

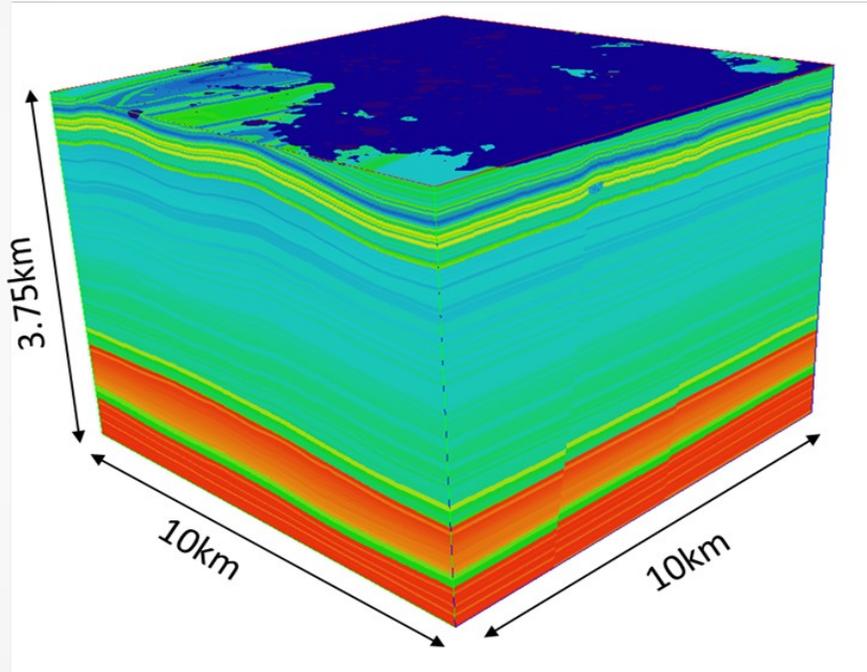
# The Numerical Dispersion Mitigation in Three-Dimensional Wavefields

Е.А. Гондюл, В. В. Лисица, К.Г. Гадильшин, Д.М. Вишневский  
ИНГГ СО РАН

# Содержание

- Постановка задачи
- Описание нейронной сети
- Численные эксперименты

# Сейсмическое моделирование



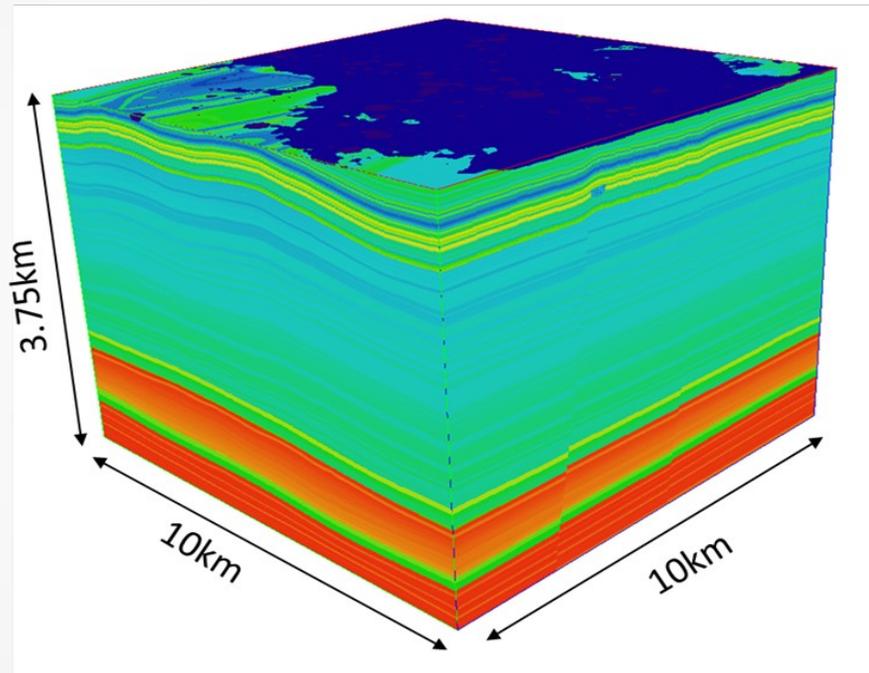
$$\rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z},$$

$$\rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z},$$

$$\rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z},$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \\ \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{f}_{xx} \\ \hat{f}_{yy} \\ \hat{f}_{zz} \\ \hat{f}_{yz} \\ \hat{f}_{xz} \\ \hat{f}_{xy} \end{pmatrix},$$

# Сейсмическое моделирование

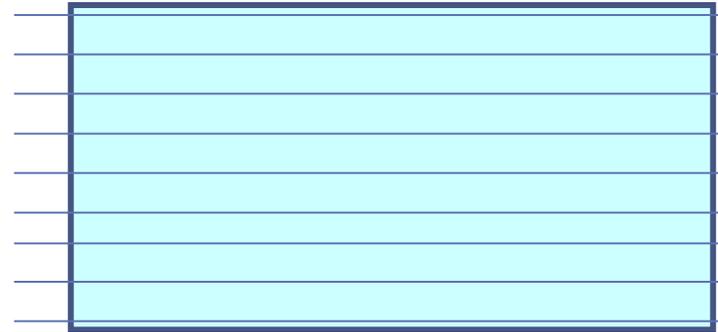
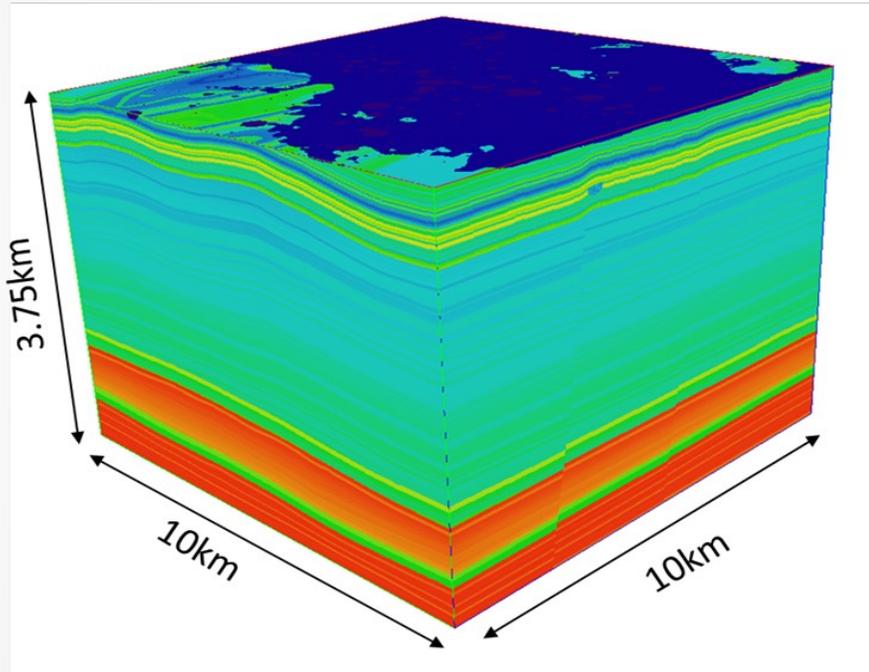


Время расчета одной  
сейсмограммы:  
30 минут на 16 Tesla K40 =

4 узло-часа кластере  
«Торнадо» СПбПУ  
или 8 узло-часов на  
кластере «Ломоносов 2»

Аренда машинного времени  
30-50 руб. за узло-час

# Сейсмическое моделирование

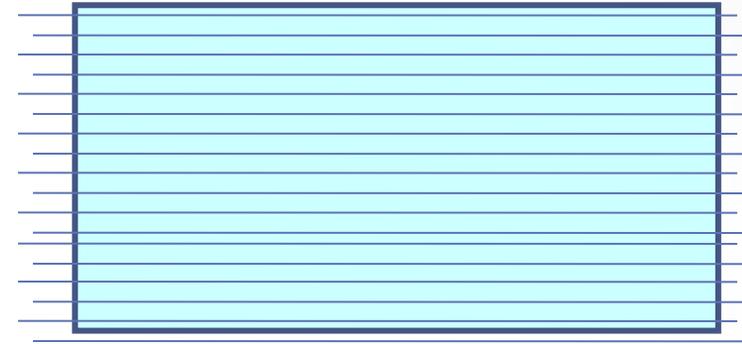
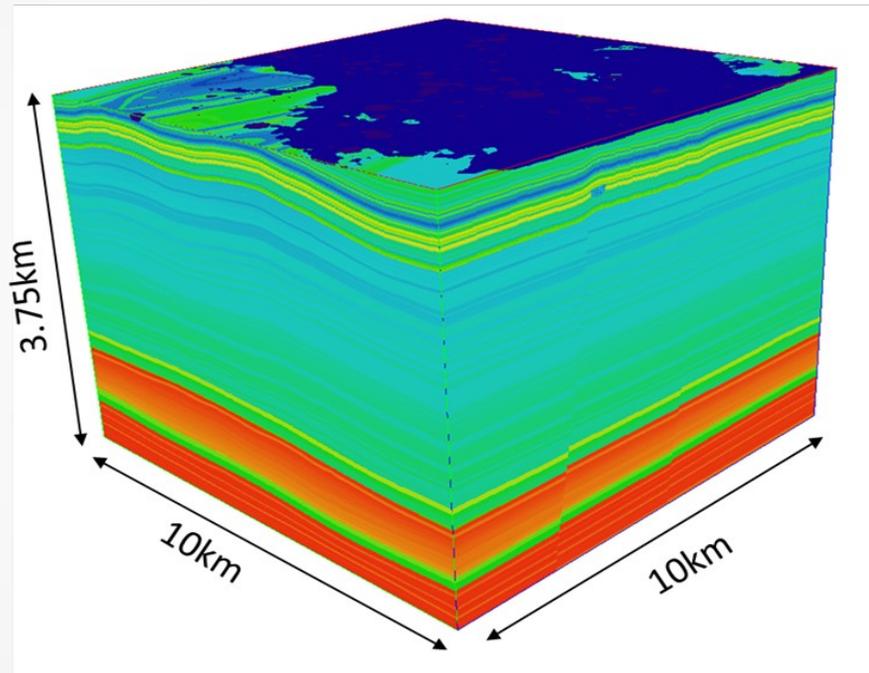


