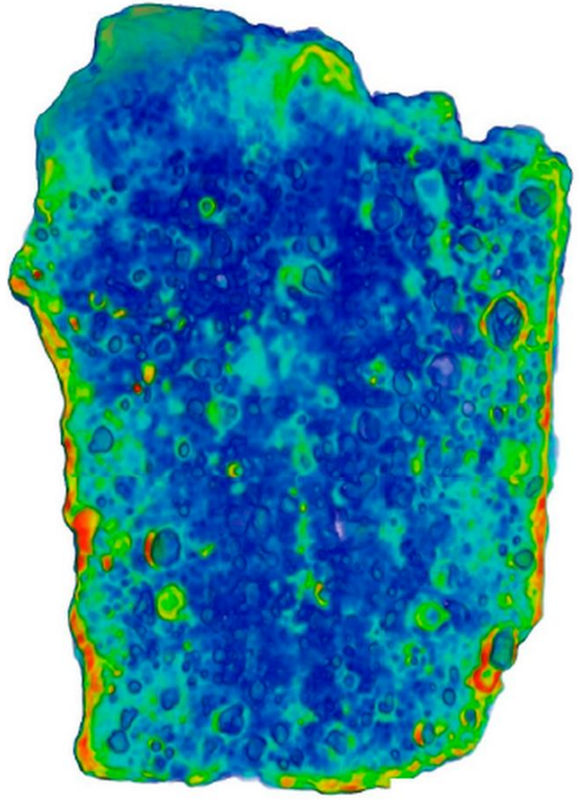
Лаборатория
Нейтронной Физики
им. И.М. Франка

МЕЖДУНАРОДНАЯ
МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Компьютерное зрение для нейтронной томографии



Реконструкция по разреженным данным и анализ пористой структуры

Булат Айратович Бакиров

Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка
Объединённый институт ядерных исследований

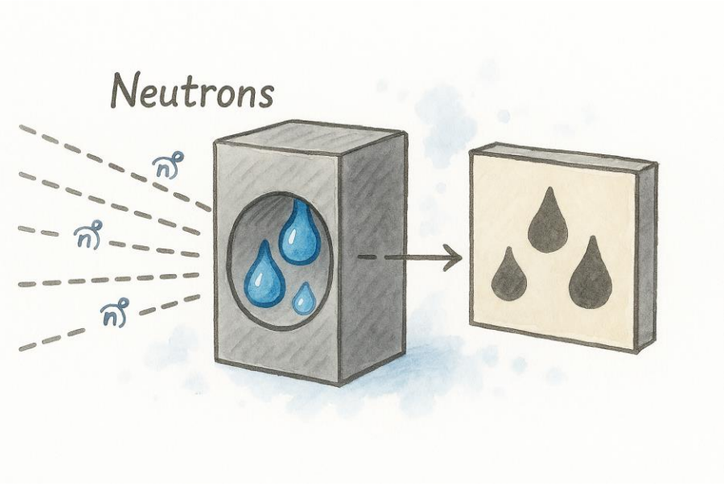
Нейтронная томография: плюсы и минусы

Плюсы

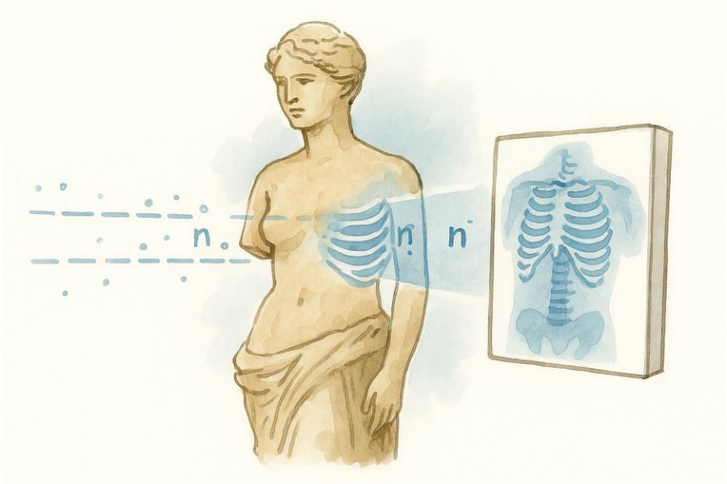
Чувствительность к лёгким элементам
Глубокое проникновение в металлы
Изотопный контраст

Минусы

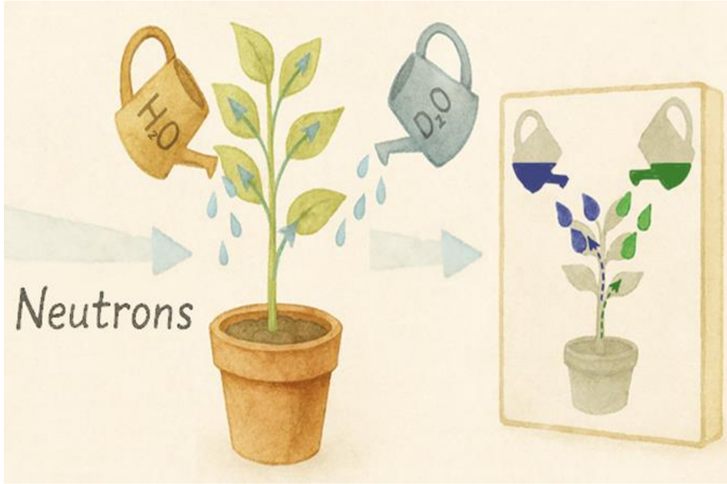
Длительная съёмка
Шум и артефакты реконструкции
Трудоёмкая обработка данных



