

Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет имени Н. И. Лобачевского  
Радиофизический факультет

## Численное моделирование морской поверхности

Работу выполнил:  
Понур К.А.

Научный руководитель:  
Караев В.Ю.

30 мая 2020 г.

# Введение

## Цели:

- 1 Изучить принципы моделирования морской поверхности.
- 2 Оптимизировать существующие алгоритмы.

## Актуальность работы:

- 1 Тестирование и разработка алгоритмов восстановления океанографической информации
- 2 Оценка возможностей новых радиолокаторов
- 3 Постановка численных экспериментов, в частности накопление статистических данных

# Двумерная модель поверхности волнения

Представим морскую поверхность в виде суммы синусоид с детерминированными амплитудами и случайными фазами:

$$\zeta(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(k_n) \cdot \Phi_{k_n m}(\varphi_m) \cos\left(\omega_n t + \vec{k}_n \vec{r} + \psi_{nm}\right),$$

$\psi_{nm}$  – случайная фаза,  $A_n$  – амплитуда  $n$ -ой гармоники.

Амплитуда, которая является мощностью на интервале  $\Delta k_n$ , вычисляется по спектру моделируемой поверхности

$$A_n(k_n) = \sqrt{2S(k_n)\Delta k_n}$$

$\Phi_{nm}$  – азимутальное распределение, вычисляемое следующим образом:

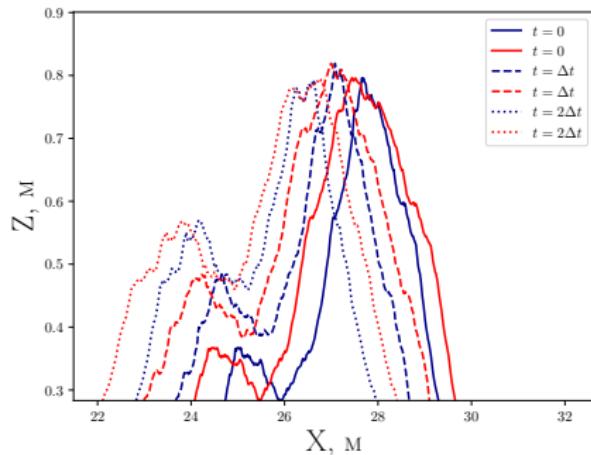
$$\Phi_{nm}(k_n, \varphi_m) = \sqrt{\Phi(k_n, \varphi_m)\Delta\varphi},$$

$\Delta\varphi$  – шаг по углу.

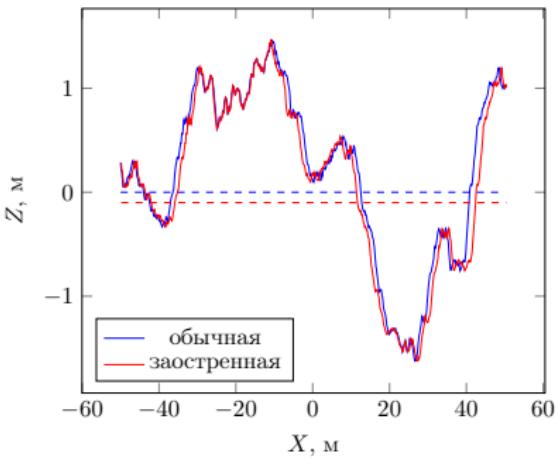
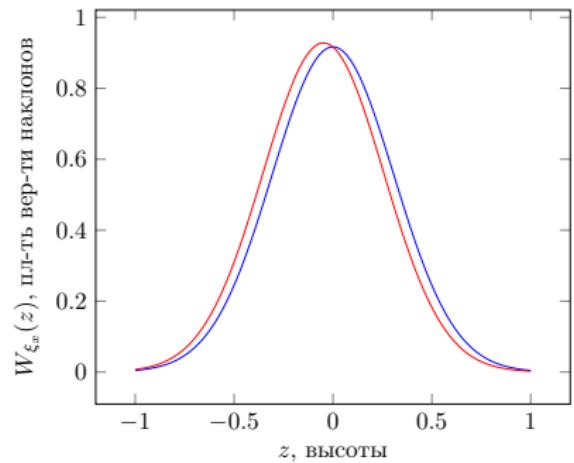
# Модель заостренной поверхности

$$\begin{cases} z(\vec{r}, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_m(\kappa_n, \varphi_m) \cos(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_{nm}), \\ x = x_0 - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_m(\kappa_n, \varphi_m) \cos \varphi_m \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_{nm}), \\ y = y_0 - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M A_n(\kappa_n) \cdot F_m(\kappa_n, \varphi_m) \sin \varphi_m \sin(\omega_n t + \vec{\kappa}_n \vec{r}_0 + \psi_{nm}), \end{cases}$$

