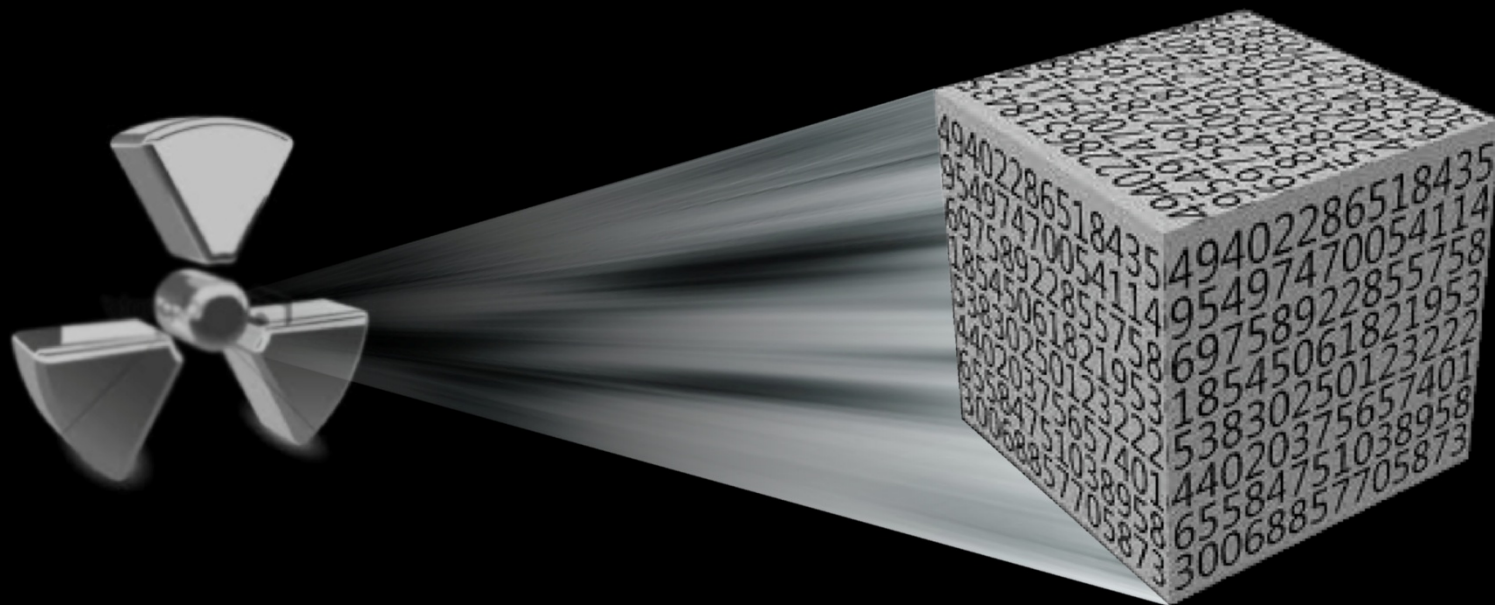


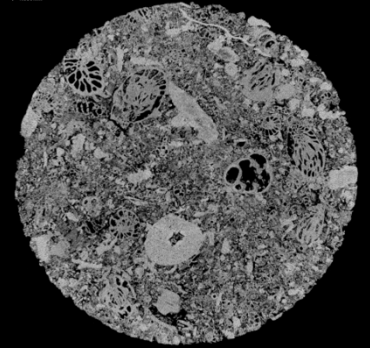


Компьютерная микротомография: *от наблюдений к цифровому моделированию*

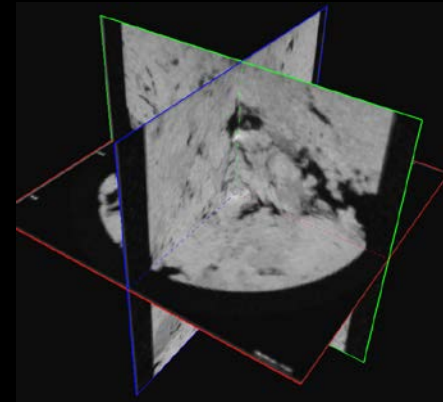


Задачи, решаемые методом μ СТ

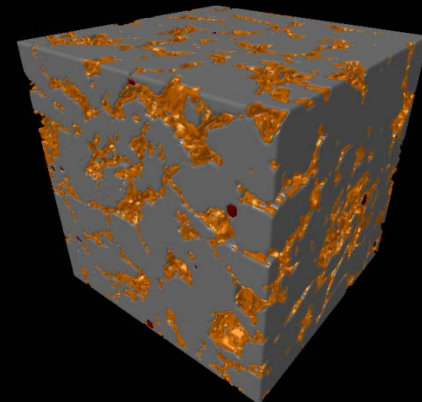
Изучение зон кольматации
Техногенное воздействие на пласт
Контроль качества образцов



Текстурный анализ
Минерально-компонентный состав
Выявление крипто-свойств
Палеонтологические исследования