Проникновение воды в материалы



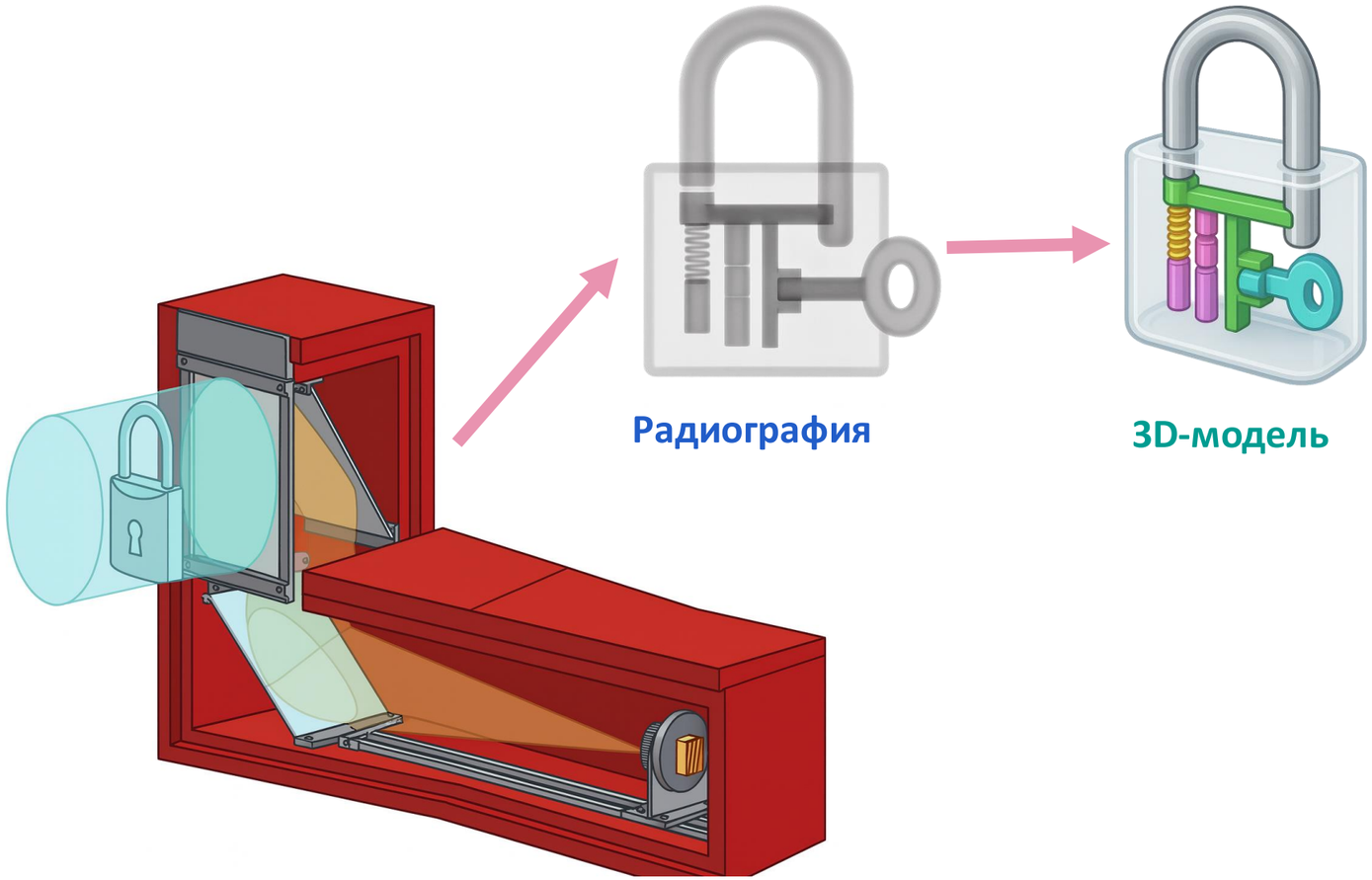
Культурное наследие



Исследования растений

Сокращение объёма томографической съёмки

Цель: сохранить структуру материала при меньшем числе проекций



360

исходный набор

72

разреженный набор

Один диапазон углов: 0–180°

–80 %

угловых измерений

Потенциальная экономия времени съёмки

Экспериментальные данные и объекты проверки

40

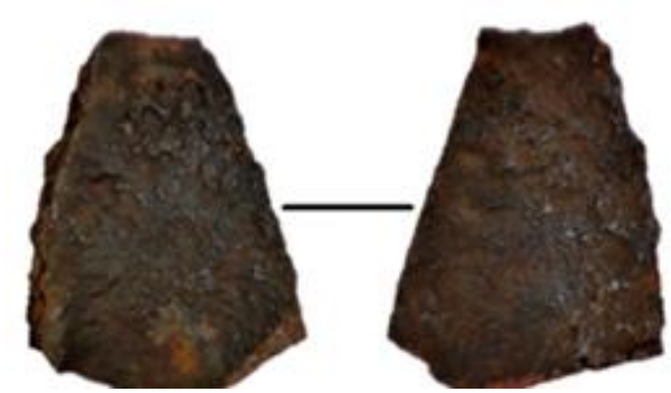
экспериментов

3

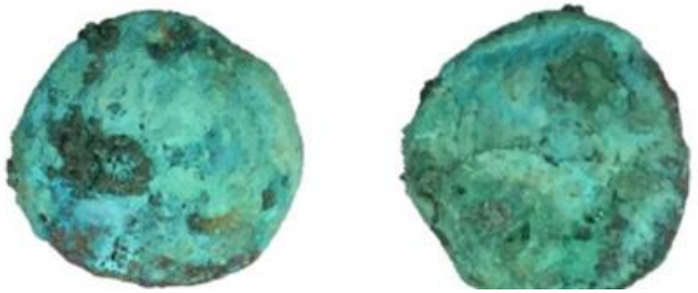
нейтронные установки

21

объект в оценке качества



10 чугунных фрагментов



9 бронзовых монет



2 фрагмента мозаики

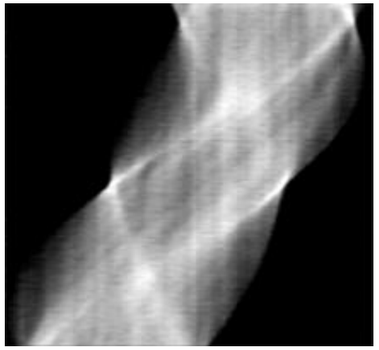
Обучение и проверка разделены по экспериментам

Реконструкция с физическими ограничениями

$$S_{\text{final}} = M \cdot S_{\text{measured}} + (1 - M) \cdot S_{\text{predicted}}$$

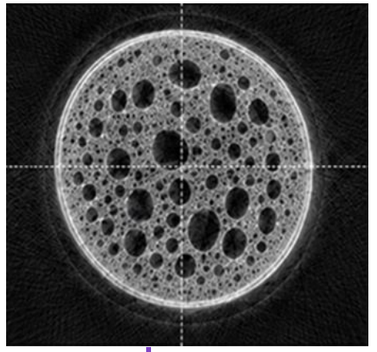
Измеренные значения синограммы сохраняются точно