где  $\vec{\kappa}$  – двумерный волновой вектор,  $\vec{r}_0 = (x_0, y_0)$ ,  $\vec{r} = (x, y)$



# Модель заостренной поверхности



$$\sigma_{\alpha\beta\gamma}^2 = \int \frac{\kappa_x^\alpha \kappa_y^\beta}{\kappa^\gamma} S(\vec{\kappa}) d\vec{\kappa},$$

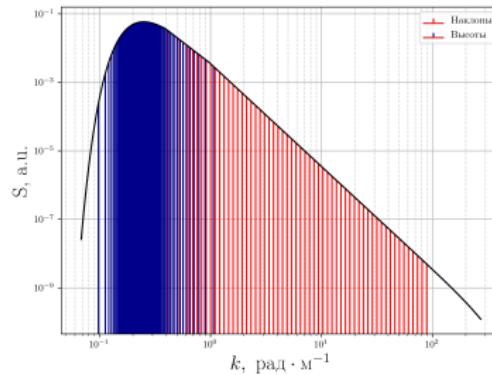
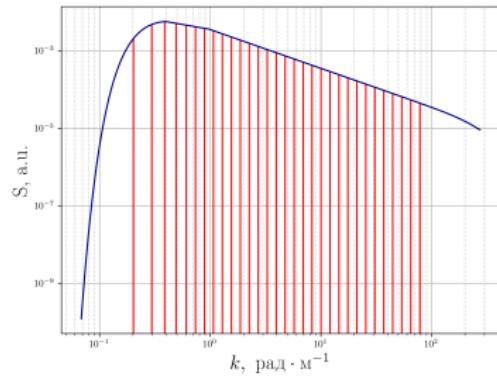
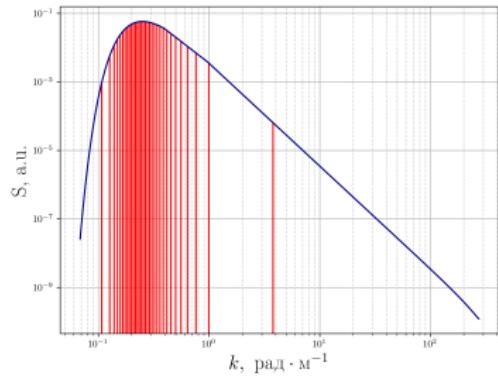
$$\sigma_n^2 = \int \kappa^n S(\vec{\kappa}) d\vec{\kappa}$$

$$\langle z \rangle = -\sigma_1^2, \quad \langle z^2 \rangle = \sigma_0^2 - 2\Sigma_1$$

