

Технологии машинного обучения в задаче интерпретации смещений земной поверхности

Петрушов А.А.^{1,2}, Михайлов В.О.^{1,2}, Пантелеев И.А.³, Волкова М.С.¹

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

² *Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³ *Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь, Россия*

petrushov.aa18@physics.msu.ru

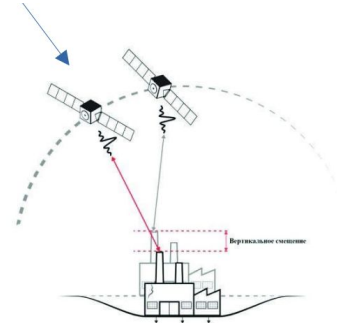


ИФЗ•РАН

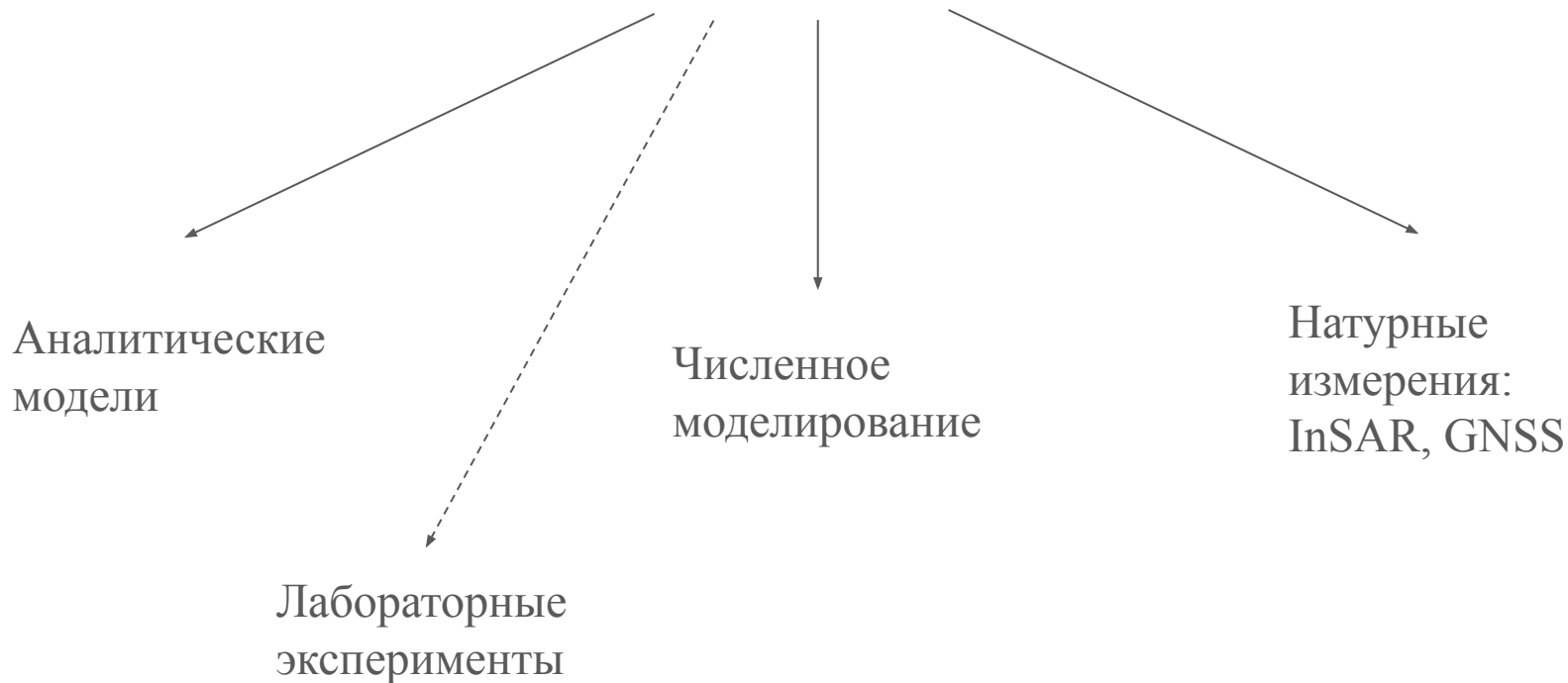


Введение

- **Смещения земной поверхности**, возникающие вследствие сейсмических и вулканических процессов устойчиво регистрируются системами распределенных геофизических наблюдений
- Такие данные несут полезную **информацию о геодинамических процессах**, в том числе происходящих в районах **сейсмической и вулканической активности**. Основные источники натуральных данных — станции ГНСС и радарная съемка со спутников (РСА интерферометрия)