1 Достройка синограммы



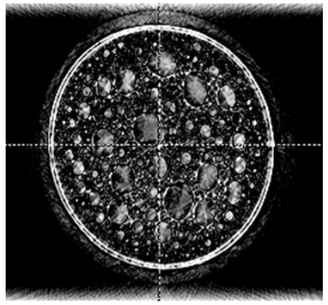
UNet3+
Маска углов
Интерполяция

2 Дифференцируемая FBP



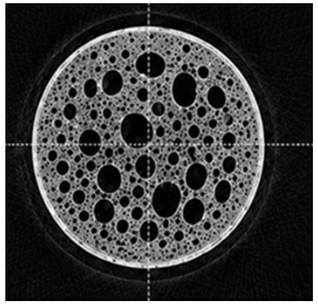
Фильтрованная
обратная
проекция

3 Остаточное уточнение



8 остаточных
блоков

4 Итоговый срез

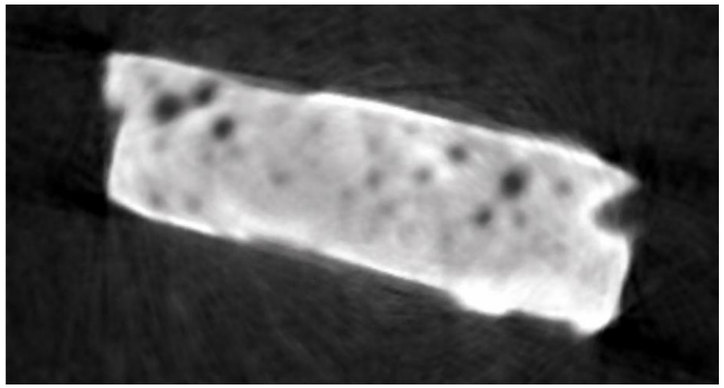


Количественный
анализ структуры

Одни и те же 72 проекции, разные реконструкции