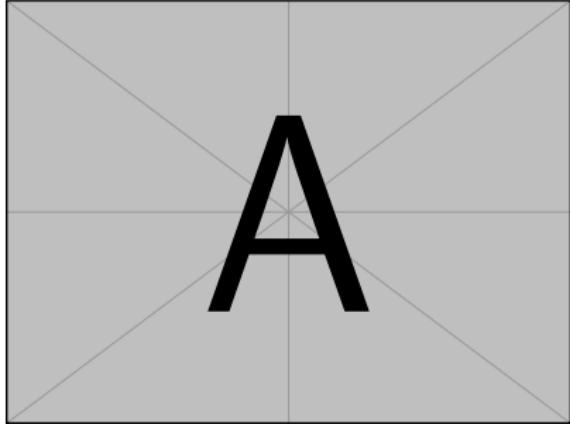
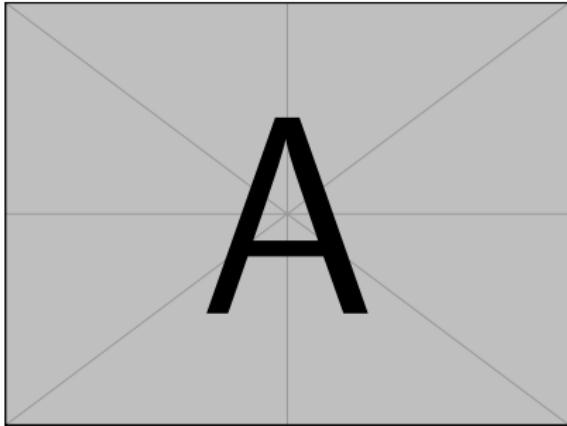
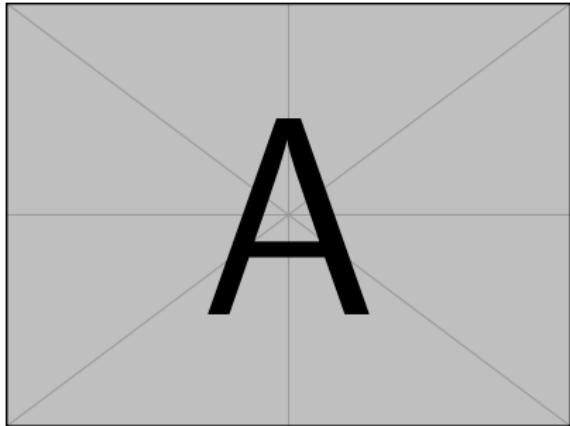
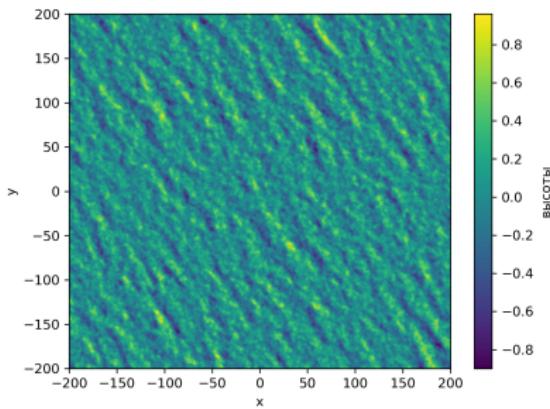
$$\Phi(\theta) = (1 - i\theta\sigma_1^2 + \theta^2\Sigma_1) \exp\left(-\frac{1}{2}\theta^2\sigma_0^2\right),$$

где \$\Sigma\_1 = \sigma\_{111}^4 - \sigma\_{201}^2\sigma\_{021}^2\$.

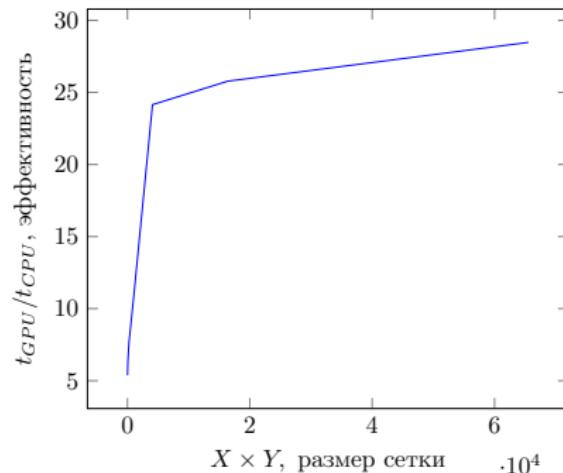
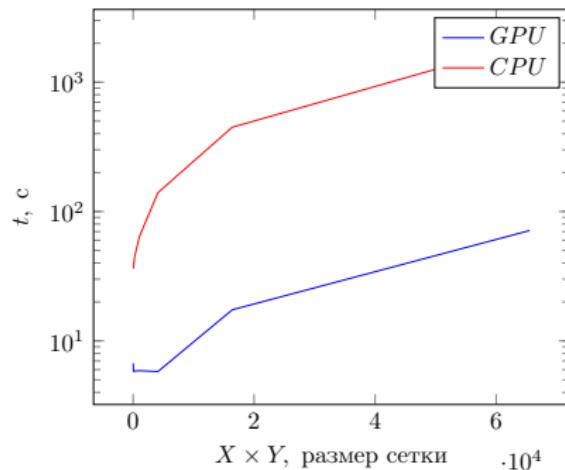
# Метод «отбеливания» спектра