- **Задача интерпретации** - определение параметров и конфигурации глубинного источника деформаций по данным о зарегистрированных смещениях на поверхности



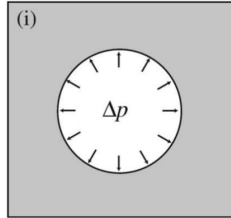
Источники данных



Аналитические модели

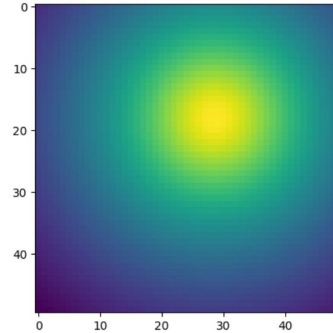
- Первый источник данных - **аналитические модели**, позволяющие в явном виде получить выражения для компонент смещения на поверхности среды при заданной конфигурации источника и упругих параметров среды.

Модель Моги



$$\begin{cases} U_r(r, z) = \frac{\Delta P a^3}{4\mu} \cdot \left[\frac{r}{R^3} + f(r, z) \right] \\ U_z(r, z) = \frac{\Delta P a^3}{4\mu} \cdot \left[\frac{z-d}{R^3} + g(r, z) \right] \end{cases}$$

+ Быстрый расчет карт смещений

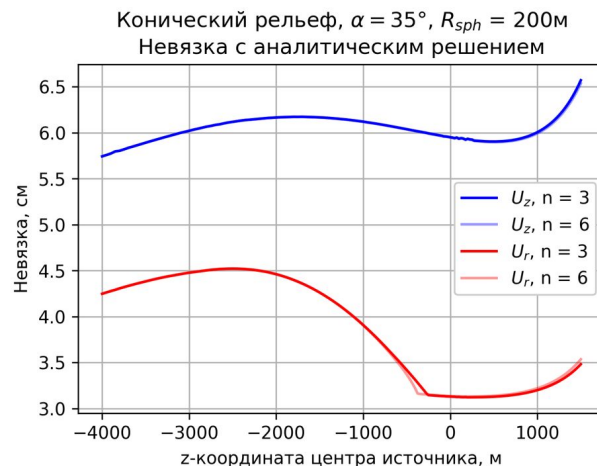
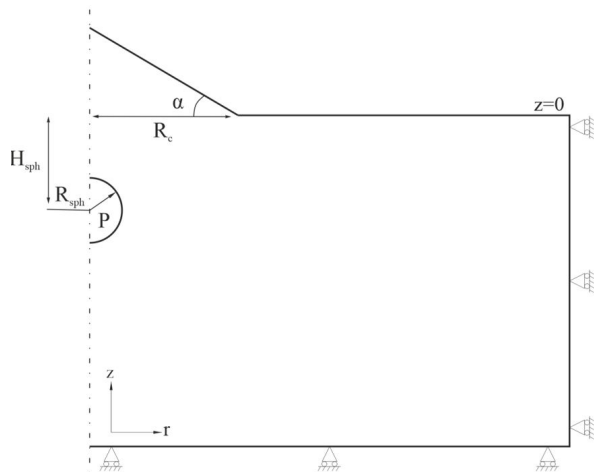


Характерный вид вертикальных смещений

- Ограниченная применимость - простые источники, плоская свободная поверхность: не работают на сложном рельефе