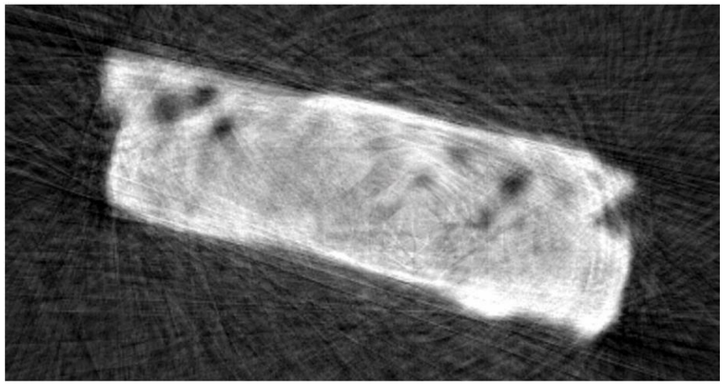
Эталон

360 проекций, FBP



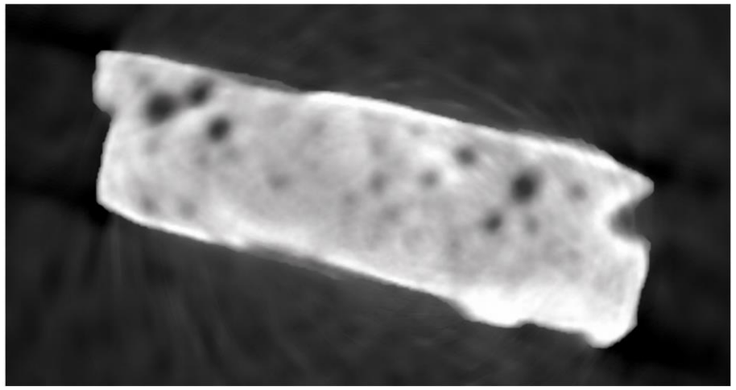
Обычная FBP

72 проекции



Предлагаемый метод

72 проекции



3D SSIM

0,813 → 0,934

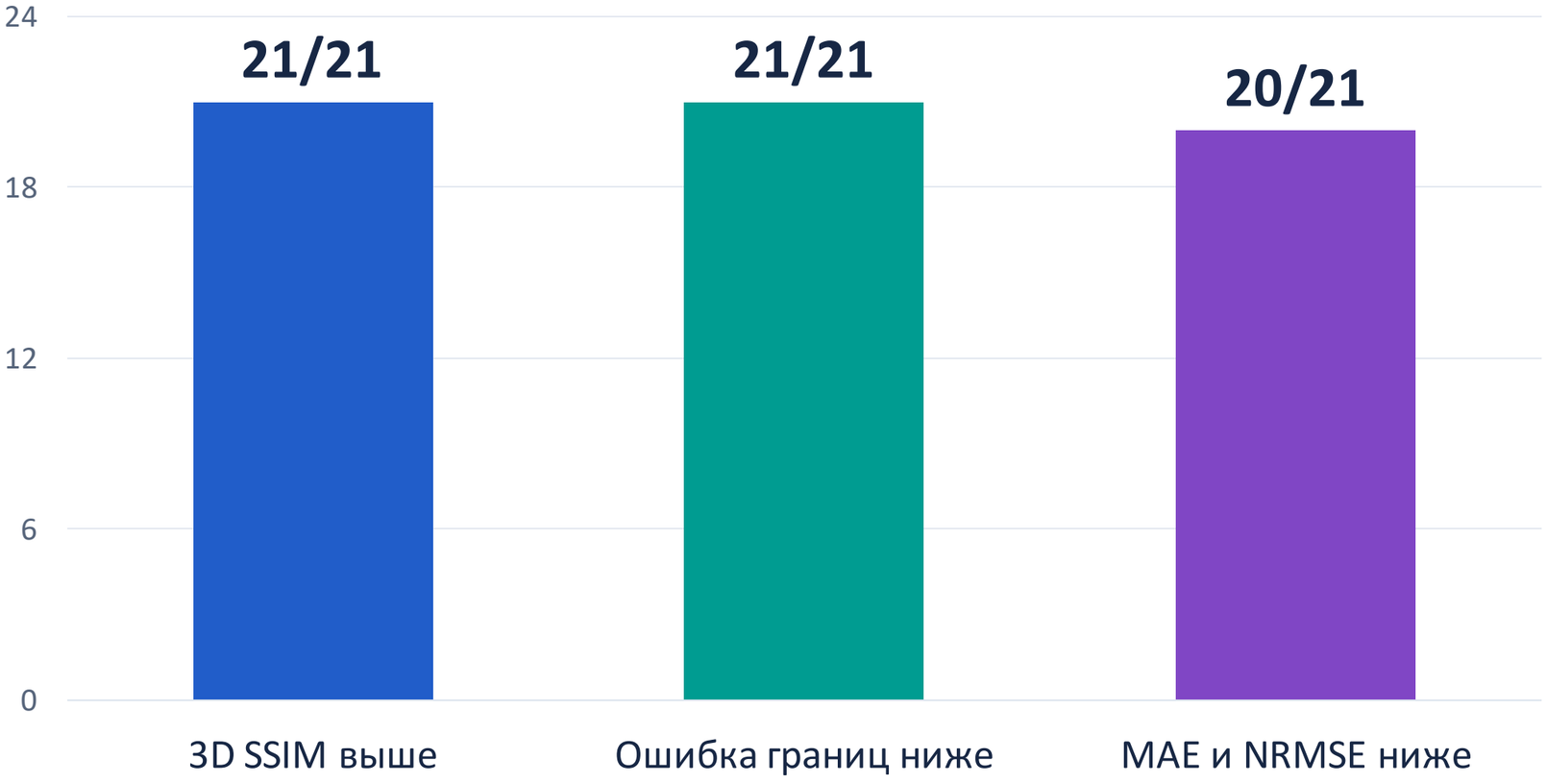
Ошибка границ

0,153 → 0,055

Средние значения для чугунных фрагментов

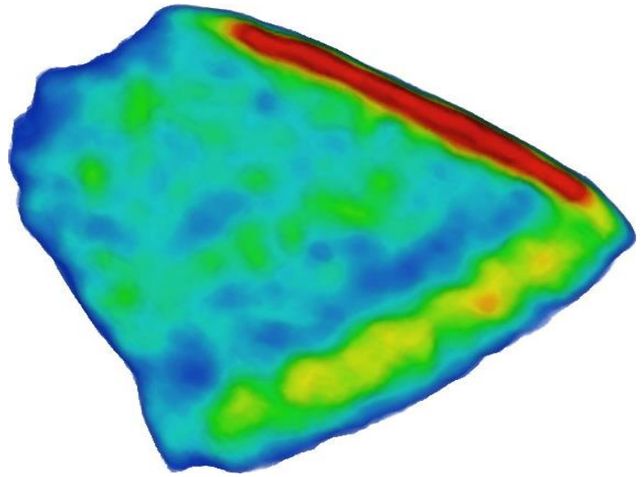
Улучшение качества на разных реальных объектах