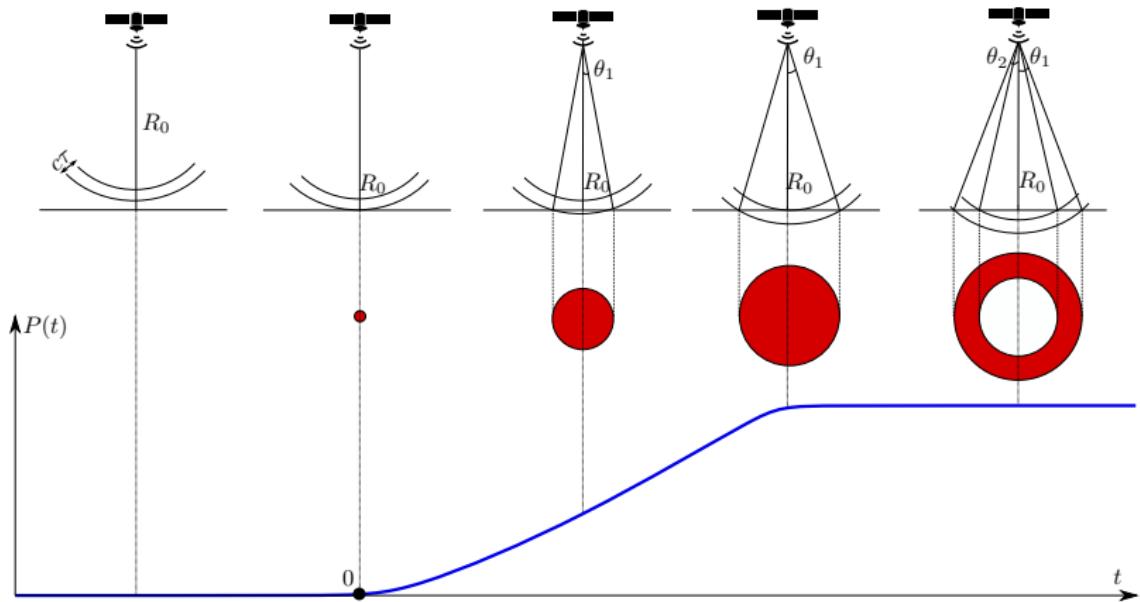
# Изображение поверхностей



# Увеличение производительности



# Моделирование отраженного импульса



# Моделирование отраженного импульса

$$P(t) = Ae^{-v}(1 + \operatorname{erf}(u)), \text{ где}$$

$$A = A_0 \exp\left\{\frac{-4}{\gamma} \sin^2 \xi\right\}, \quad u = \frac{t - \alpha \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v = \alpha \left(t - \frac{\alpha}{2} \sigma_c^2\right)$$

в которых

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

$$\gamma = \frac{\ln 2}{2} \sin^2 \theta_{-3dB}, \quad \sigma_c^2 = \sigma_p^2 + \frac{\sigma^2}{c^2},$$

$\xi \ll 1$  – малое отклонение антенны от надира,

$\theta_{-3dB}$  – ширина диаграммы направленности антенны на уровне  $-3dB$ ,

$h$  – высота радиолокатора над поверхностью земли,

$c$  – скорость света в вакууме,

$\sigma^2$  – дисперсия высот взволнованной морской поверхности.

