

Physics-Informed Well Model

Supervisors:

Grigoriy Shutov

Vladimir Vanovskiy

Alexander Ryabov

Team:

Daniil Sherki

Alex Shevchenko

Egor Cherepanov

Команда

Руководители



Владимир Вановский



Григорий Шутов



Александр Рябов

Участники



Даниил Шерки



Алексей Шевченко



Егор Черепанов

Постановка проблемы

$$\operatorname{div}\left(\frac{k_{ro}k}{\mu_o B_o}(\nabla p_o - \rho_o g \nabla z)\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(m \frac{s_o}{B_o}\right) + Q_o,$$

$$\operatorname{div}\left(\frac{k_{rg}k}{\mu_g B_g}(\nabla p_g - \rho_g g \nabla z) + \frac{R_S k_{ro}k}{\mu_o B_o}(\nabla p_o - \rho_o g \nabla z)\right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial t}\left(m \left(\frac{s_g}{B_g} + \frac{R_S s_o}{B_o}\right)\right) + Q_{fg} + R_S Q_o,$$

$$\operatorname{div}\left(\frac{k_{rw}k}{\mu_w B_w}(\nabla p_w - \rho_w g \nabla z)\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(m \frac{s_w}{B_w}\right) + Q_w,$$

$$s_o + s_w + s_g = 1,$$

$$p_{cow} = p_o - p_w = f(s_w, s_o),$$

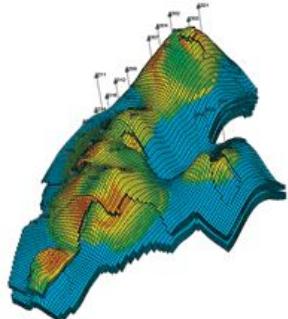
$$p_{cog} = p_g - p_o = f(s_w, s_g)$$

$$B_o = \frac{(V_o + V_{go})_{rc}}{(V_o)_{stc}},$$

$$B_g = \frac{(V_g)_{rc}}{(V_g)_{stc}},$$

$$B_w = \frac{(V_w)_{rc}}{(V_w)_{stc}},$$

$$R_S = \frac{(V_{go})_{stc}}{(V_o)_{stc}}.$$



1. Численные решатели являются точными, физически обоснованными, но очень времязатратными
2. В настоящее время появляются суррогатные модели, которые по скорости значительно превосходят численные решатели и могут быть сравнимы с ними в качестве
3. Но при построении суррогатной модели с помощью нейронной сети может возникать проблема нефизичности предсказаний.

Цели и задачи

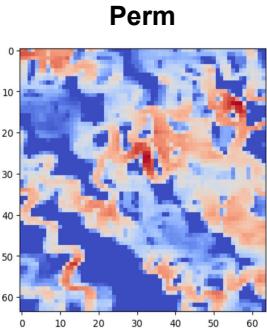
1. Обучение без учителя.

Исследование использования физически-информированной функции потерь для решения задачи обучения нейронной сети.