Число объектов с улучшением относительно FBP из 72 проекций



$$\mathrm{SSIM}_{3D} = \left\langle \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\sigma_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2)} \right\rangle_\Omega$$

Ω — область объекта
Статистики в 3D-окне

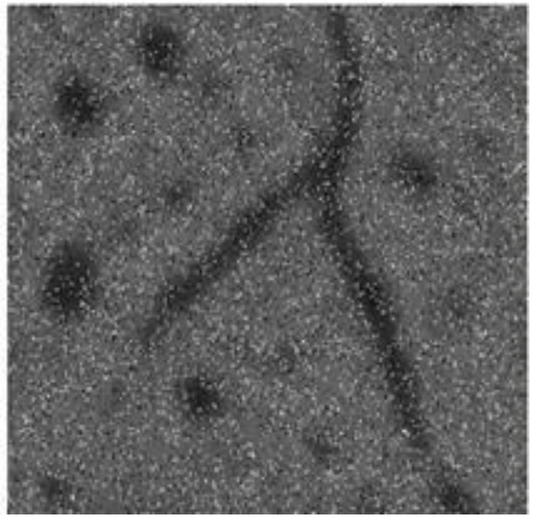


Пример 3D-модели фрагмента мозаики

Всего 21 объект

Сегментация пор: проверка на известных масках

Синтетические данные с шумом, размытием
и неоднородным фоном

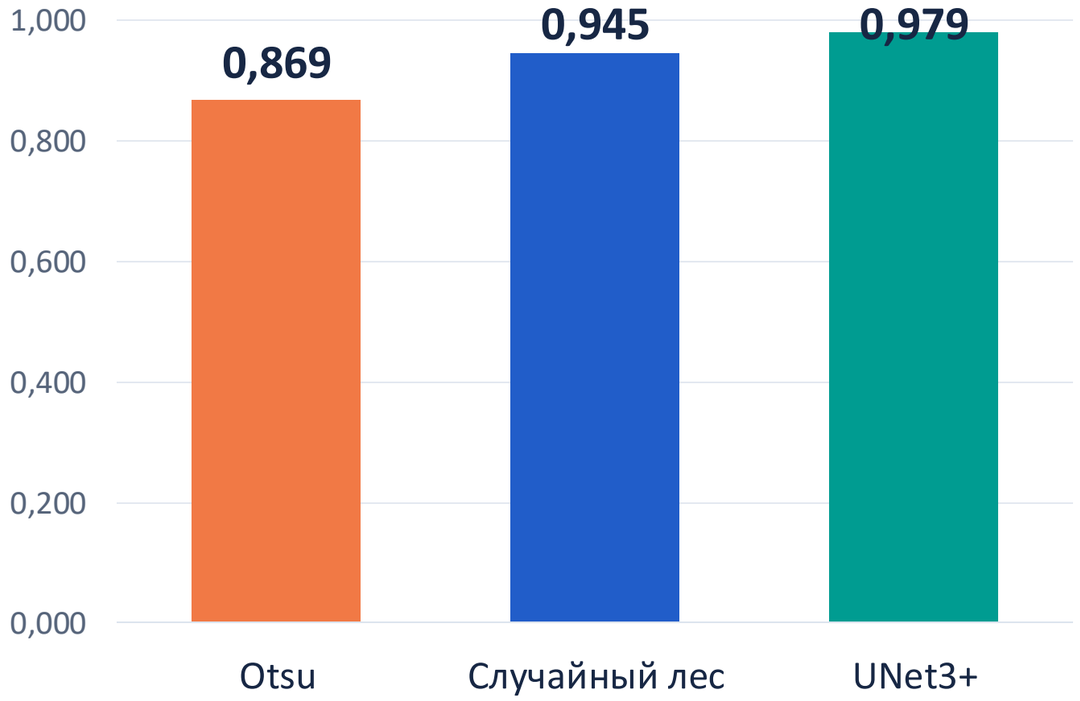


Входной срез



Маска пор

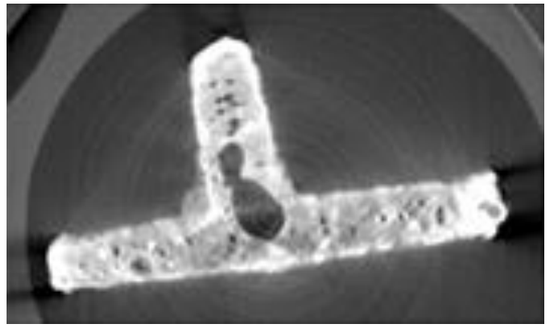
IoU на тестовых данных

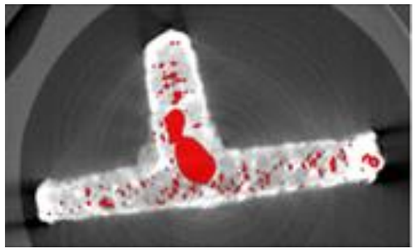


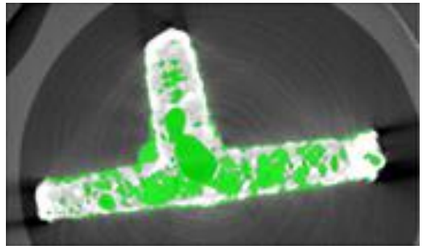
Маски срезов образуют 3D-объём для анализа отдельных пор

