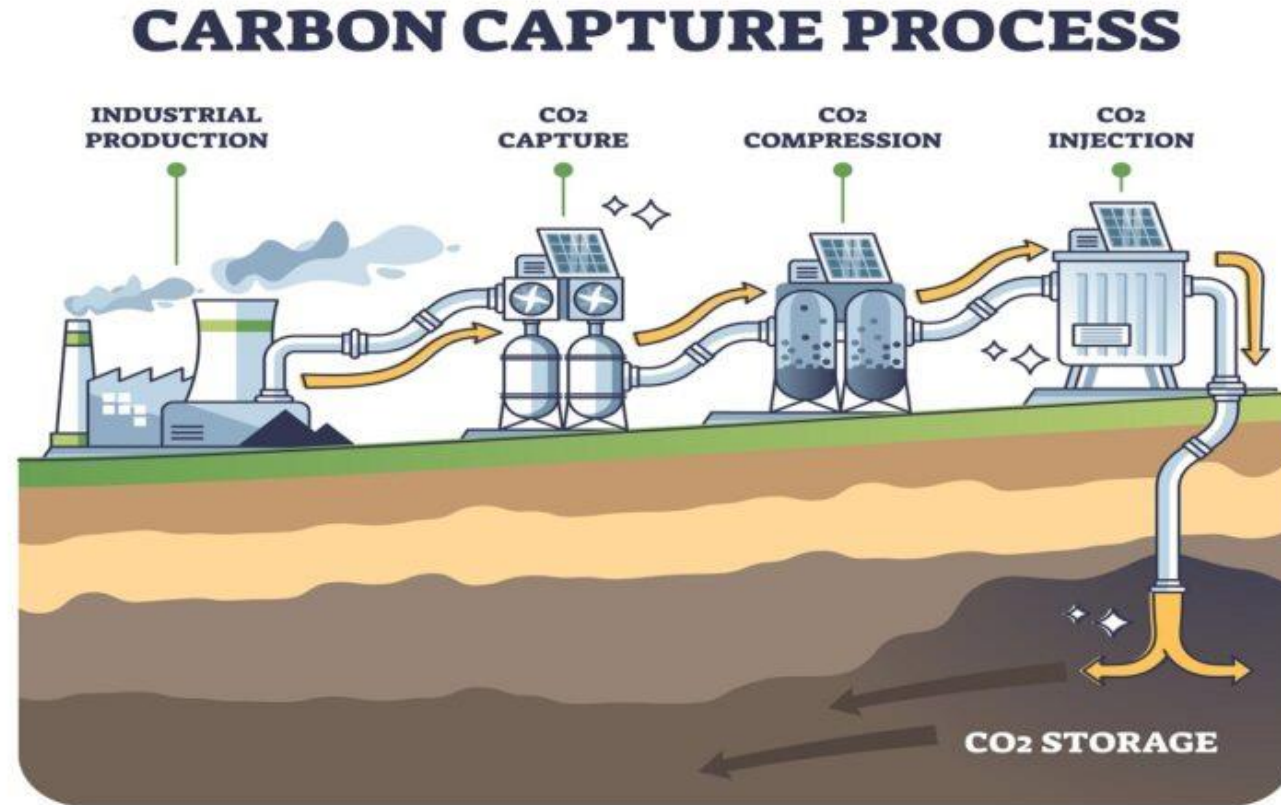


# Применение нейронной сети при сейсмическом мониторинге

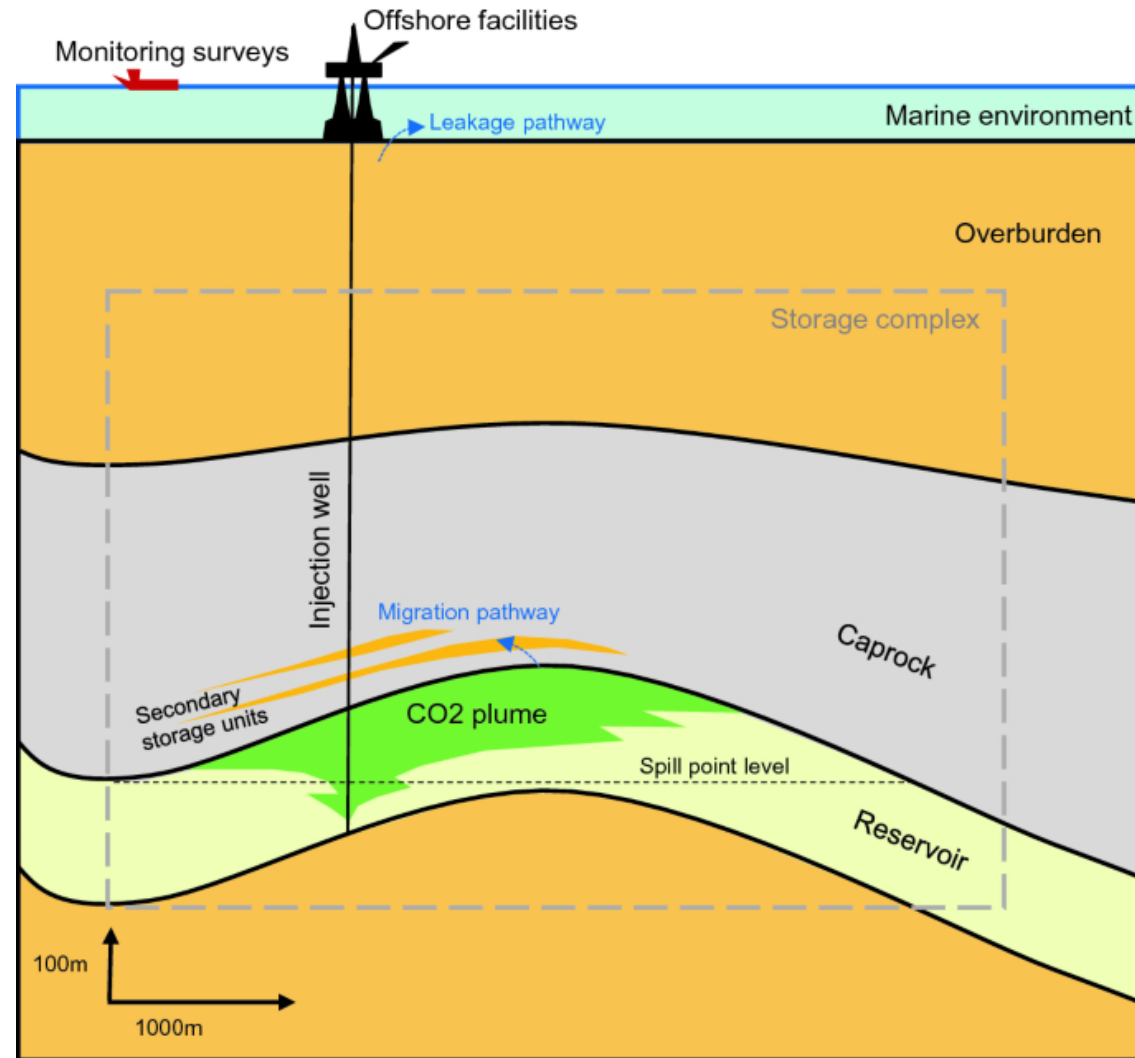
Гондюл Елена Александровна (ИМ СО РАН)

Лисица Вадим Викторович (ИМ СО РАН)

Вишневский Дмитрий Михайлович (ИМ СО РАН)

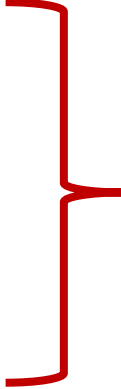


# Введение



# Введение

- **Фильтрация** в пористой среде
- **4D сейсмика**
- **Нейронная сеть NDM-net** для уточнения сейсмограмм

- 
- Оценка стабильности при длительном хранении
  - Предотвращение утечки
  - ...

Требуется много вычислительных ресурсов и времени!

Моделирование на грубой сетке  
для **всех** источников

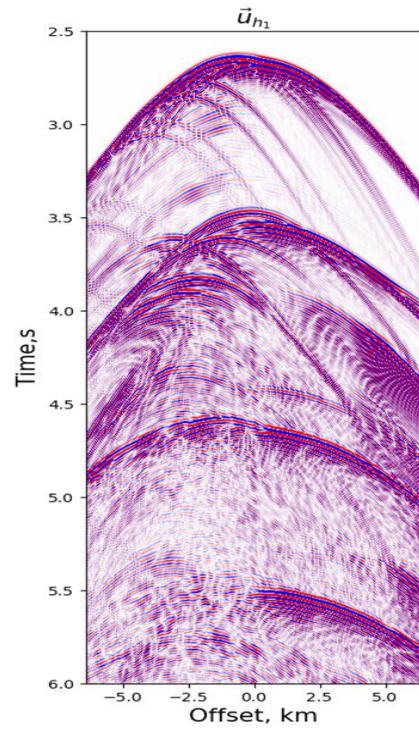


Моделирование на мелкой сетке  
для **части** источников

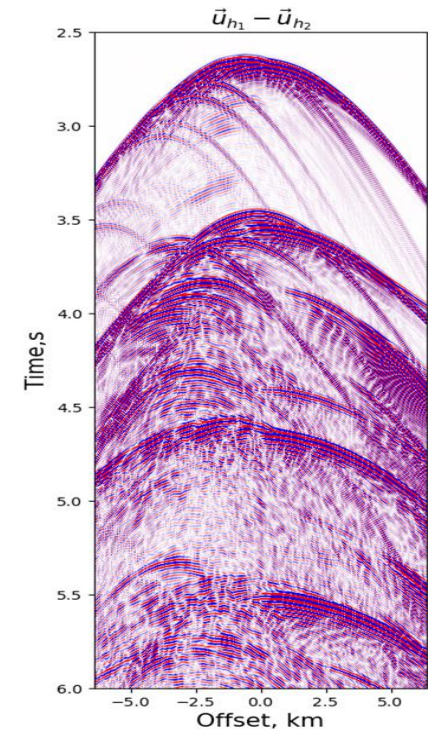
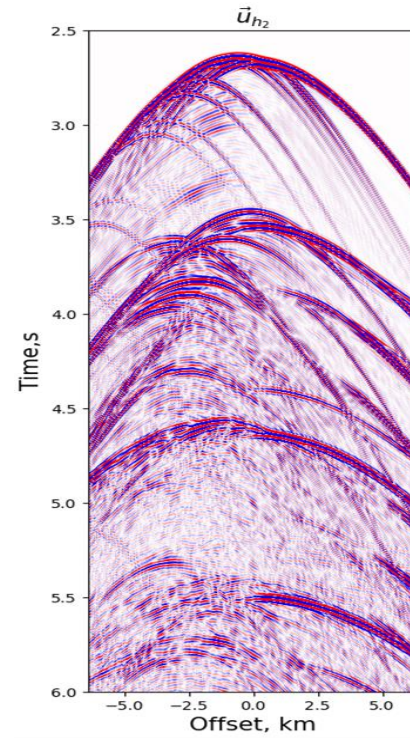


**NDM-net**

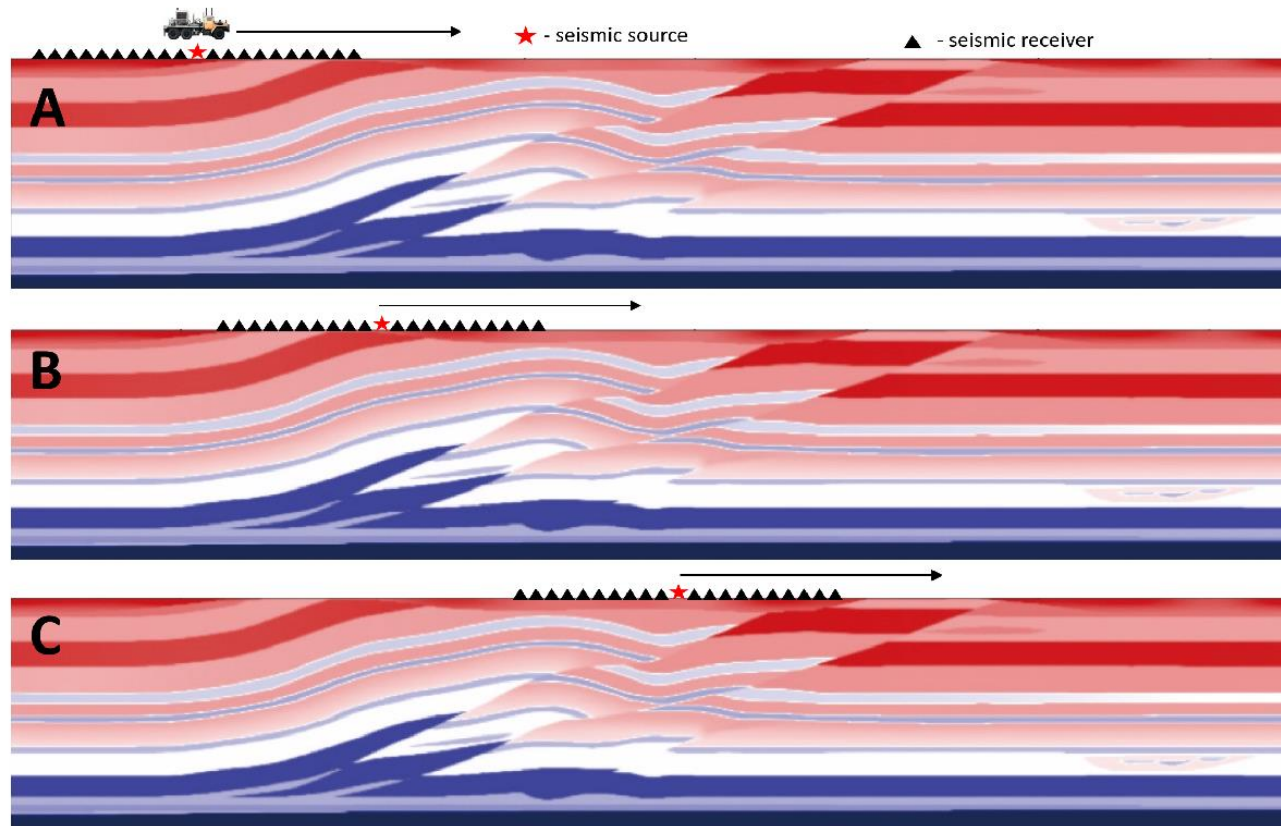
# Нейронная сеть NDM-net



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

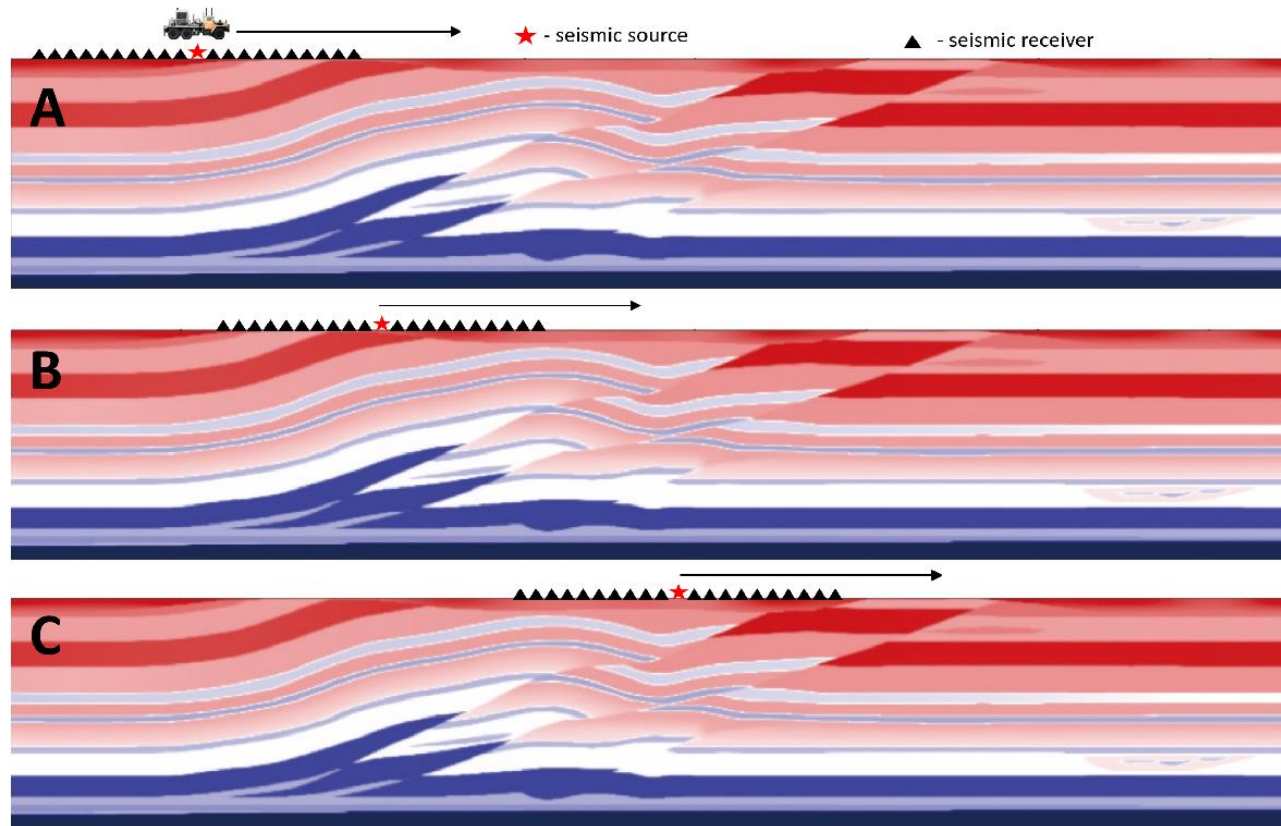


# Введение



$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial u_x}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}, \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} + \hat{f}_{xx}, \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \hat{f}_{zz}, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} &= \mu \frac{\partial u_x}{\partial z} + \mu \frac{\partial u_z}{\partial x} + \hat{f}_{xz},\end{aligned}$$

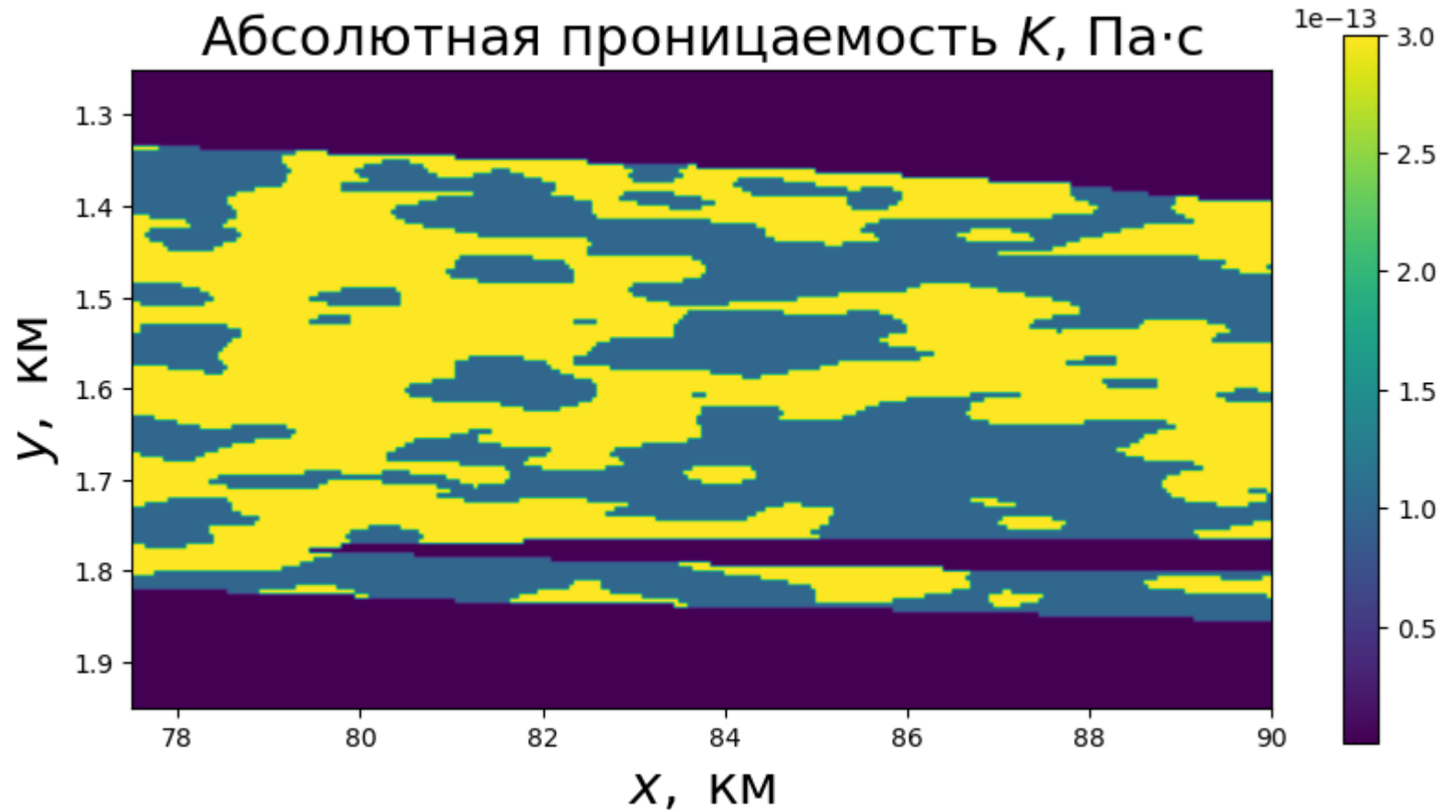
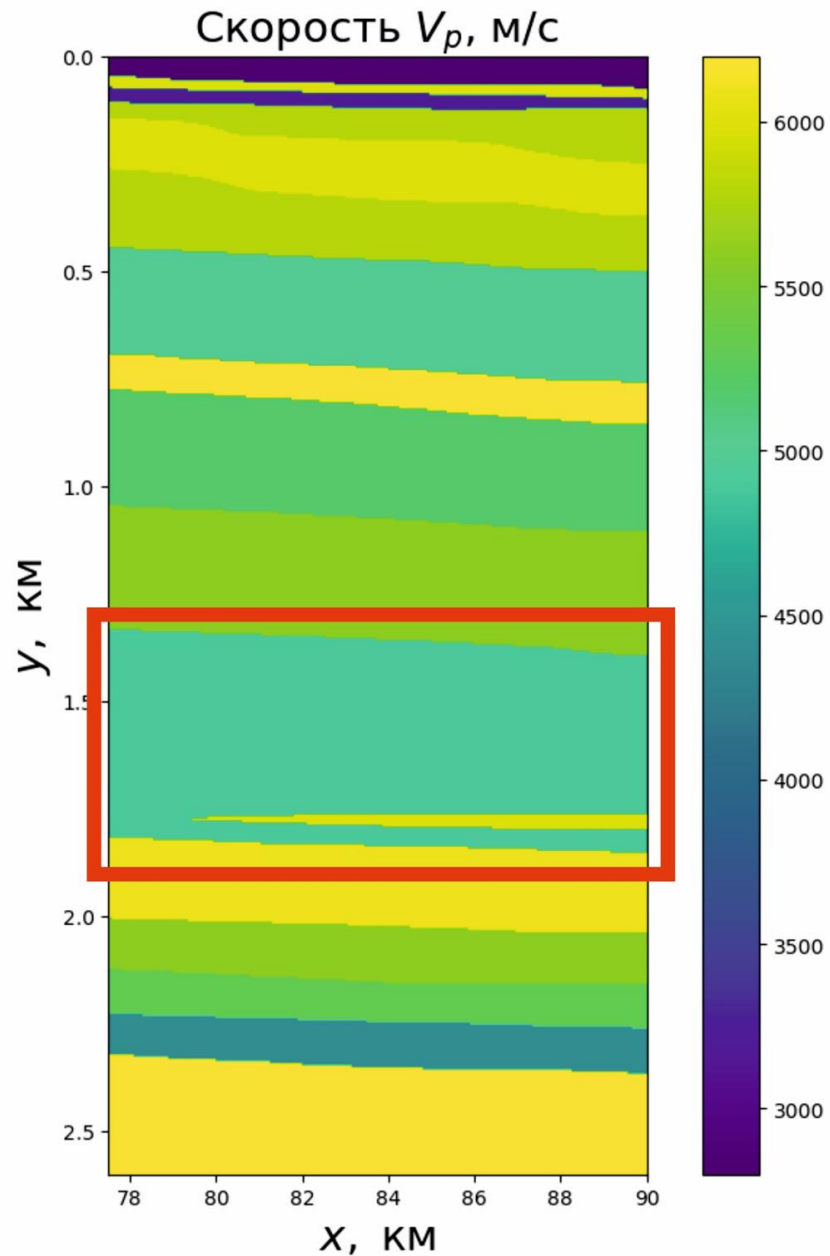
# Введение