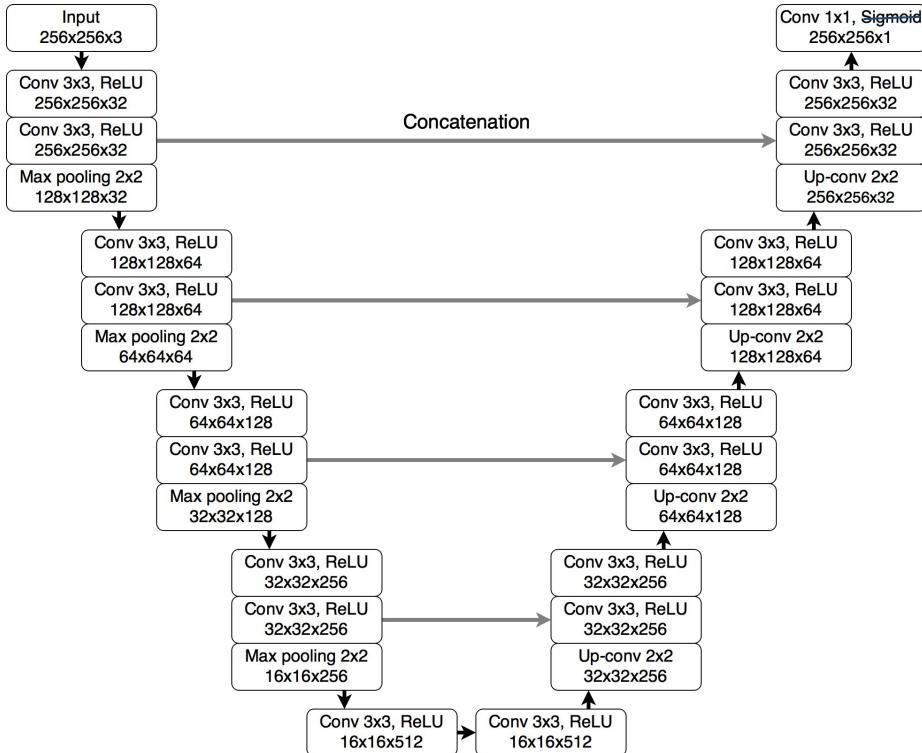
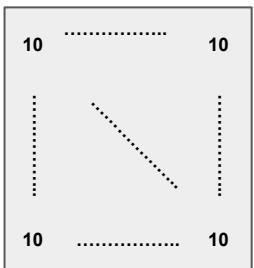
2. Обуславливание на добычу.

Имплементация физически информированной функции потерь, которая получала бы исторические данные добычи нефти и штрафовала нейронную сеть за несоответствие предсказаний динамики добычи.