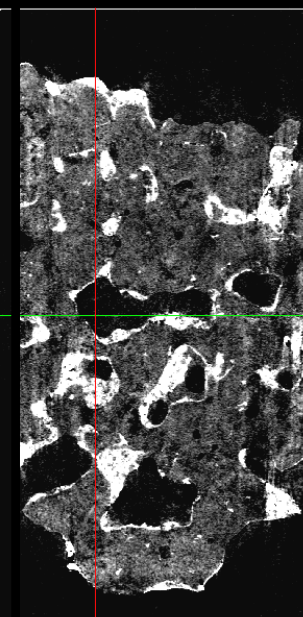
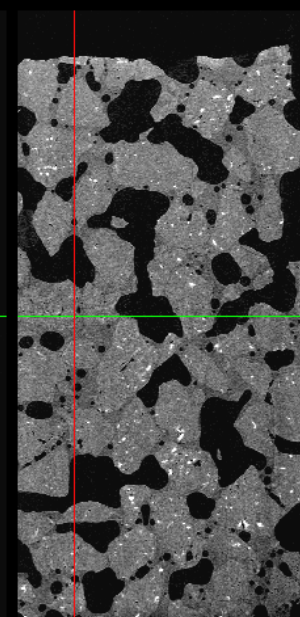
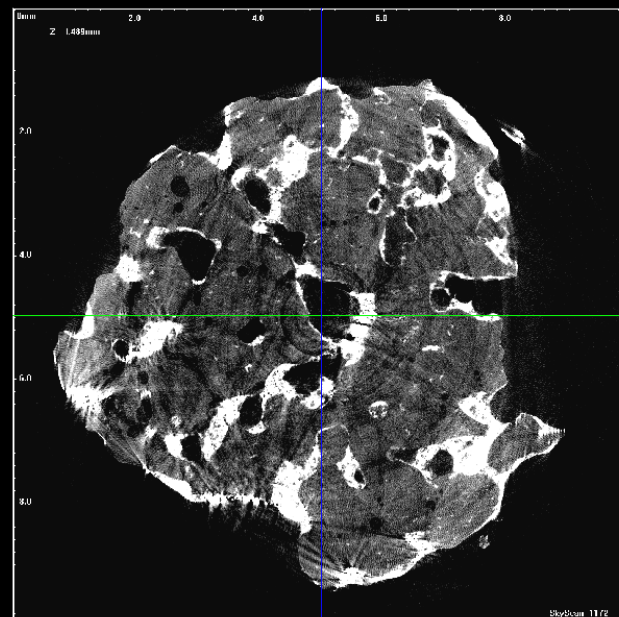
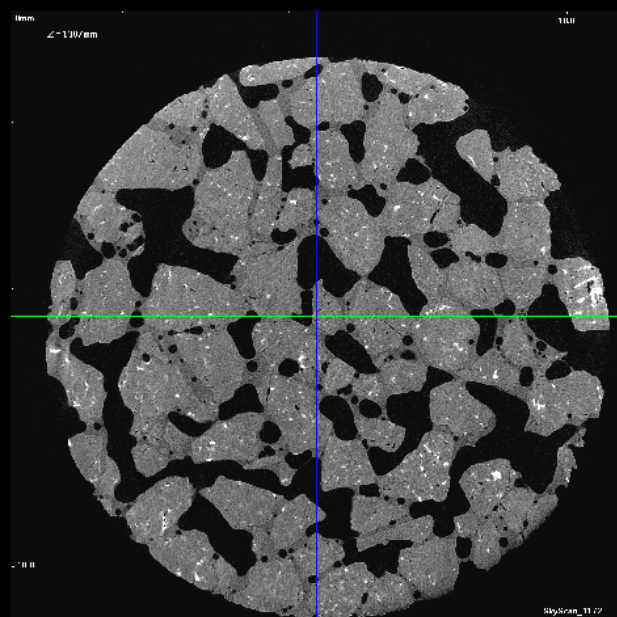
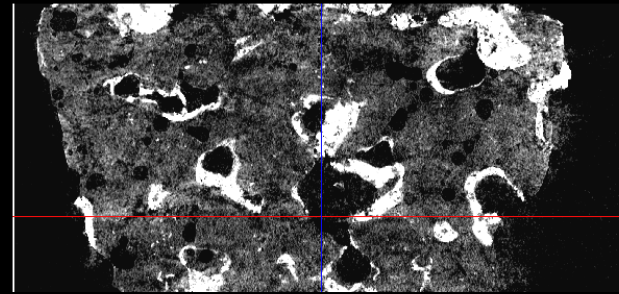
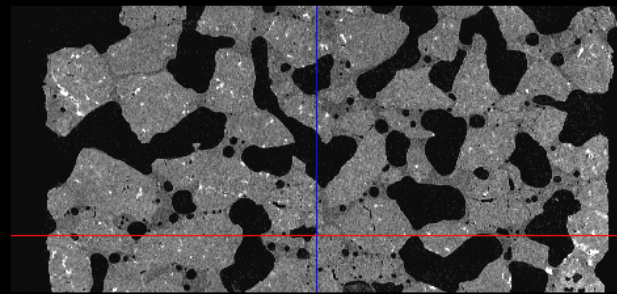
Строения пустотного пространства
Типизация пород-коллекторов
Изучение неконсолидированных и ценных образцов
Моделирование физических свойств
Изучение распределения флюидов