$\times N_m$

Количество этапов мониторинга  
(количество скоростных моделей)

# Данные: скоростная модель Ванавара



# Фильтрация CO<sub>2</sub> в водонасыщенном слое

$$\phi \frac{\partial S}{\partial t} + \vec{w} \cdot \nabla S = 0, \quad \nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad \vec{u} = -k\lambda(s)\nabla p,$$

where  $S = S_w$ ,  $\vec{w} = f'(S)\vec{u}$ ,  $\lambda(s) = \lambda_w(s) + \lambda_o(S)$ ,  
 $\lambda_w(S) = k_{rw}(S)/\mu_w$ ,  $\lambda_o(S) = k_{ro}(1 - S)/\mu_o$ .

с граничными условиями

$$p|_{x=0} = p_l, p|_{x=N_x * h_x} = p_r,$$

$$S|_{x=0} = 1,$$

$$\vec{u}|_{y=0||y=N_z * h_z} = 0,$$

$$\nabla p \cdot \vec{n}|_{y=0||y=N_z * h_z} = 0.$$

# Фильтрация CO<sub>2</sub> в водонасыщенном слое

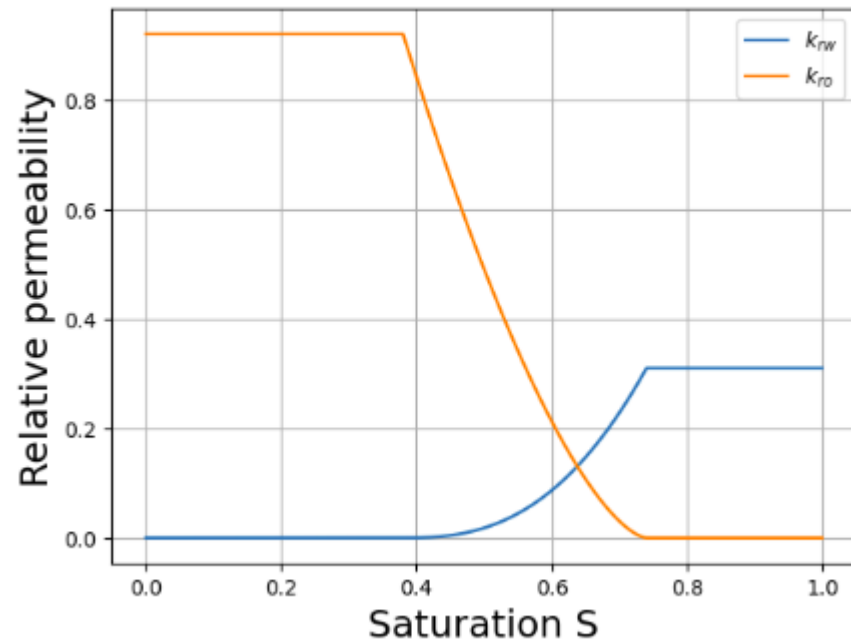
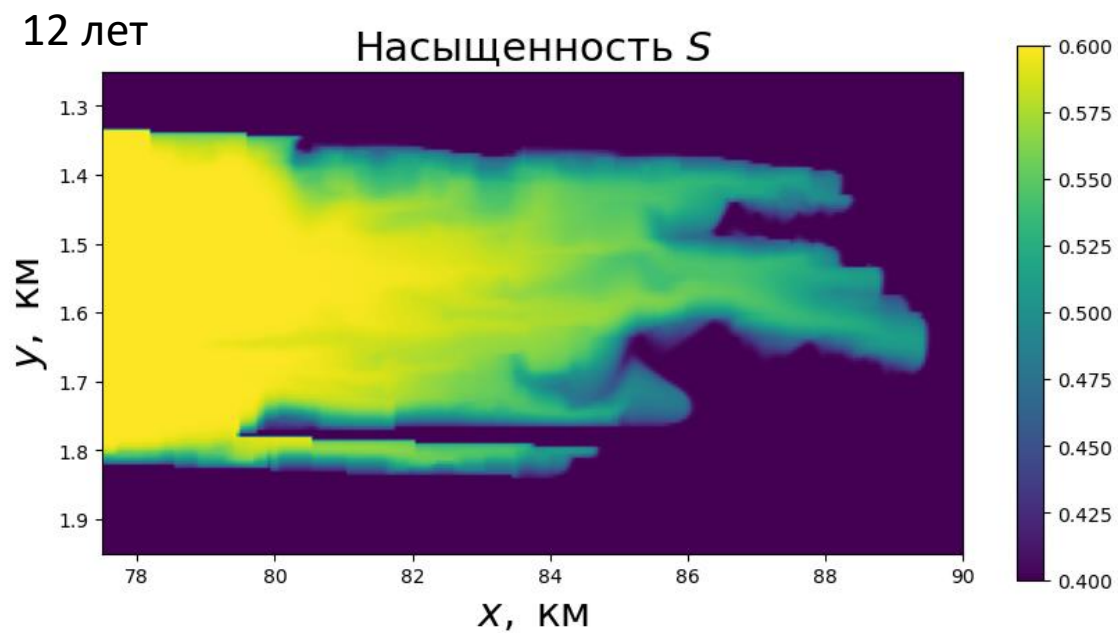
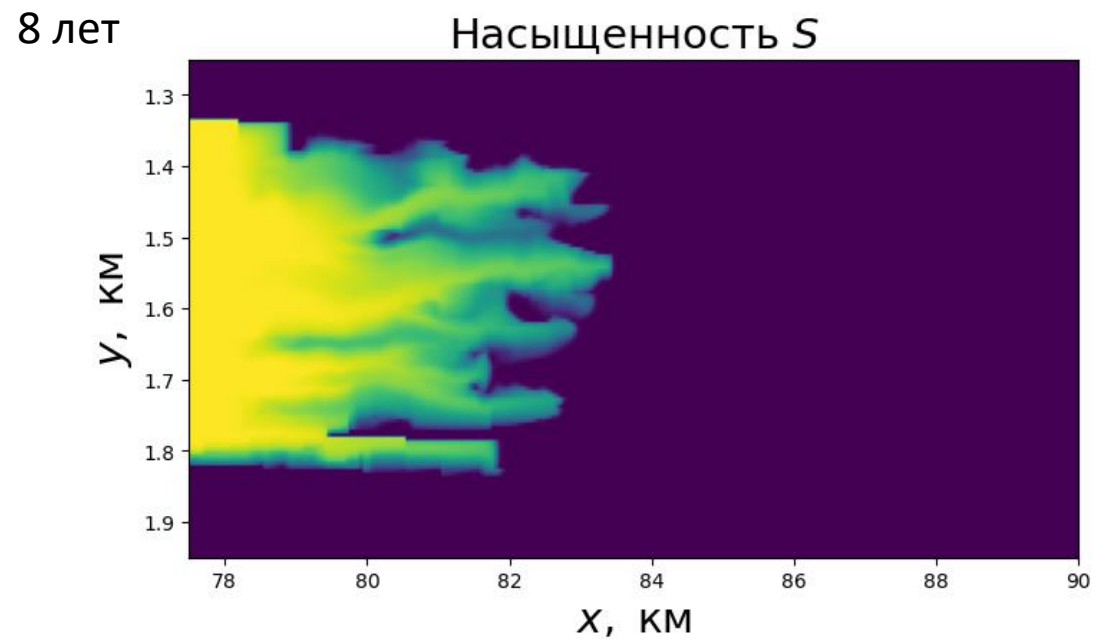
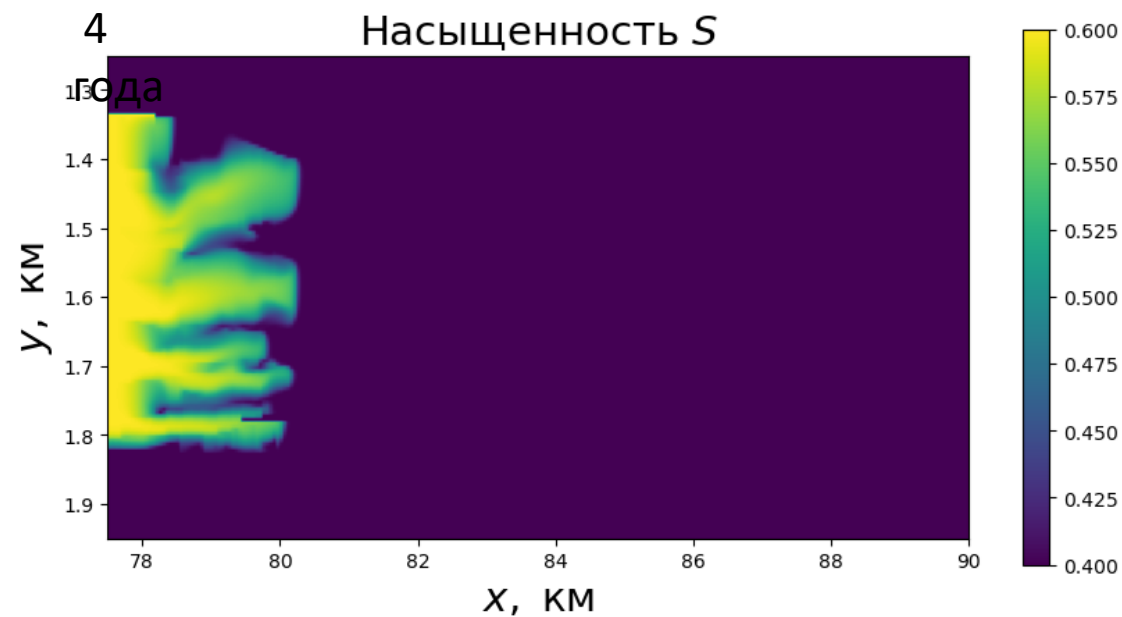
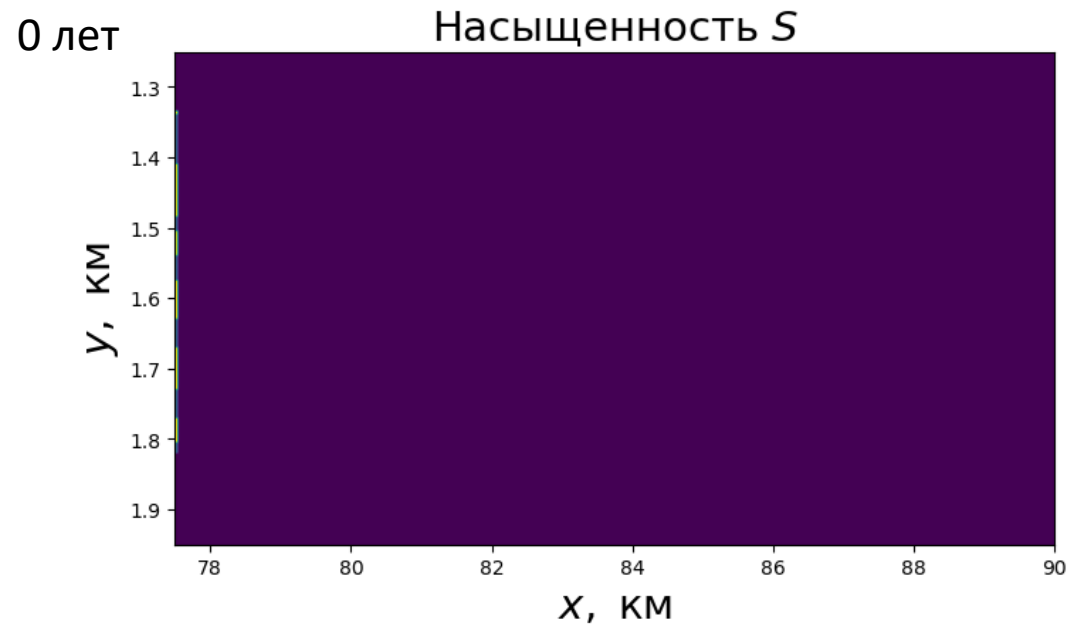


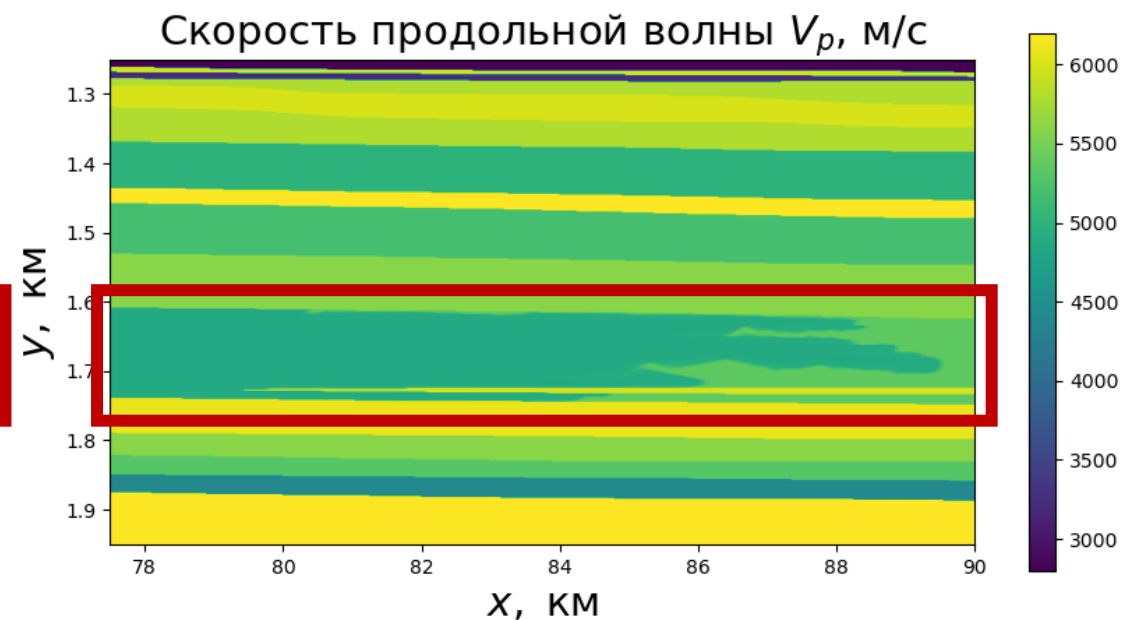
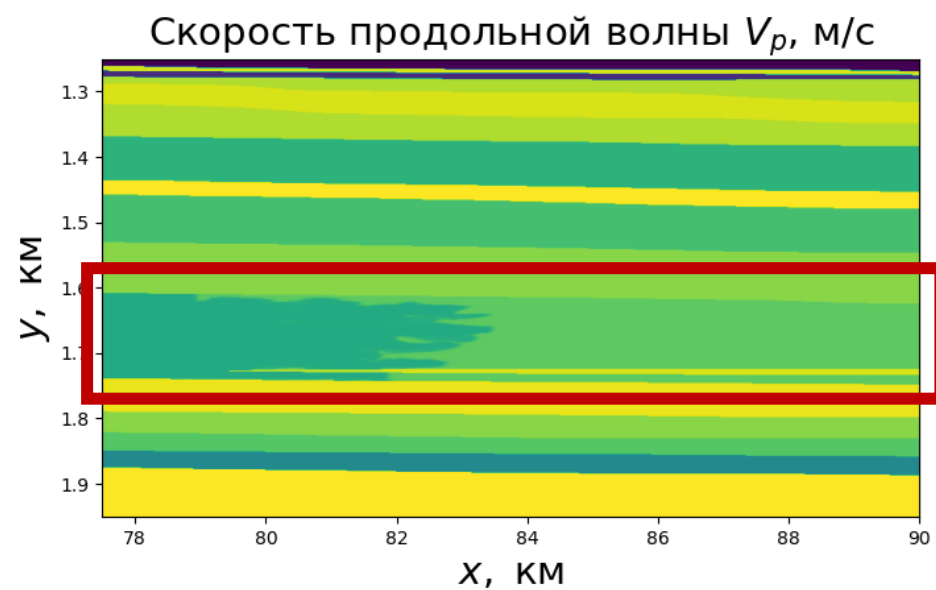
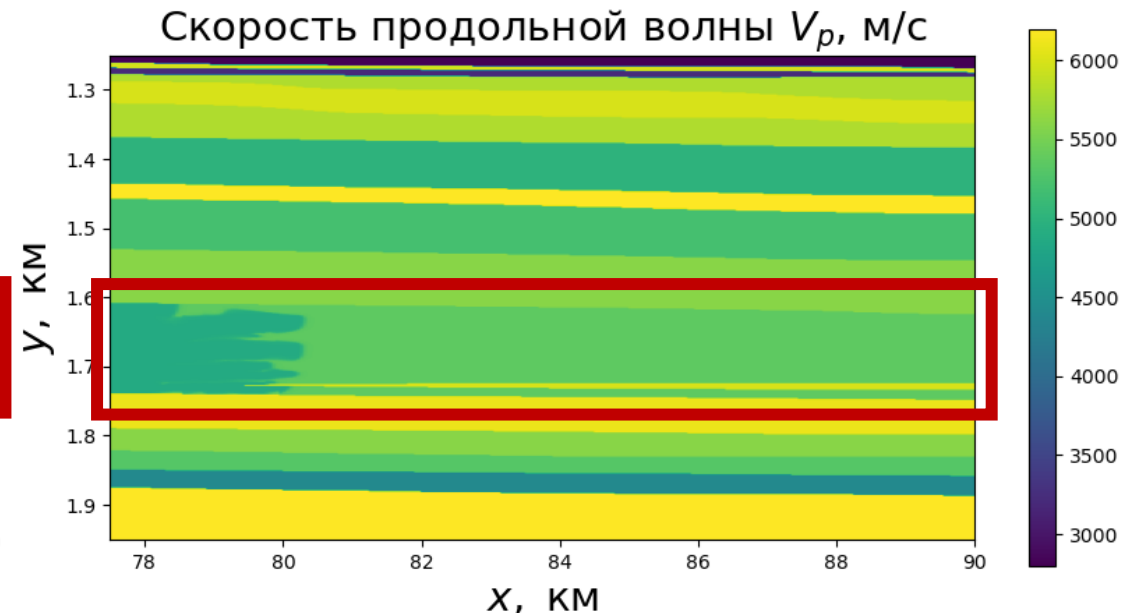
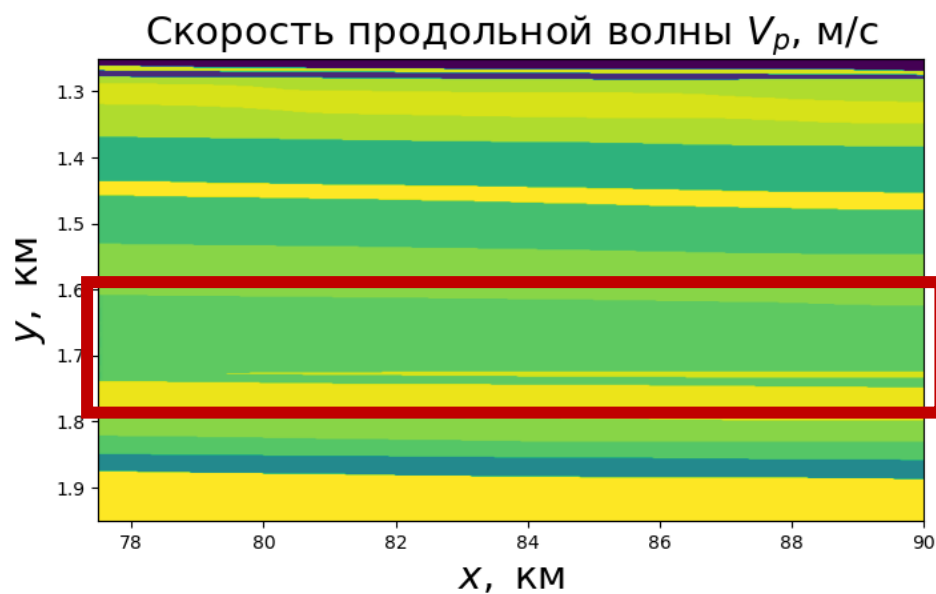
Table 1: Table of fluid properties

| Property        | Value                             |
|-----------------|-----------------------------------|
| Gas density     | $800 \text{ kg m}^{-3}$           |
| Gas viscosity   | $0.7 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$ |
| Water density   | $1000 \text{ kg m}^{-3}$          |
| Water viscosity | $2 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$   |