Аналитические модели

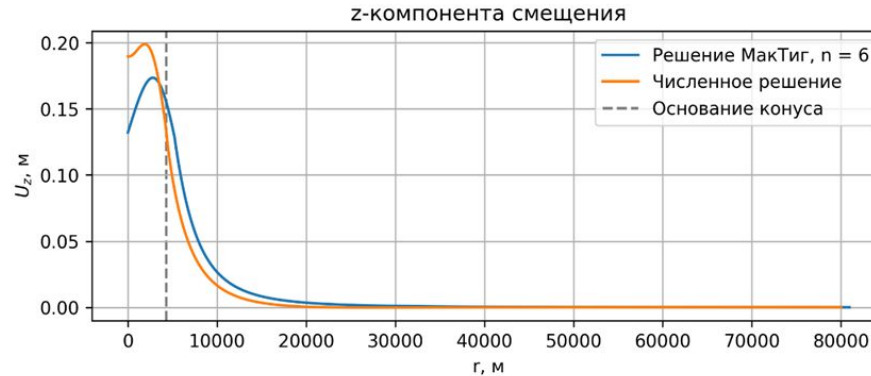
В работе [Пантелеев и др., 2025] выполнено сопоставление аналитического и численного методов расчета смещений дневной поверхности в изотропной линейно-упругой среде со сферической полостью, находящейся под избыточным давлением. Топография - конусный рельеф, подобный вулкану Корякский



$U_{z_max} = 20\text{см}$

Аналитические модели

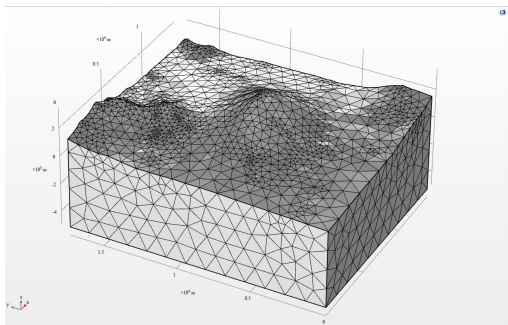
- Невязки между численным и аналитическим решениями составили **более 30% по вертикальному смещению** и более 45% для горизонтальной компоненты при глубине источника 1.45 км и 3 км соответственно. При условии характерного максимума вертикальных смещений в 20 см.
- **Положение максимумов** компонент вектора смещений относительно вершины конической постройки **не совпадают в аналитическом решении и в прямом численном расчете.** Упрощенный учет рельефа также может давать неправильное представление о положении источника деформаций относительно вершины вулкана.



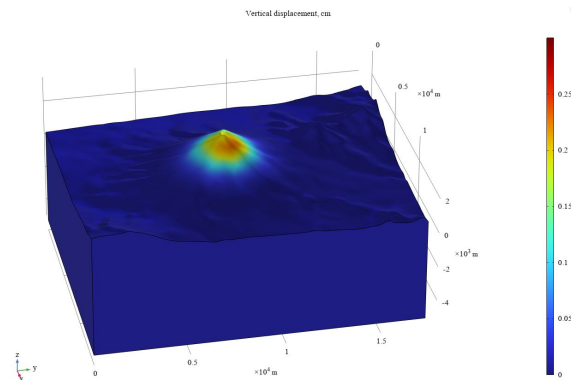
Численное моделирование

- Второй источник - данные численного моделирования, которые могут быть получены для источников произвольной формы и для различной топографии свободной поверхности (рельеф).

Пакет моделирования + настройка методов + ЦМР (DEM) + построение сетки + оценка сходимости



+ Возможность задать произвольную геометрию расчетной области (рельеф), свойства среды и параметры источника