31000 узло-часов

24 дня на кластере «Торнадо»  
СпБПУ

Аренда машинного времени  
1 млн. рублей

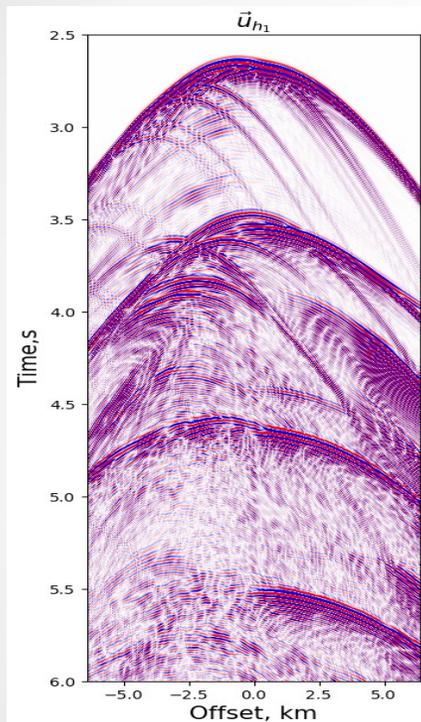
# Сейсмическое моделирование



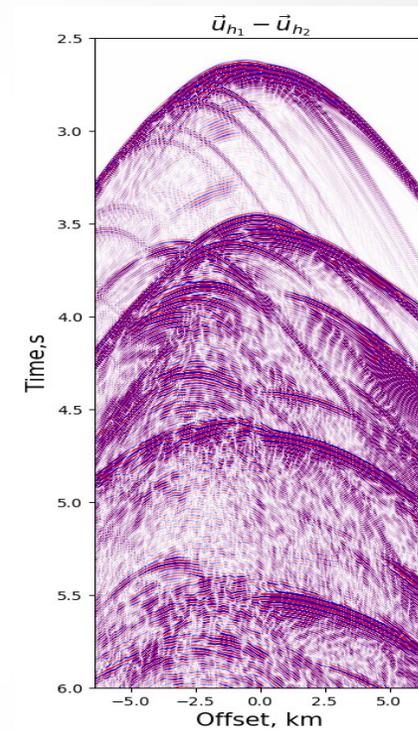
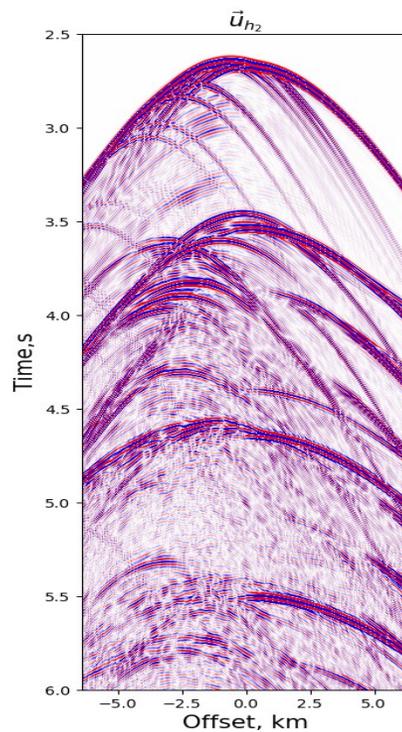
Аренда машинного времени – 500 млн. руб. для расчета 200 км<sup>2</sup> !!!

Время счета 500 дней полной загрузки кластера Ломоносов2.

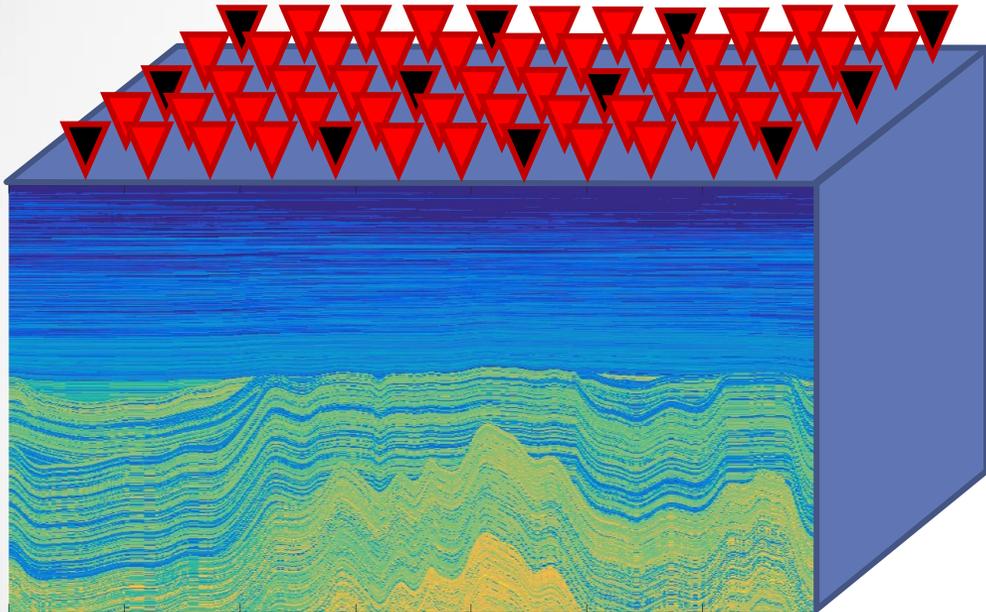
# Численная дисперсия



$$G : \vec{u}_{h_1} \rightarrow \vec{u}_{h_2}$$

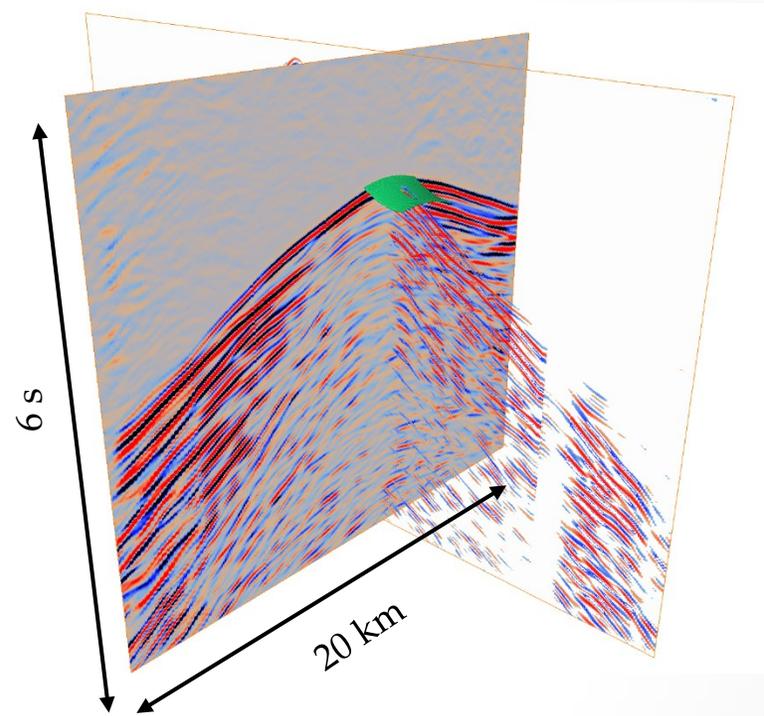
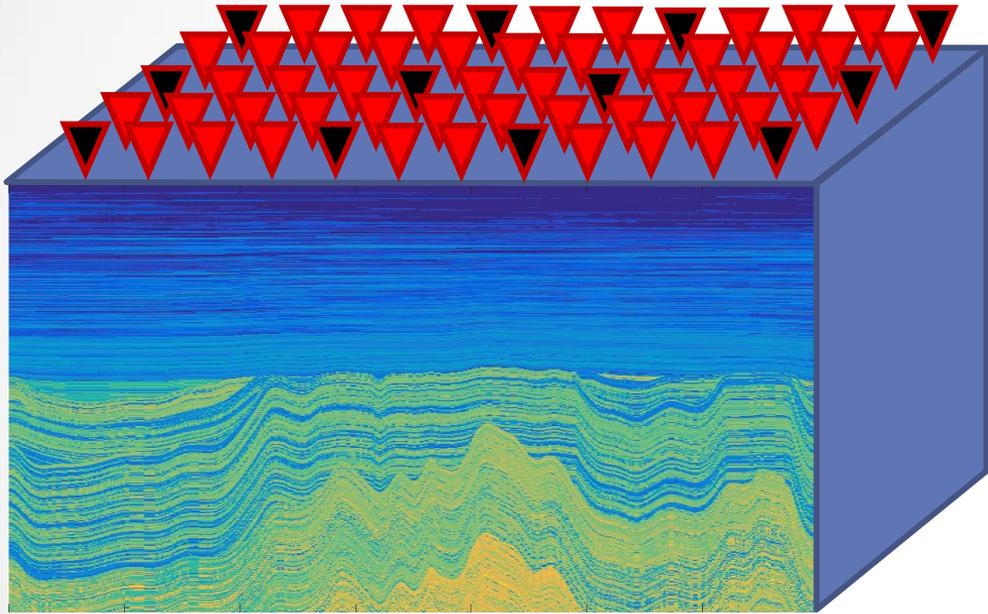