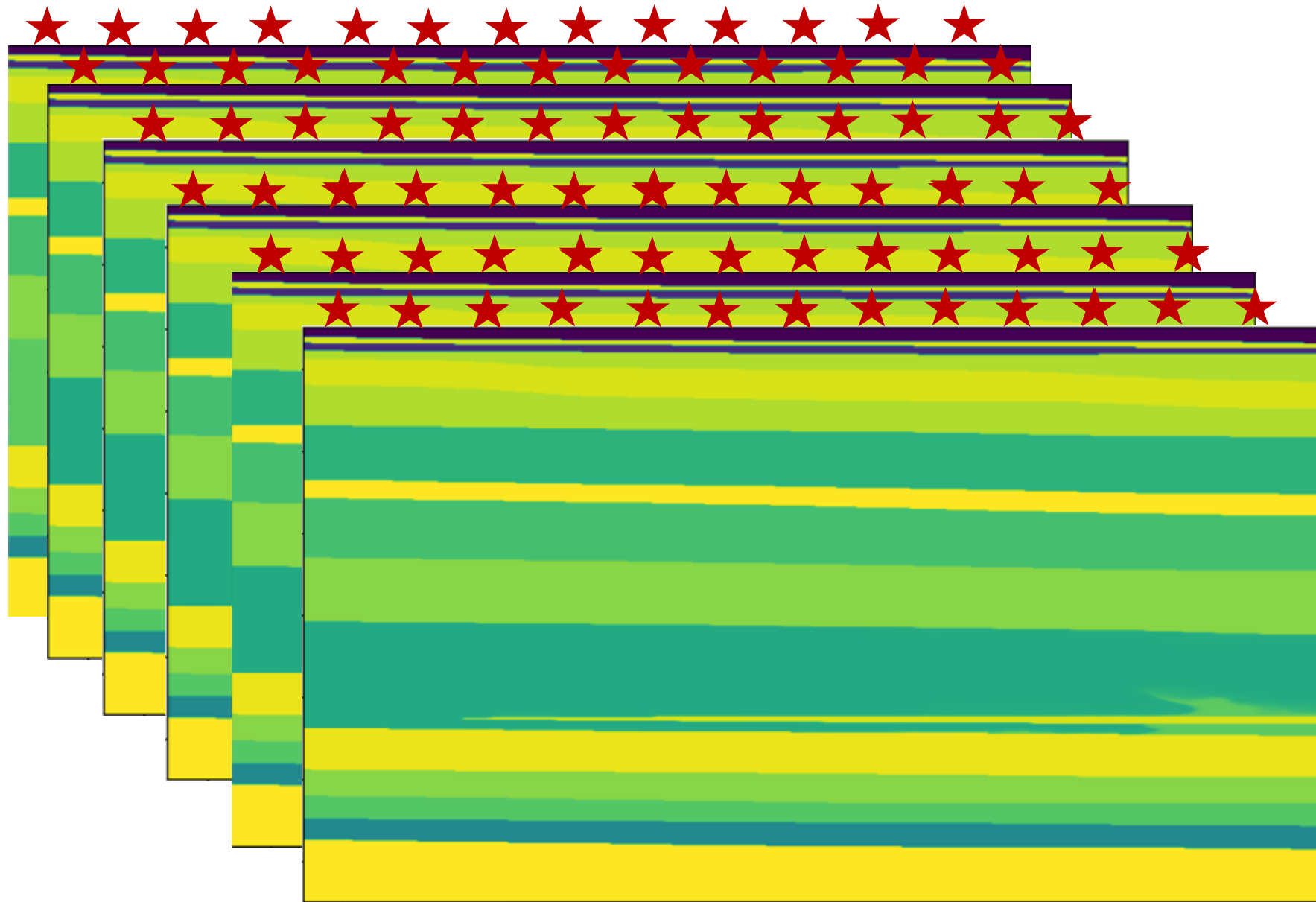
# Фильтрация $CO_2$ – вода



# Скоростная модель Ванавара ( $V_p$ )



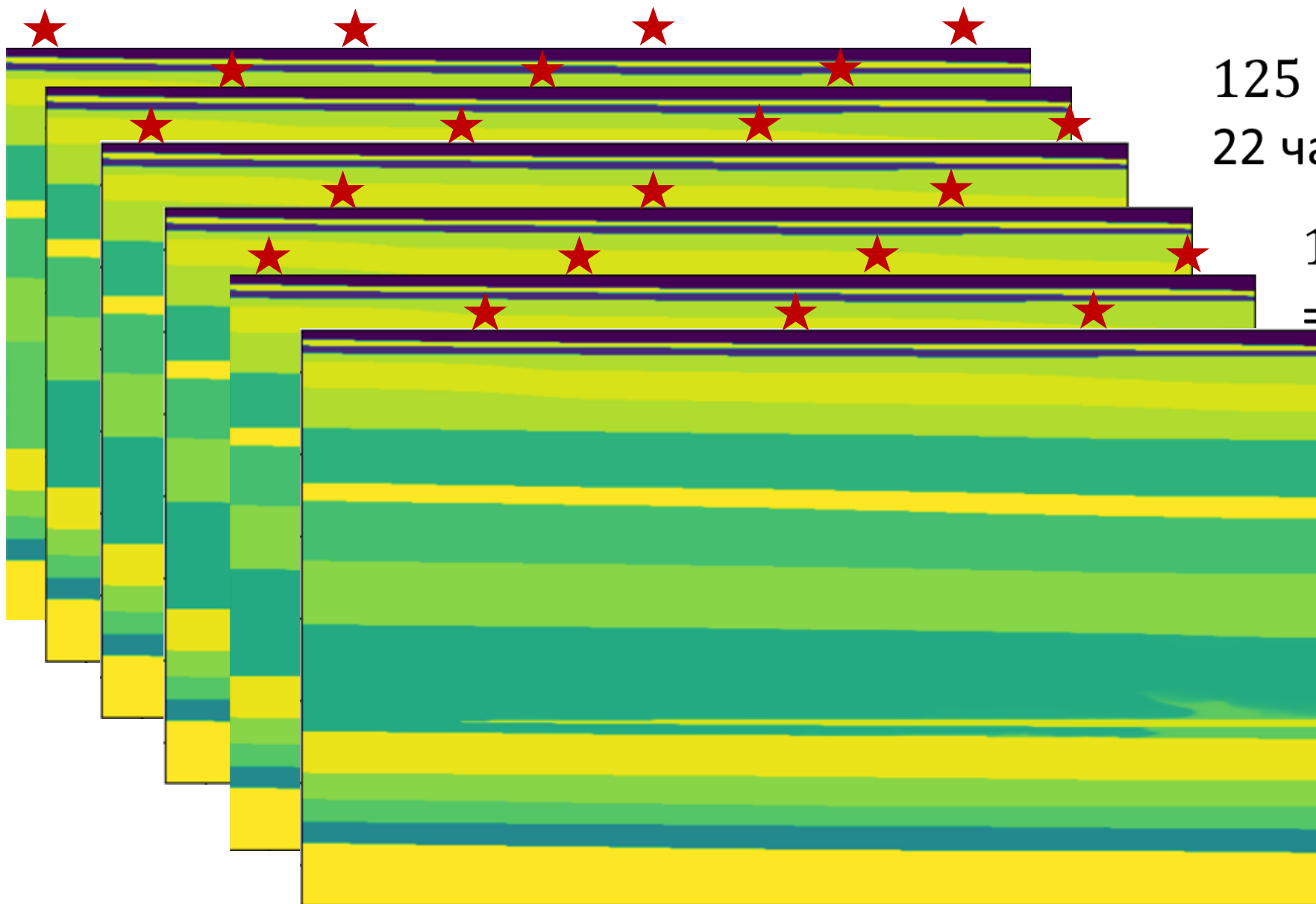
# 4D сейсмика



$$h_x = h_z = 2.5 \text{ м}$$

$125 \times 6 \times 6 \text{ мин} =$   
62 часа 30 мин

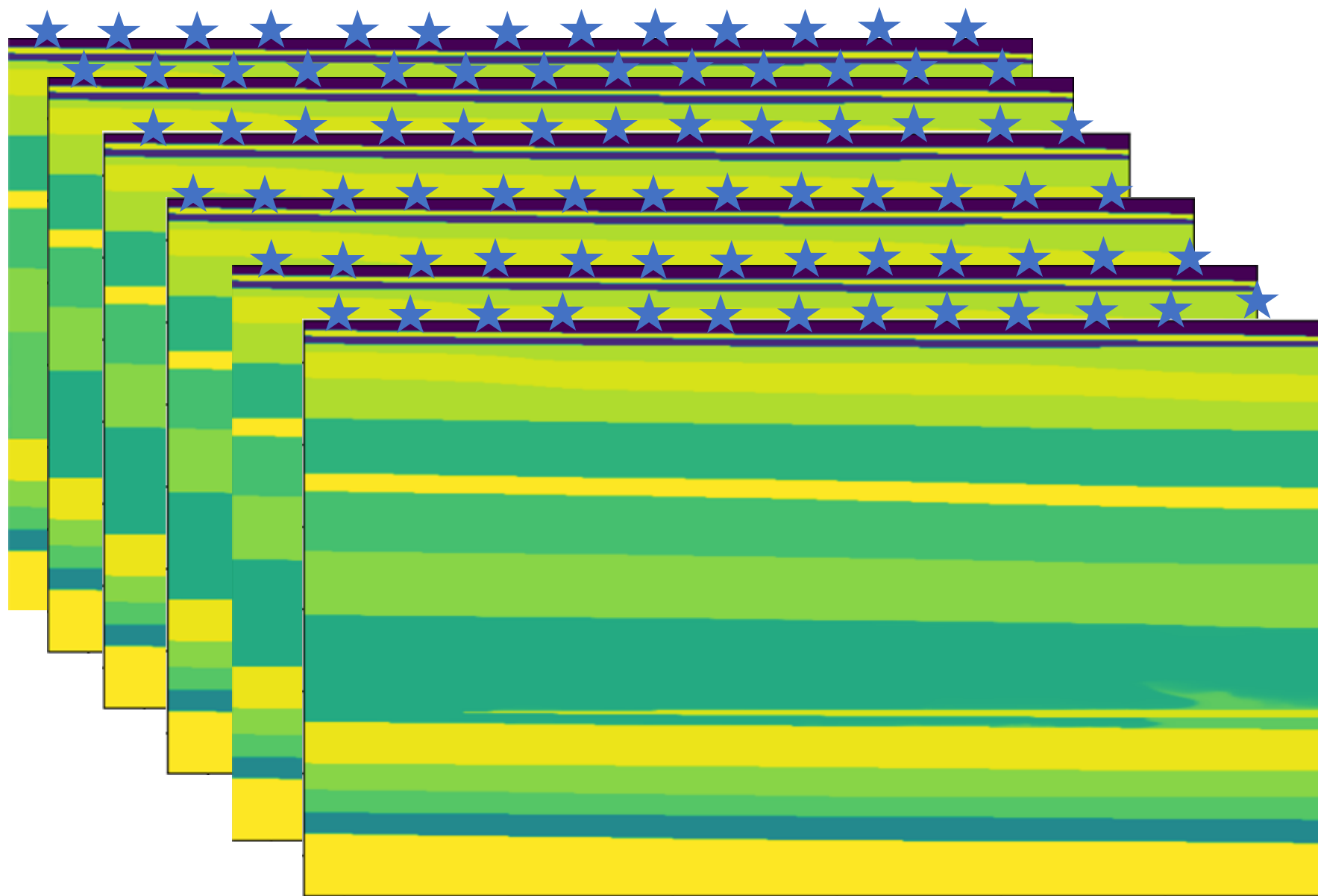
# 4D сейсмика



$125 \times 6 \times \mathbf{30\%} \times 6 \text{ мин} =$   
22 часа 30 мин

$125 \times 6 \times \mathbf{20\%} \times 6 \text{ мин}$   
= 15 часов

# 4D сейсмика

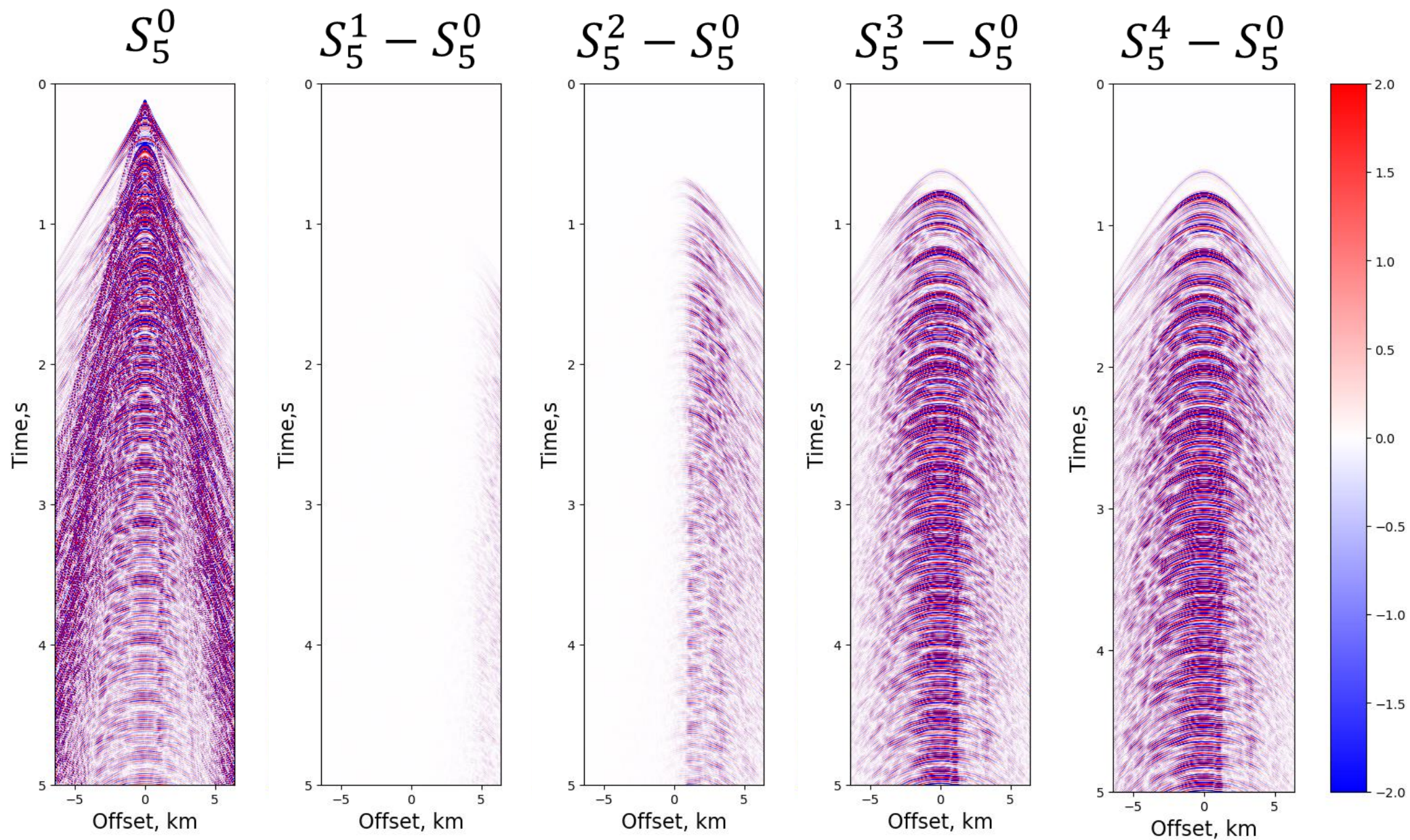


$$h_x = h_z = 5 \text{ м}$$

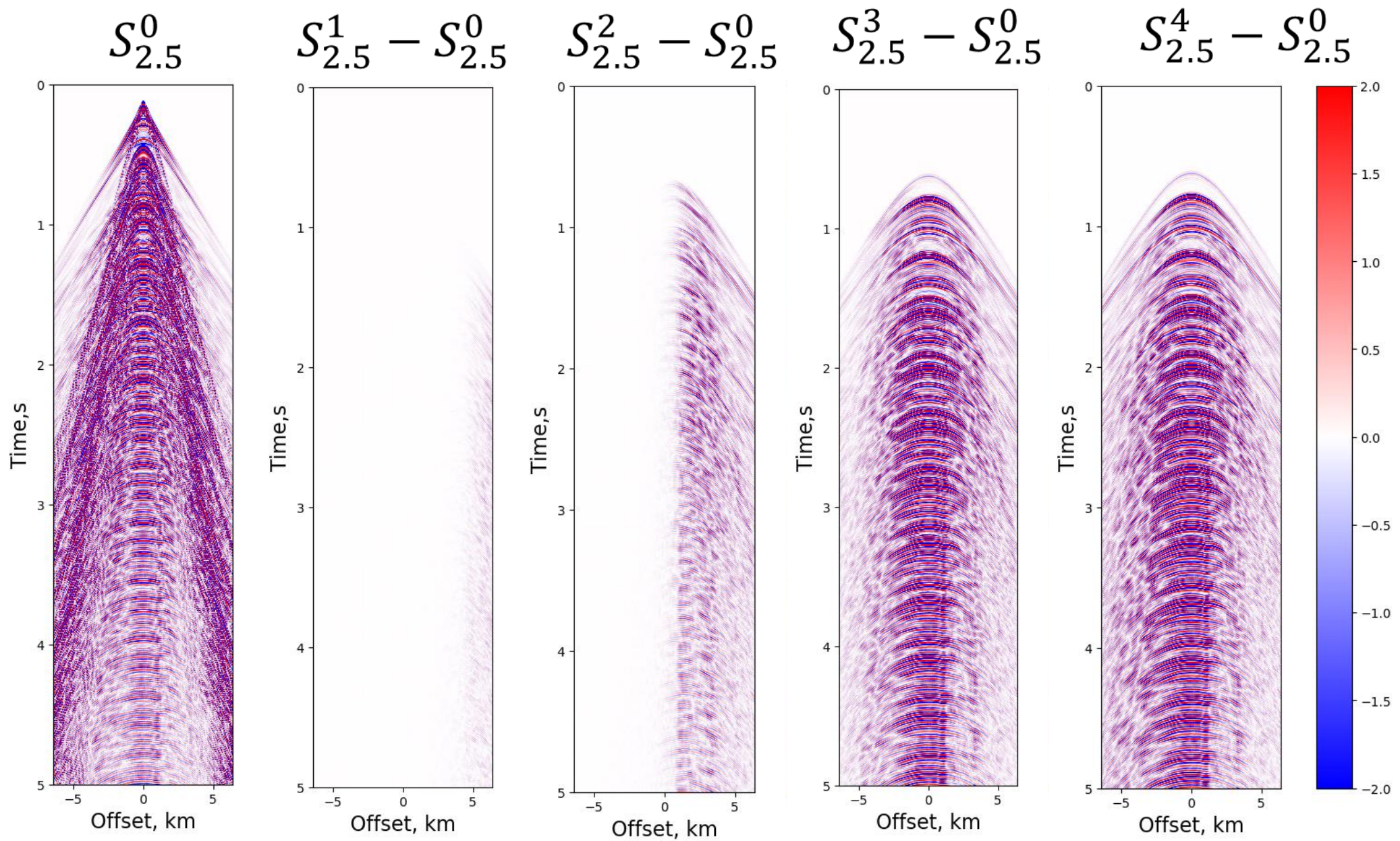
$$125 \times 6 \times 1 \text{ мин} =$$

12 часов 30 мин

# Данные: 5 м

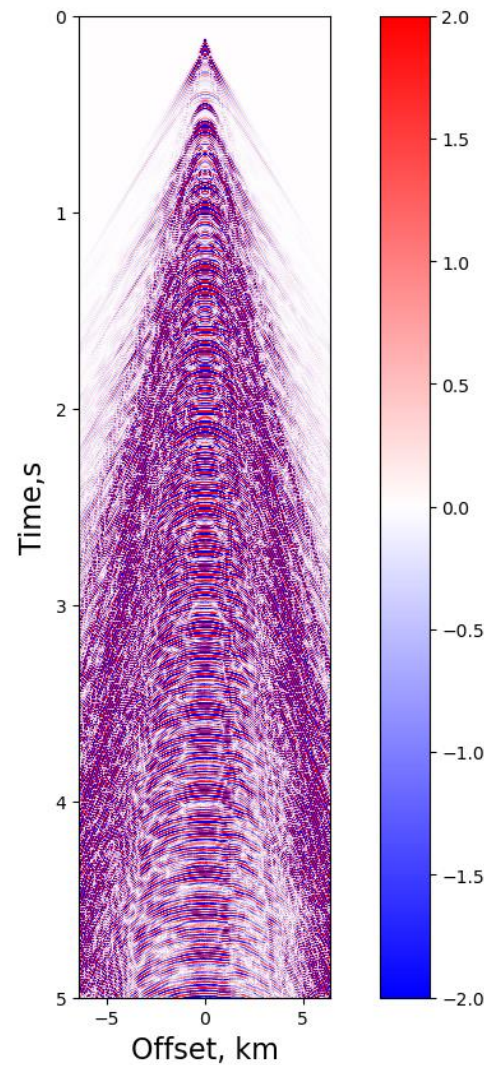


Данные: 2.5 м

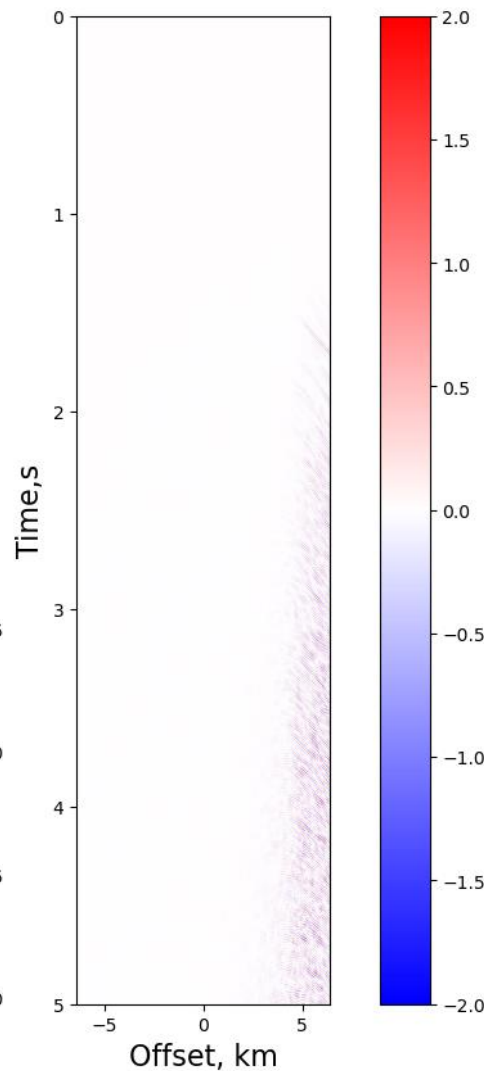


# Данные: дисперсия в разницах

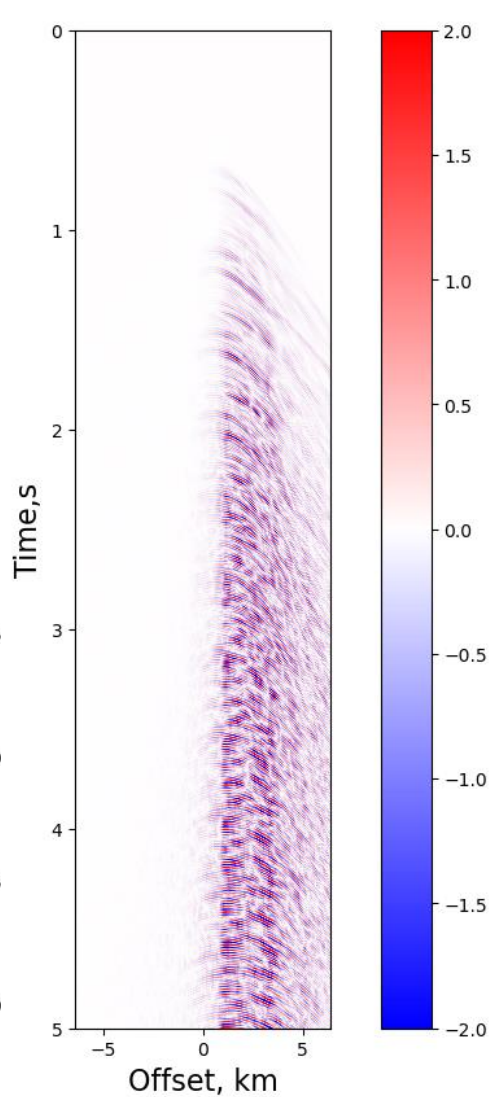
$$S_{2.5}^0 - S_5^0$$



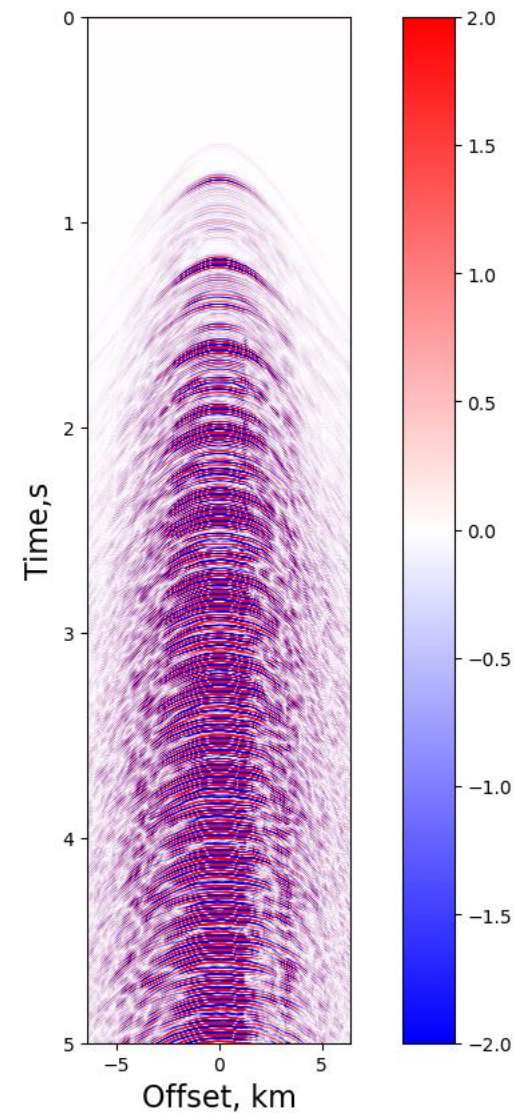
$$dS_{2.5}^{1,0} - dS_5^{1,0}$$



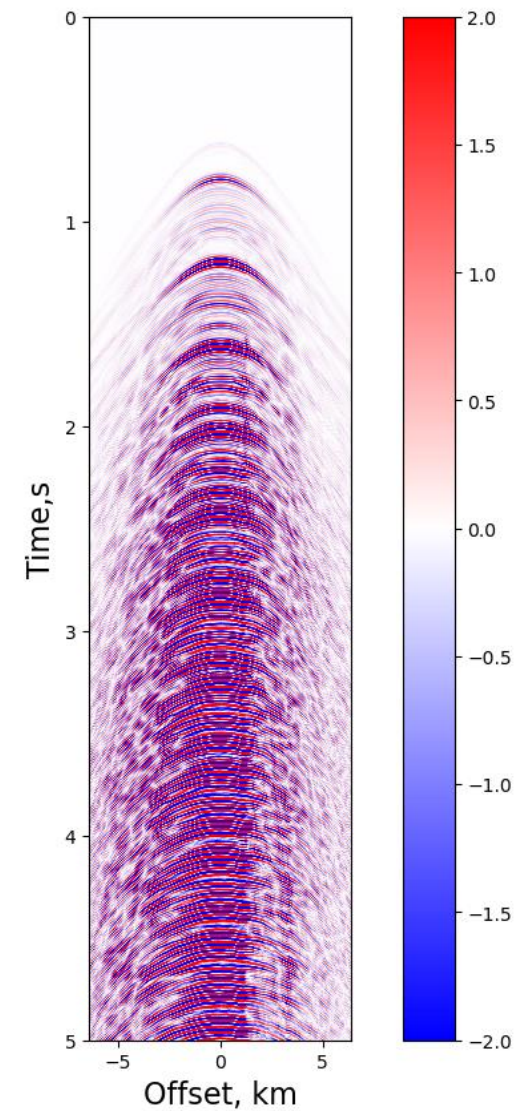