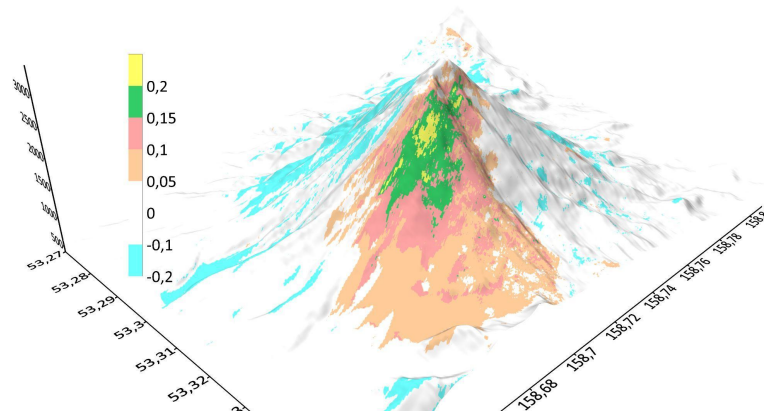


- Затратный процесс моделирования, особенно при многовариантных расчетах

Спутниковые наблюдения

- Третий источник - фактические карты смещений, получаемые по результатам интерференции спутниковых SAR снимков миссии Sentinel-1. Эти данные в общем случае не имеют регулярной разметки (для них **не всегда известны источники**, породившие смещения), и будут использованы в дальнейшей работе для интерпретации реальных смещений, измеренных на участках поверхности Земли.

Пример расчетных карт смещений по
SAR интерферометрии: вулкан
Корякский перед извержением 2008 г.
 $U_{\max} = 25$ см

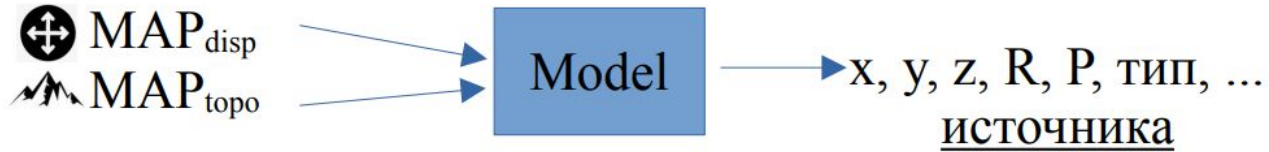


+ Отражают реальные процессы в недрах Земли;
хорошая точность в направлении на спутник

- Не всегда известны источники; большие погрешности по
ХУ; необходимость поправок за атмосферу, поверхность, ...

Постановка задачи

1.1 Оценка параметров подземного источника по картам смещения поверхности с учетом рельефа: решение обратной задачи



1.2 Использование **1.1** в качестве начального приближения для «тяжеловесного» итерационного решения обратной задачи (численное моделирование) - получение ускорения за счет удачного выбора стартового приближения

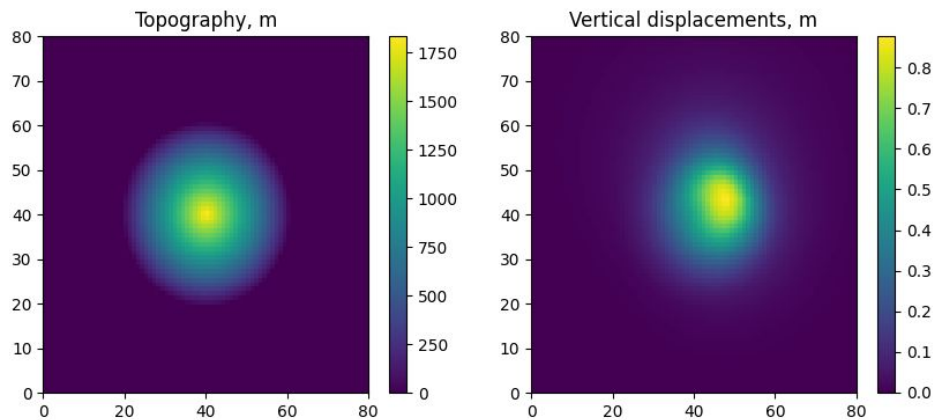
1.3 Совместная интерпретация данных SAR и GNSS для уточнения решения обратной задачи