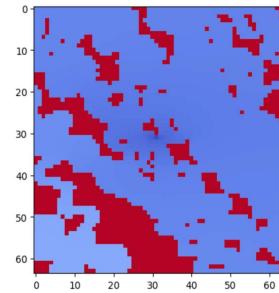
Data-driven подход



Time step



Pressure

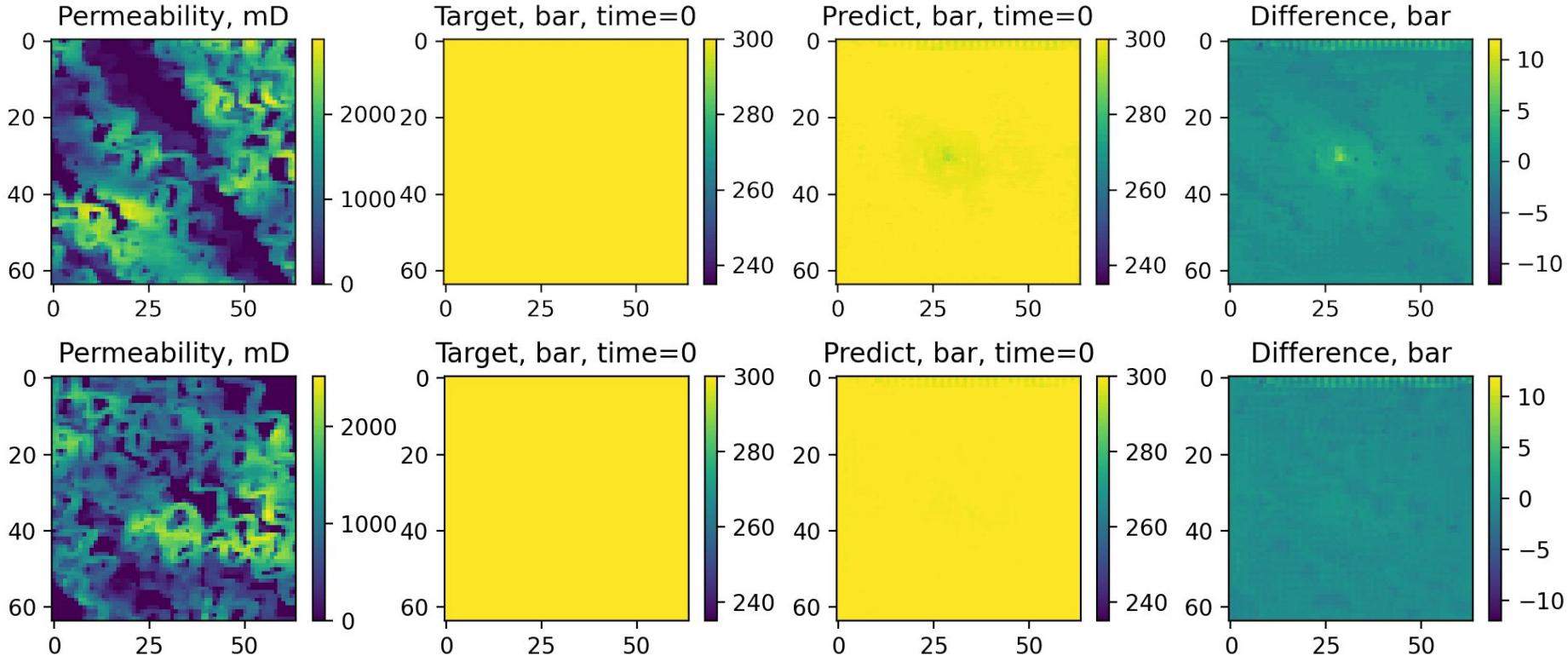


Standard boundary conditions for nonflow at the outer boundary of the reservoir (Neman conditions)

We can drop activation sigmoid function from the last layer for pressure map generating

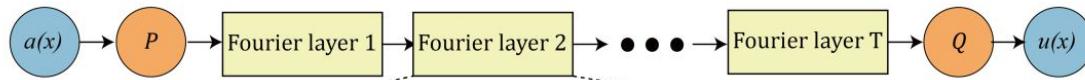
We also use batch normalization and L2 regularization

Результаты

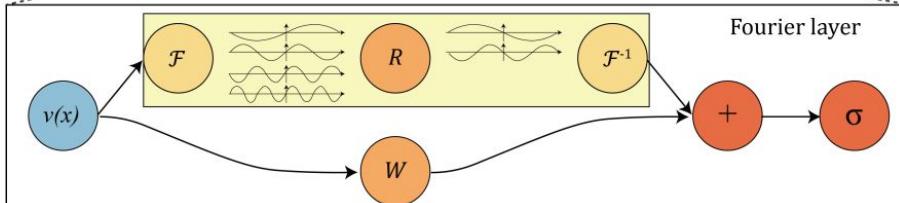


Fourier Neural Operator

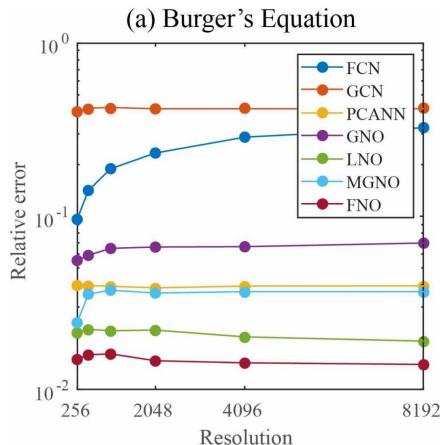
(a)



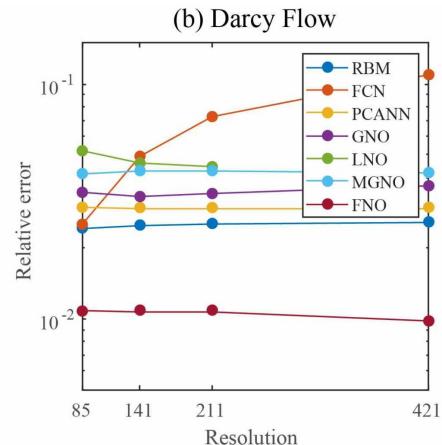
(b)