# NDM-net



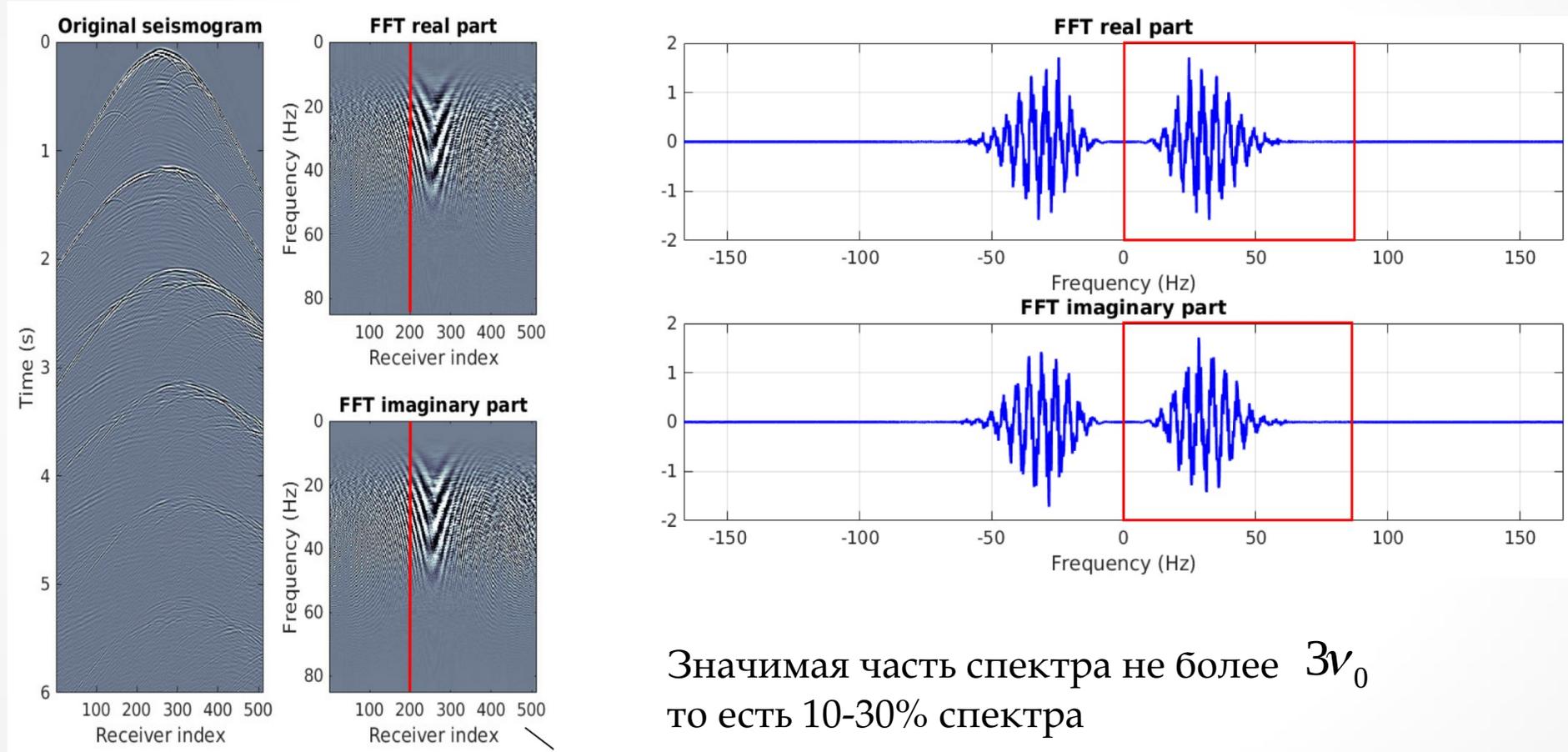
1. Расчет поля всех источников на грубой сетке
2. Расчет поля некоторых источников на мелкой сетке – обучающая выборка
3. Обучение сети
4. Применение сети для коррекции данных

# NDM-net



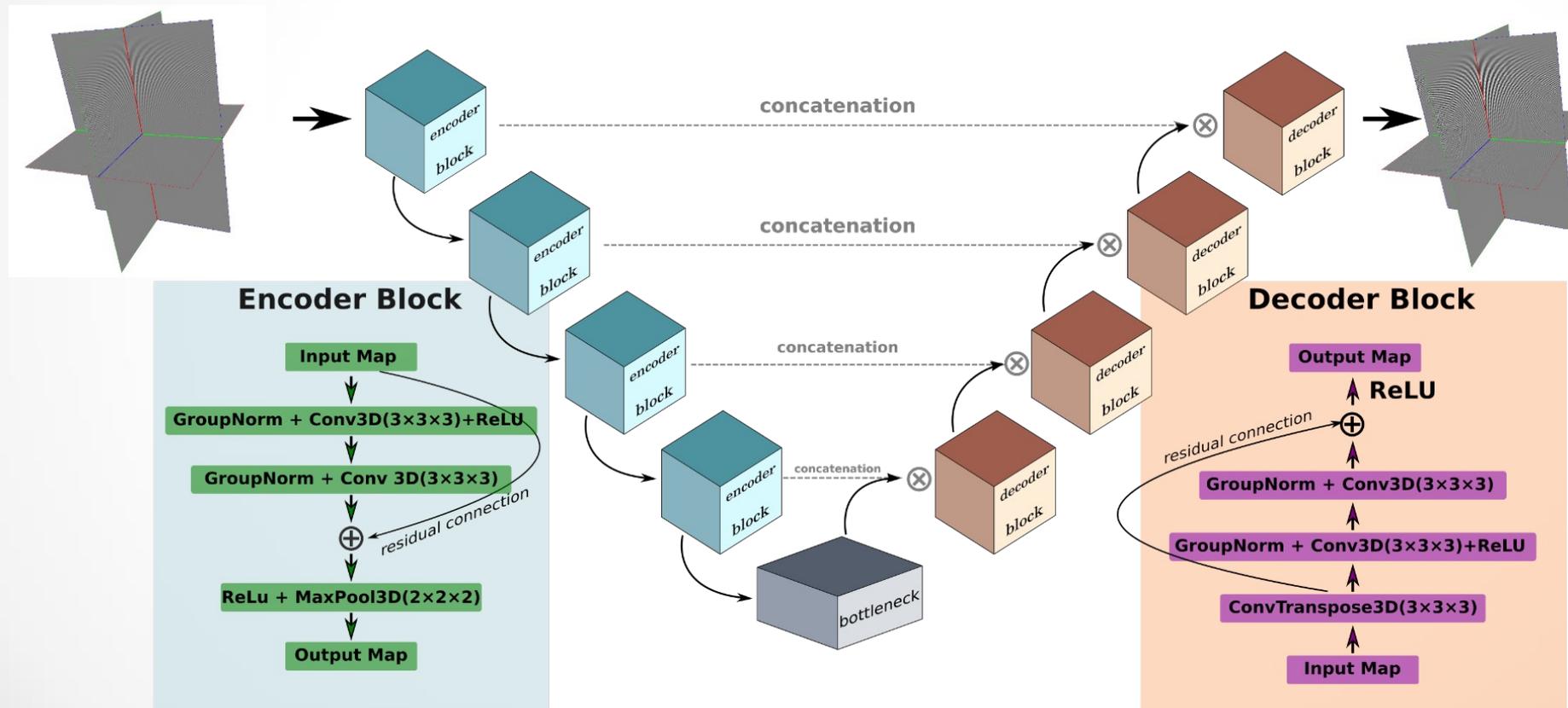
Необходимо работать с 3D данными

# FFT-based NDM-net

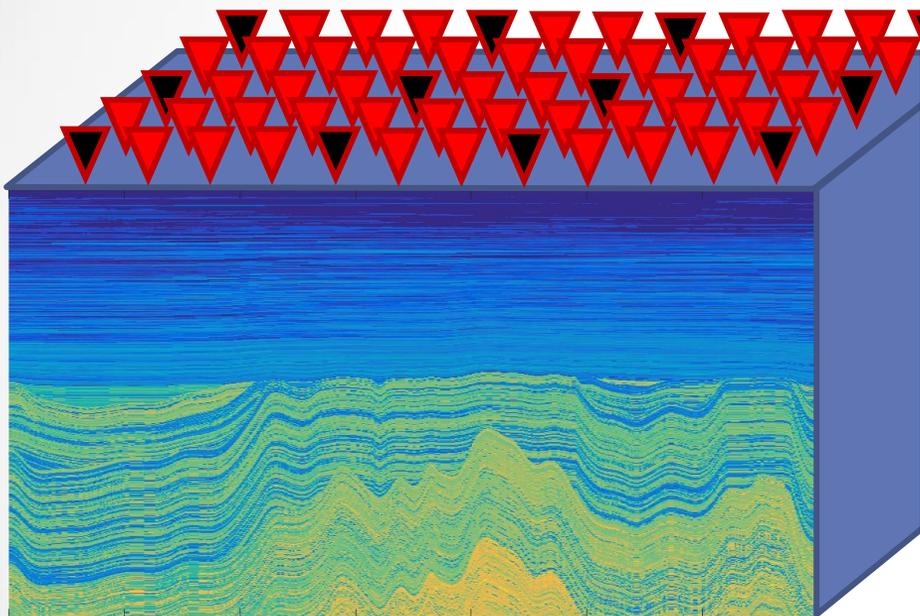


Значимая часть спектра не более  $3v_0$   
то есть 10-30% спектра

# 3D NDM-NET (3D Residual U-net)



# NDM-net



$$\begin{aligned}\|\vec{u}_{h_1} - \vec{u}_{h_2}\| &= \varepsilon^*, \text{ where } h_1 > h_2, \\ \|G(\vec{u}_{h_1}, \vec{\theta}) - \vec{u}_{h_2}\| &= \varepsilon \ll \varepsilon^*,\end{aligned}$$