$$dS_{2.5}^{2,0} - dS_5^{2,0}$$



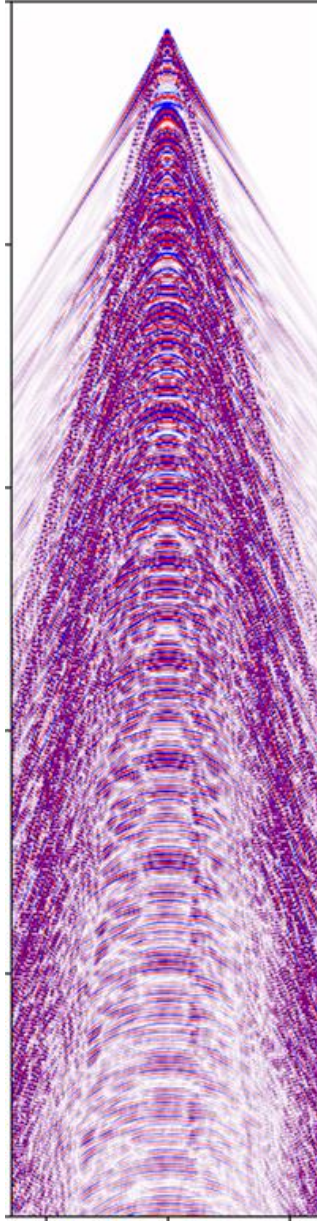
$$dS_{2.5}^{3,0} - dS_5^{3,0}$$



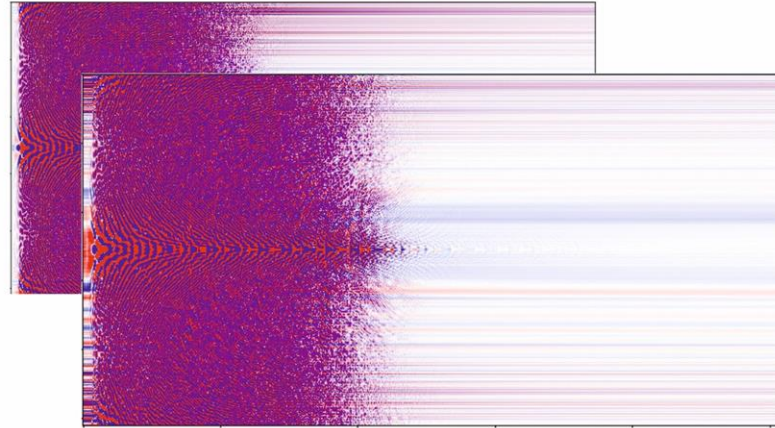
$$dS_{2.5}^{4,0} - dS_5^{4,0}$$



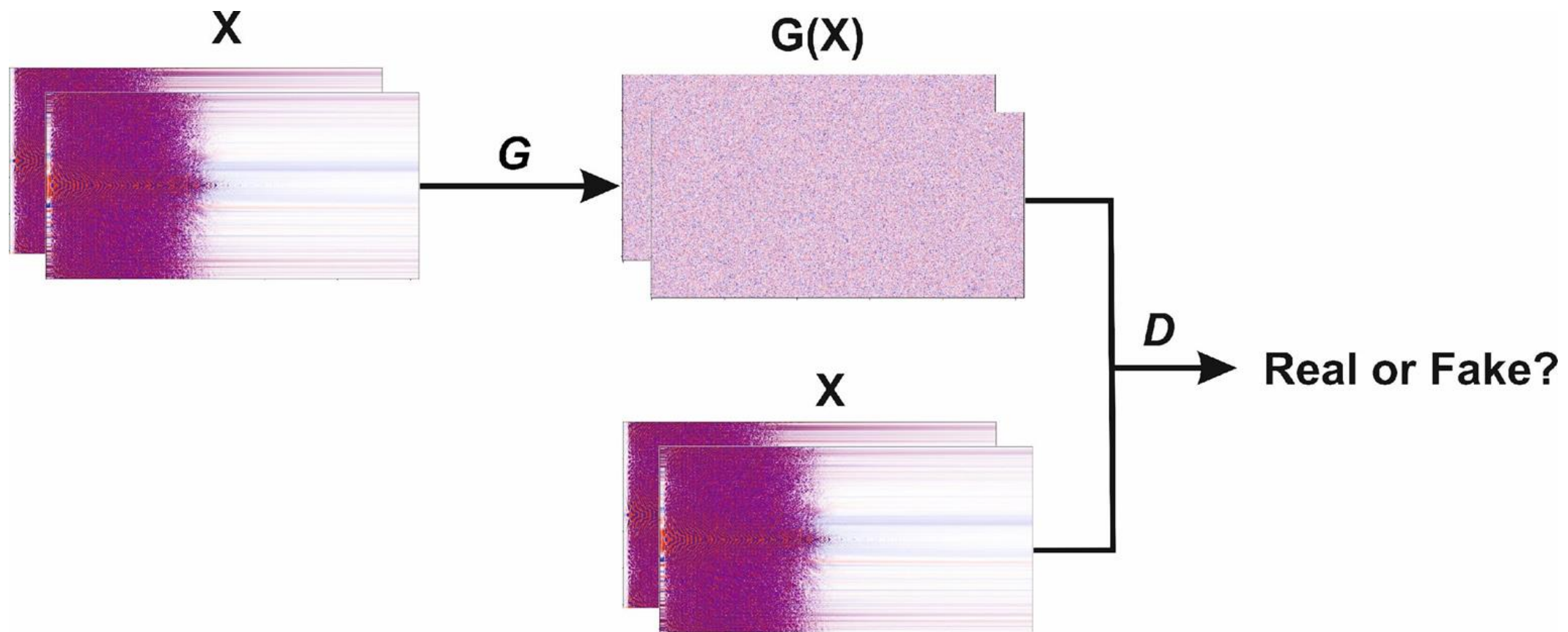
# Нейронная сеть NDM-net



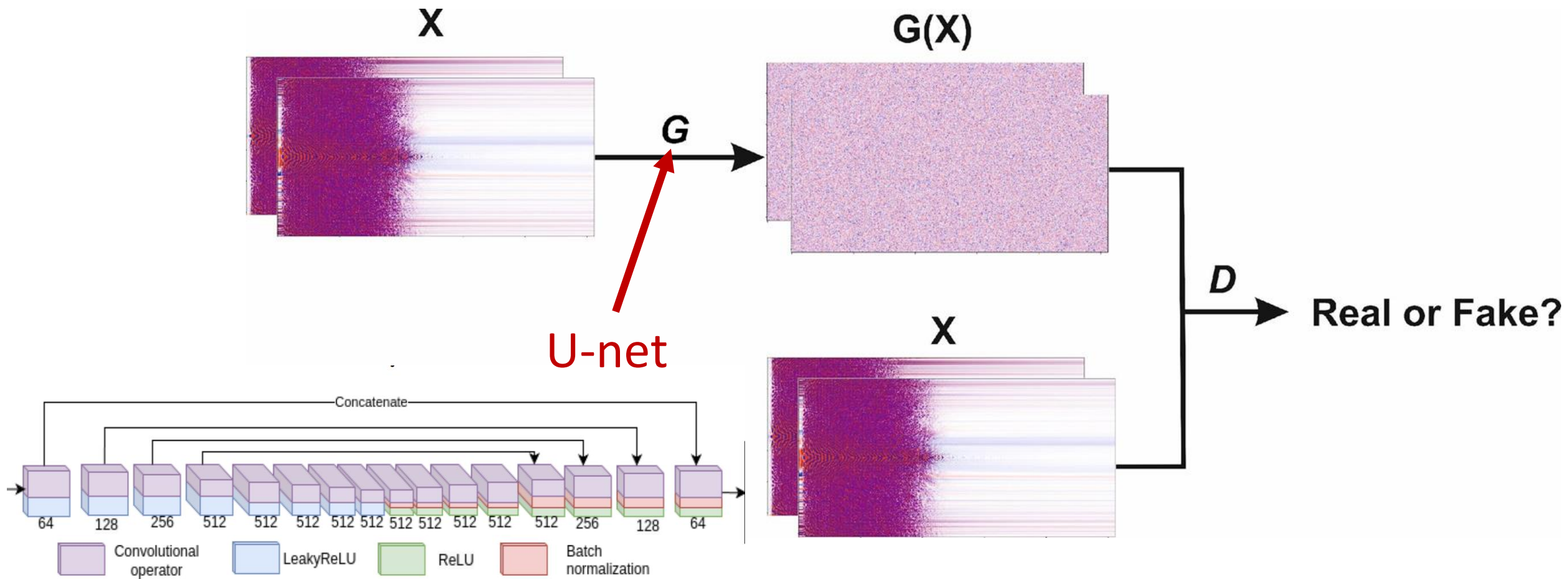
**БПФ**



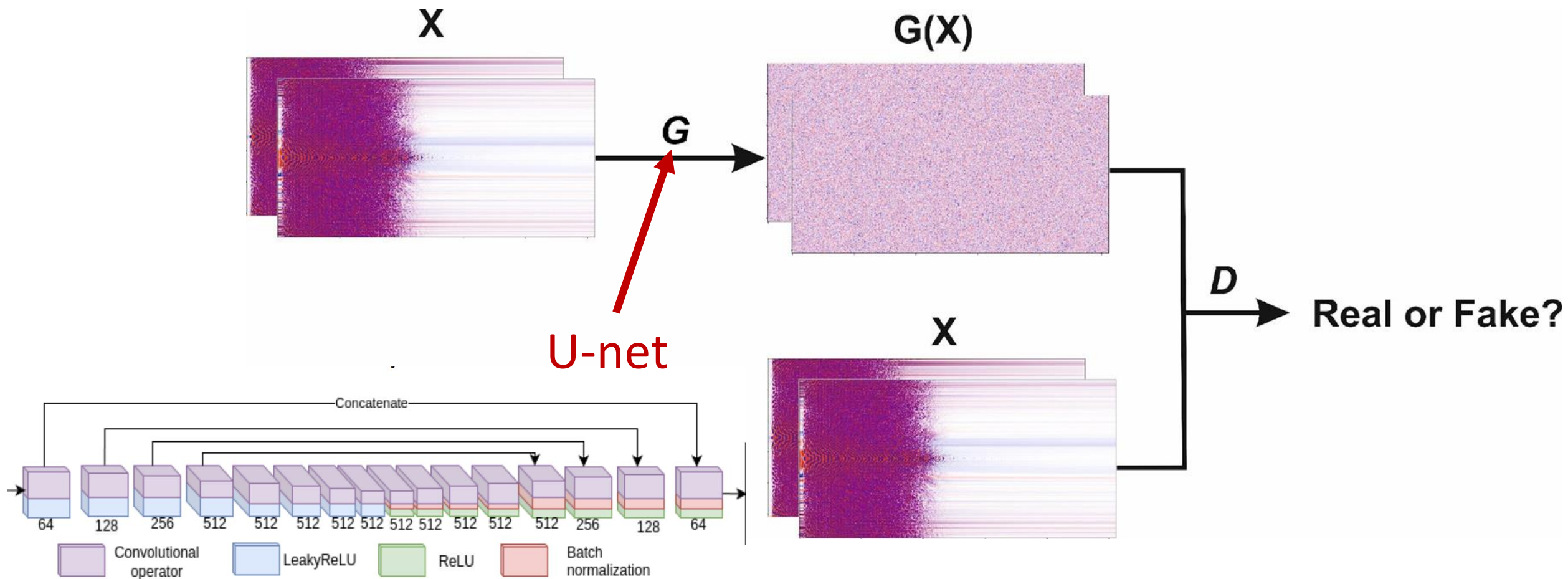
# Нейронная сеть NDM-net



# Нейронная сеть NDM-net

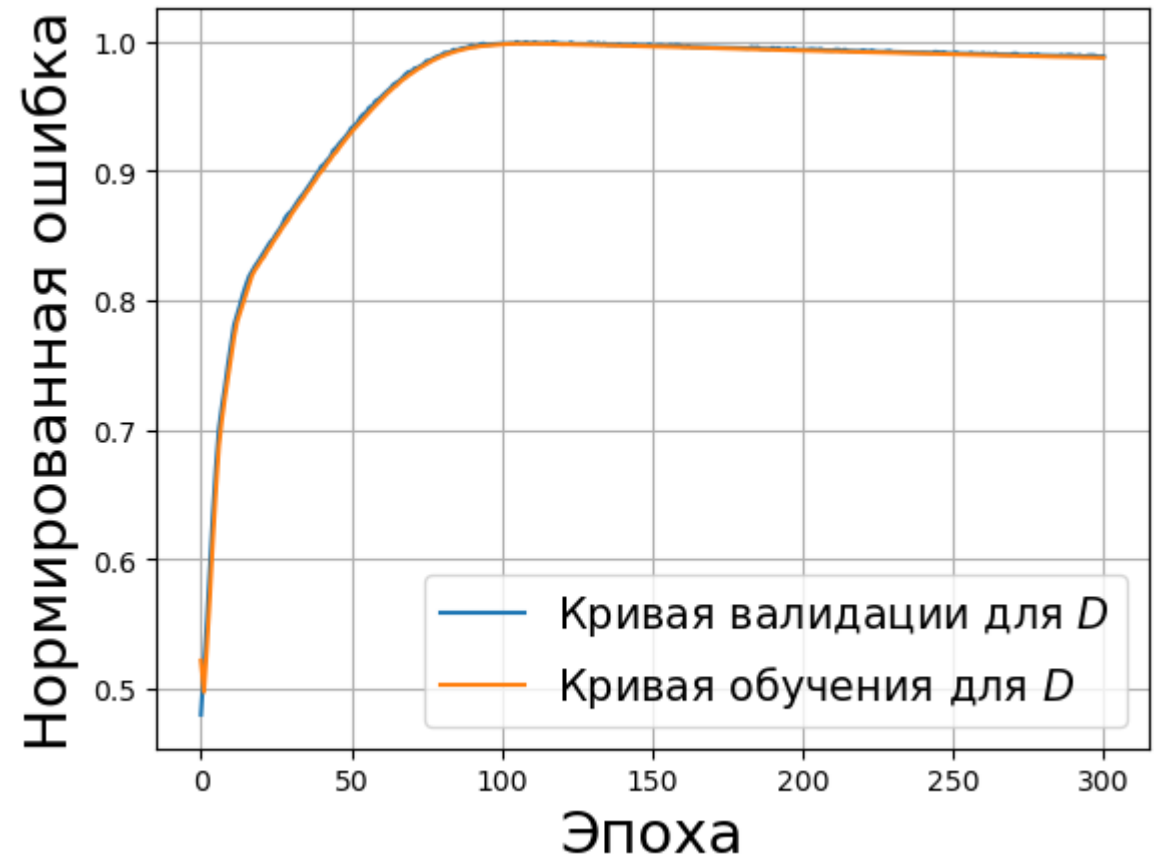
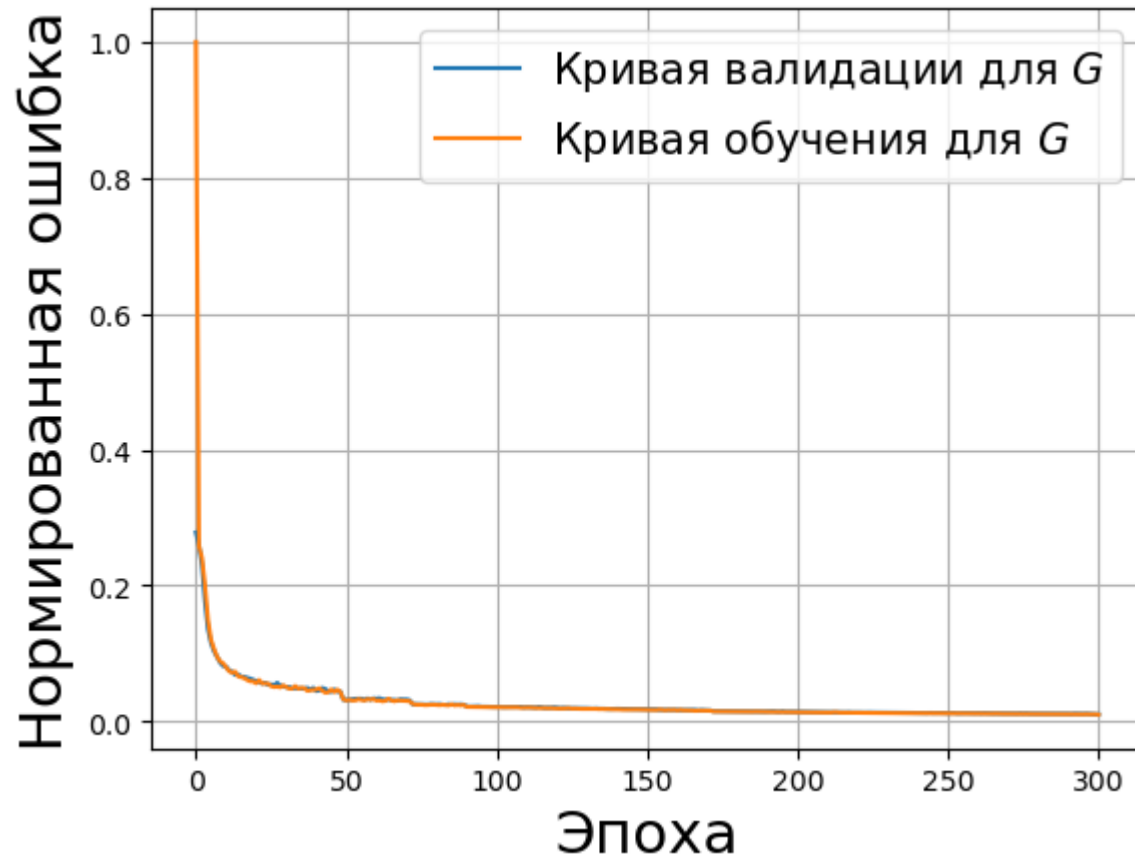


# Нейронная сеть NDM-net



$$\mathcal{L}_1(\Theta) = \arg \min_G \max_D E_{k \in D_t} [\log D(G(\vec{u}_{h_2}(t, x_o, x_s^k), \Theta))] \\ + \log(1 - D(d\vec{u}_{h_2, h_1}^i(t, x_o, x_s^k))) \\ + \lambda(\|d\vec{u}_{h_2, h_1}^i(t, x_o, x_s^k) - G(\vec{u}_{h_2}(t, x_o, x_s^k), \Theta_1)\|_1)],$$

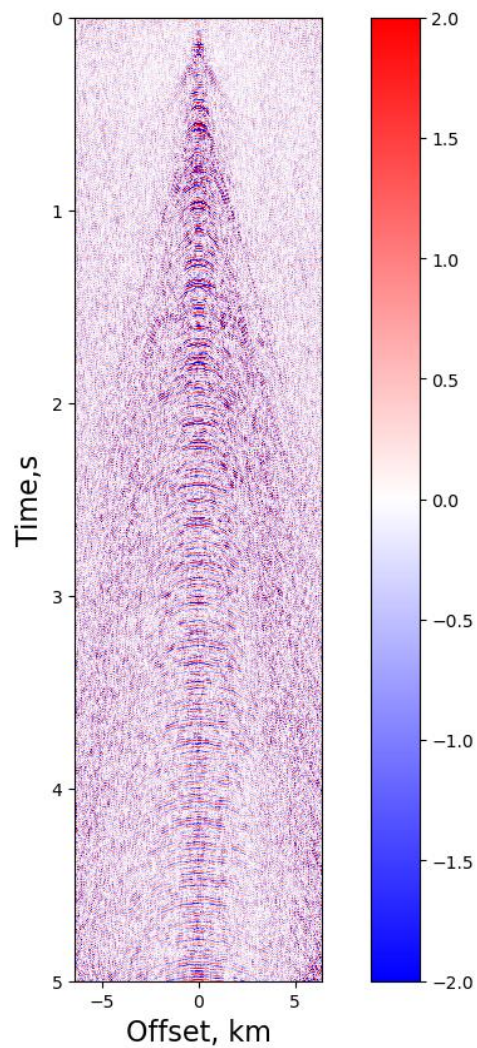
# Обучение нейронной сети



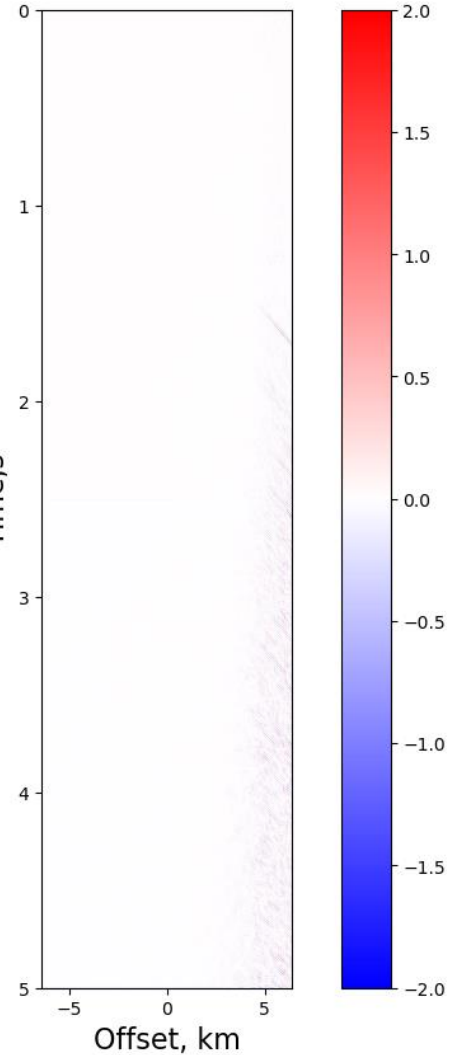
Время обучения (30%) = 143 мин = 2 часа 23 мин  
Время обучения (20%) = 60 мин = 1 час