(a) Burger's Equation



(b) Darcy Flow



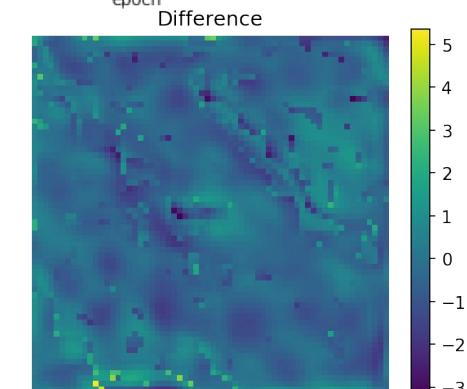
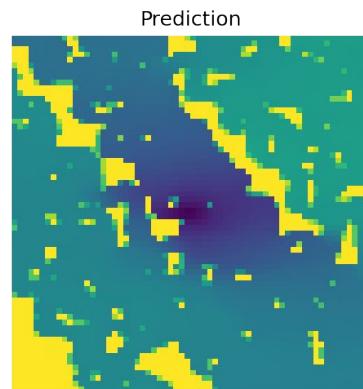
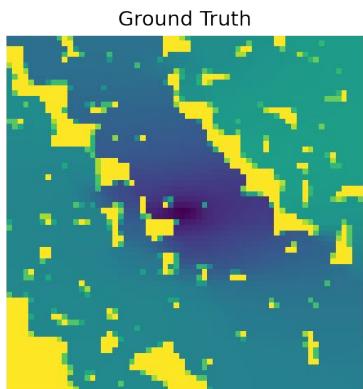
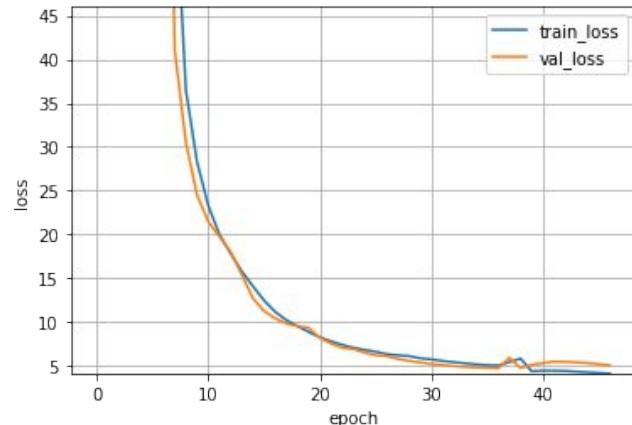
The Fourier layer consists of three main steps:

1. Fourier transform;
2. Linear transform on the lower Fourier modes (low-pass filter);
3. Inverse Fourier transform;

Результаты FNO

Input data	Output data	RMSE, bar
$p(t = 1)$	$p(t = 2, 3, 4)$	3.45
$p(t = 1)$	$p(t = 2, \dots, 20)$	20.19
$p(t = 1)$	$p(t = 7, 14, 20)$	15.71
$k, p(t = 1)$	$p(t = 7, 14, 20)$	15.17
$p(t = 1, \dots, 10)$	$p(t = 10, \dots, 20)$	1.31

Кривые потерь на train и validation



Физическая модель и PDE Loss

Пример нелинейной системы PDEs коммерческого симулятора тНавигатор:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi N_c) = \operatorname{div} \sum_{P=O,W,G} x_{c,P} \xi_P \left(k \frac{k_{rP}}{\mu_P} (\nabla p_P - \gamma_P \nabla D) \right) + q_c, \quad c = 1, \dots, n_c$$

Приближение, рассмотренное в нашей работе:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = k \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \right), \quad Loss_{PDE} = \left\| \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} - k \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \right) \right\|$$

