана (красная линия), где τ_0 — середина переднего фронта или «эпоха». Жёлтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимой высоты волн (h_{swh})

Засвеченная площадь при отклонении от положения надира



Зависимость полезной засвеченной площади от угла отклонения от положения надира

Моделирование отраженного импульса от зеркальной плоскости



- H_0 - высота зондирования альтиметром поверхности
- α – угол между зеркальной поверхностью и плоскостью xu

$$E_S(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} \exp(i(\omega t - \vec{k}\vec{R})) U(t) G(\theta),$$

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

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 \vec{r}

Моделирование отраженного импульса от зеркальной плоскости

$$E = \frac{E_0}{R^2} \exp(-2ik\vec{R}) \sigma^0 G^2(\theta)$$

Уравнение амплитуды поля E вблизи приемной антенны где σ^0 – 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.

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

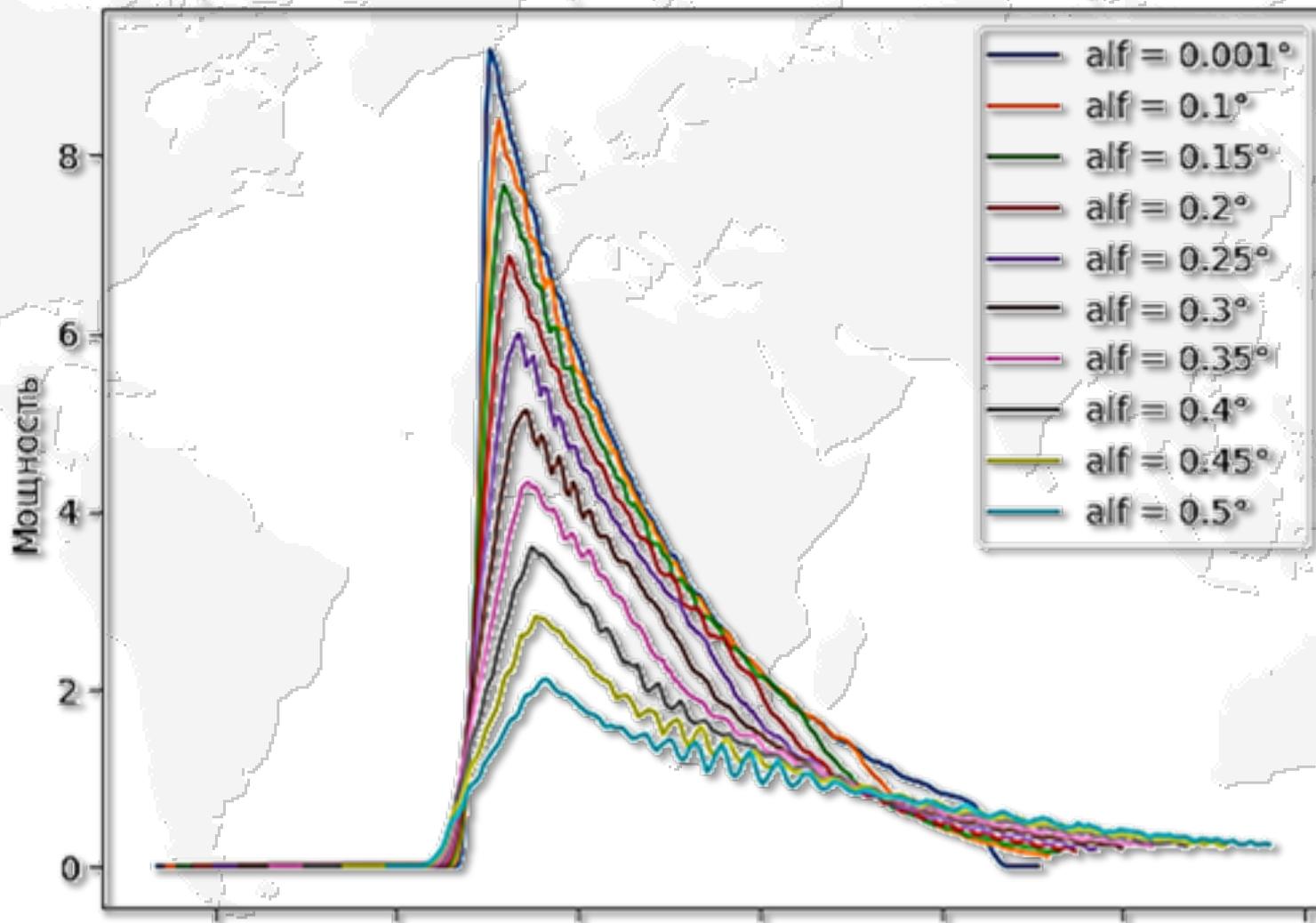
Результирующая мощность отражённого импульса