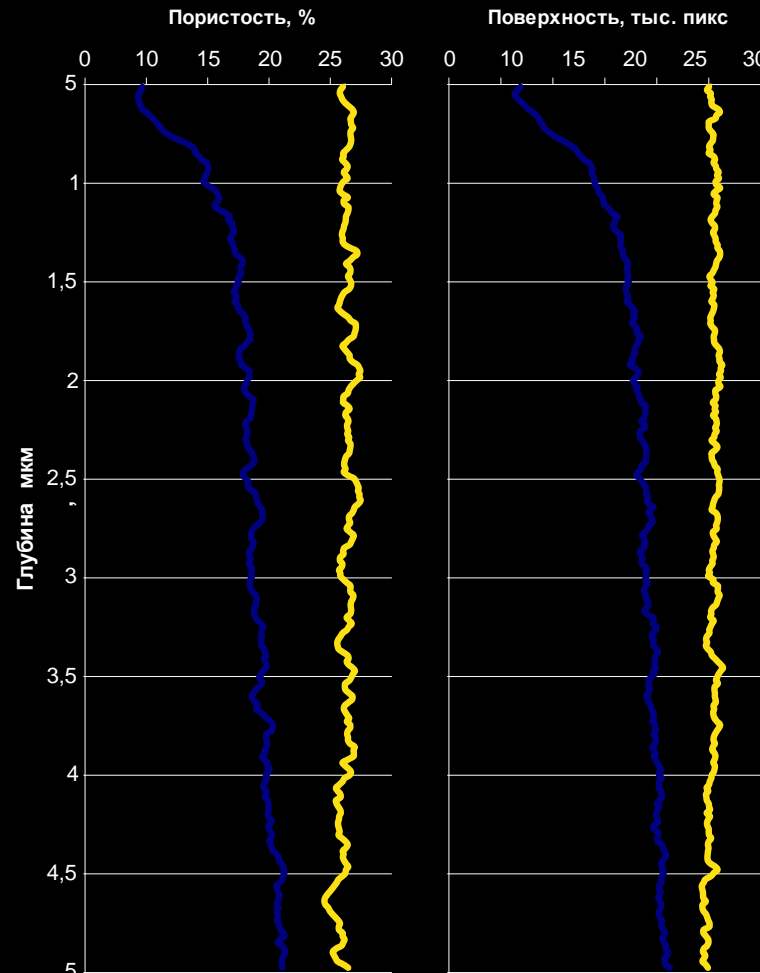
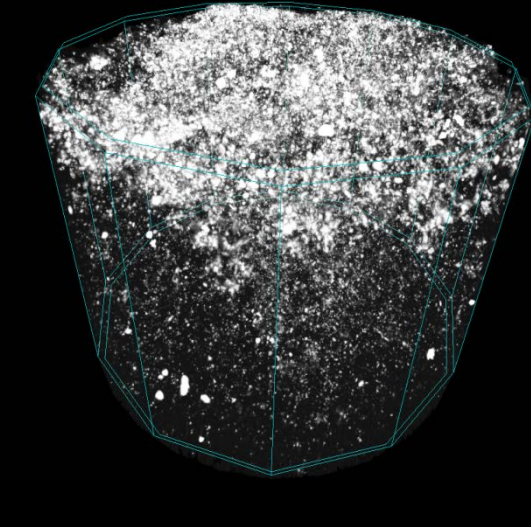
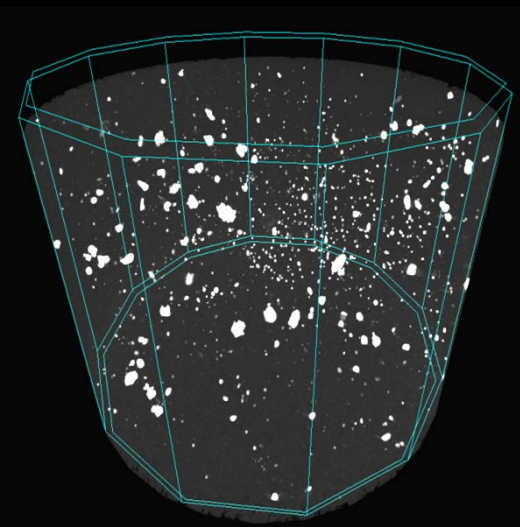
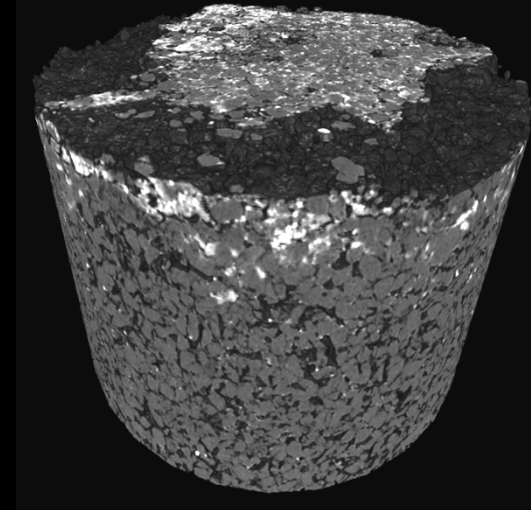
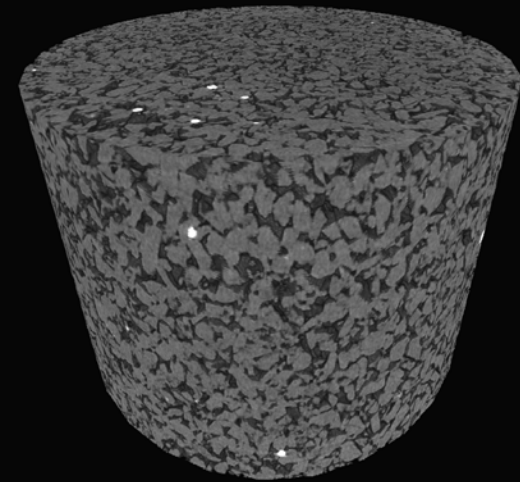
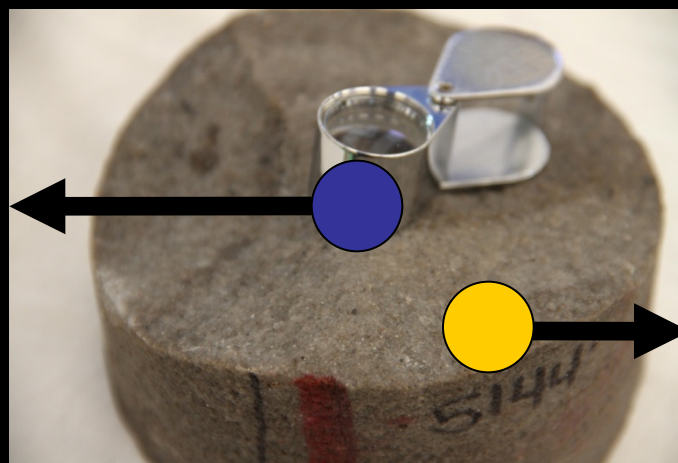
Изучение проникновения буровых растворов