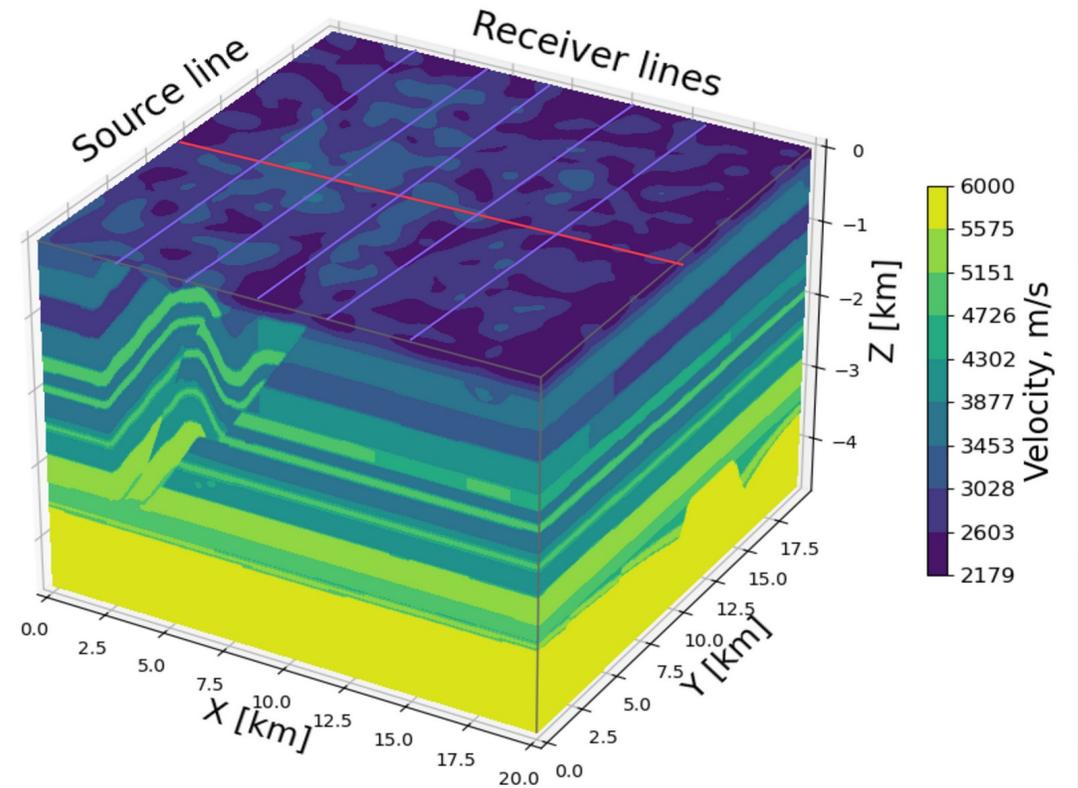
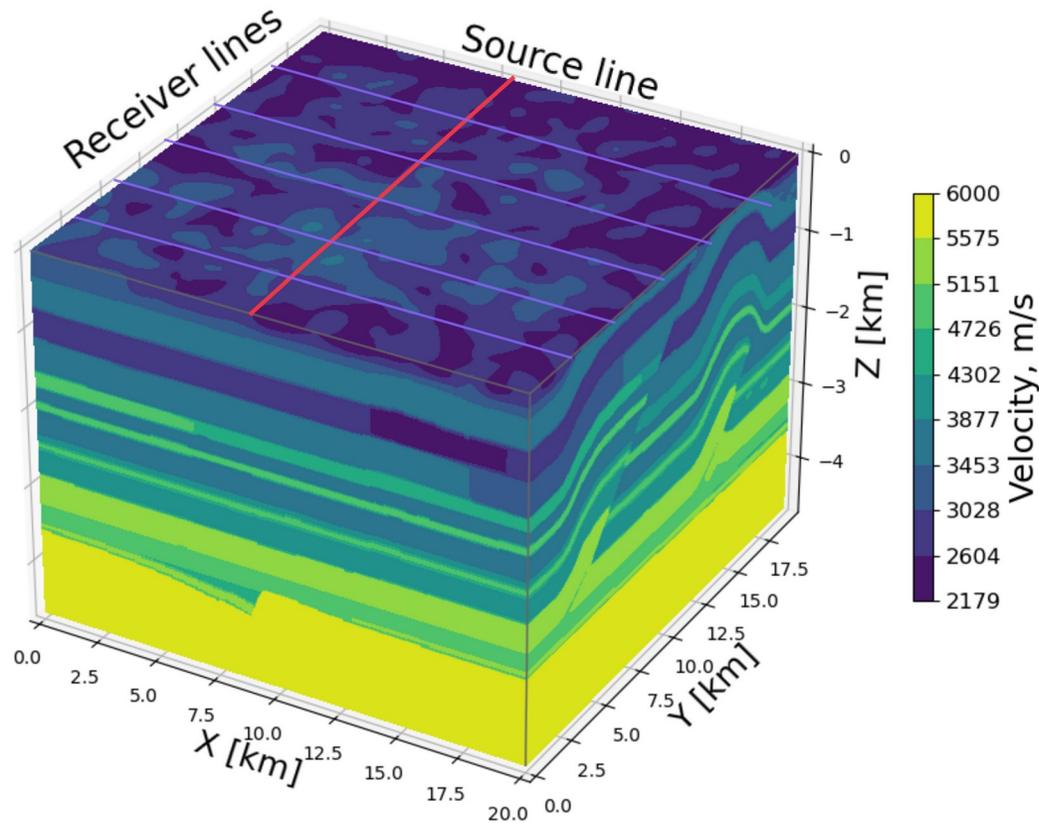
где  $\vec{\theta} = \{\mathbf{W}, \mathbf{b}\}$  — это параметр, который включает в себя матрицу весовых коэффициентов  $\mathbf{W}$  и смещение  $\mathbf{b}$ .

В процессе обучения минимизируется функция потерь:

$$L(\vec{\theta}) = \mathbb{E}_{x,y} [\|\vec{u}_2 - G(\vec{u}_1, \vec{\theta})\|_1],$$

где  $\{\vec{u}_1, \vec{u}_2\}_{i=1}^N$  — тренировочная выборка размером  $N$ .

# Overthrust, Pseudo-3D



2D линии 101 сейсмограмм

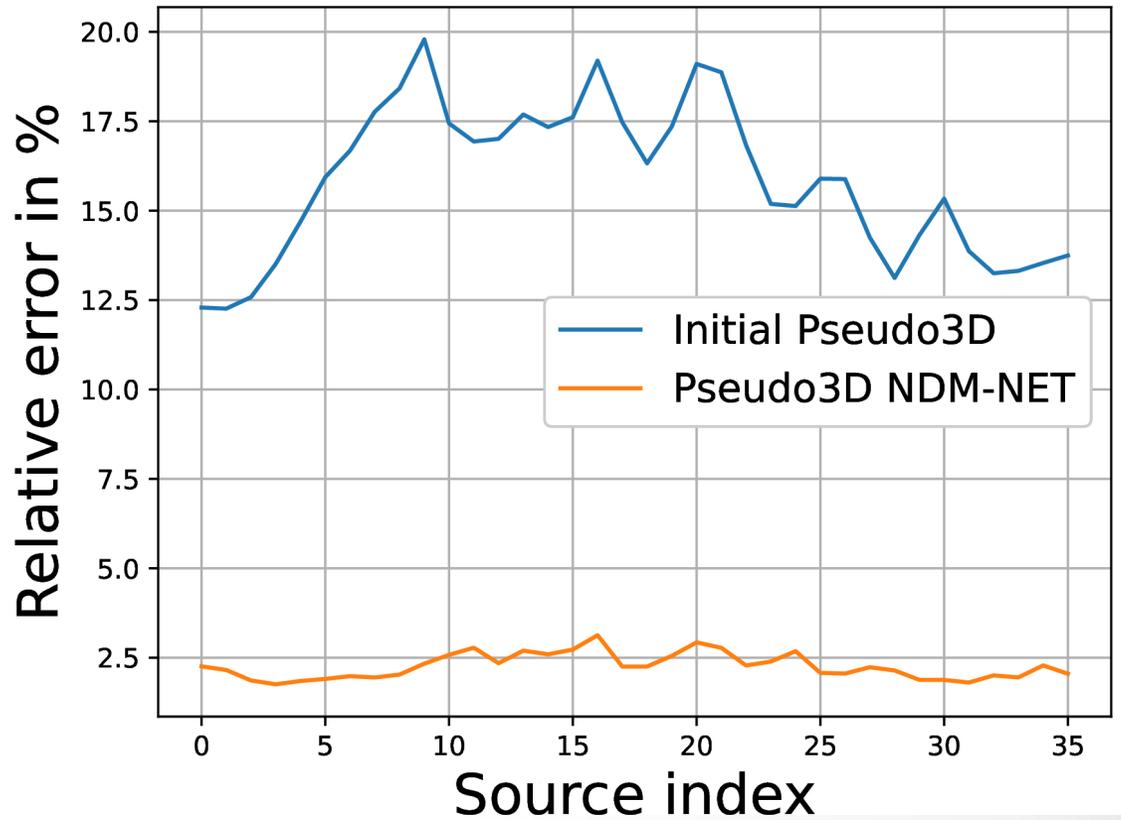
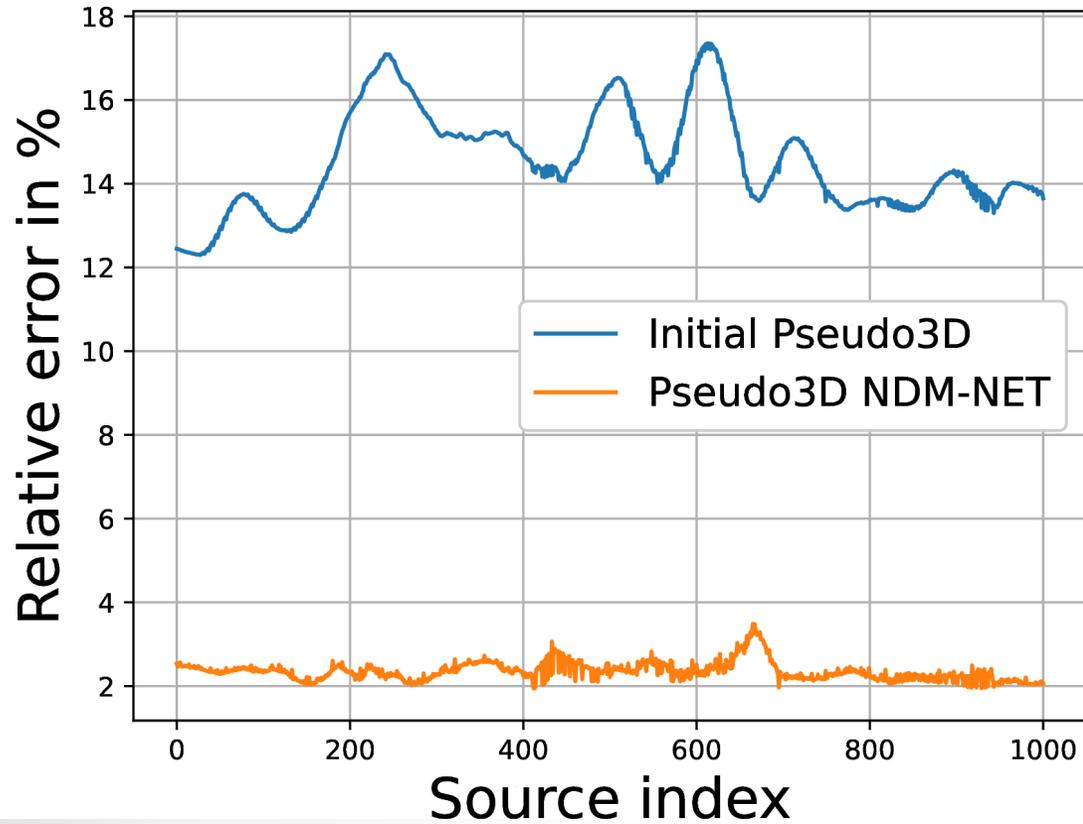
Импульс Рикера с центральной частотой 30 Гц,  $dt = 2$  мс,  $T = 5$  с