Сегментация пор: три вида томографических данных

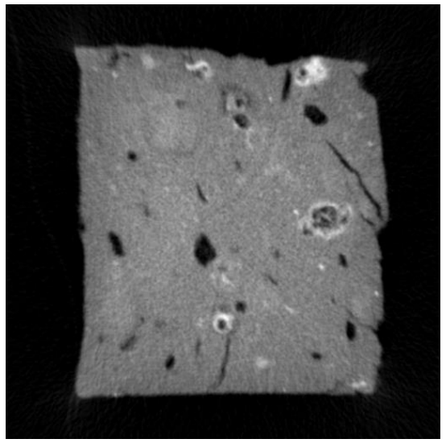
Нейтронная томография

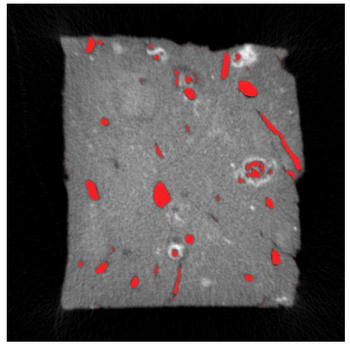


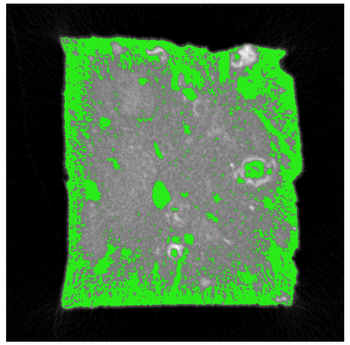




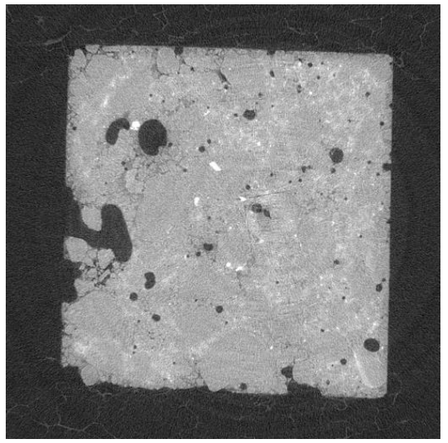
Лабораторный рентген

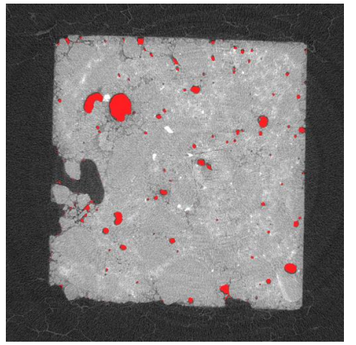


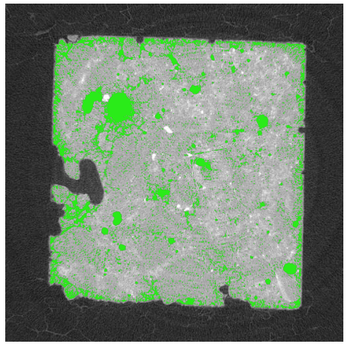




Синхротронная томография







UNet3+ — красный

Otsu — зелёный

Отсу: порог по интенсивности внутри образца, внешний фон исключён

Точность количественного анализа пор

Средняя абсолютная относительная ошибка, %
8 чугунных образцов, сравнение с реконструкцией из 360 проекций