Искусственный песчаник, крупнозернистый.
До и после обработки буровым раствором



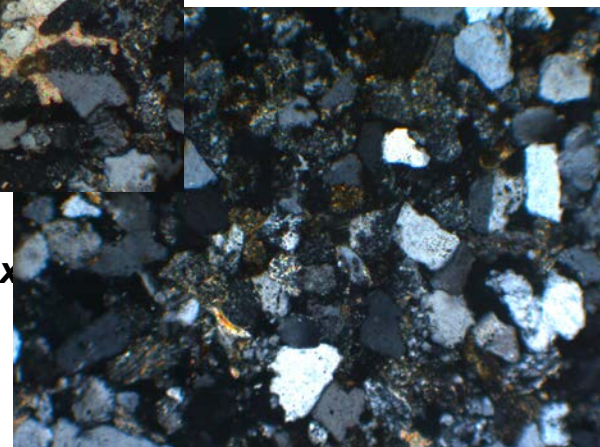
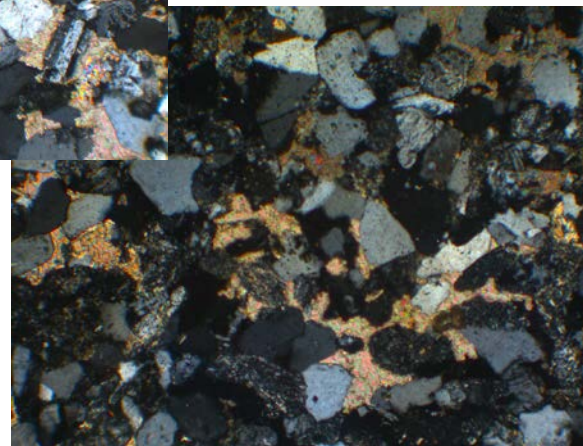
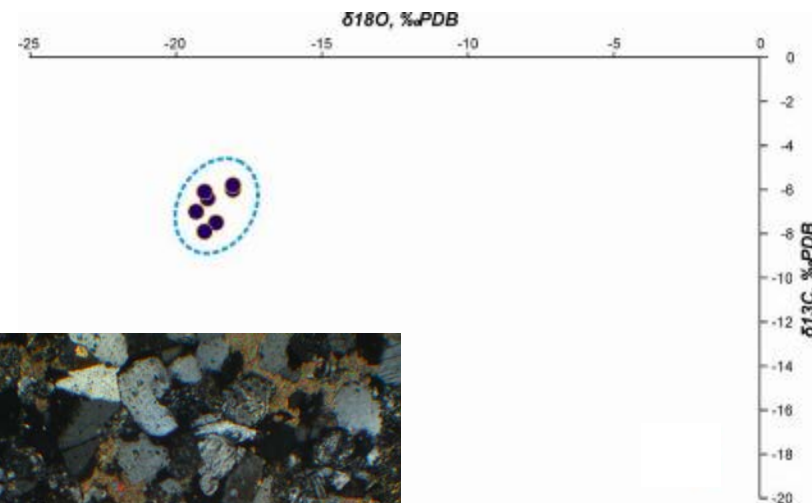
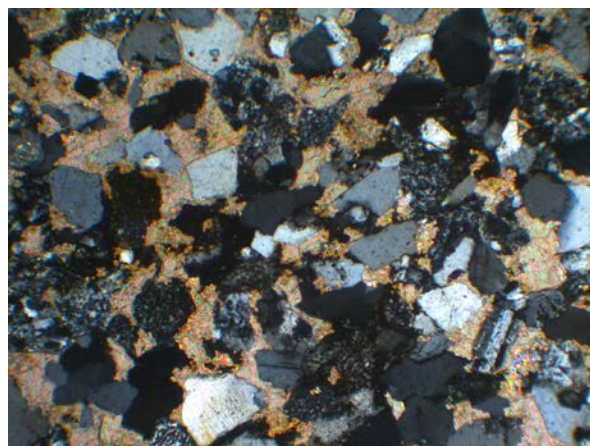
Изучение проникновения буровых растворов



Литолого-седиментологические исследования

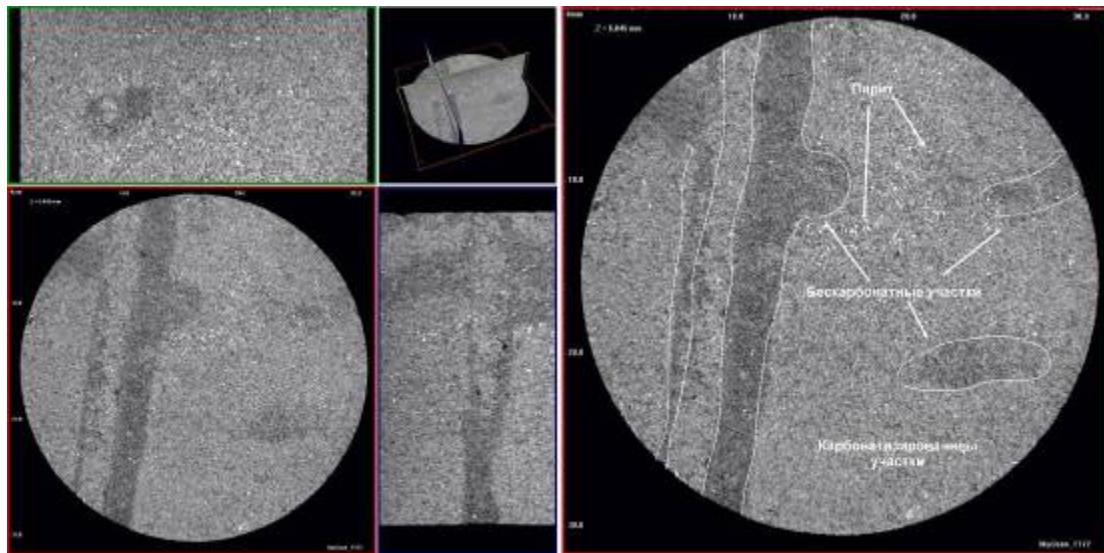


Граувакковые полевошпат-кварцевые мелкозернистые **песчаники с аутигенной карбонатной цементацией**. Вверх по разрезу, на фоне **увеличения карбонатного цемента от 1 до 40%**, происходит **ухудшение ФЕС** коллекторов: Кп уменьшается с **18 до 2%**, Кпр – со **100 до 0,05 мД**, Ков увеличивается с **30 до 70%**