# Моделирование отраженного импульса

$$P(t) = A \exp\left\{S_T\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right\} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{t - \tau}{\sigma_L}\right), \text{ где}$$

$S_T$  – коэффициент наклона заднего фронта импульса,

$\tau$  – эпоха,

$\sigma_L$  – ширина переднего фронта импульса,

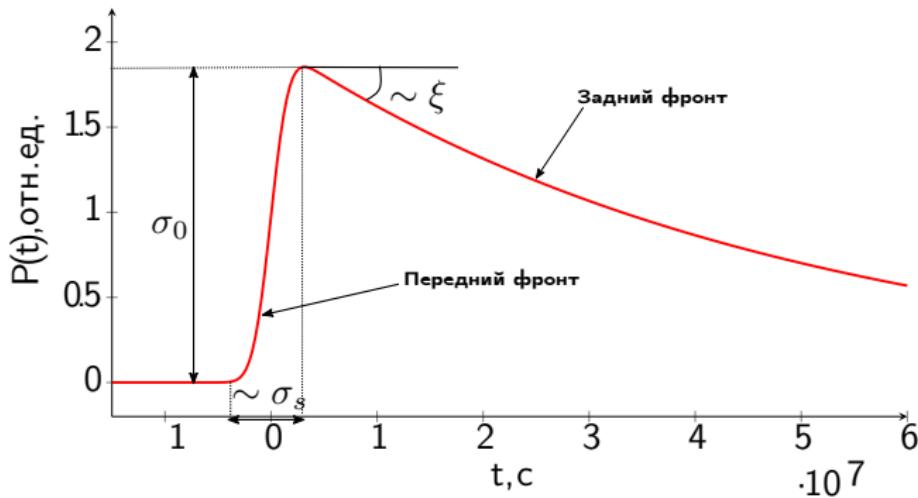
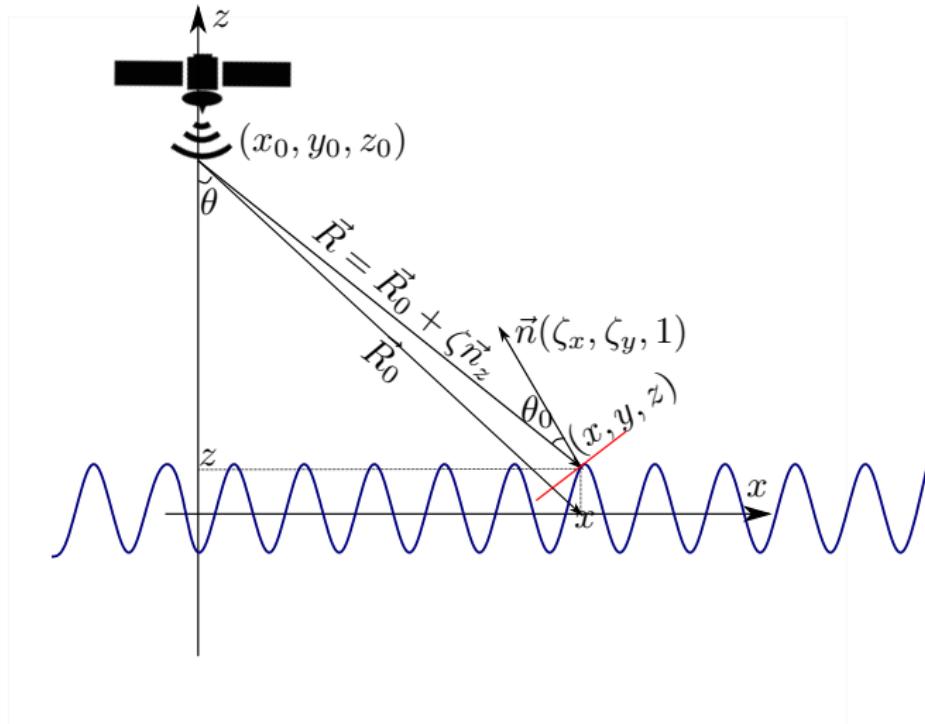
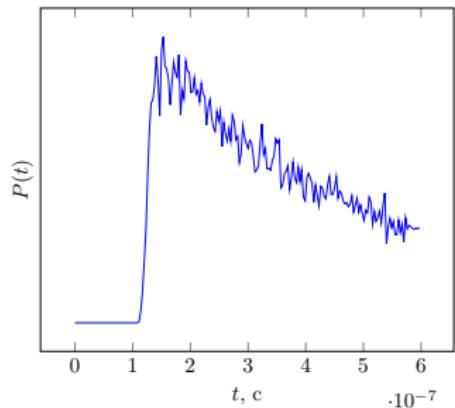
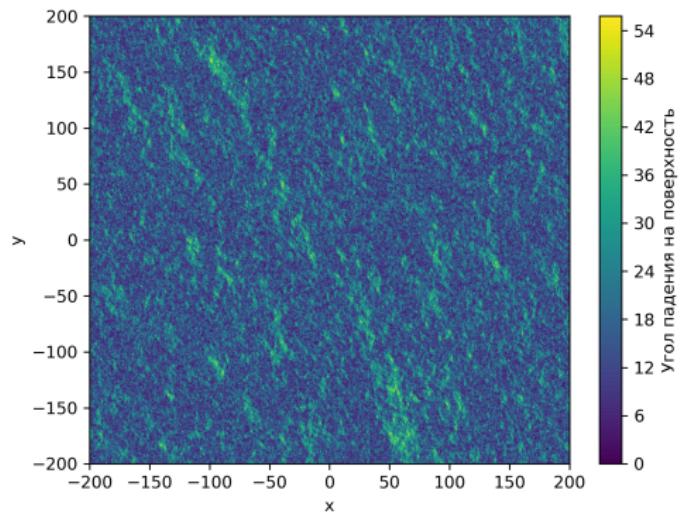