# Результаты: дисперсия в разницах

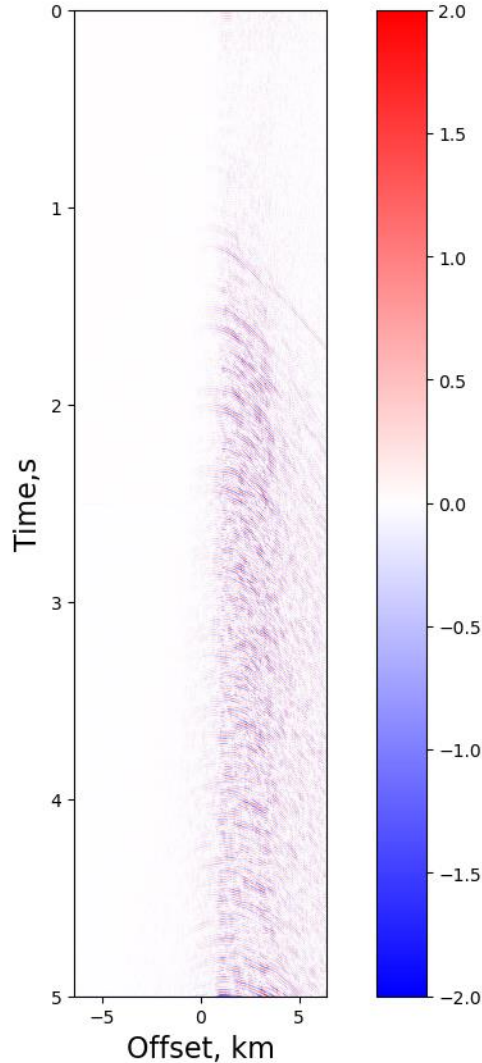
$$S_{2.5}^0 - S_g^0$$



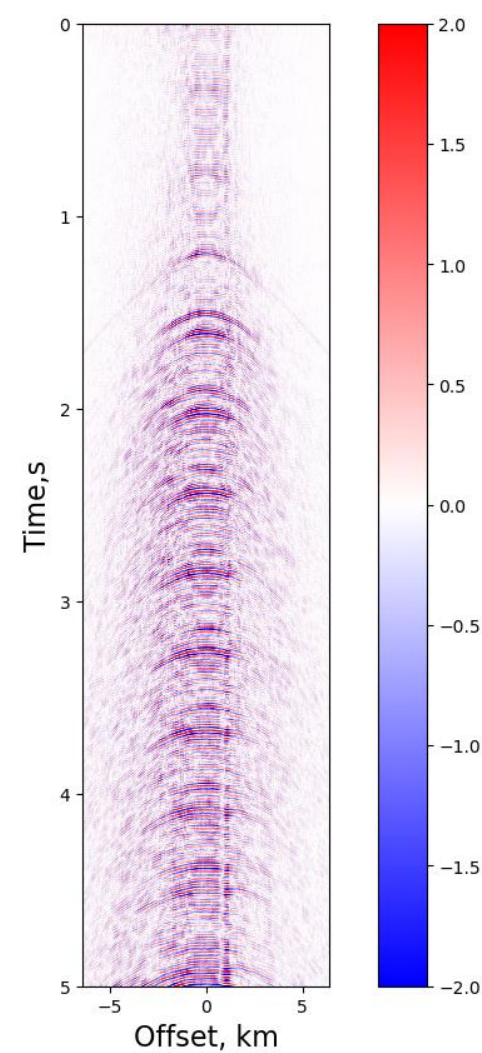
$$dS_{2.5}^{1,0} - dS_g^{1,0}$$



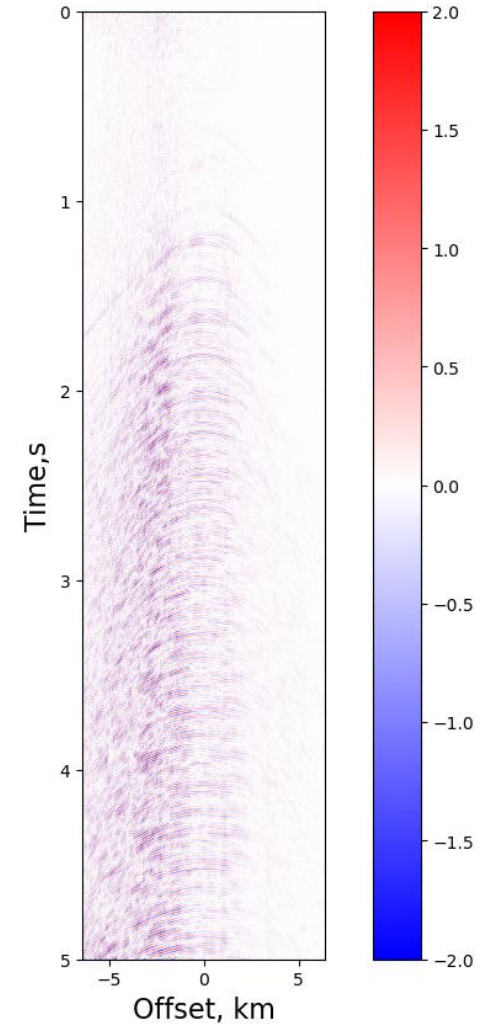
$$dS_{2.5}^{2,0} - dS_g^{2,0}$$



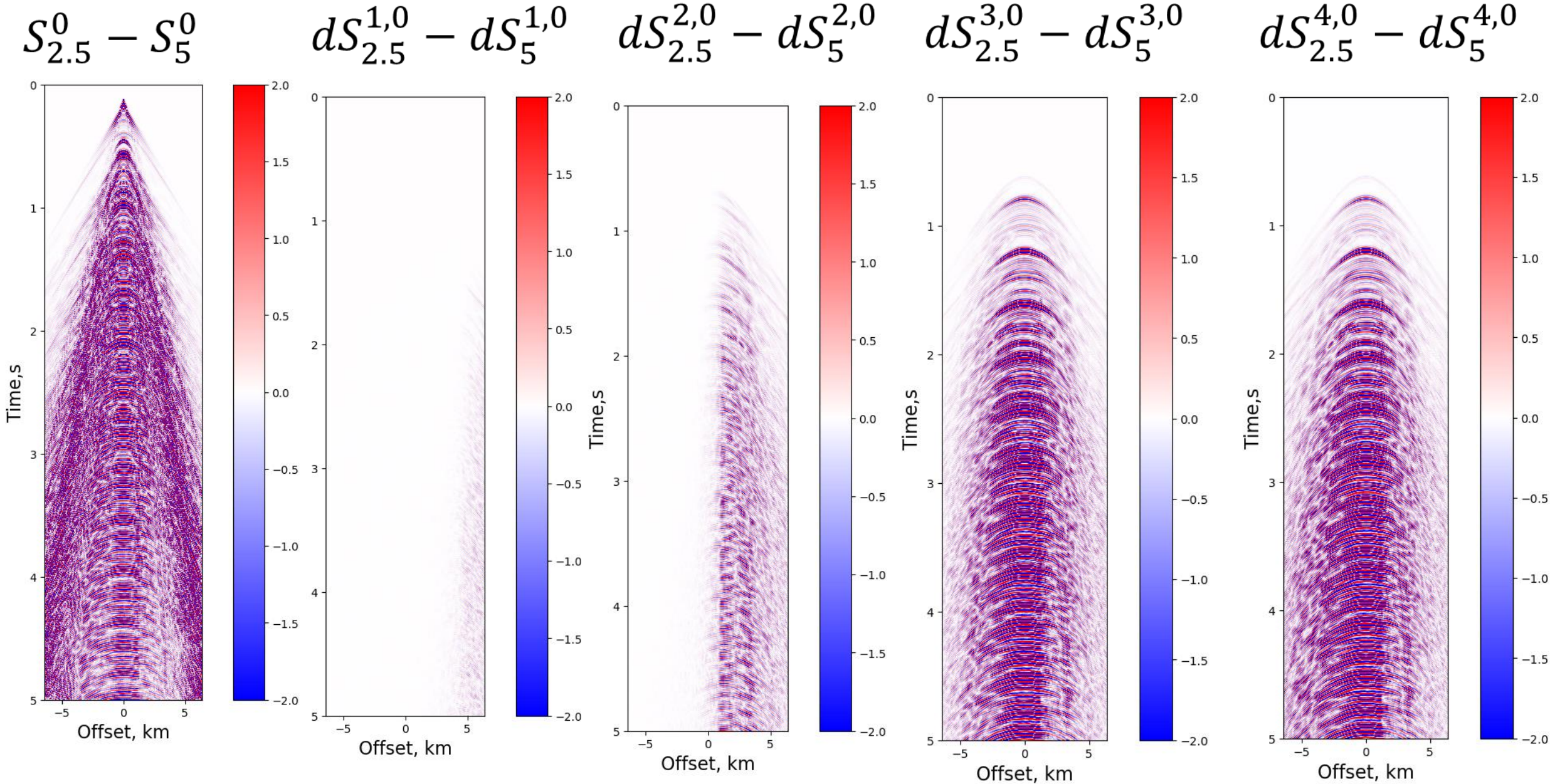
$$dS_{2.5}^{3,0} - dS_g^{3,0}$$



$$dS_{2.5}^{4,0} - dS_g^{4,0}$$

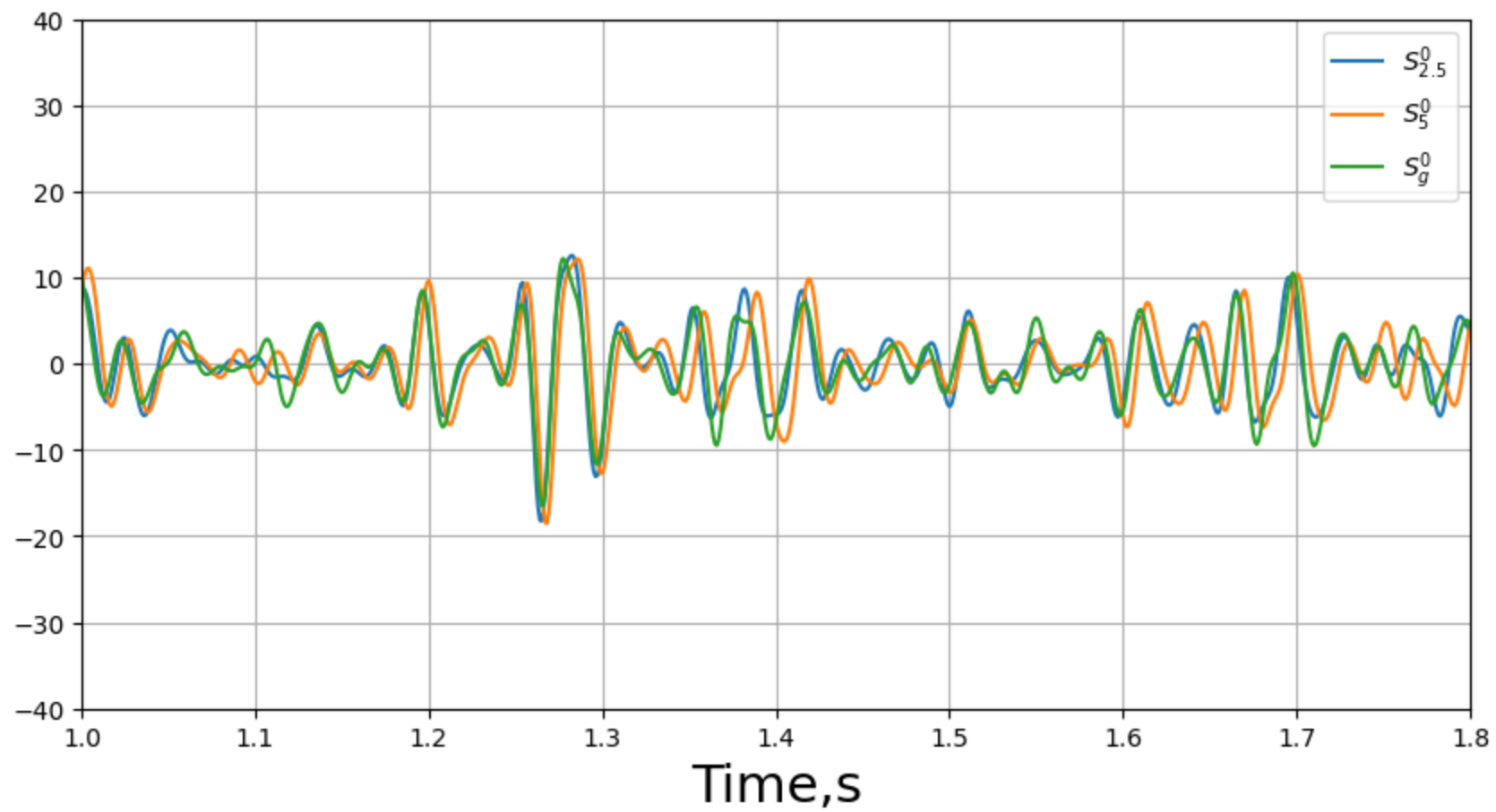


# Данные: дисперсия в разницах



# Результат

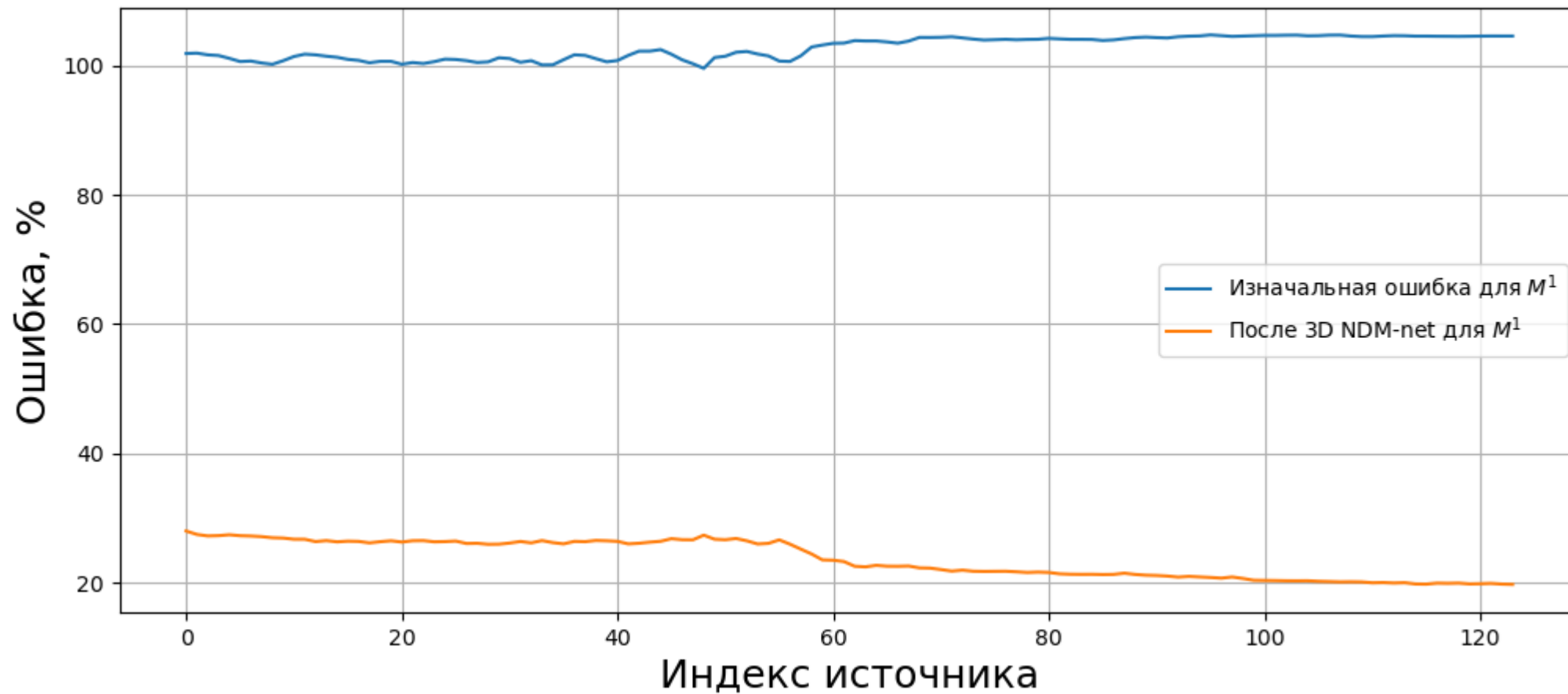
ы



$$\epsilon(S_5, S_{2.5}) = \frac{||S_5 - S_{2.5}||_2}{||S_{2.5}||_2} \times 100\%$$