- Тренировочный набор: 1% от общего кол-ва сейсмограмм

Мелкая сетка: 2.5m

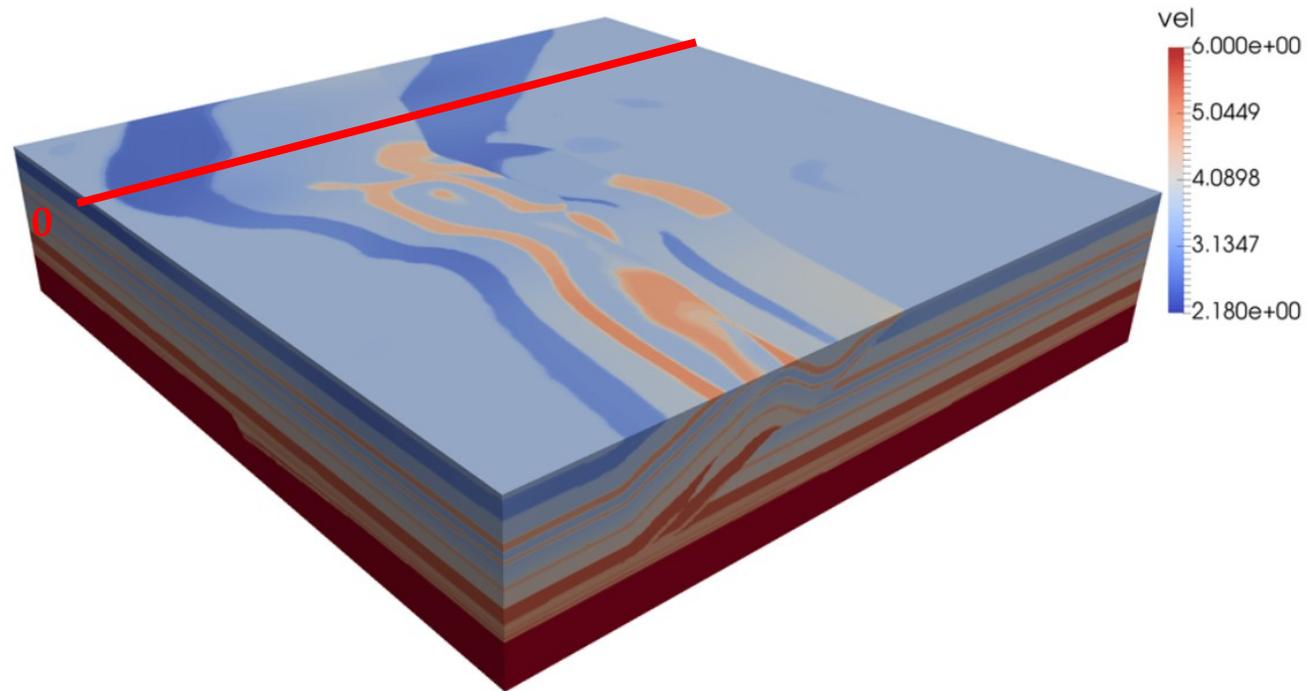
Грубая сетка: 5m

# Overthrust, Pseudo-3D

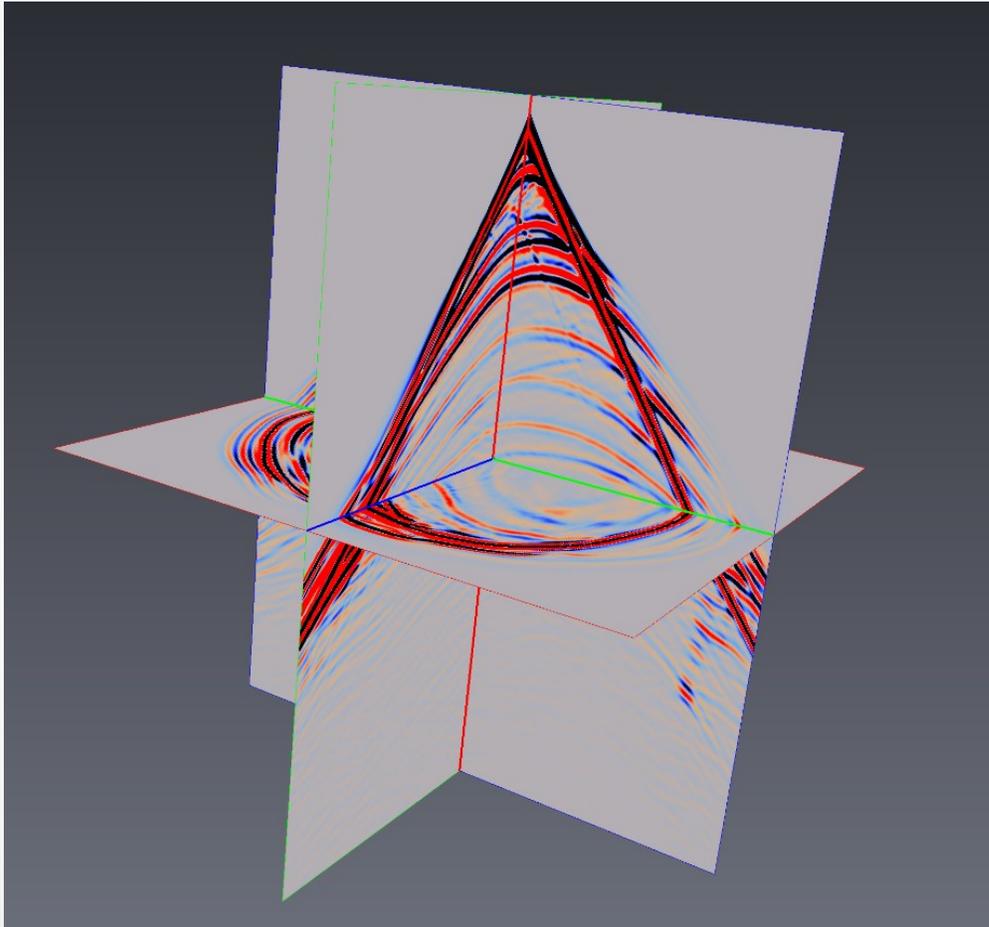


$$L_2^{rel} = \frac{\|\mathbf{u}^g - \mathbf{u}_{h_1}\|_2}{\|\mathbf{u}_{h_1}\|_2}$$