5,3 раза

снижение средней ошибки пористости при одинаковом числе измеренных проекций

Границы точности: размер и форма отдельных пор

Пористость одного образца

2,69 %

72 проекции, FBP

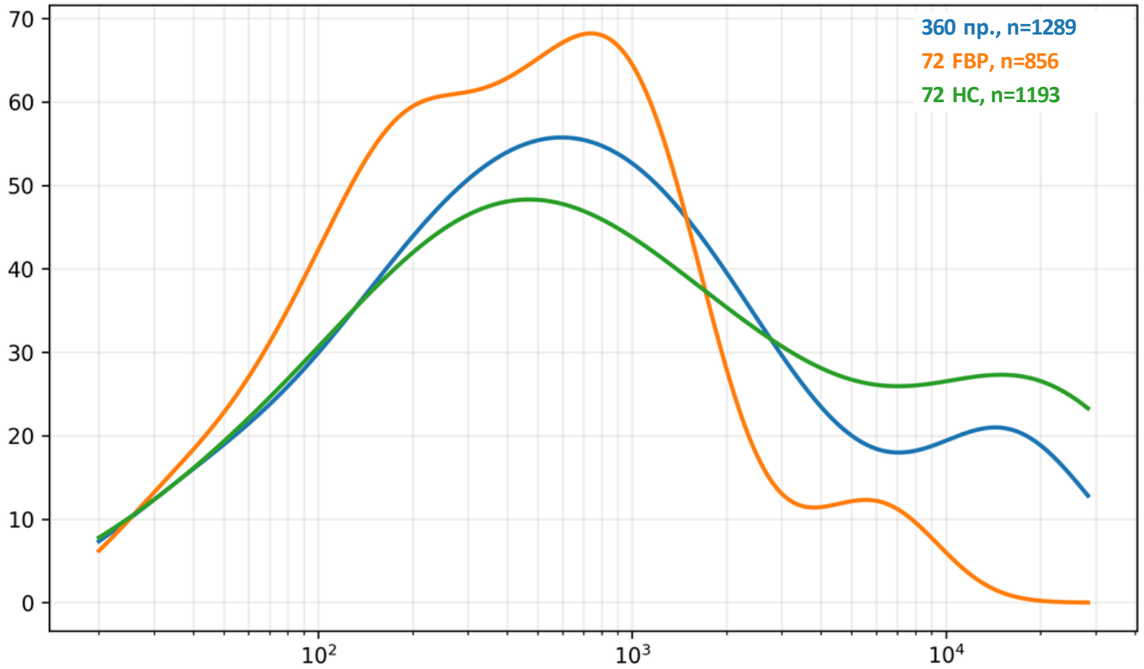
4,96 %

72 проекции, нейросеть

4,89 %

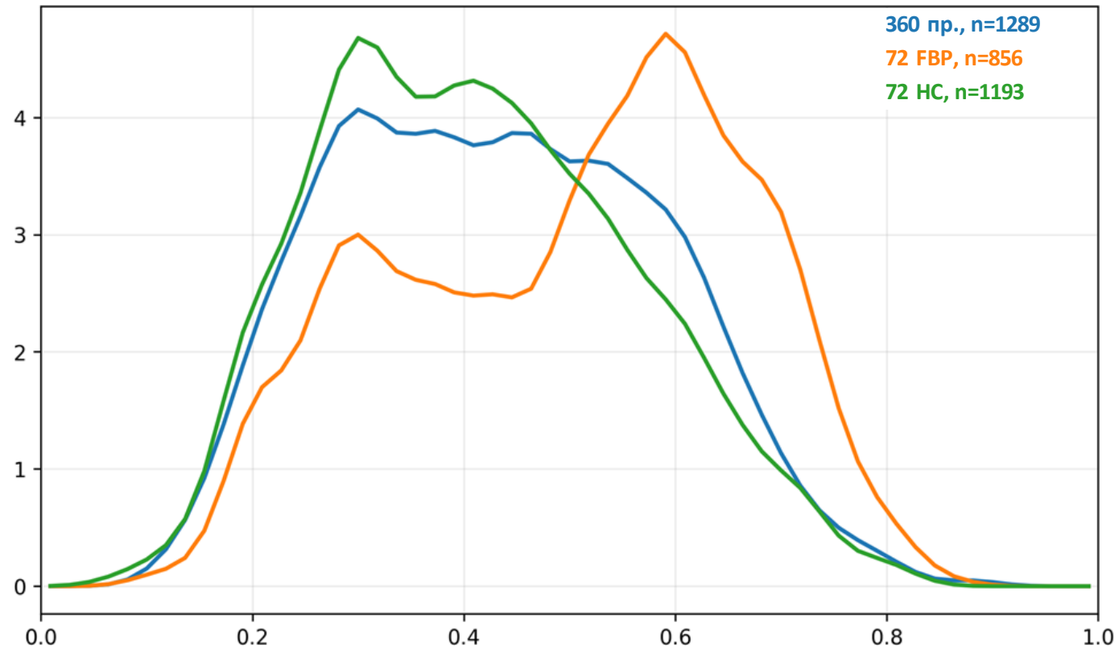
360 проекций

Объём: доля порового объёма, %



Объём пор, воксели (логарифмическая шкала)