Моделирование отраженного импульса от зеркальной плоскости

Начальные условия для модели:

- $H_0 = 1000 \text{ км}$
- $\theta_{\text{зонд}} = 1.5^\circ$
- $G_0 = 10$ (коэффициент усиления антенны)
- $\tau = 3.125$ наносекунд
- $P_{\text{излучения}} = 50$ Ватт
- $E_0 = 12250$ В/м
- $S_{\text{плоскости}} = 22 \times 22 \text{ км}^2$
- α берется от 0° до 0.5° с шагом 0.1
- $\nu = 20$ Гц ($\omega = 2\pi \cdot 20$)

Зависимость формы отражённого импульса от угла отклонения от положения надир



Алгоритм ретрекинга по Брауну

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

$$K = 1, \quad \gamma = 0,724 (\sin(\theta_{3dB}))^2,$$

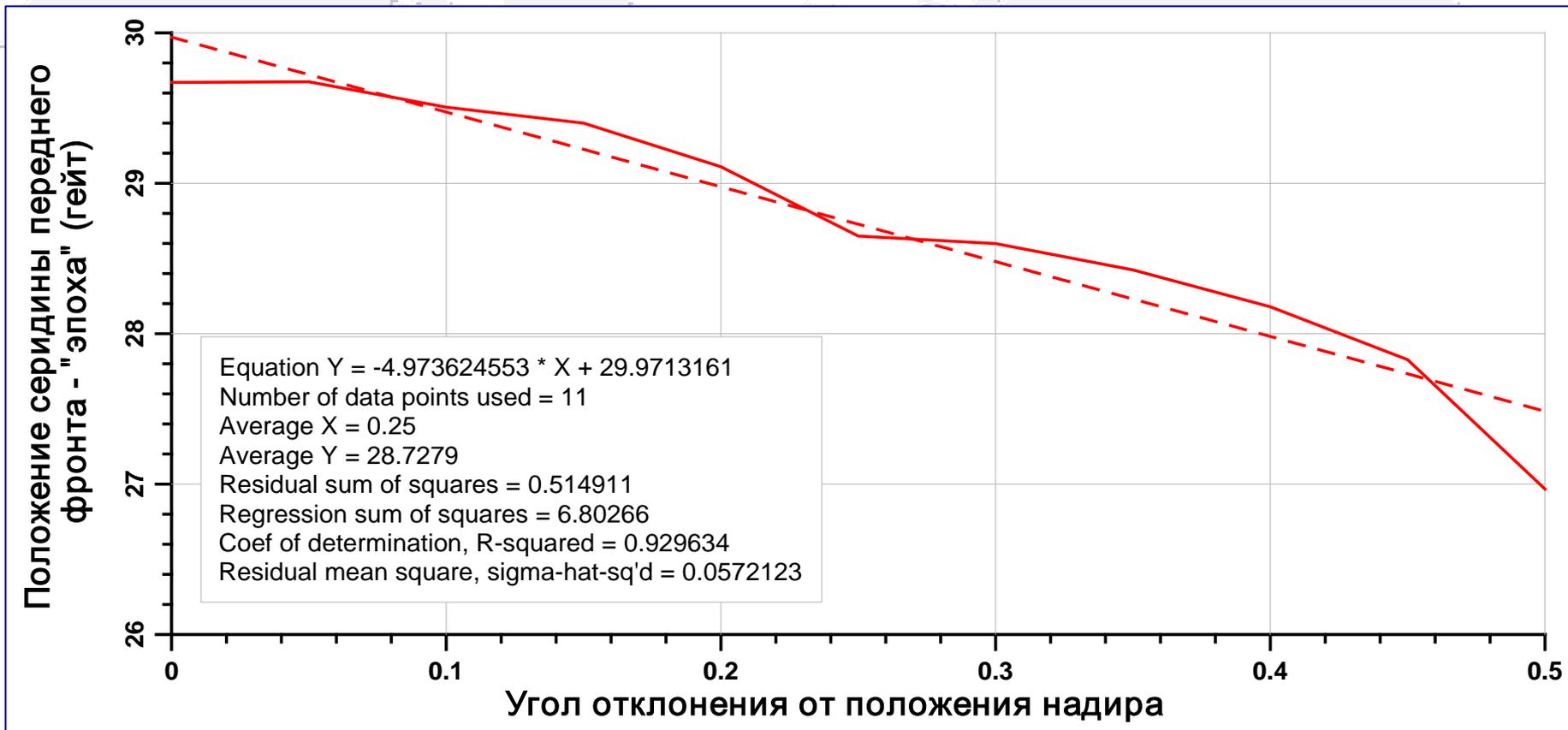
$$u = \frac{t - \tau - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v = \alpha \left(t - \tau - \frac{\alpha}{2} \sigma_c^2 \right),$$

$$\alpha = \frac{4c}{\gamma H \left(1 + \frac{H}{R} \right)} \left(\cos(2\xi) - \frac{(\sin(2\xi))^2}{\gamma} \right),$$