Рис.: Качественная форма импульса с обозначением основных параметров.

# Моделирование отраженного импульса



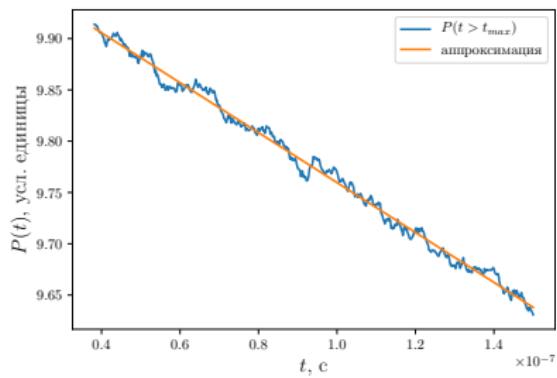
# Моделирование отраженного импульса



# Алгоритм ретрекинга

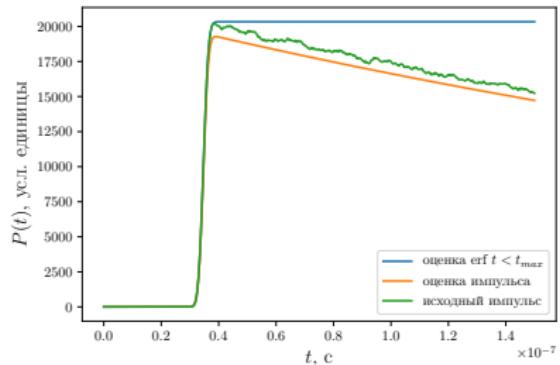
При  $t > t_{max}$

$$P(t) = 2A \exp\left\{S_T\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right\}$$



При  $t < t_{max}$

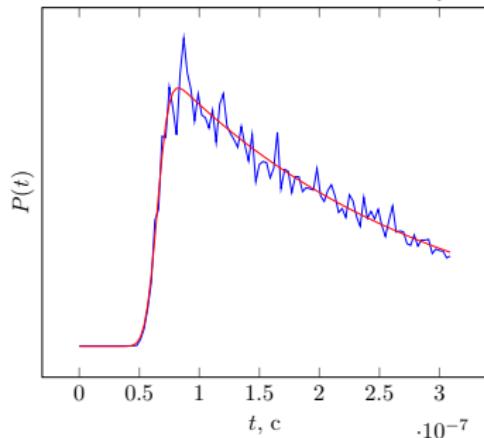
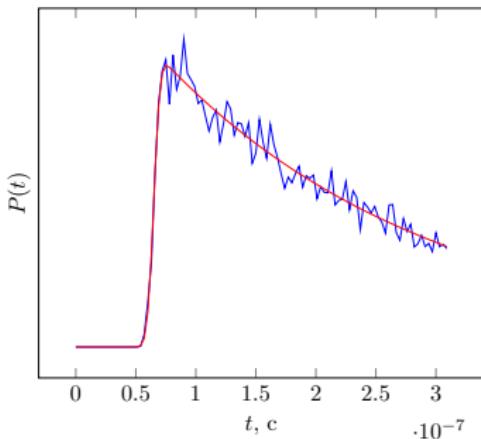
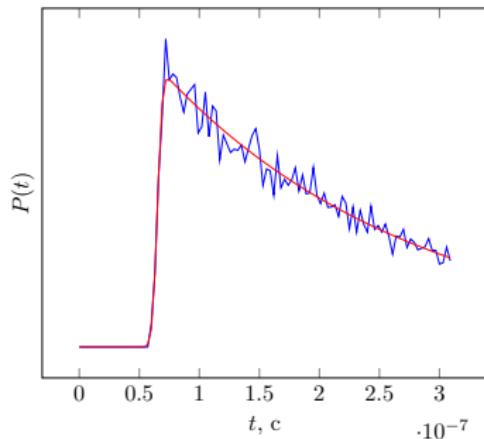
$$\frac{d \operatorname{erf} \frac{t-\tau}{\sigma_L}}{dt} \gg \frac{d \exp\left\{S_T(t - \frac{\tau}{2})\right\}}{dx}$$