# 3D overthrust model: line 0 experiment



# 3D overthrust model: 10% training dataset



3D линии 200 сейсмограмм  
Импульс Рикера с центральной  
частотой 15 Гц

$dt = 4$  мс

$T = 5$  с

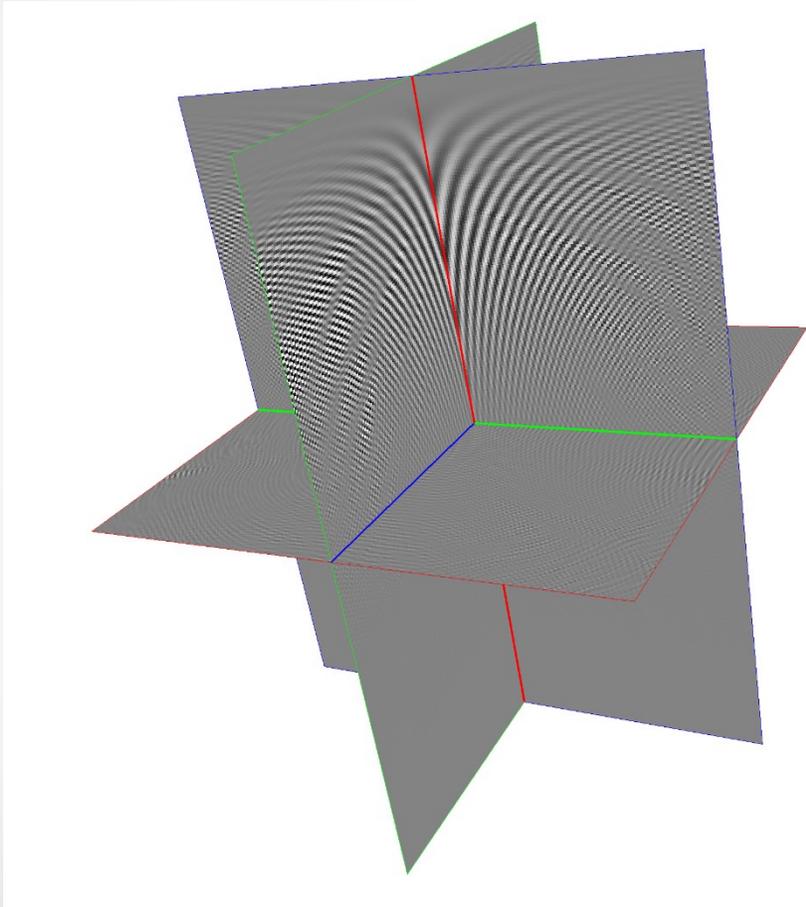
Max offsets X/Y = 5000 м

Тренировочный набор: 20  
сейсмограмм

Мелкая сетка: 12.5 м

Грубая сетка: 25 м

# 3D NDM-net размерность входных данных



**3D NDM-net input/output**

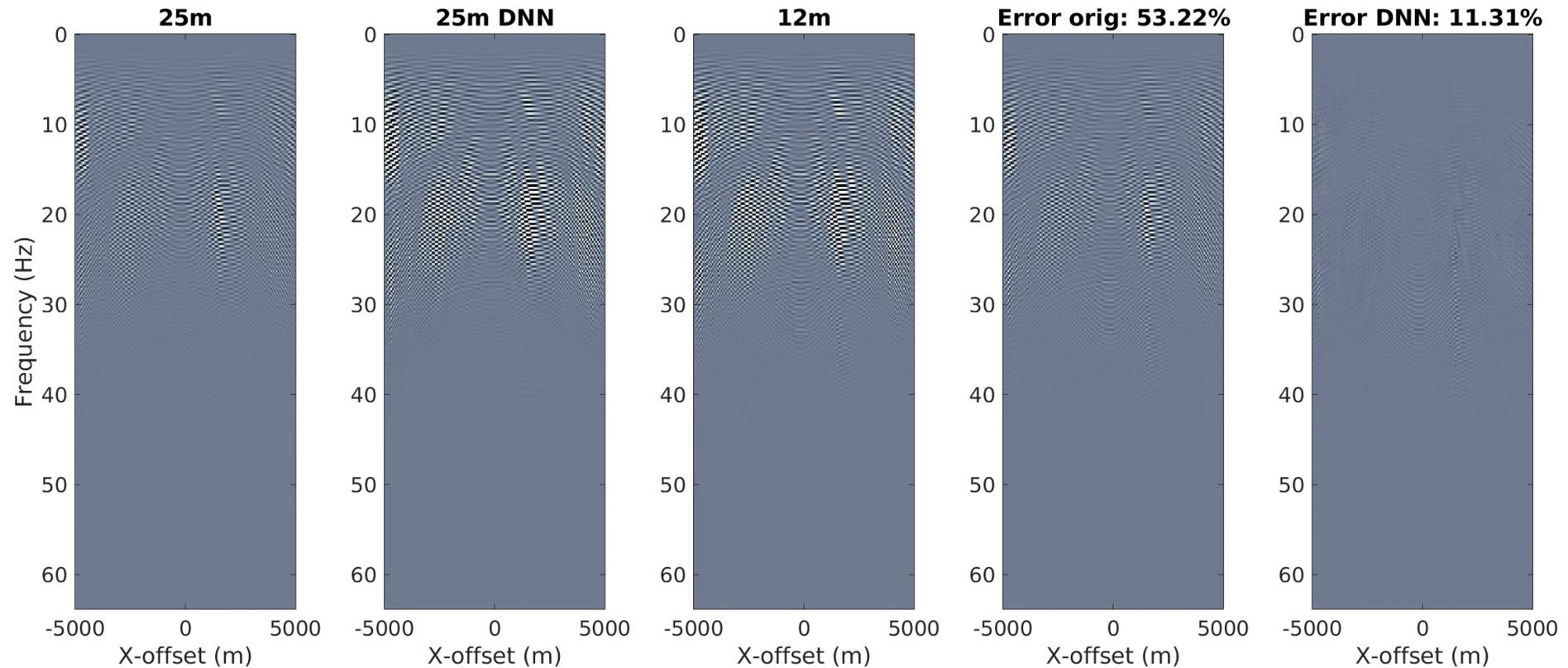
200 x 200 x 256 отсчетов

50m x 50m x 0.2Hz voxel size

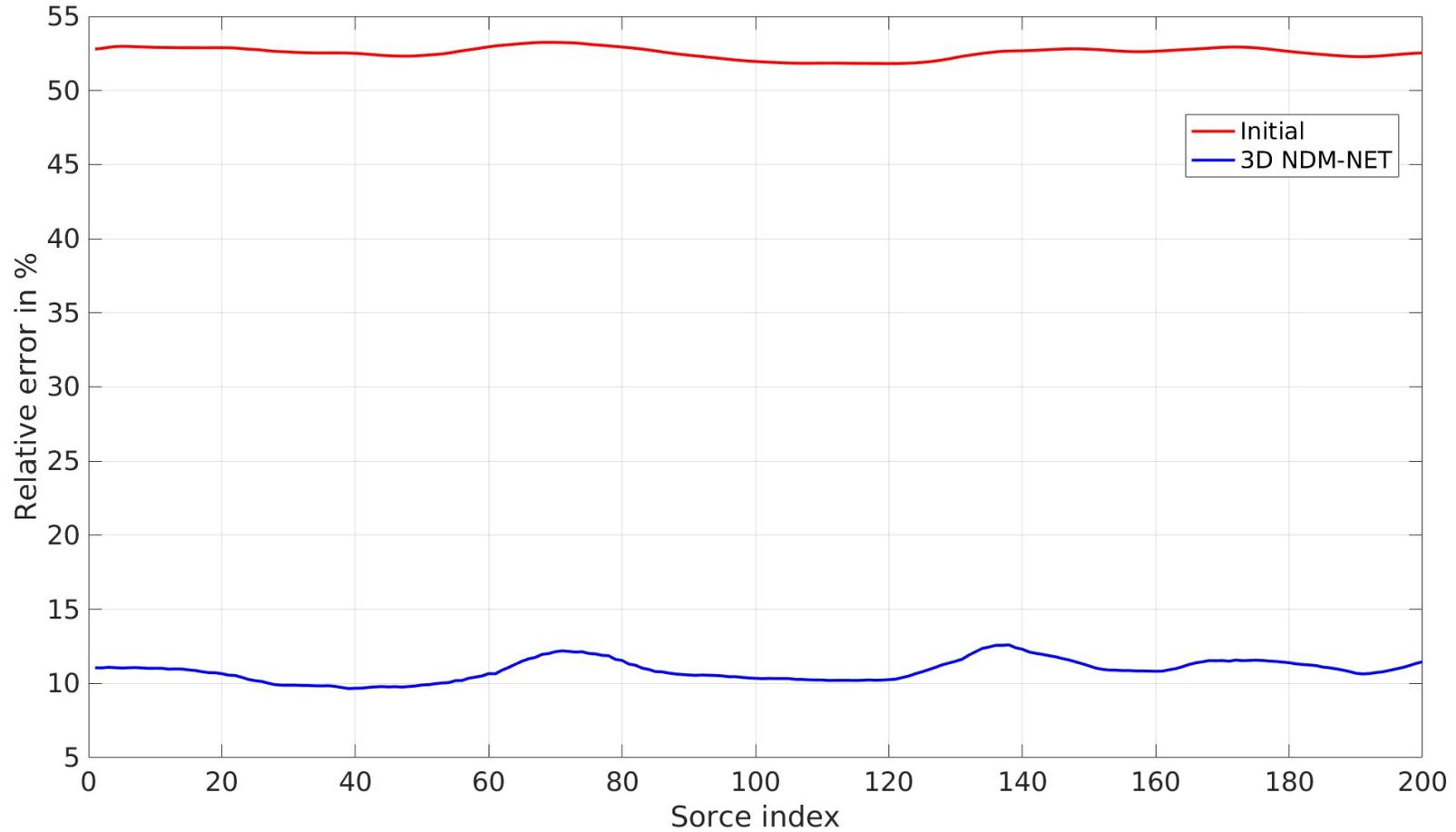
10km x 10km x 51Hz input/output size

**Время обучения ~4 часа на RTX3090Ti**

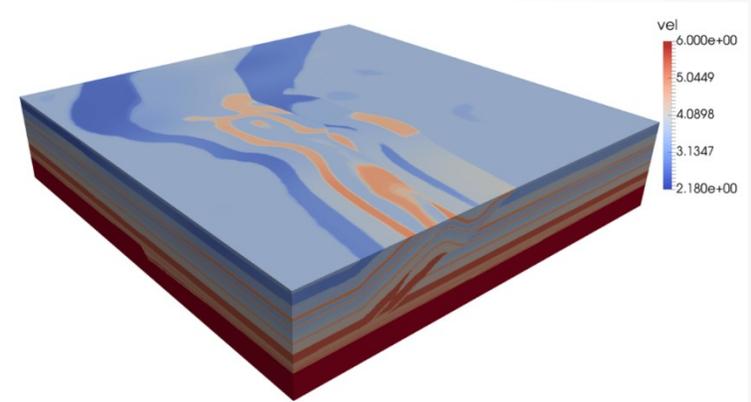
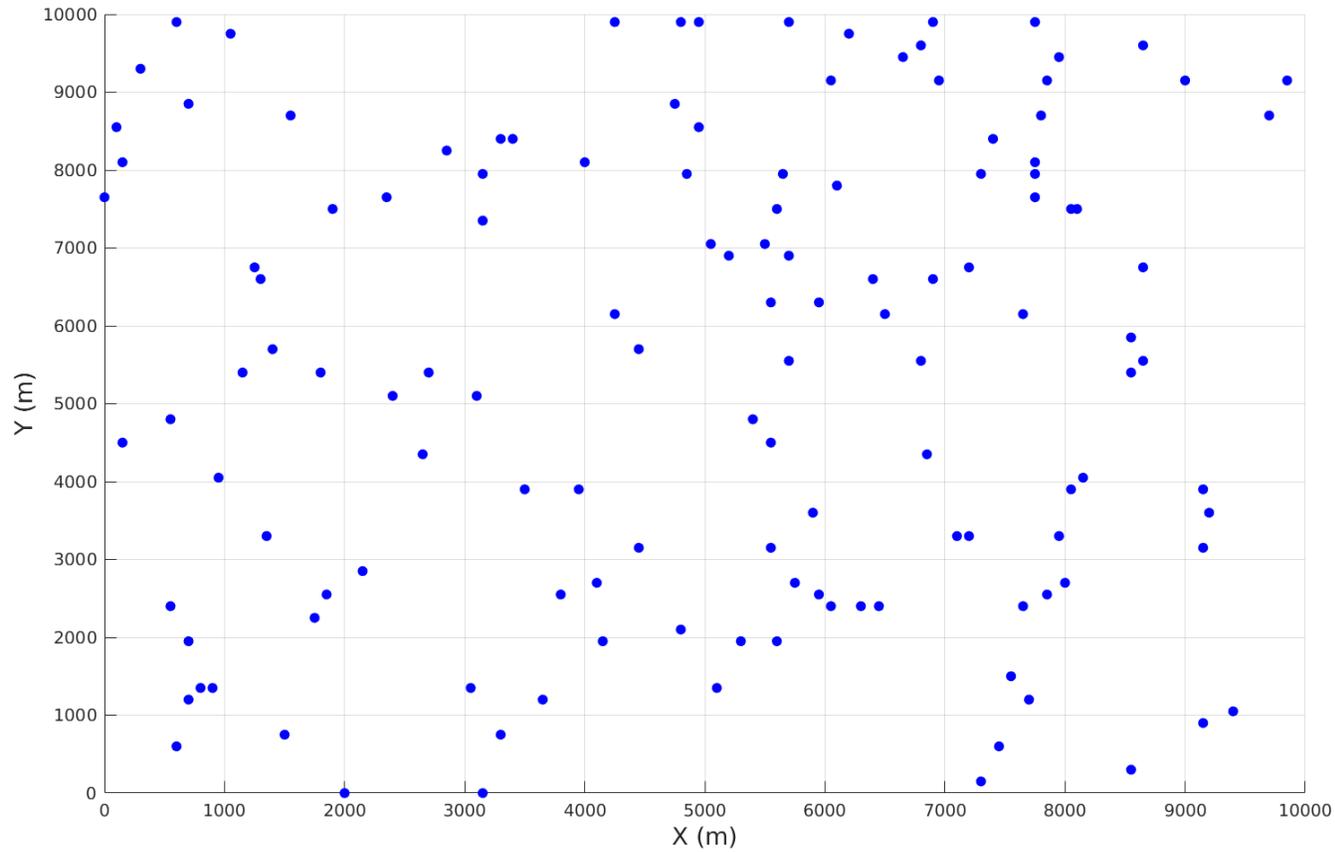
# Результат применения NDM-net (Y-offset -4000m)