# Верификация

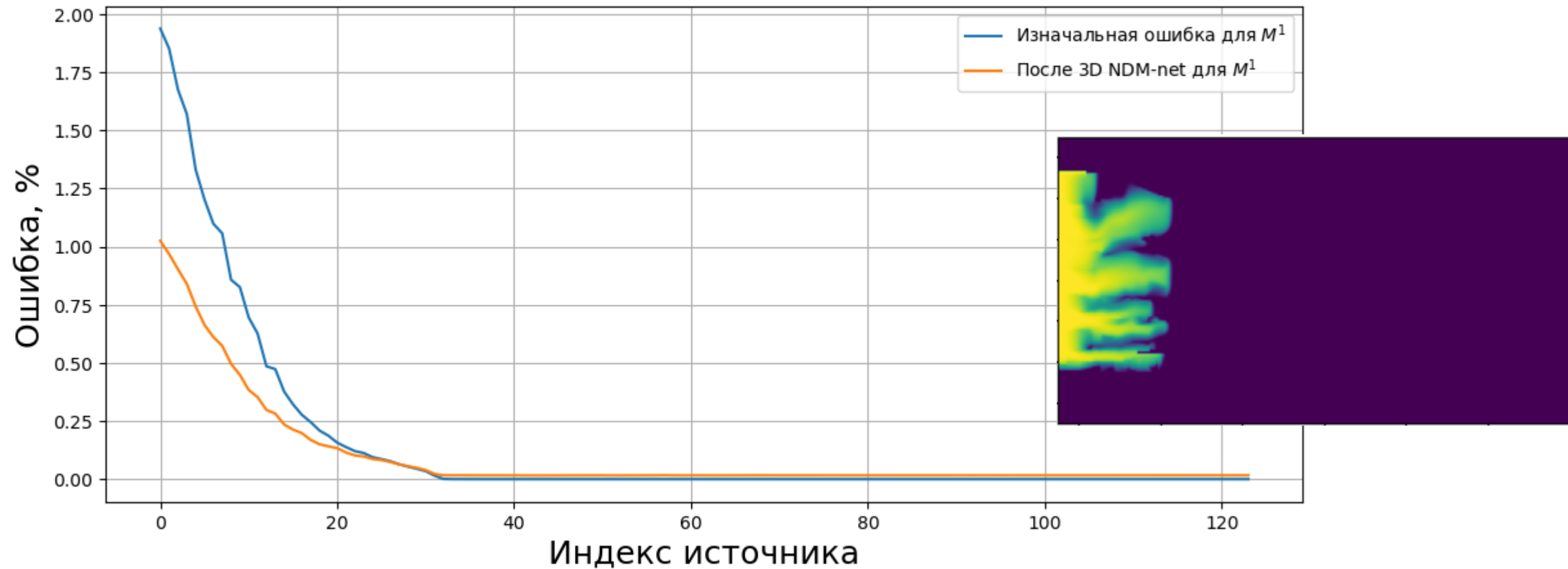
$$\epsilon(S_5, S_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(S_g, S_{2.5})$$



В 4.4 раза

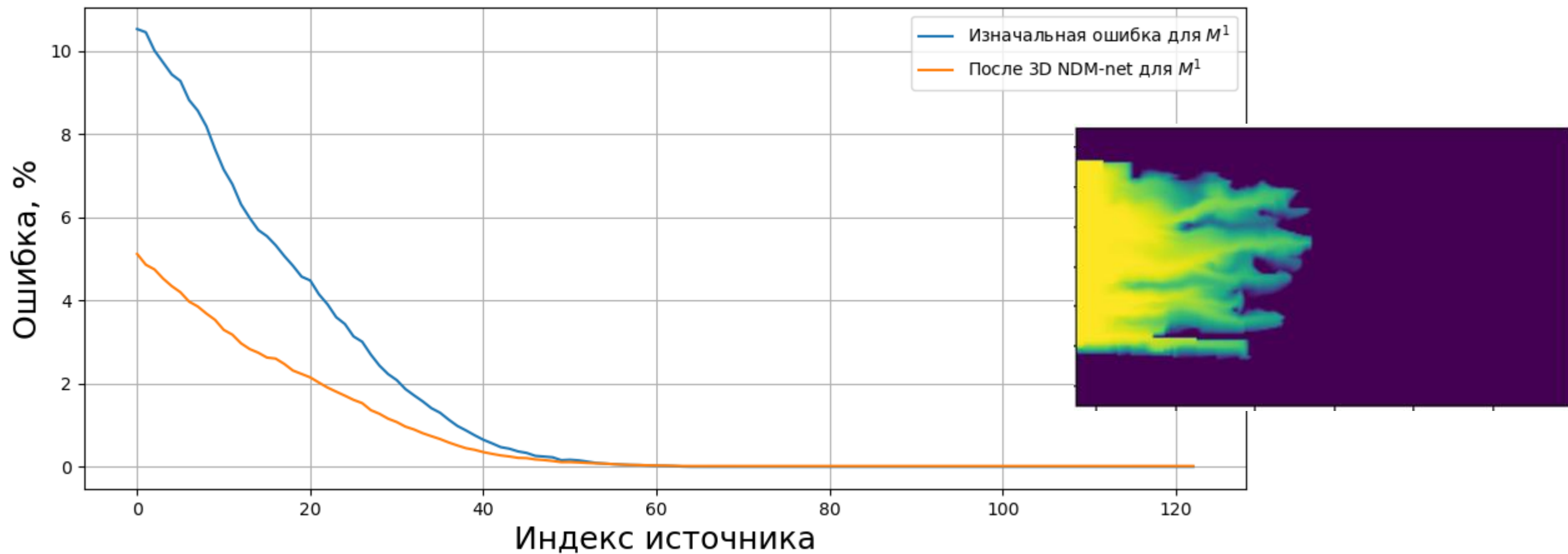
# Верификация

$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$



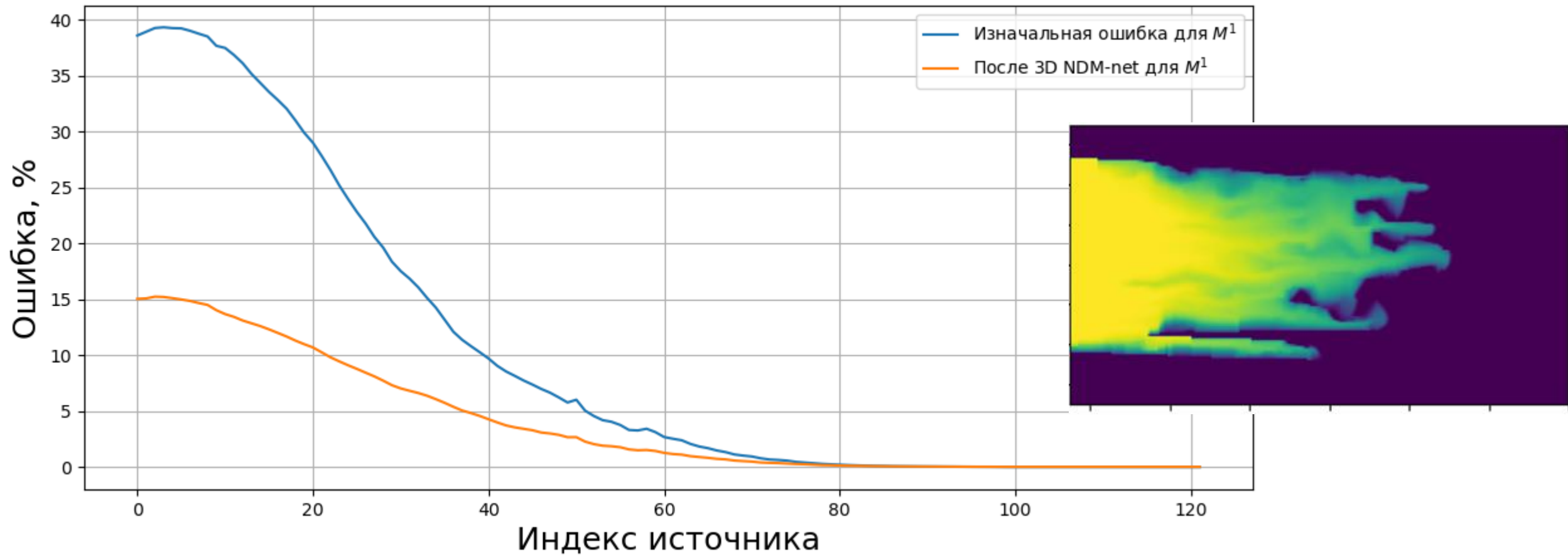
# Верификация

$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$



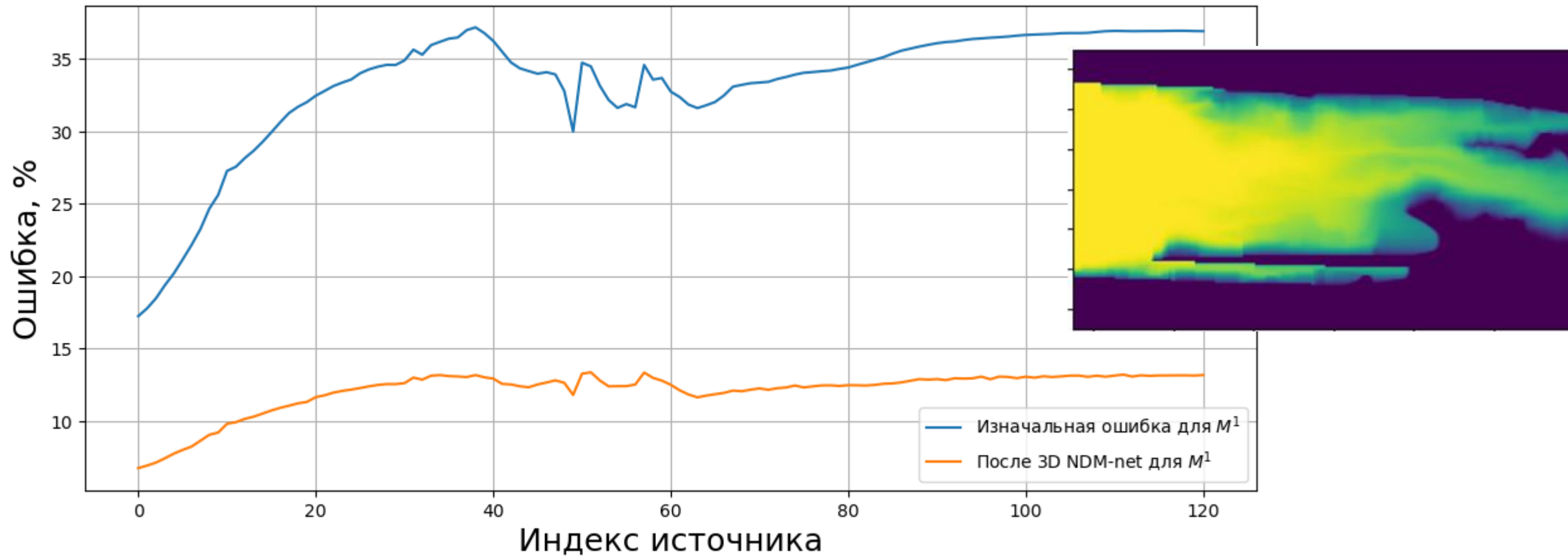
# Верификация

$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$

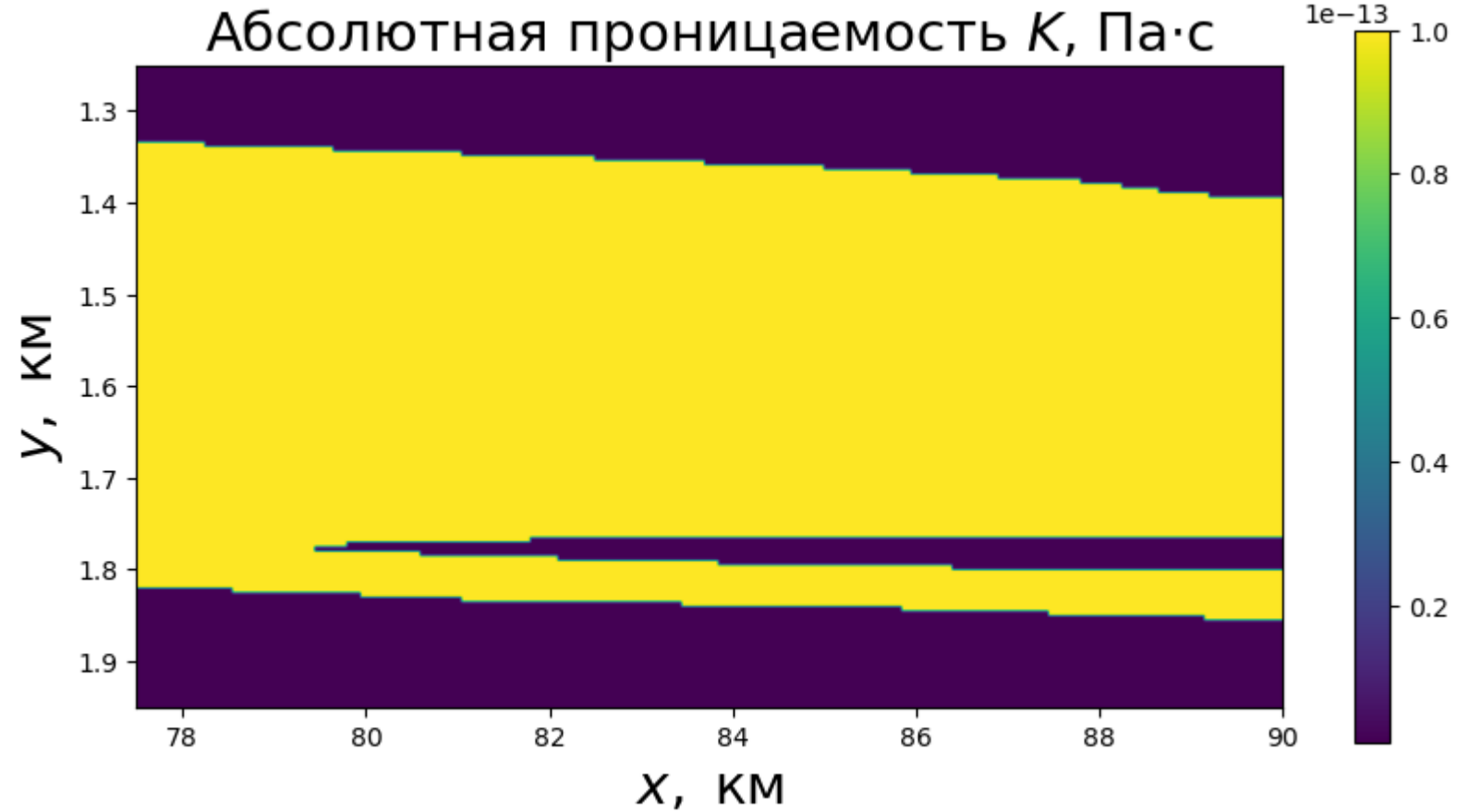
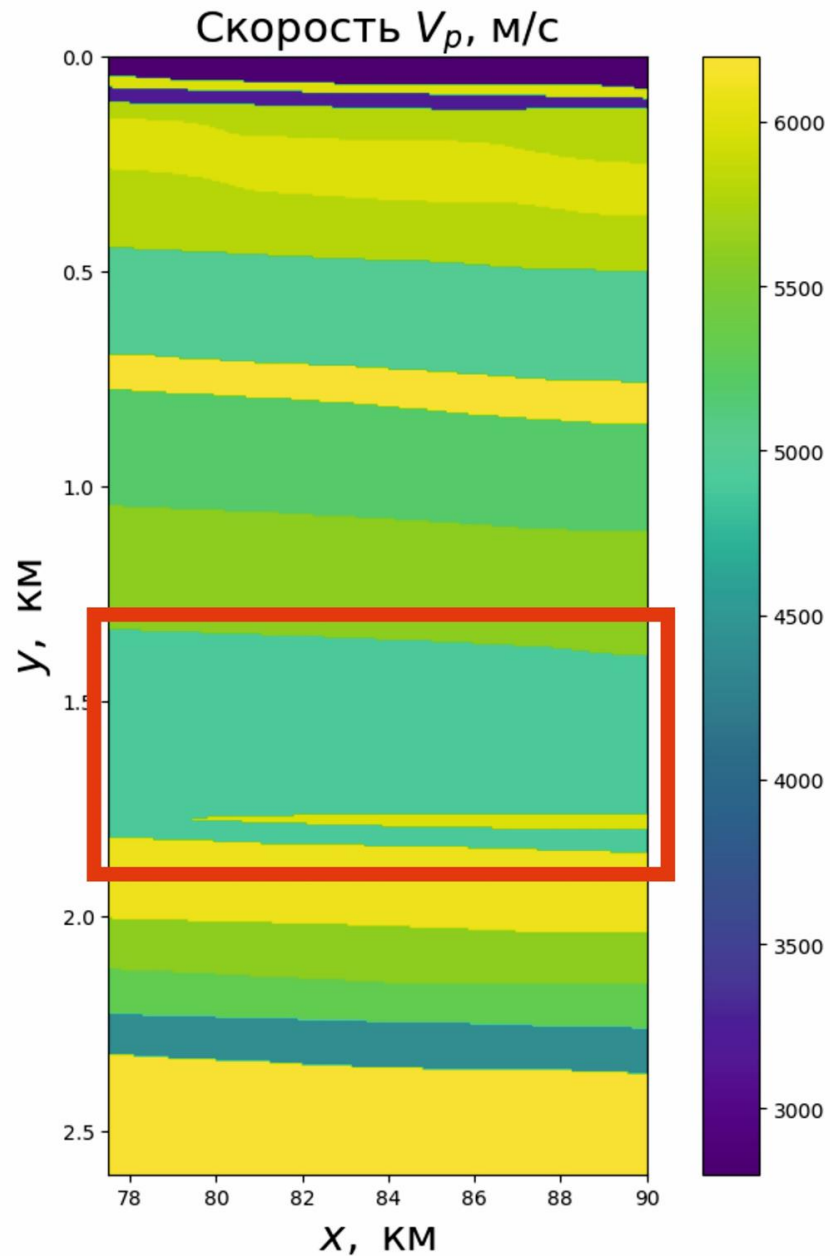