Развитие аутигенного **карбонатного цемента** связано с **переотложением нормальных морских карбонатов**, источником которых могли служить захороненные в разрезе в большом количестве детрит, а также раковины двустворок и белемниты. **Карбонаты** незначительно **облегчены**, что может быть связано с поступлением **CO₂** из **нижележащих угленосных горизонтов**

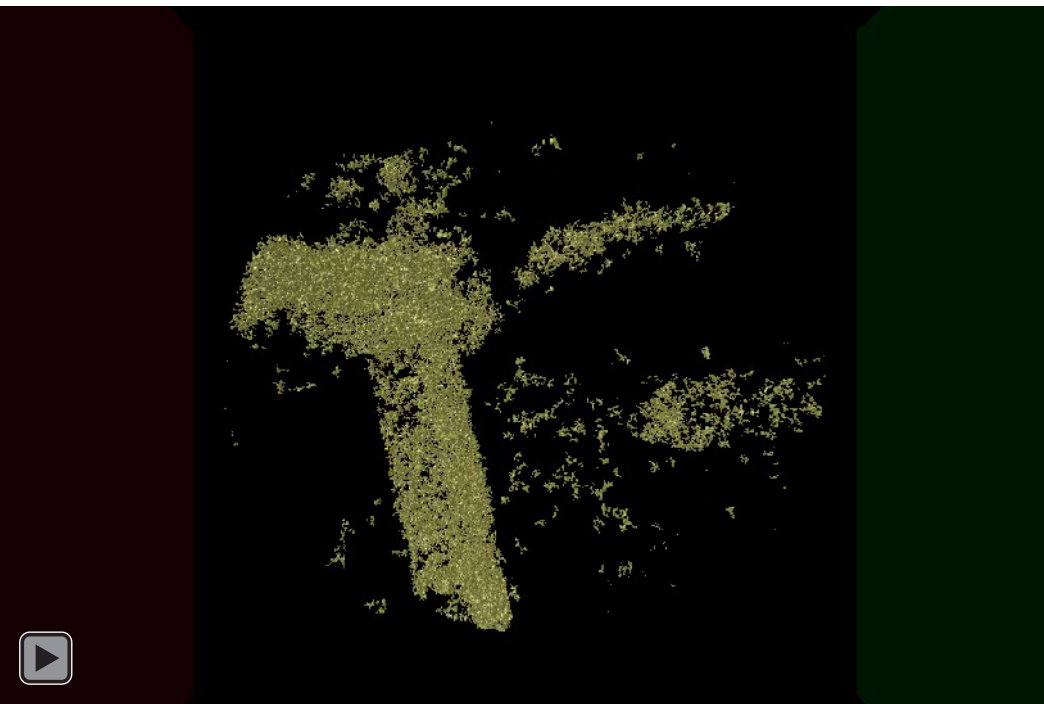
Литолого-седиментологические исследования