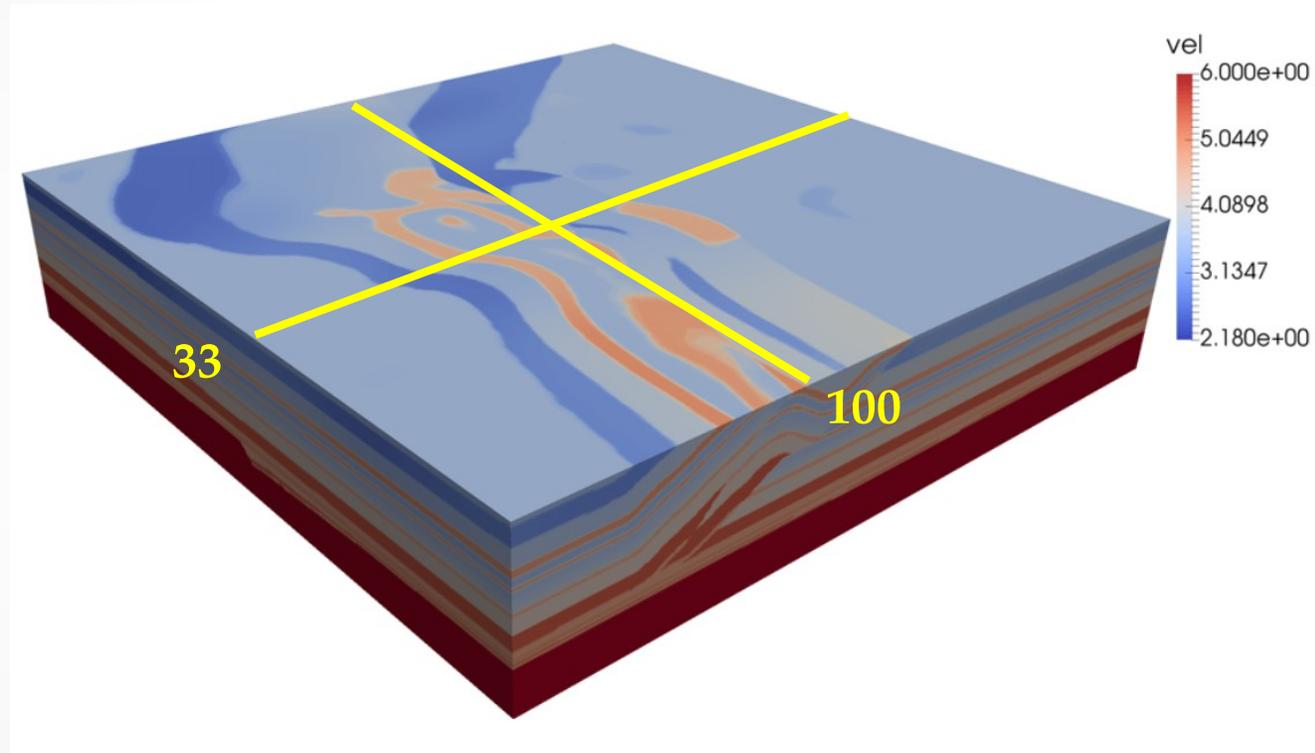
# Относительная ошибка



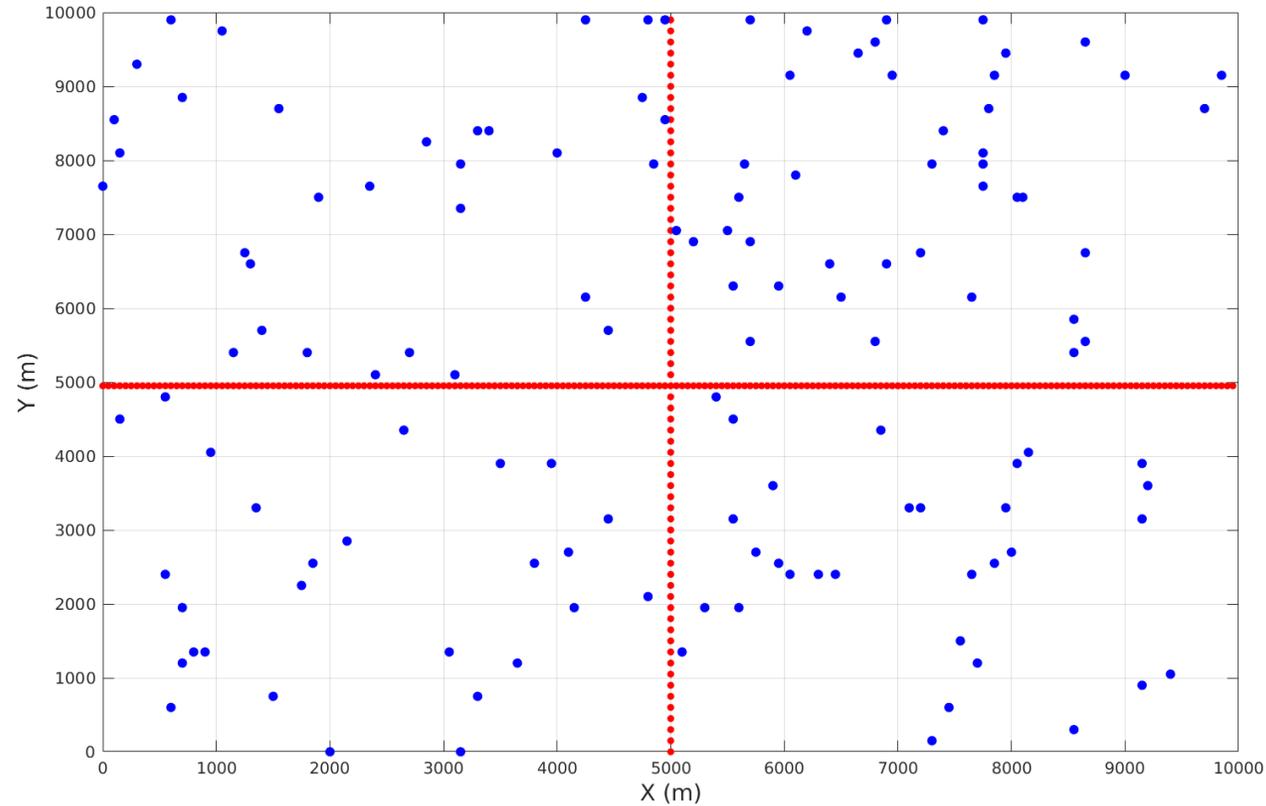
# 1% random training dataset: source positions