# Верификация

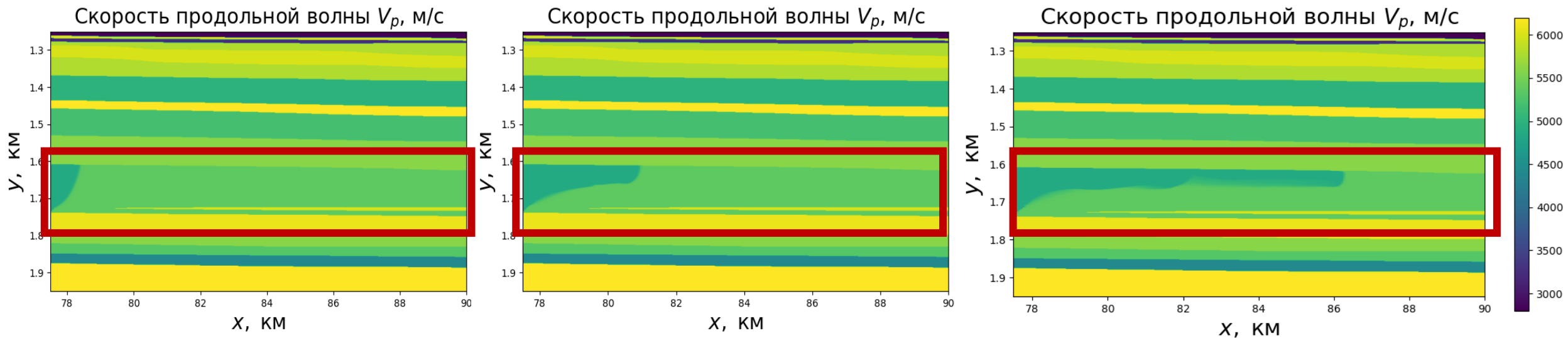
$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$



# Данные: скоростная модель Ванавара



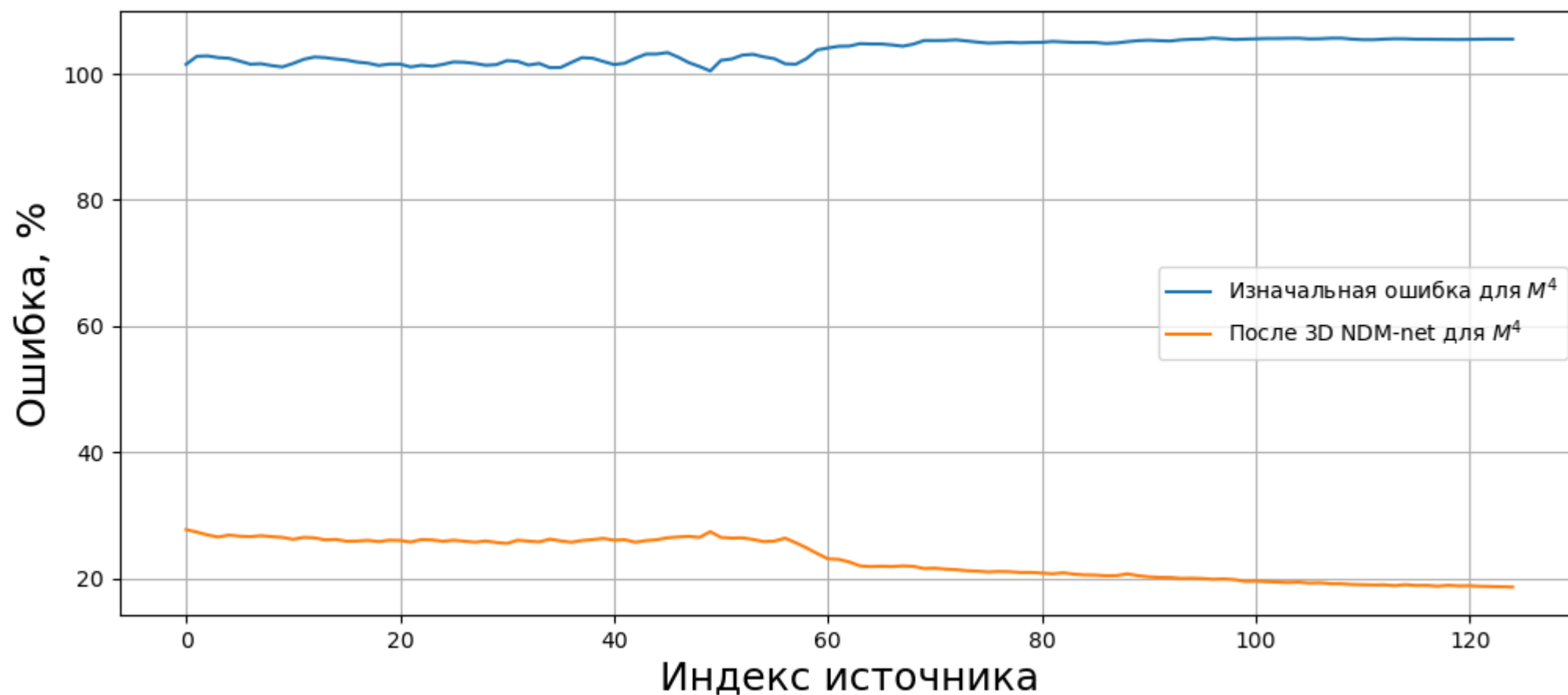
# Скоростная модель Ванавара ( $V_p$ )



# Результат

ы

$$\epsilon(S_5, S_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(S_g, S_{2.5})$$

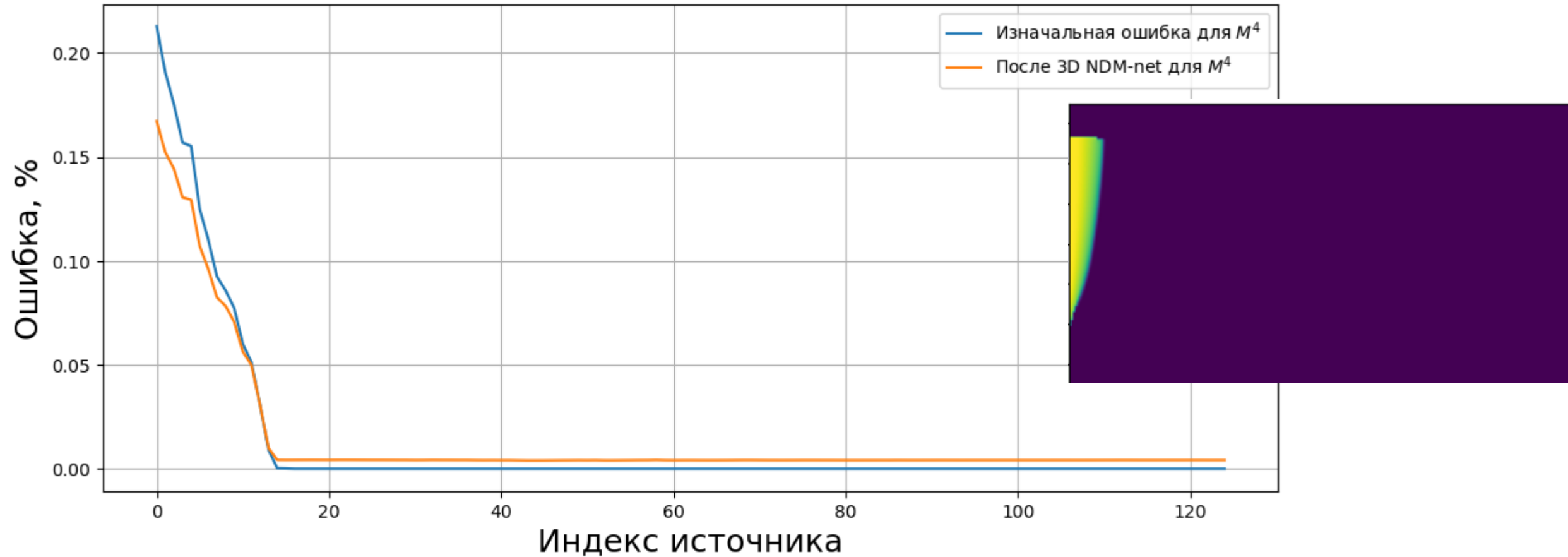


В 4.6 раза

# Результат

ы

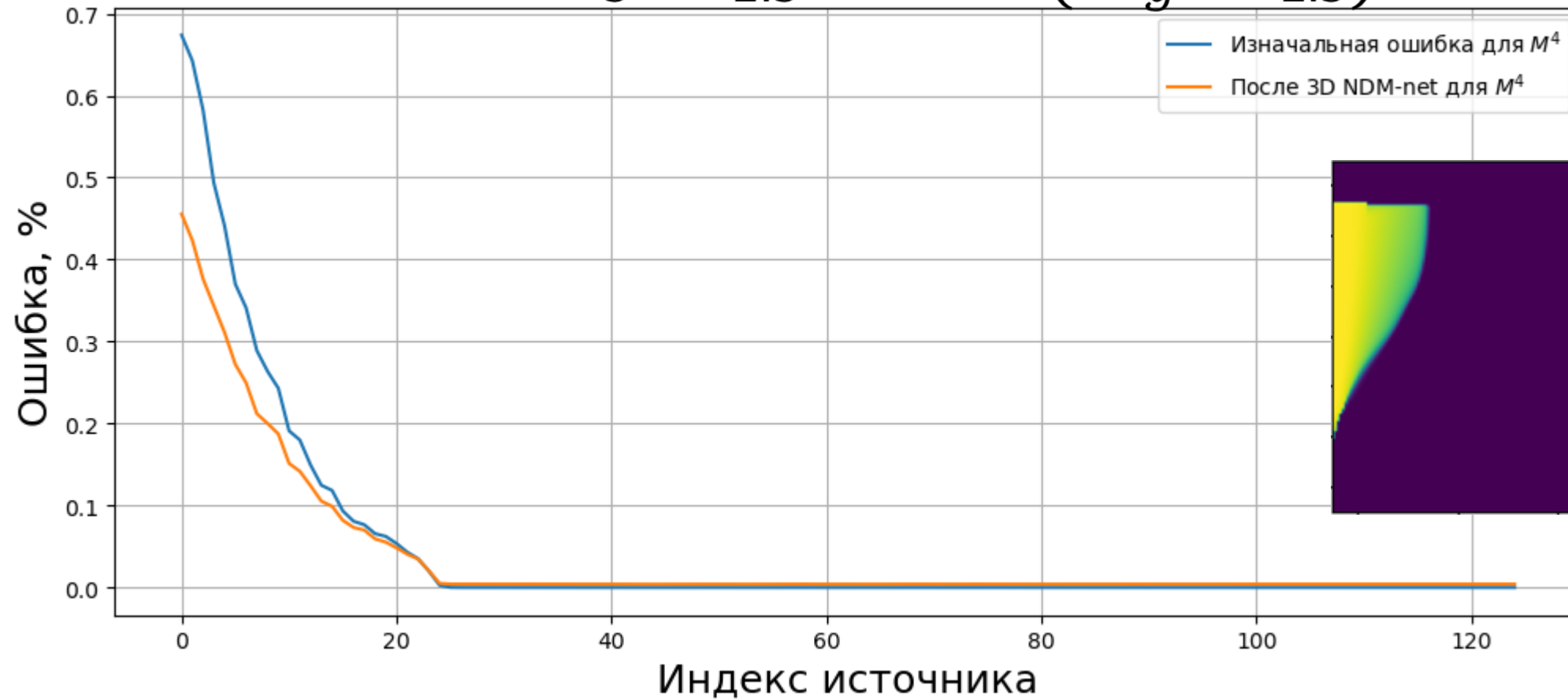
$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$



# Результат

ы

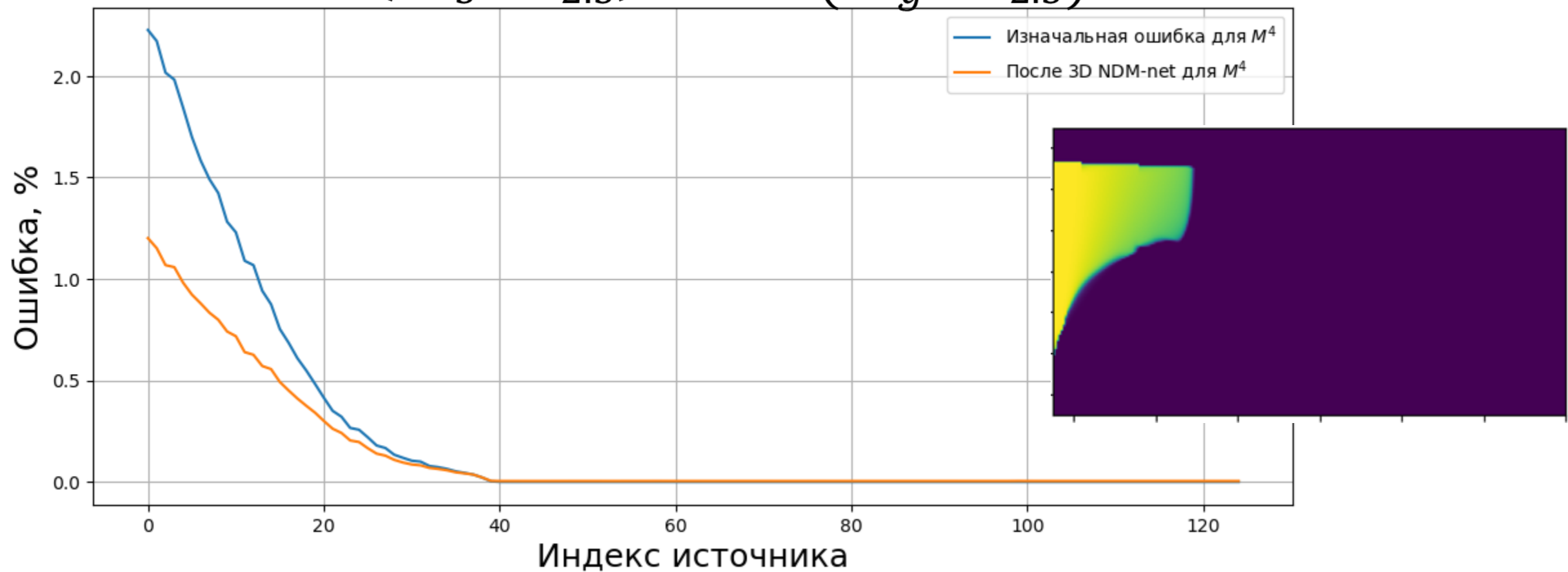
$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$



# Результат

ы

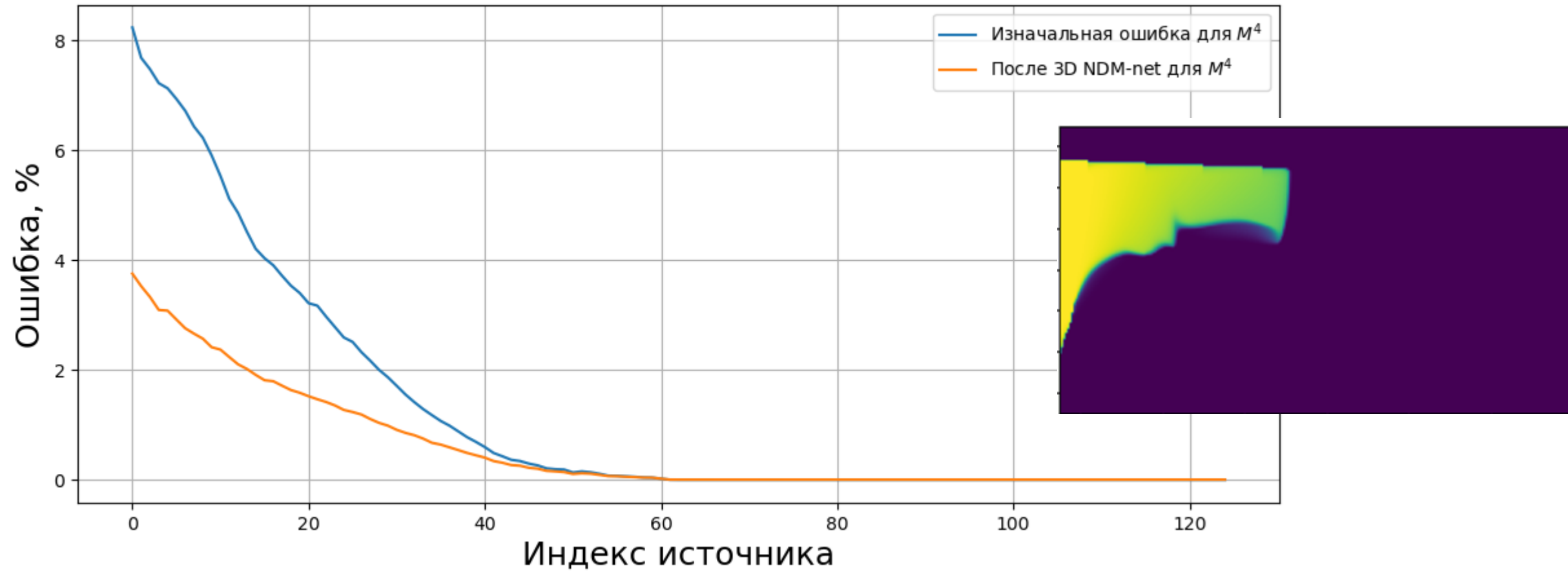
$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$