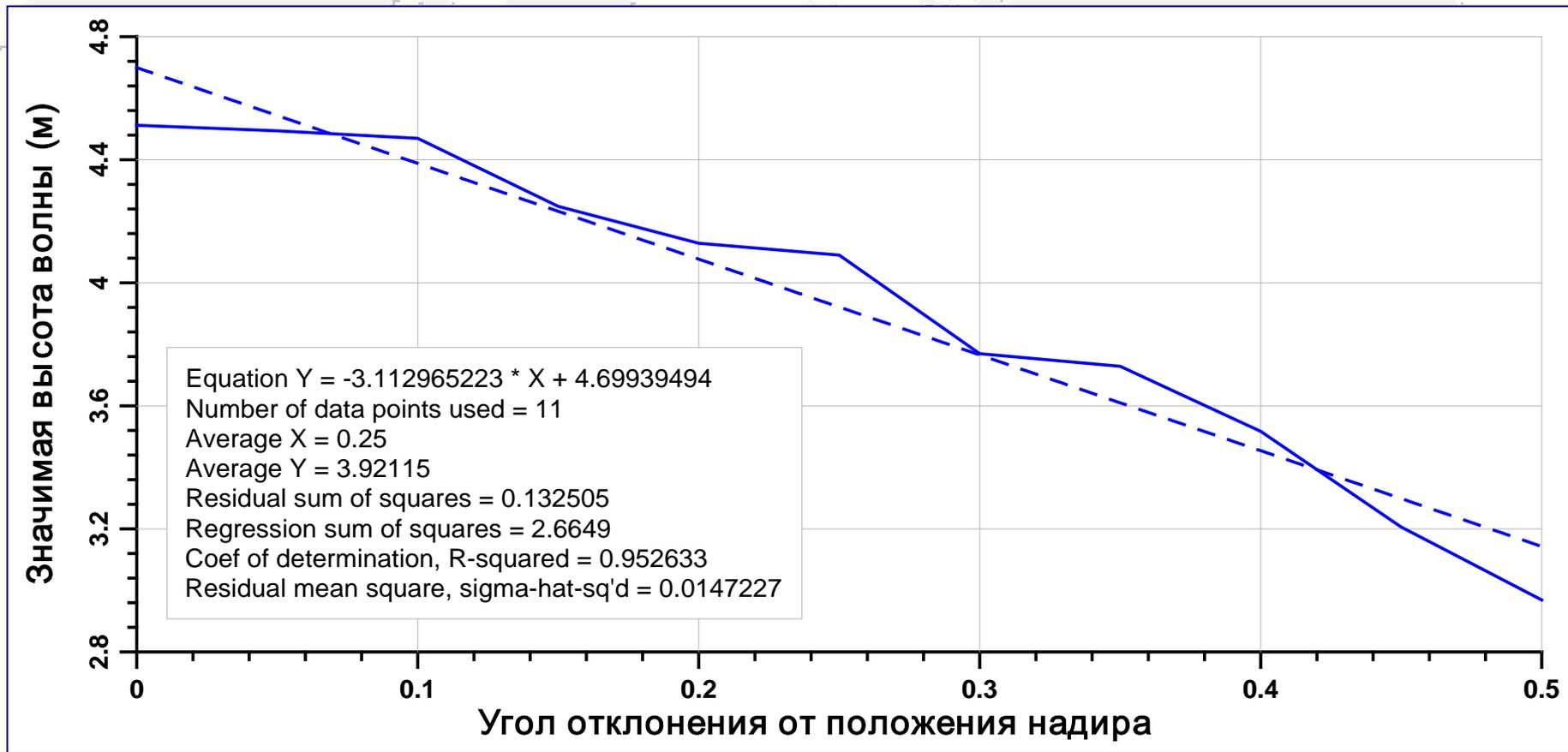
$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_P^2 + \left(\frac{h_{swh}}{2c} \right)^2}, \quad \sigma_P = \frac{0,5}{BW}.$$

- τ – «эпоха», номер гейта;
- σ_0 – коэффициент обратного рассеивания ;
- h_{swh} – значимая высота морских волн;
- ξ – угол отклонения антенны от положения надира;
- θ_{3dB} – угловое разрешение антенны;
- H – расстояние от спутника до поверхности;
- R – радиус Земли;
- c – скорость света.