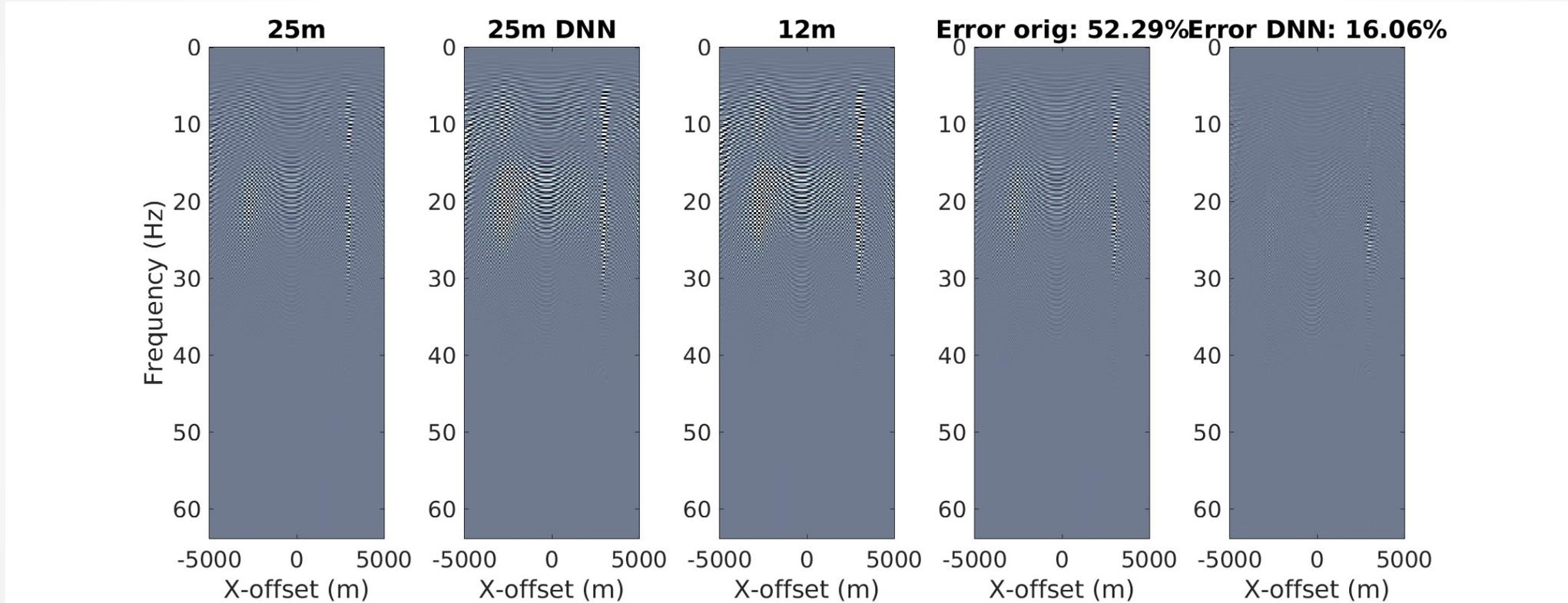
# Testing data: xline 100 and line 33



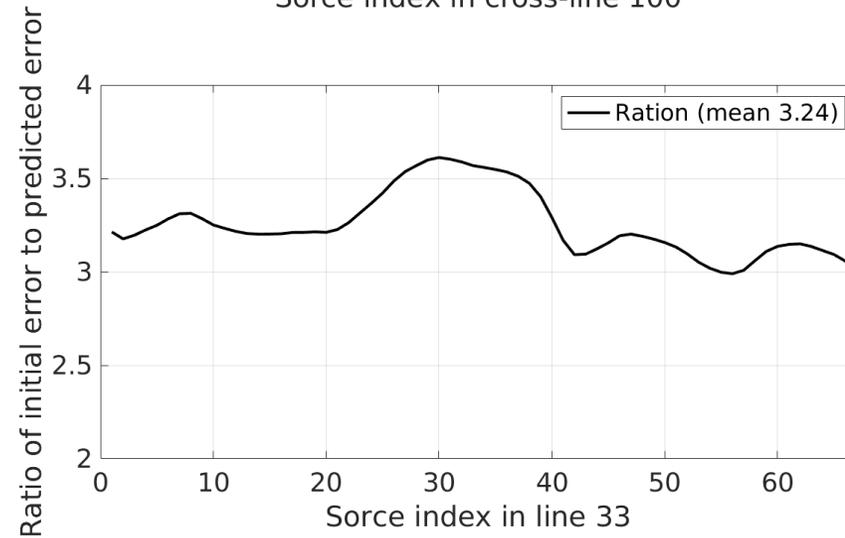
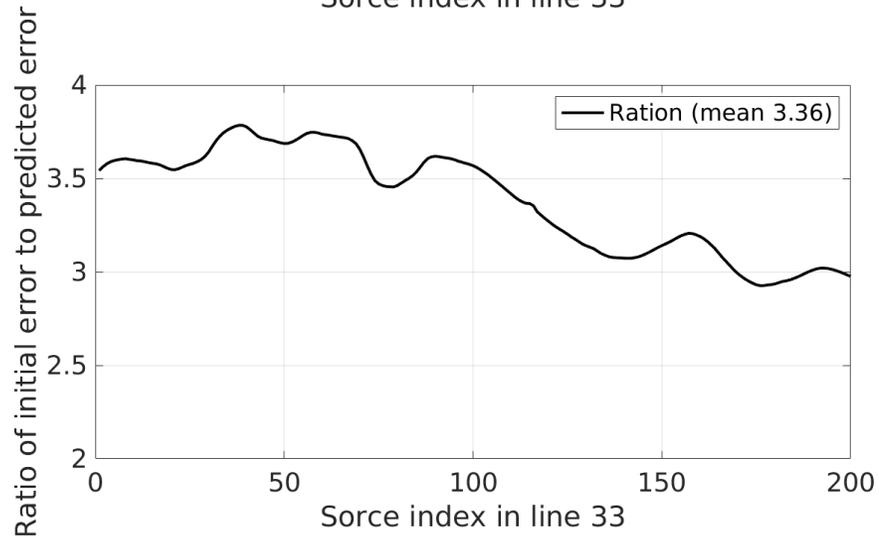
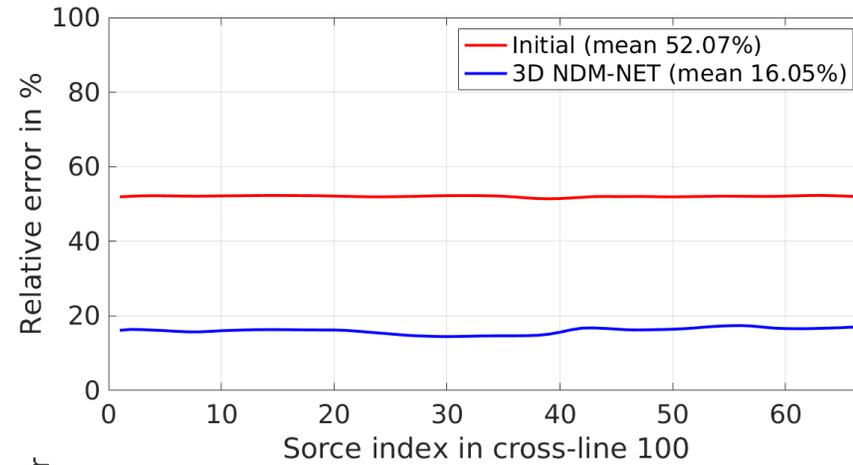
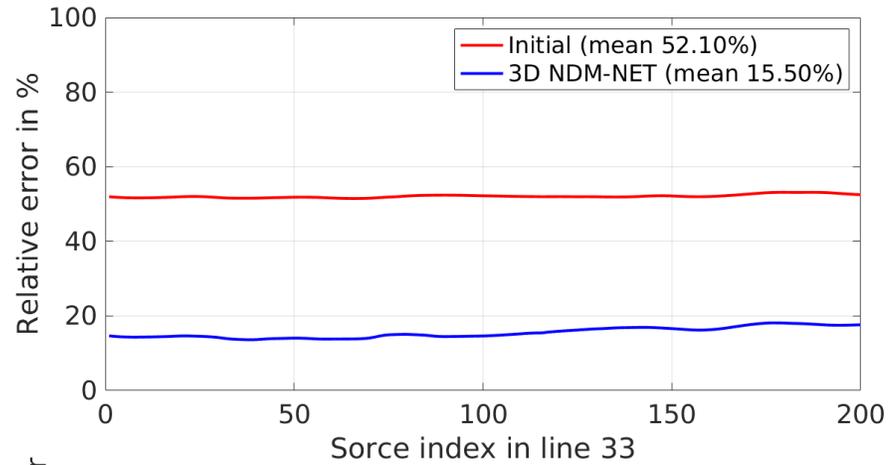
# Testing data: xline 100 and line 33



# Prediction example (Y-offset -4000m)



# Относительная ошибка

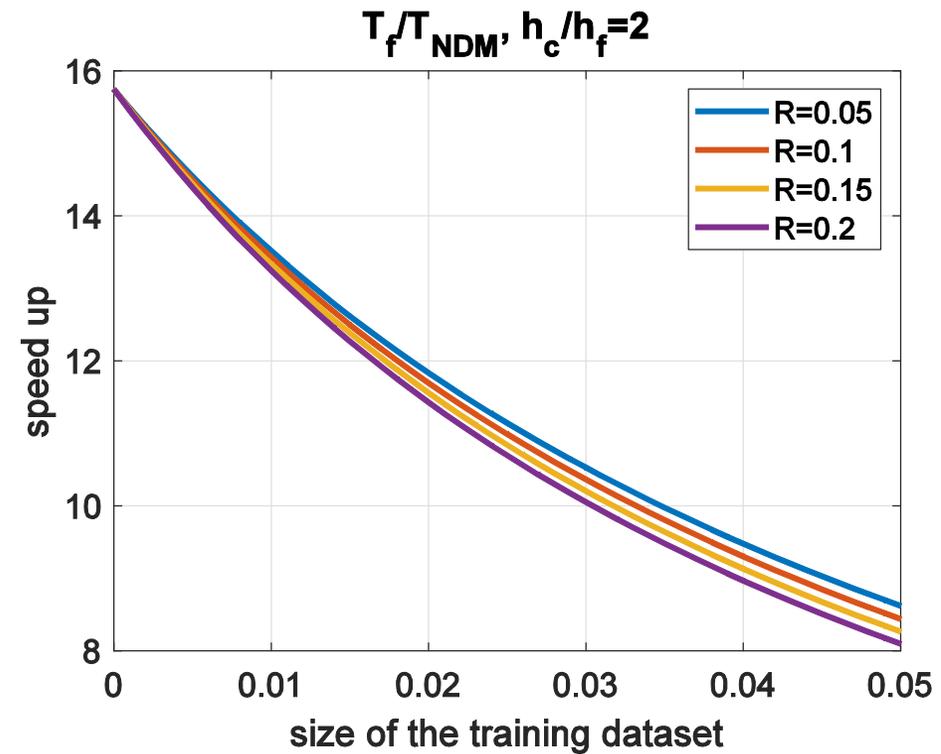


# Ускорение

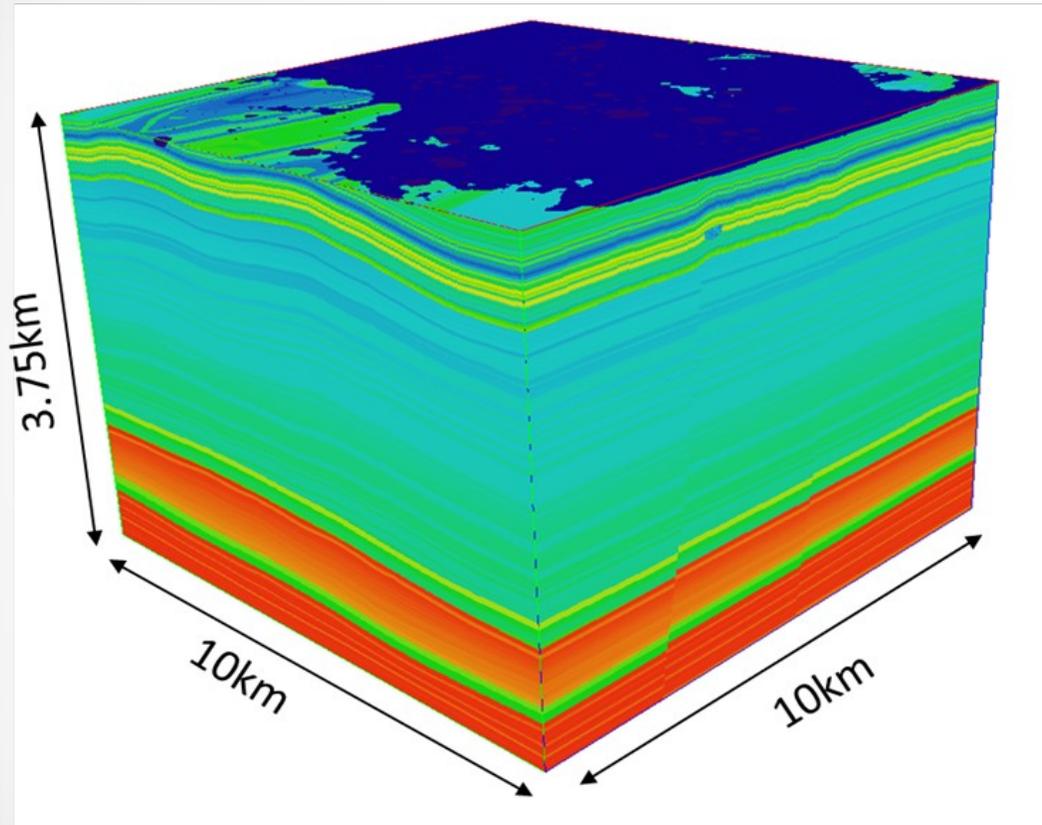
Время счета на мелкой сетке

---

Время работы NDM-net



# Сейсмическое моделирование



~~Аренда машинного времени – 500  
млн. руб.~~

~~Время счета 500 дней.~~

Аренда машинного времени – 38  
млн. руб.

Время счета 38 дней.

# Заключение

- Разработан и реализован численный алгоритм моделирования сейсмических полей, основанный на комбинировании сеточных методов и машинного обучения;
- Машинное обучение применяется для подавления численной дисперсии в рассчитанных данных;
- Модификация NDM-net с возможностью ее применения к Фурье образам сейсмограмм позволила обобщить подход на 3D;
- NDM-net позволяет сократить время расчета сейсмограмм от 8 до 15 раз при сохранении приемлемой точности результата.

**Спасибо за внимание!**