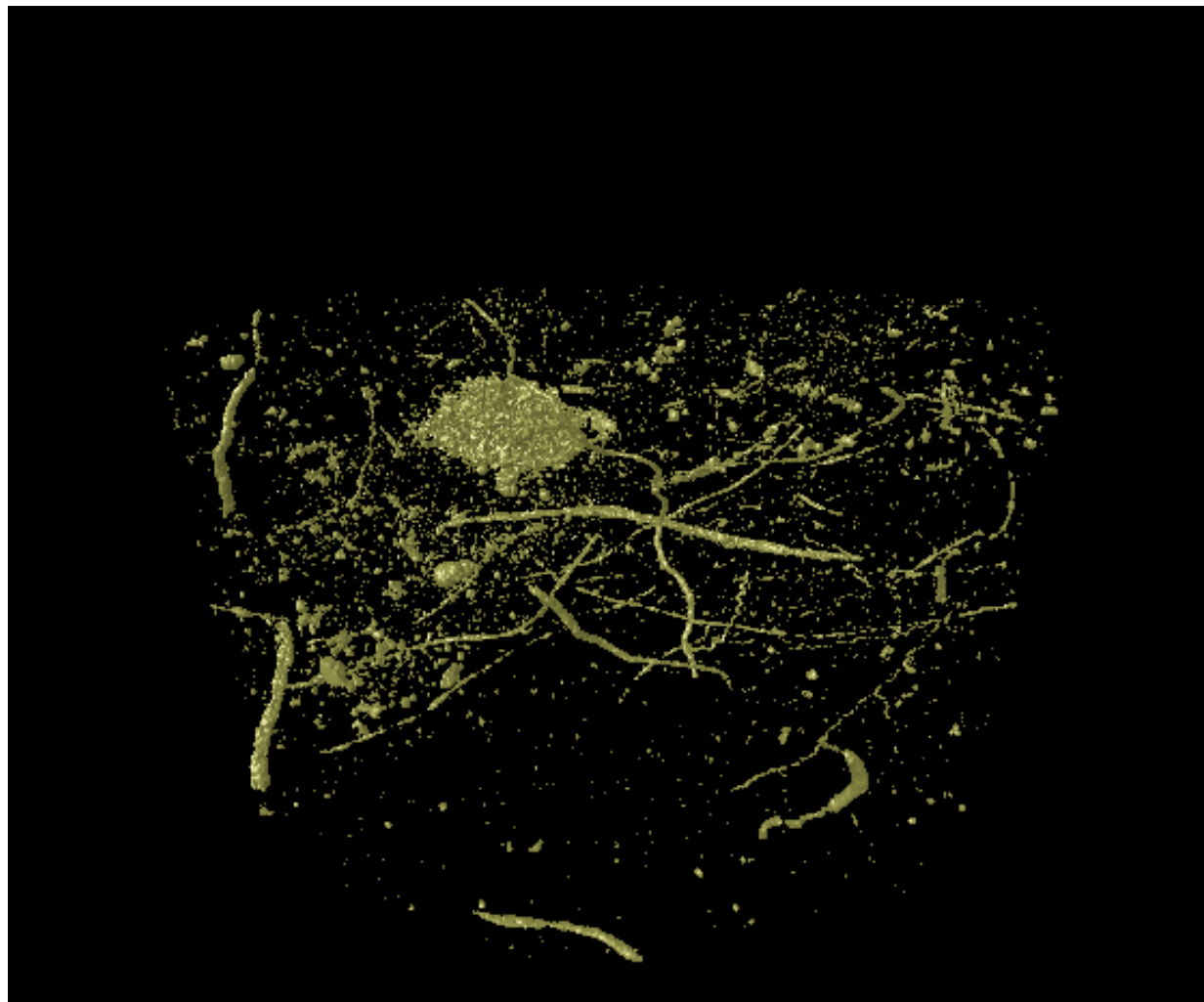
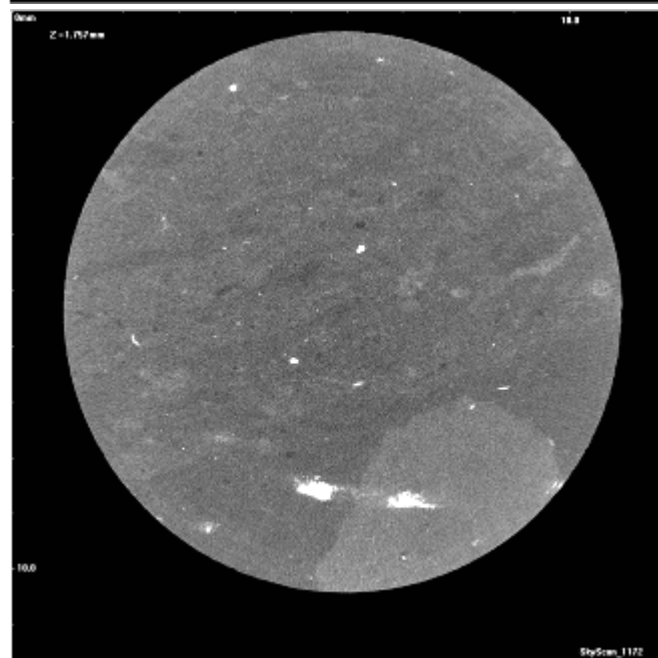
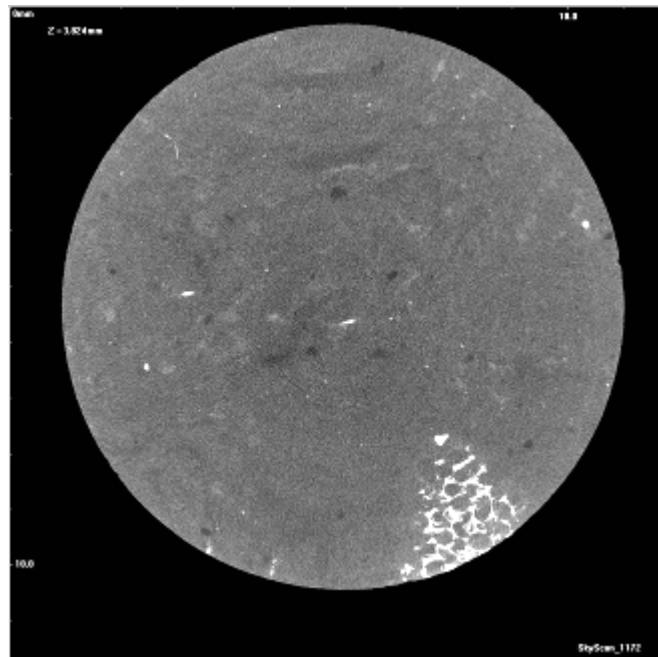
Отсутствие карбонатной цементации поперек напластования вызвано **геохимическим барьером**, возникшим на стеках норки илоеда за счет выделения им слизистого секрета. Наблюдаемые элементы биотурбации были проинтерпретированы как следы жизнедеятельности полихет *Cylindrichnus*, *Asterosoma* или *Rosselia* [Belaústegui, 2009].



В пределах изучаемого разреза **процессы биотурбации** и возникающие в их пределах геохимические барьеры привели к двум **различным** по своему воздействию на качество коллектора **результатам: ухудшение свойств** за счет увеличения глинизации разреза и **улучшение свойств** за счет препятствия развития карбонатной цементации