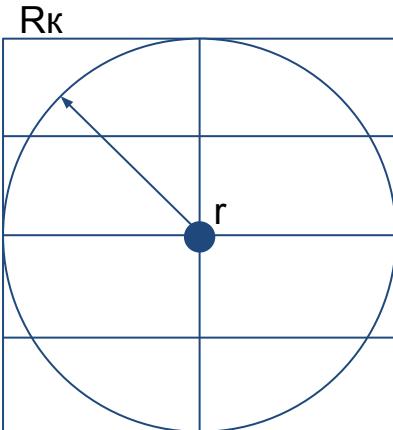
- $k = k(x, y)$ — известное поле проводимости
- $\rho = \rho(p) = \frac{\rho_{sc}}{B(p)} = \frac{\rho_{sc}}{-a_1 \cdot p + b_1} = \frac{859.5}{-5 \cdot 10^{-8} \cdot p[\text{Па}] + 2.55}$
- $\mu = \mu(p) = (a_2 \cdot p + b_2) = 2 \cdot 10^{-7} \times p[\text{Па}] + 2.9 \cdot 10^{-3}$
- $\phi = \phi(k) = \frac{1}{16.6332}k + 1.27139$ — пористость

Производные вычисляются при помощи `torch.gradient`

History matching loss

Idea: it is possible to get real history dynamic of oil flow rate data and penalize the model when it predicts pressure with wrong flow rate in each time step.

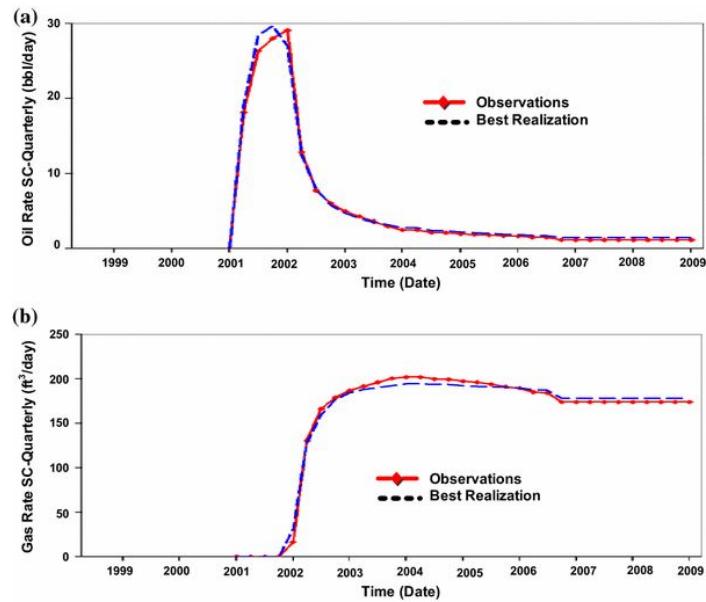
There is accepted well model to oil flow rate calculation



$$q = J(P_c - P_w)$$

$$J = \frac{\theta k h}{\mu} \frac{1}{\ln\left(\frac{R_c}{r_w}\right) - S}$$

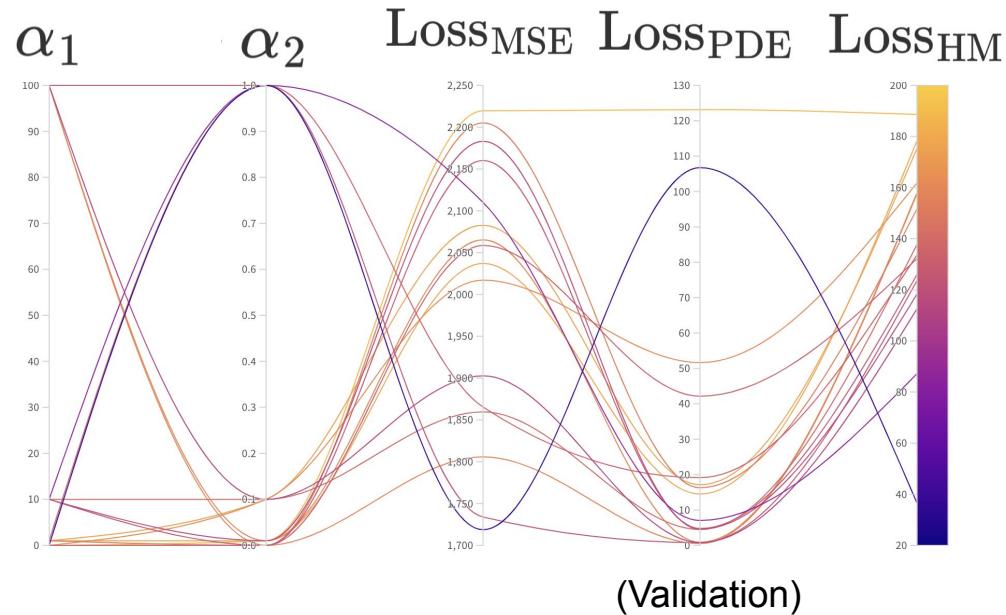
$$\text{Loss}_{\text{HM}} = \|q(t) - \hat{q}(t)\|_2^2$$