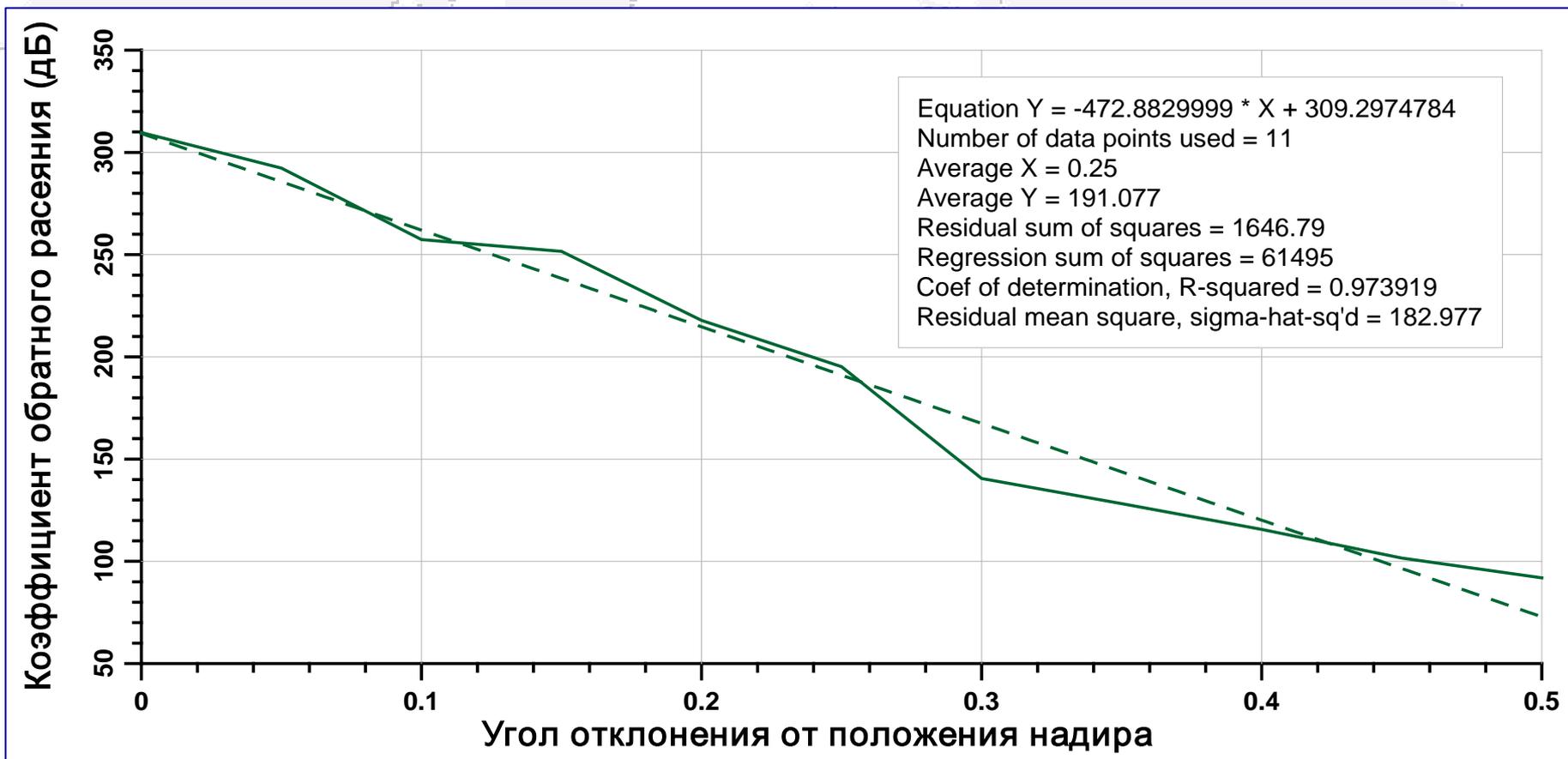
Зависимость параметров отражённого импульса от угла отклонения от положения надира



Зависимость параметров отражённого импульса от угла отклонения от положения надира



Зависимость параметров отражённого импульса от угла отклонения от положения надира



Заключение

Отклонение оси антенны альтиметра от положения надира :

- Приводит к уменьшению «полезной» засвеченной области;
- Приводит к сдвигу середины переднего фронта отражённого импульса («эпохи») в сторону уменьшения $\tau = -4,973624553 \cdot \varphi + 29.9713161$ (φ – угол отклонения), что в свою очередь приводит к уменьшению времени отражения
- При отклонении на $0,5^\circ$ происходит смещение середины переднего фронта почти на 3 гейта, что может приводить при расчётах высот морской поверхности к ошибке около 2 м;
- Уменьшаются величины значимых высот волн, что означает изменения угла наклона переднего фронта;
- При увеличении угла отклонения уменьшается коэффициент обратного рассеяния, что может привести к ошибке расчеты модуля приводного ветра.



Спасибо за внимание