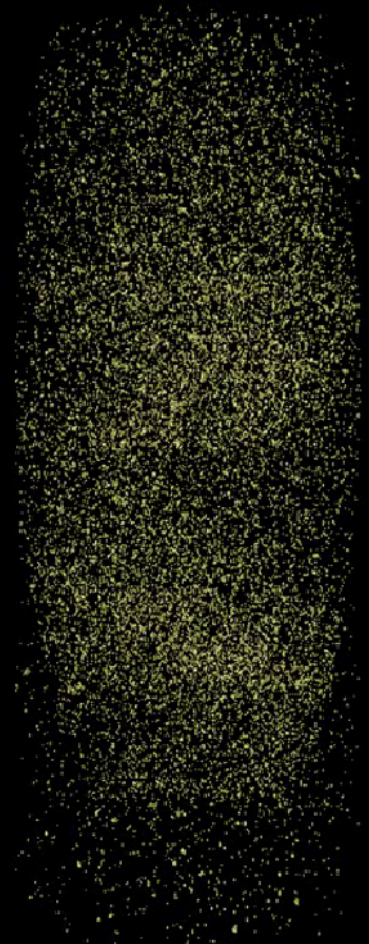
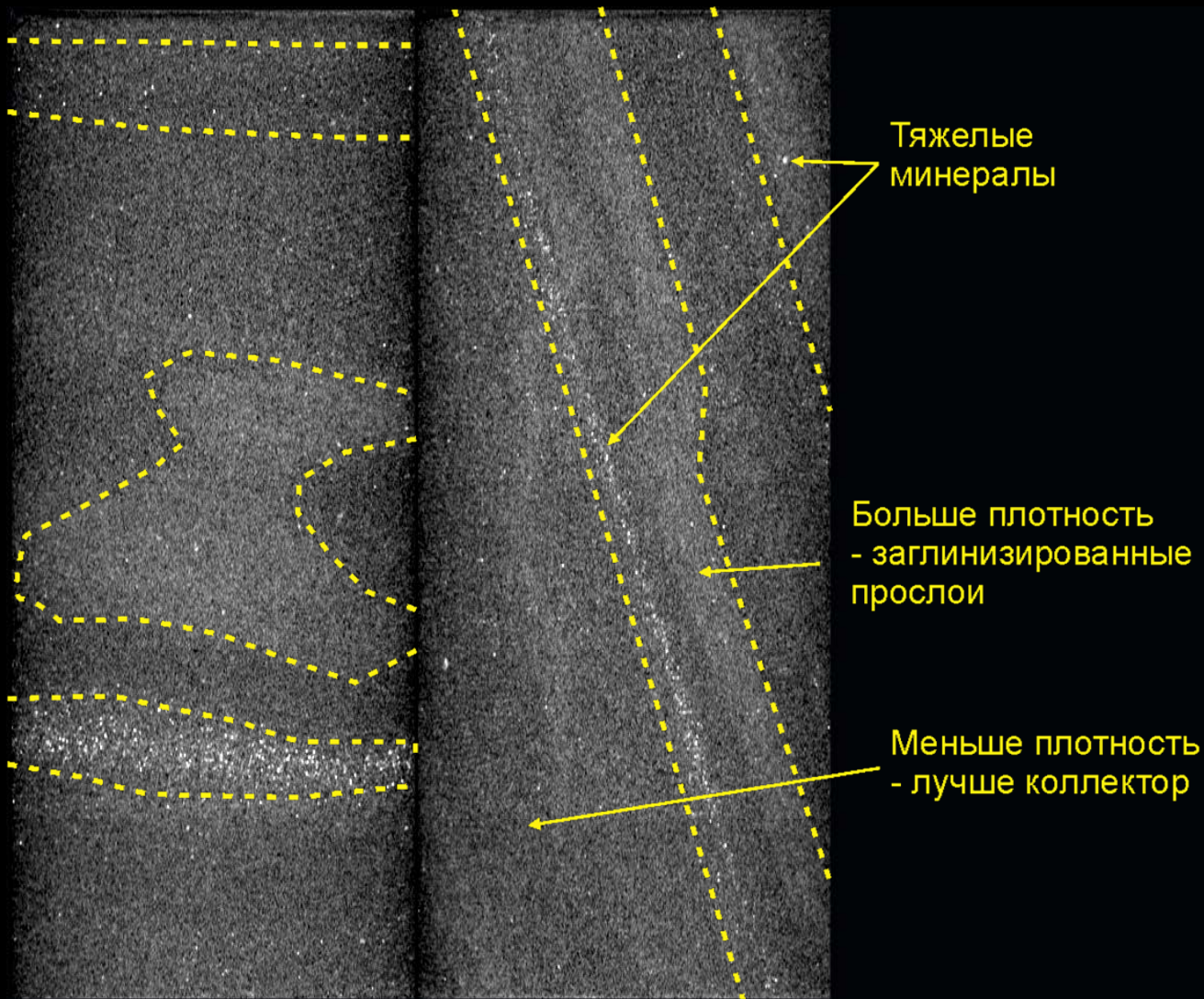


Неогеновые мергели (ЮВ Вьетнам)