Обучение с учителем (U-Net)

$$\text{Loss} = \text{Loss}_{\text{MSE}} + \alpha_1 \cdot \text{Loss}_{\text{PDE}} + \alpha_2 \cdot \text{Loss}_{\text{HM}}$$

α_1 (PDE loss)	α_2 (HM loss)	RMSE (21 predictions), bar
0	0	45.0
100	1	41.6
0	1	41.4
10	1	42.4

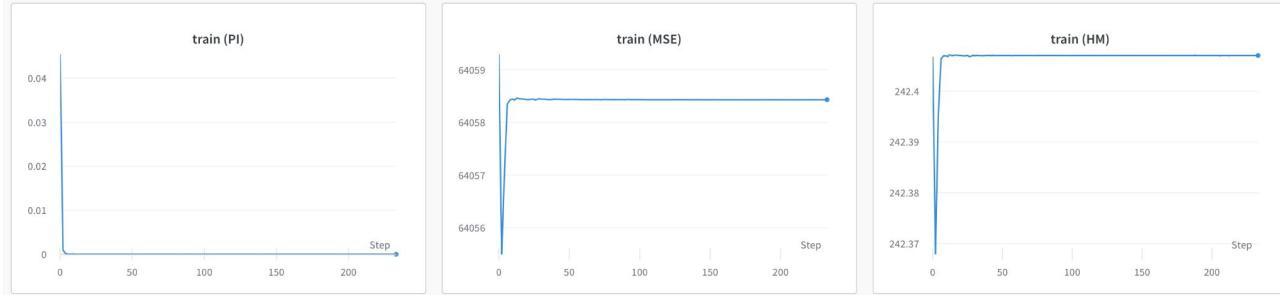


Обучение без учителя (U-Net)

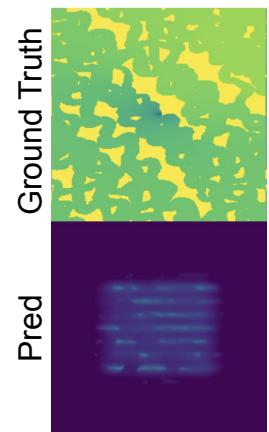
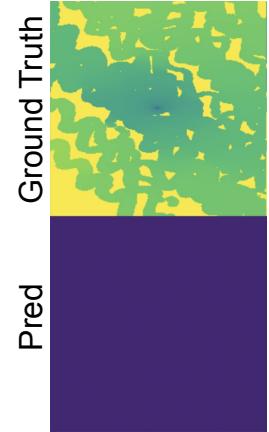
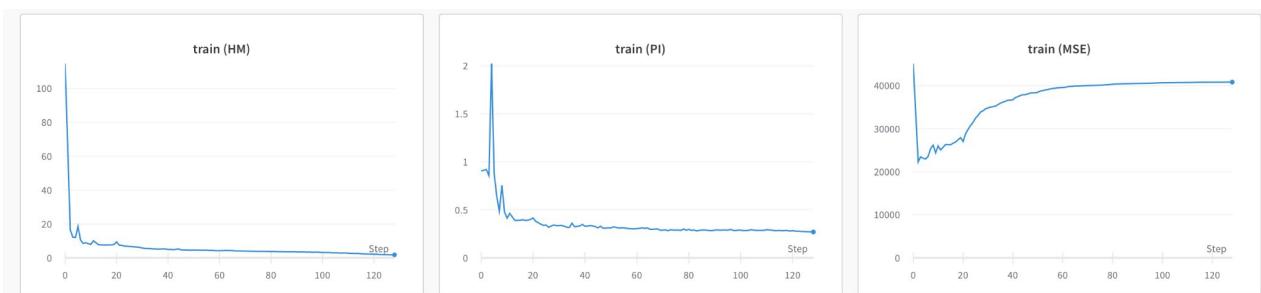
$$\text{LOSS} = \alpha_1 \cdot \text{LOSS}_{\text{PDE}} + \alpha_2 \cdot \text{LOSS}_{\text{HM}}$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -k\nabla \left[\frac{\rho}{\mu} \nabla p \right]$$