$$\ln P(t) = \ln 2A + S_T\left(t - \frac{\tau}{2}\right) = S_T t + const$$

$$P(t) \approx A \left( 1 + \operatorname{erf} \frac{t - \tau}{\sigma_L} \right)$$

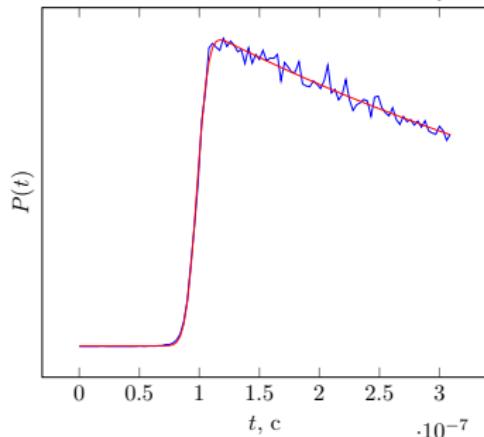
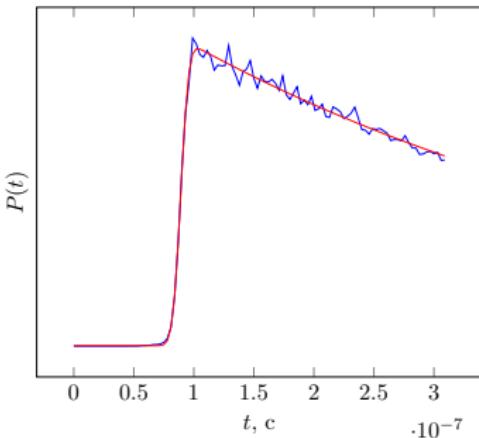
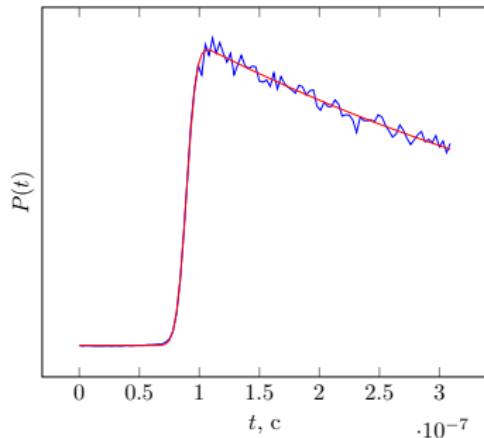
# Ретрекинг модельных импульсов



$h, \text{ м}$	0.83	1.36	5.14
$\tilde{h}, \text{ м}$	0.65	1.49	4.9

$h$  – высота, заложенная в  
моделировании  
 $\tilde{h}$  – высота, полученная нами

# Ретрекинг импульсов с Jason-3



$h, \text{ м}$	0.937	0.699	1.075
$\tilde{h}, \text{ м}$	0.931	0.703	1.081

$h$  – высота, полученная  
NASA

$\tilde{h}$  – высота, полученная нами

# Заключение