Форма: доля числа пор, %



Отношение короткой и длинной полуосей c/a

Потенциальные площадки для применения

Цель внедрения: программный модуль для томографических станций



Россия

ОИЯИ: НРТ / ИБР-2
НИЦ «Курчатовский институт»: ДРАКОН / ИР-8



Казахстан

Институт ядерной физики
TITAN / ВВР-К



Узбекистан

Институт ядерной физики АН РУз
Станция томографии / ВВР-СМ



Вьетнам

Проект Центра ядерной науки и технологий
Перспективное направление



Возможная форма внедрения

Программный модуль, адаптация под данные станции и сопровождение

Прикладной результат работы

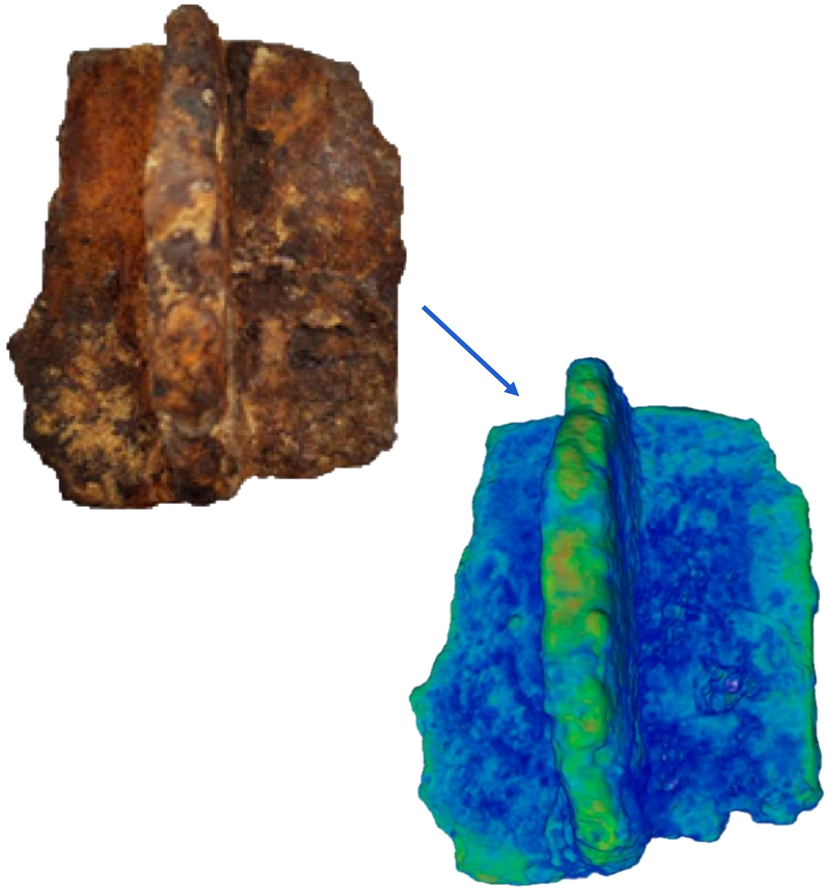
5× меньше проекций

В проверенном режиме реконструкции

5,3× ниже ошибка пористости

В среднем для 8 чугунных образцов

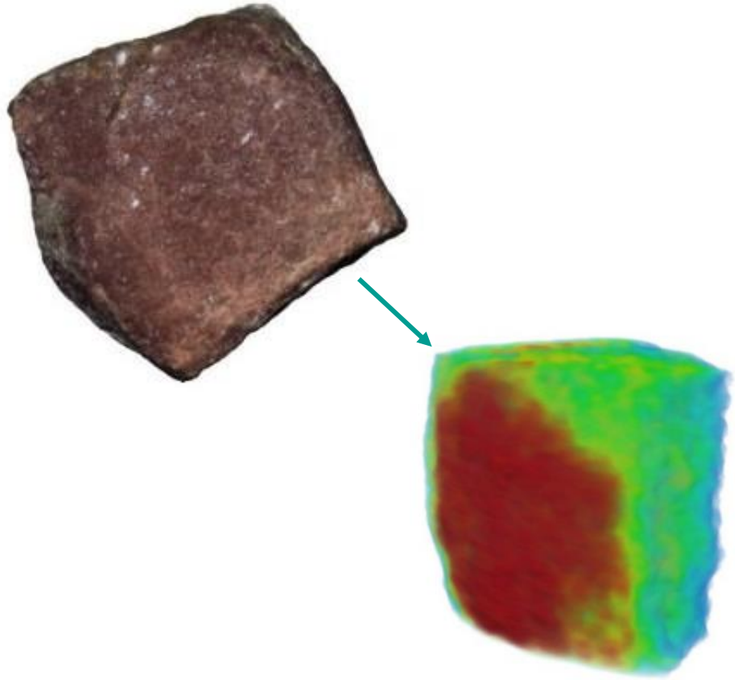
Чугун Золотой Орды



Древнегреческая монета



Древнериская мозаика



Следующий этап: апробация и интеграция ПО на станциях

Публикации, выступления и поддержка работы



Булат Айратович Бакиров

Ответственный за станцию нейтронной радиографии и томографии на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ

Публикации по теме

Bakirov B., Kichanov S., Kozlenko D. Convolutional neural networks for reconstruction of neutron tomography from incomplete data. Nuclear Instruments and Methods B 563 (2025), 165682.

Zel I., Bakirov B. et al. X-ray computer tomography of model archaeological bricks: image segmentation methods and pores characterization. Ceramics International 51 (2025), 57852–57861.

Bakirov B., Smirnova V. et al. Structural Features of the Fragments from Cast Iron Cauldrons of the Medieval Golden Horde: Neutron Tomography Data. Journal of Imaging 9 (2023), 97.

Конференции, 2026

- 62-я и 63-я сессии ПКК по ФКС (Дубна)
- «Тихоокеанская археология» (Владивосток)
- CMR@IBR2-2026 (Дубна)
- AYSS-2026 (Ташкент)
- «Сохранение и музеефикация археологической древесины» (Казань)

Грант и награды

РНФ № 23-18-00196-П, исполнитель
Исследования некрополя Волна 1

Конкурс работ ЛНФ: I место (2022), II место (2026)

Доклад на ПКК: II место (2024), I место (2025)

Стипендия имени И.М. Франка (2025)

Стипендия имени Ф.Л. Шапиро (2026)

AYSS-2026 Лучший доклад в секции ИТ