Только PDE-loss



Только HM-loss



Выводы

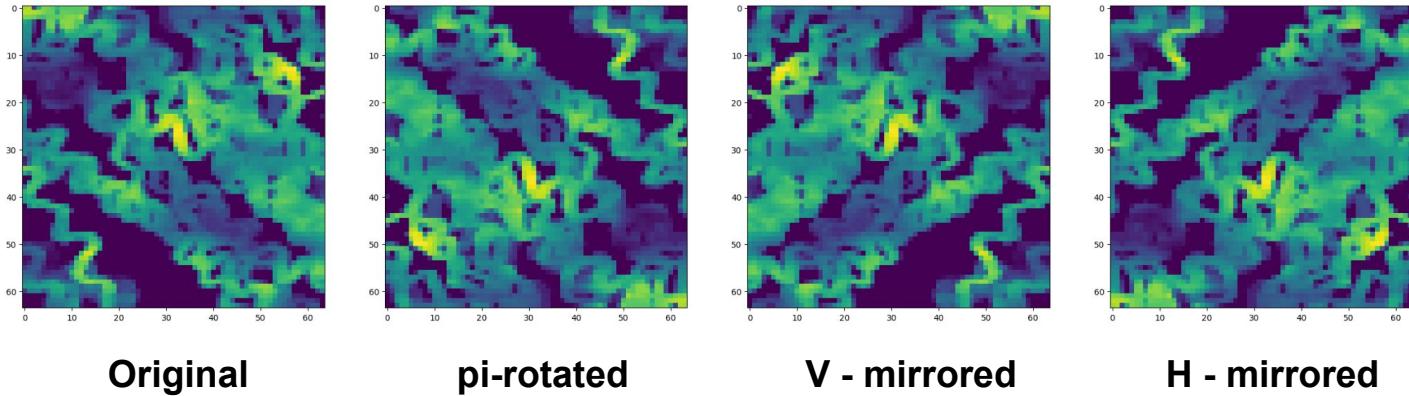
1. Физически обоснованные функции потерь могут улучшить суррогатное моделирование с помощью нейронных сетей.
2. Только физически обоснованные функции потерь без классической функции потерь на данные не работают.
3. Использование архитектуры FNO может давать хорошие результаты, но для этого необходимо иметь предыдущие результаты расчета для предсказания новых.

Thx!

Data Preparation

Augmentation

Data, as usual, is
too little...



The use of this augmentation allowed us to improve the validation metrics by **~15.2%** (on 470x64x64 dataset)