Конфигурация численной задачи

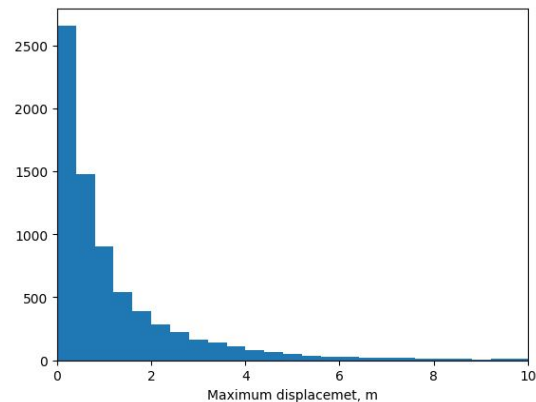
1. **Среда моделирования** - COMSOL Multiphysics 6.2. Метод Ньютона, решатель SLAU - MUMPS. Характерное **число степеней свободы** 10^5 - 10^6 .
2. **Источник** - эллипсоидальное включение в изотропной линейно-упругой среде с избыточным давлением (давление как функция глубины). Описывается 8 параметрами: координаты центра (x, y, глубина), характерный масштаб, два соотношения полуосей эллипсоида, два угла ориентации.
3. **Топография** - конусный рельеф с переменными параметрами:
 - высота [500-3500] метров
 - угол наклона образующей [15-35] градусов
4. **Размер** расчетной области 25x25 км

Данные для обучения моделей

- Входные данные - двухканальные картинки. Первый канал - топография свободной поверхности (конусные постройки), второй - карта вертикальной компоненты смещений. **Разрешение** картинок **80x80** пикселей
- Выходные данные - векторы из 8 параметров источника
- Размер обучающей выборки **5 908** примеров, валидационной - **1 478** примеров



Пример входных данных. Слева - карта топографии, справа - карта смещений



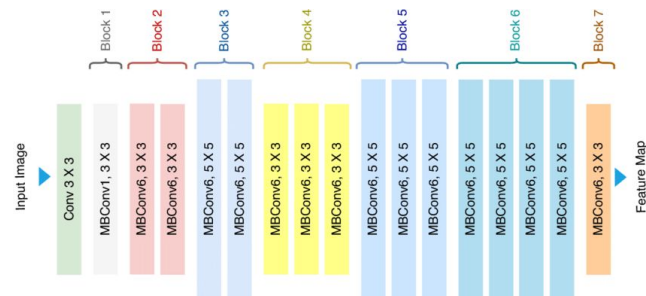
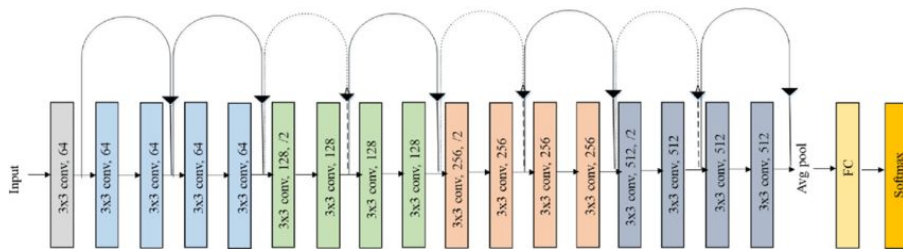
Гистограмма максимальных смещений в датасете

Нейросетевые модели

- Фреймворк - PyTorch, предобученные модели из torchvision

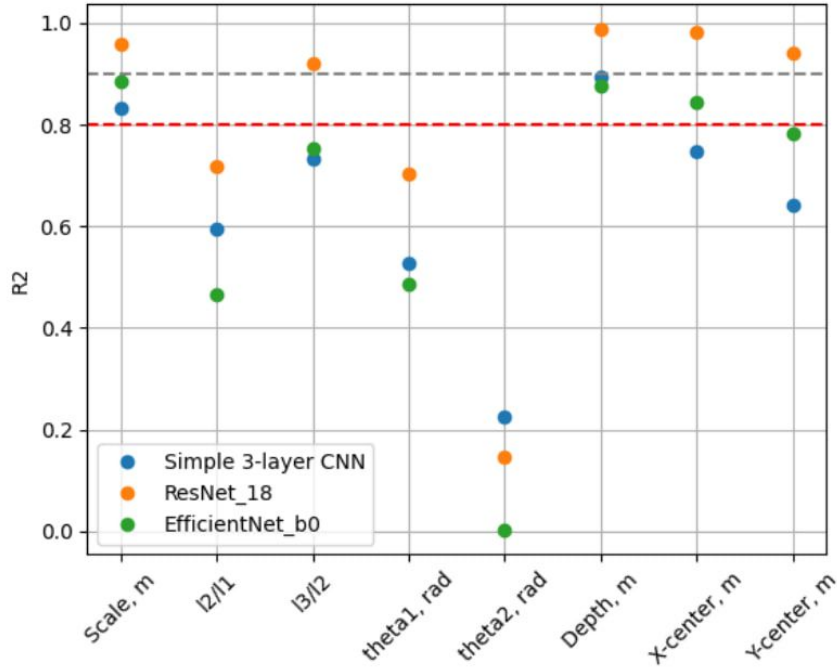
Модели:

1. **Базовая 3-слойная CNN:** ~100K параметров
2. **ResNet18:** ~11.7M параметров
3. **EfficientNet_b0:** ~5.3M параметров



Результаты

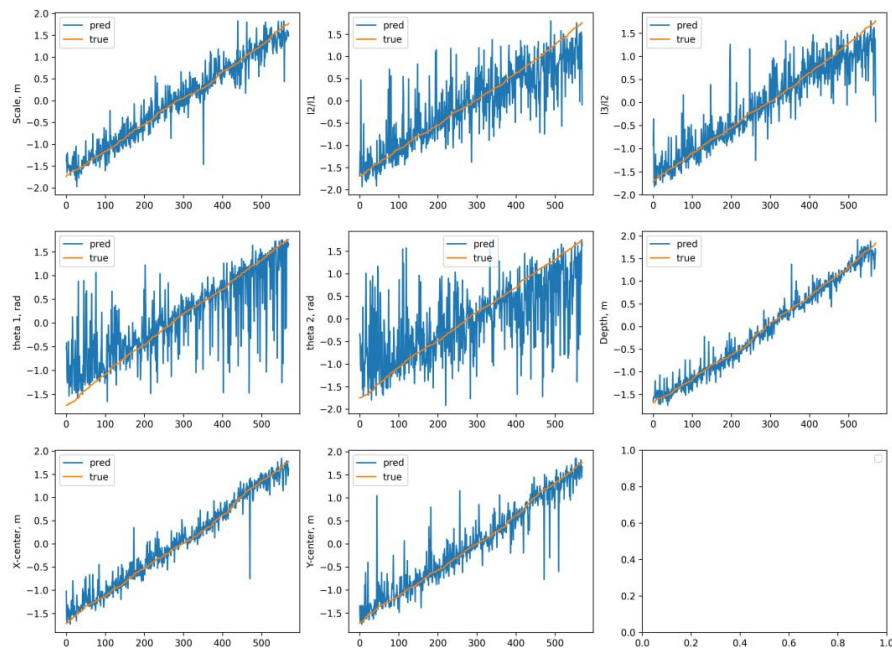
Результаты обучения моделей по метрике R2



	3 Layer CNN	EfficientNet_b0	ResNet18
Scale	0.82	0.89	0.96
I2 / I1	0.59	0.48	0.72
I3 / I2	0.73	0.71	0.92
theta1	0.52	0.49	0.71
theta2	0.22	0.01	0.16
Depth	0.89	0.87	0.99
X	0.74	0.85	0.98
Y	0.64	0.79	0.94

Результаты

Ellipsoid parameters



Сопоставление предсказаний модели ResNet18 с истинными значениями параметров источника

Заключение

- **Сопоставлены два метода расчета смещений** в однородной линейно-упругой среде: численное конечно-элементное моделирование и аналитическая модель McTigue, для которой использован упрощенный метод учета топографии с переменной глубиной источника. Невязки между численным и аналитическим решениями составили **более 30% по вертикальному смещению** и более 45% для горизонтальной компоненты при глубине источника 1.45 км и 3 км соответственно
- Проведена **серия многовариантных численных расчетов** для задачи эллипсоидального включения в линейно-упругий материал с топографией свободной поверхности в виде конического рельефа с переменными параметрами
- На результатах численного эксперимента **обучены 3 нейросети** (сверточные архитектуры), полученное качество предсказаний при решении обратной задачи составило $R^2 > 0.9$ для 5 из 8 параметров эллипсоидального включения
- Планируется проведение экспериментов по численному решению обратной задачи с заданием начального приближения в соответствии с предсказаниями моделей нейронных сетей. Оценка ускорения решения обратной задачи

Спасибо за внимание