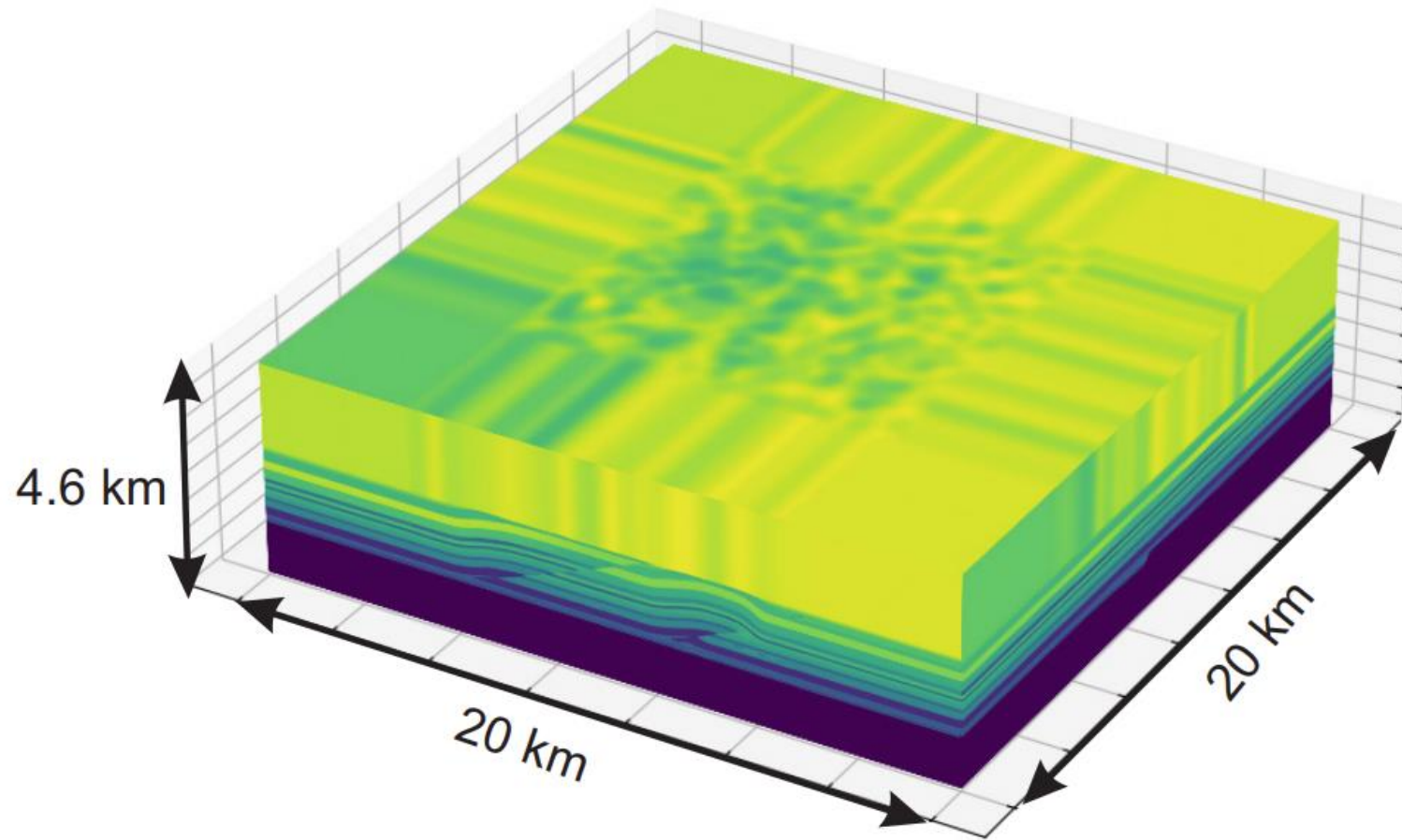
# Результат

ы

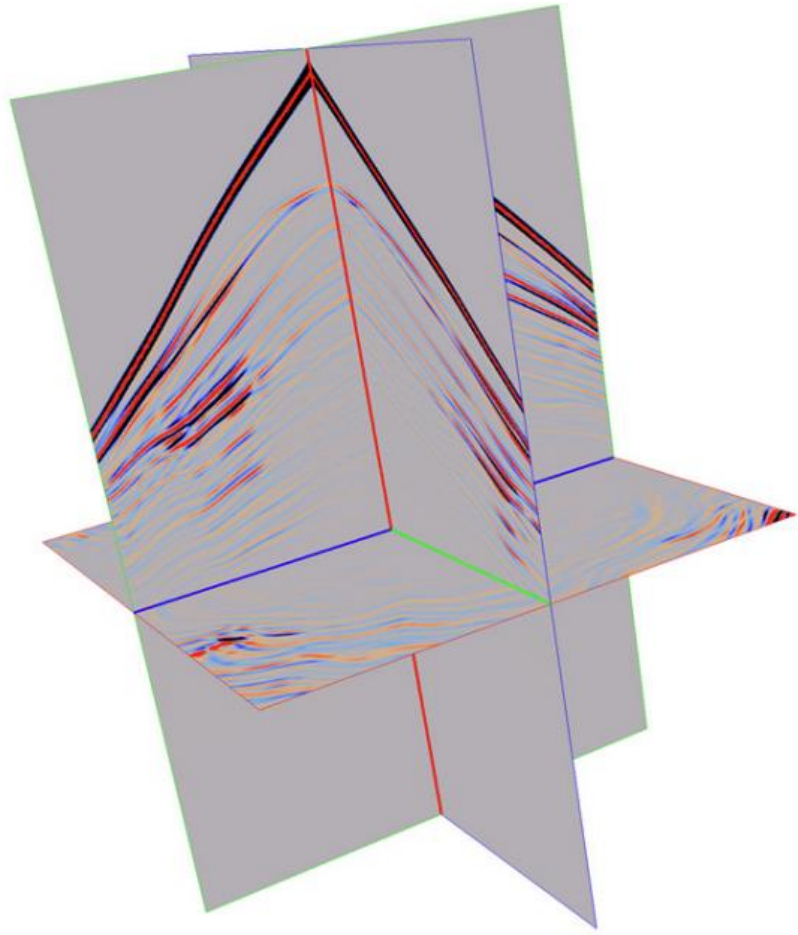
$$\epsilon(dS_5, dS_{2.5}) \text{ vs. } \epsilon(dS_g, dS_{2.5})$$



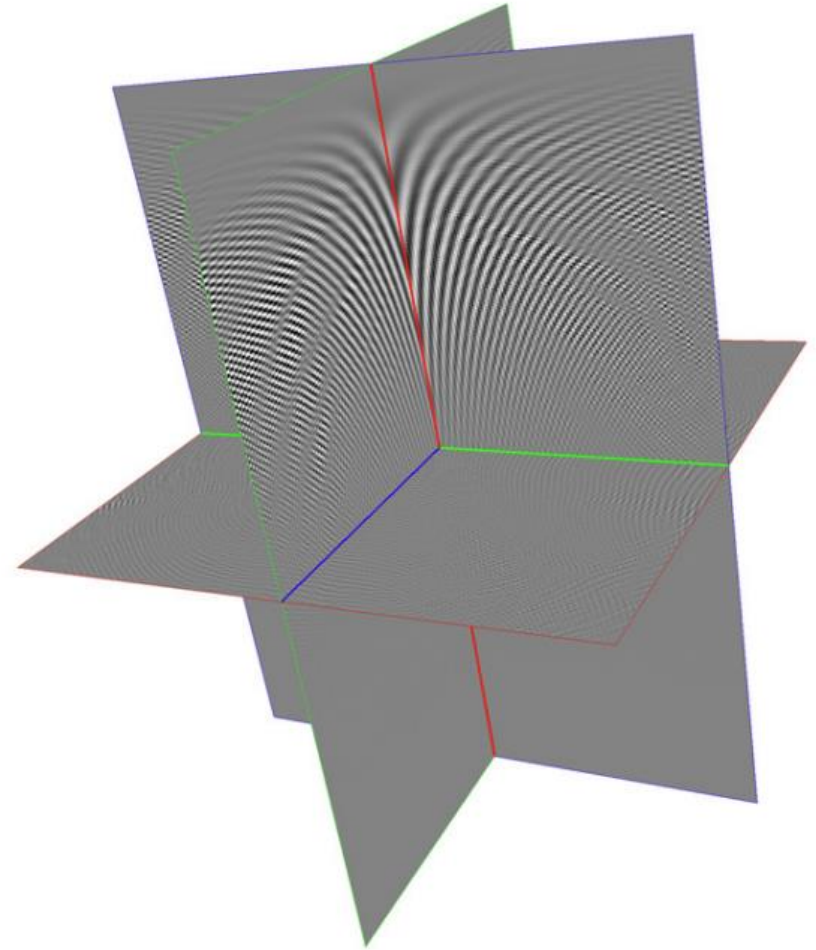
## 3D: Overthrust



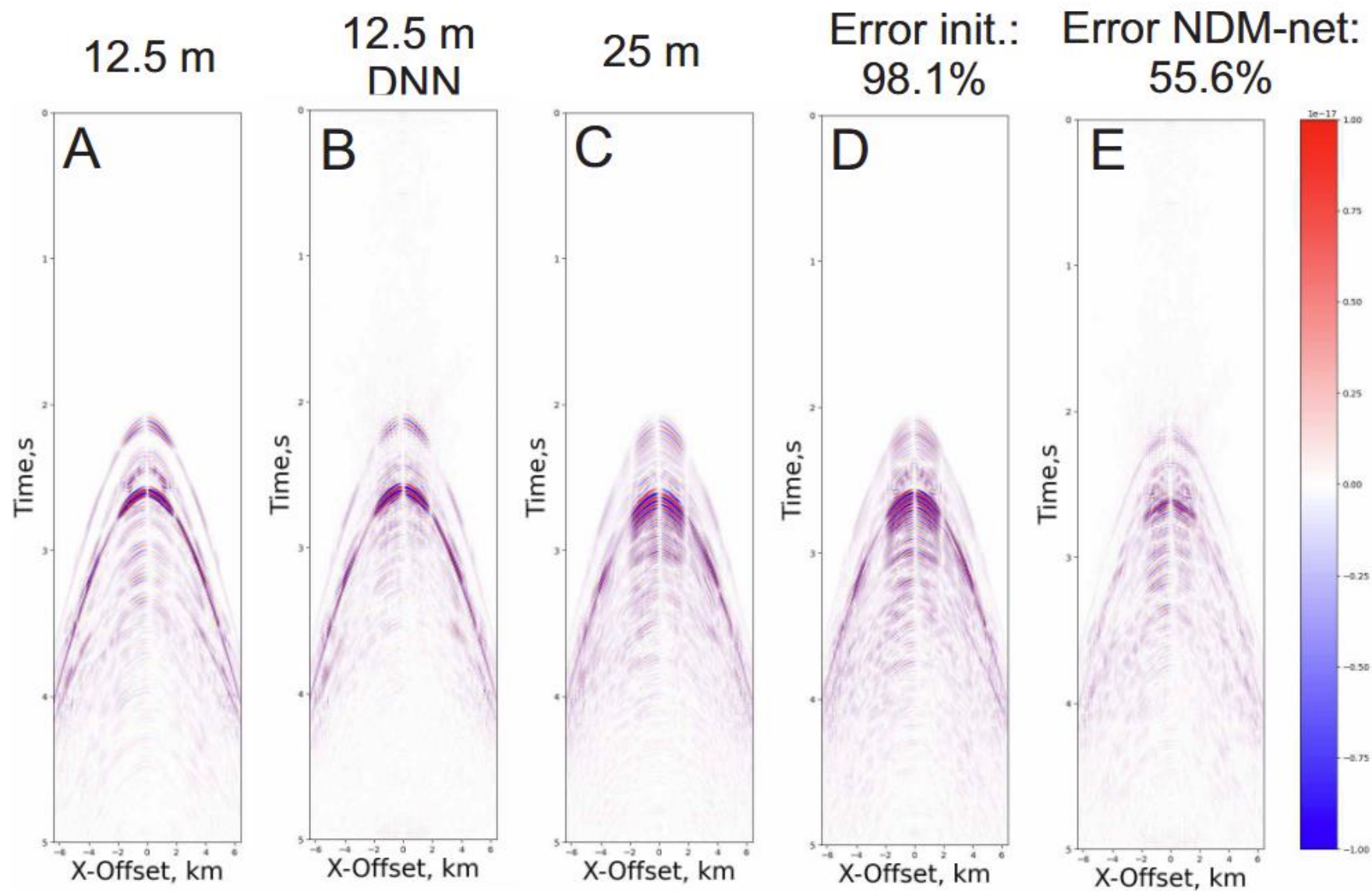
## 3D: Overthrust



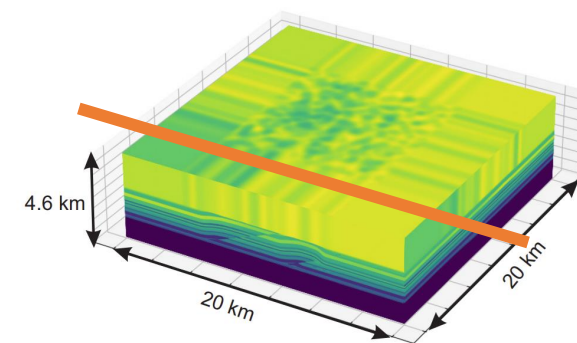
**FFT**  
→



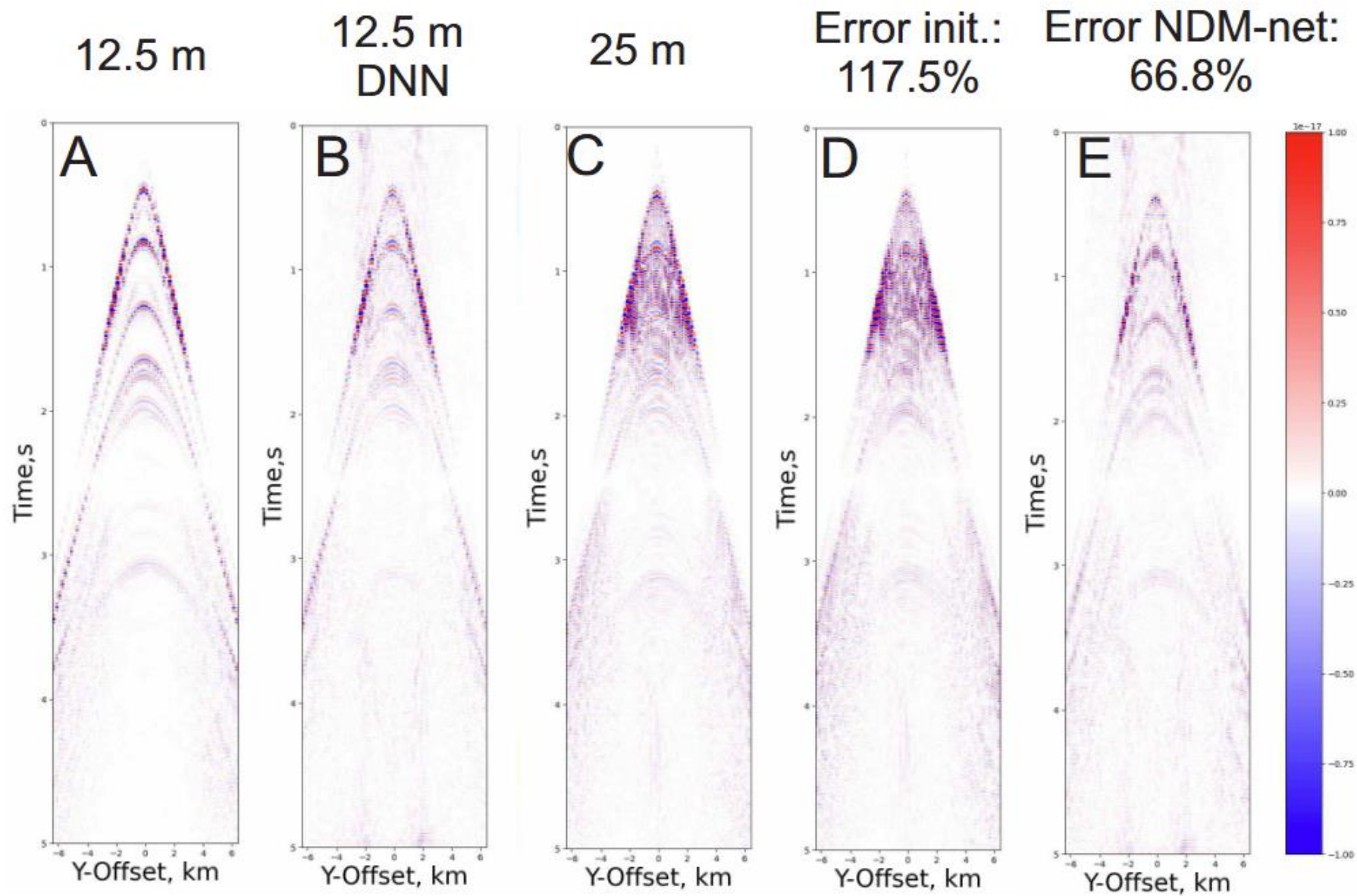
# 3D: Overthrust



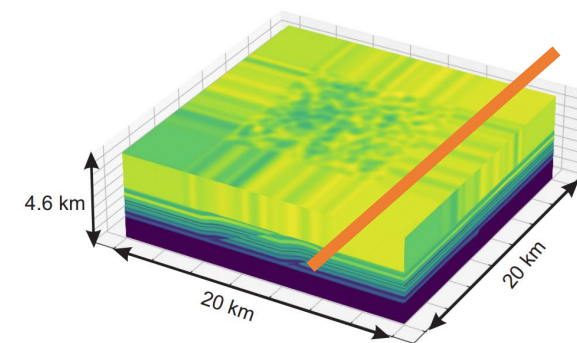
Y-offset = 4 km



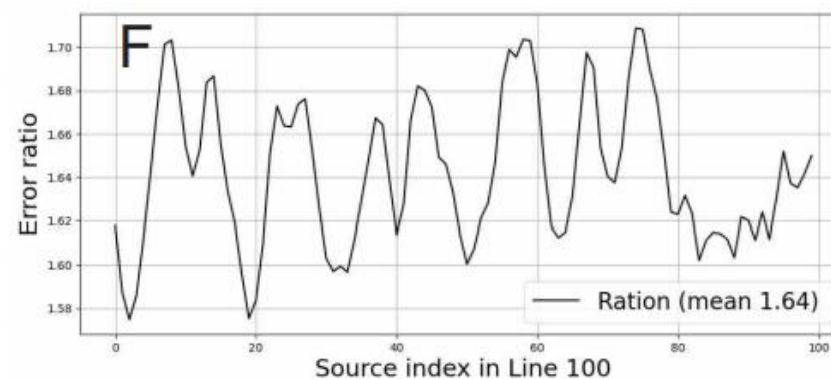
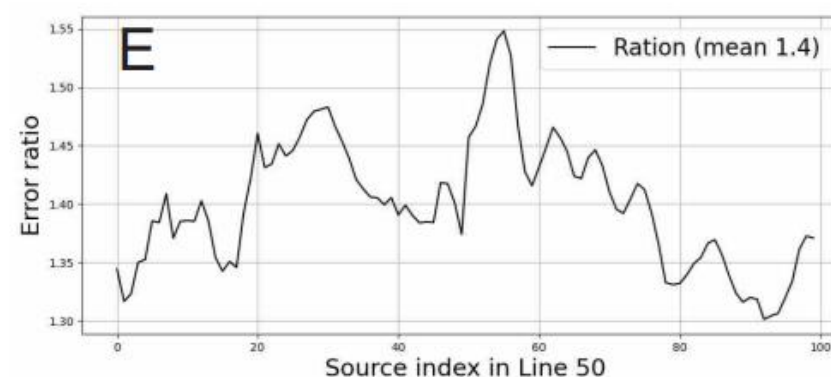
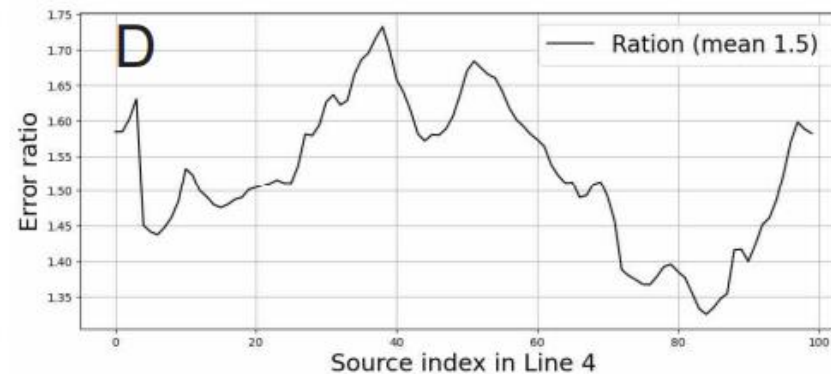
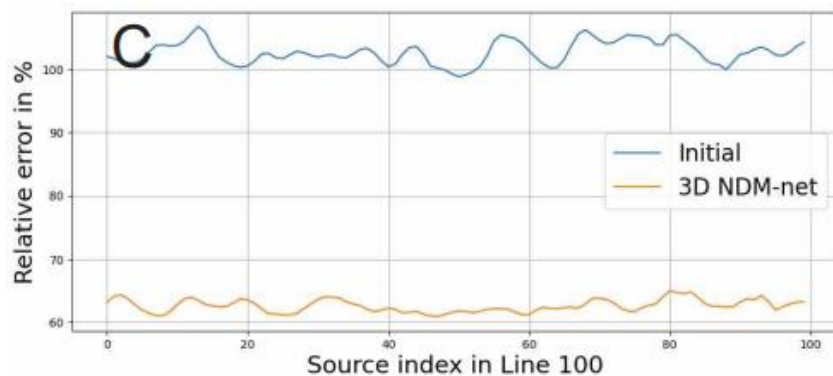
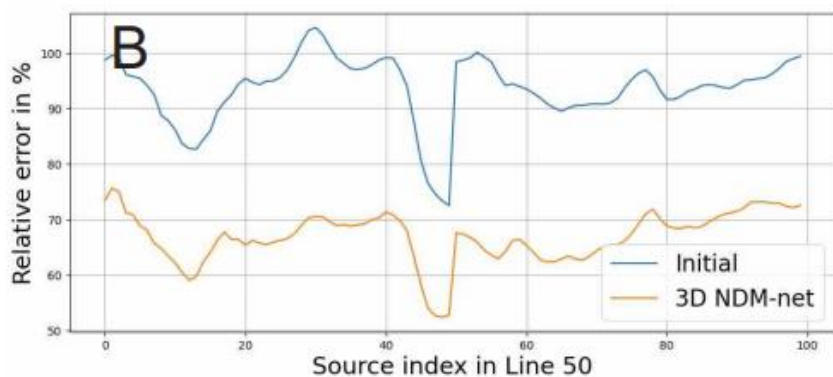
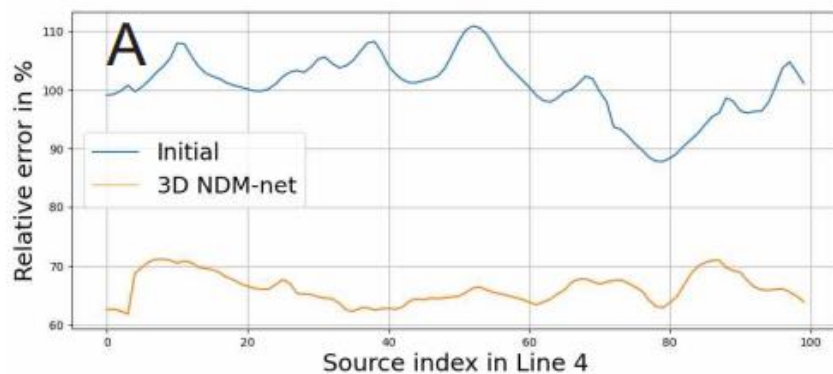
# 3D: Overthrust



X-offset = 0m



# 3D: Overthrust



# Вывод

- Расчётное время уменьшается в 5 раз (при использовании тренировочной выборки размером 20 % от общего количества источников) по сравнению с моделированием на мелкой сетке
- Численная дисперсия подавляется в 4 раза в  $L_2$  —норме
- При 3D моделировании ускорение – 12 раз, численная дисперсия подавляется в 1.5 раза в  $L_2$  —норме

Спасибо за внимание!