Data Preparation

Normalization

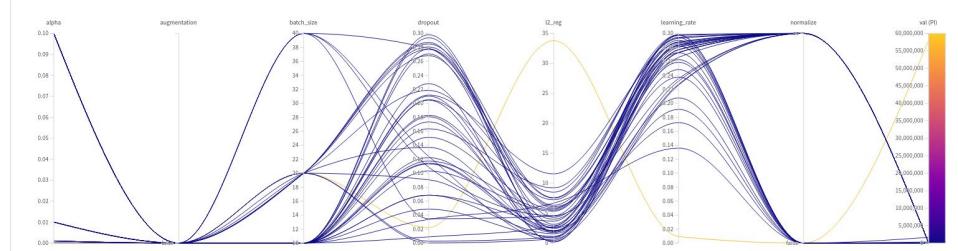
Min-max

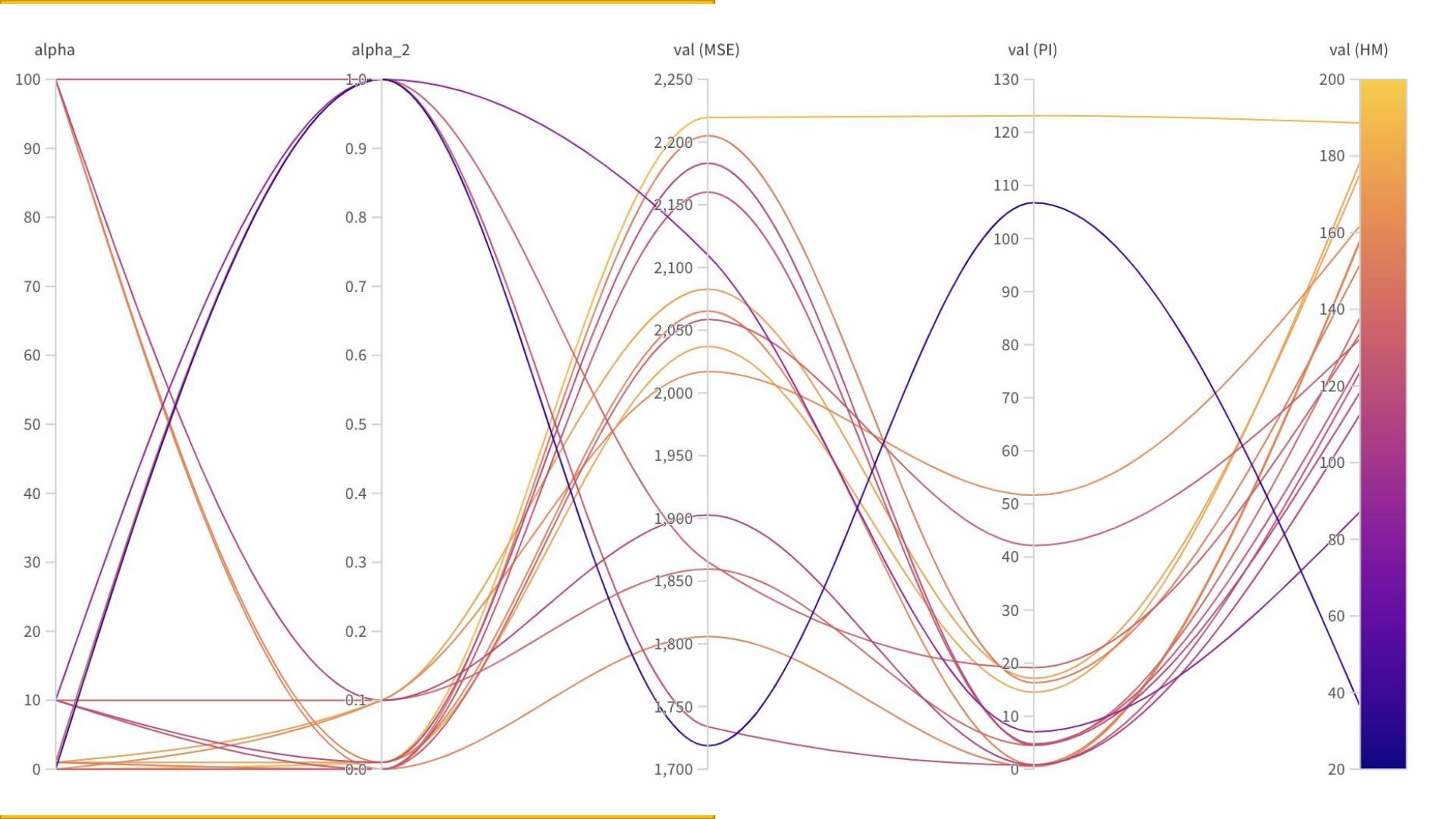
$$\hat{X} = \frac{X - \min(X))}{\max(X) - \min(X)}$$

Normal

$$\hat{X} = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

On a 470x64x64 dataset, the standard scan did not improve the results at this moment (further code correction is needed).





Постановка задачи