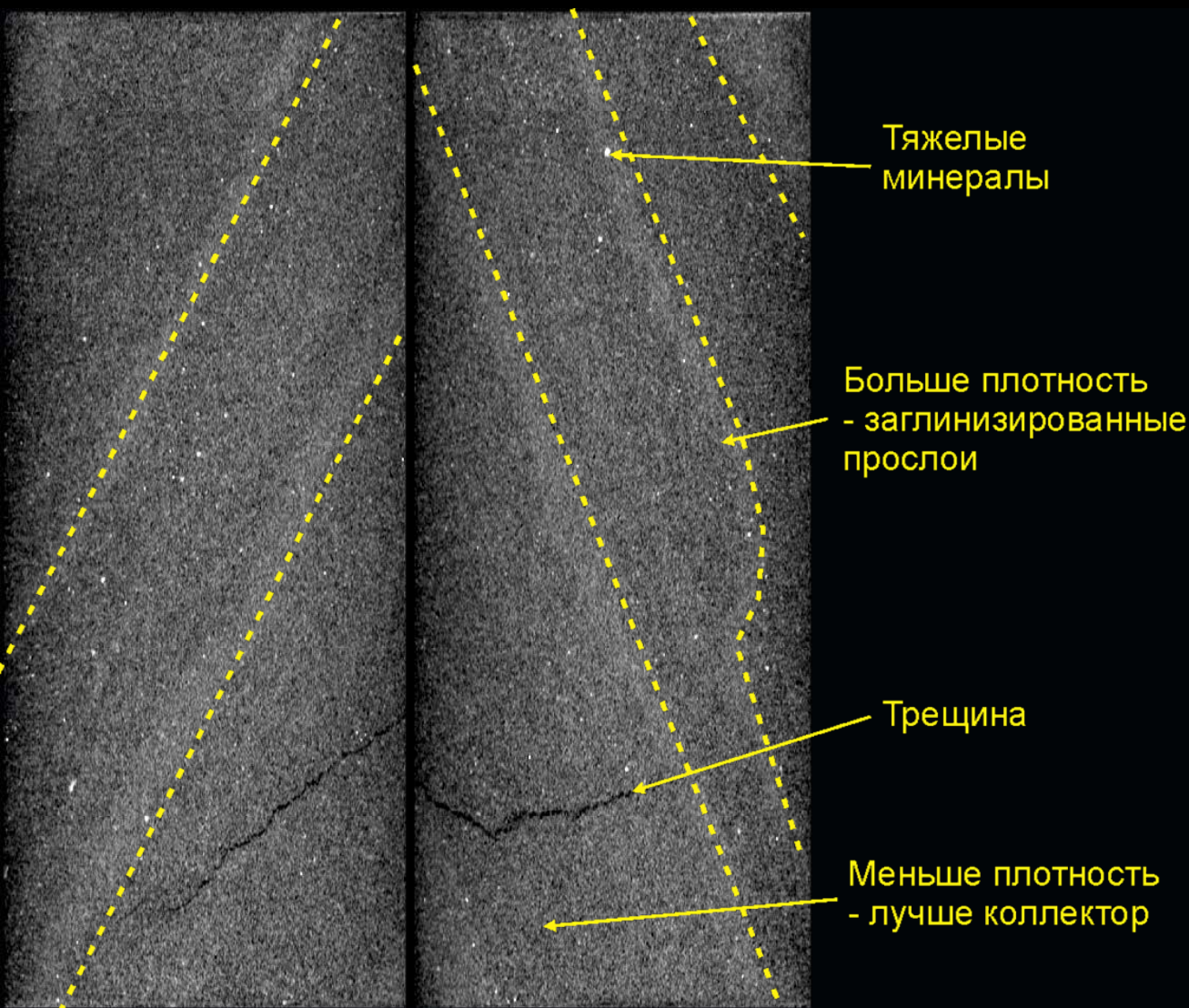


Пиритизация развита по ходам илоедов и корням растений – зонам развития восстановительных условий

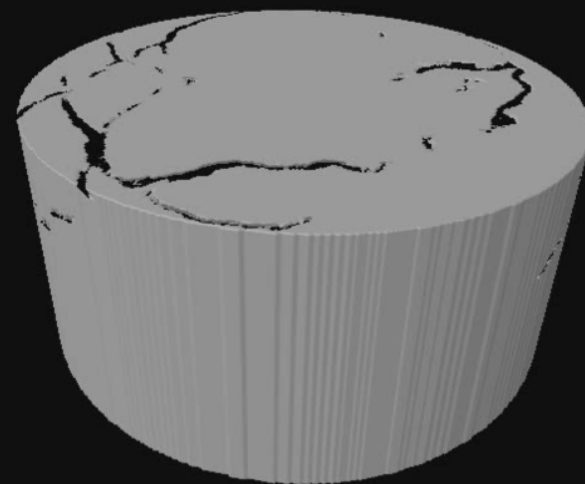
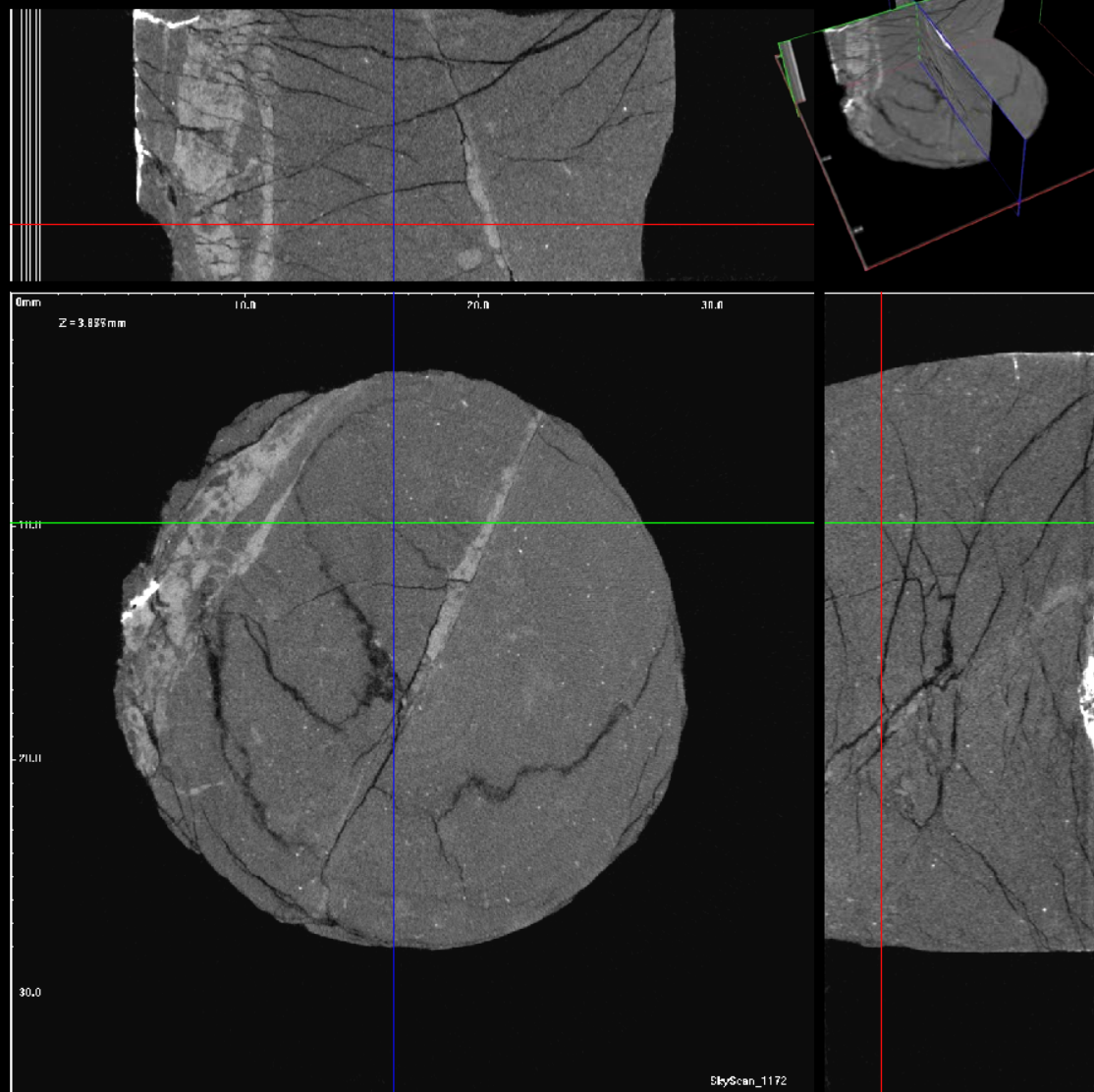
Контроль качества образцов



Контроль качества образцов



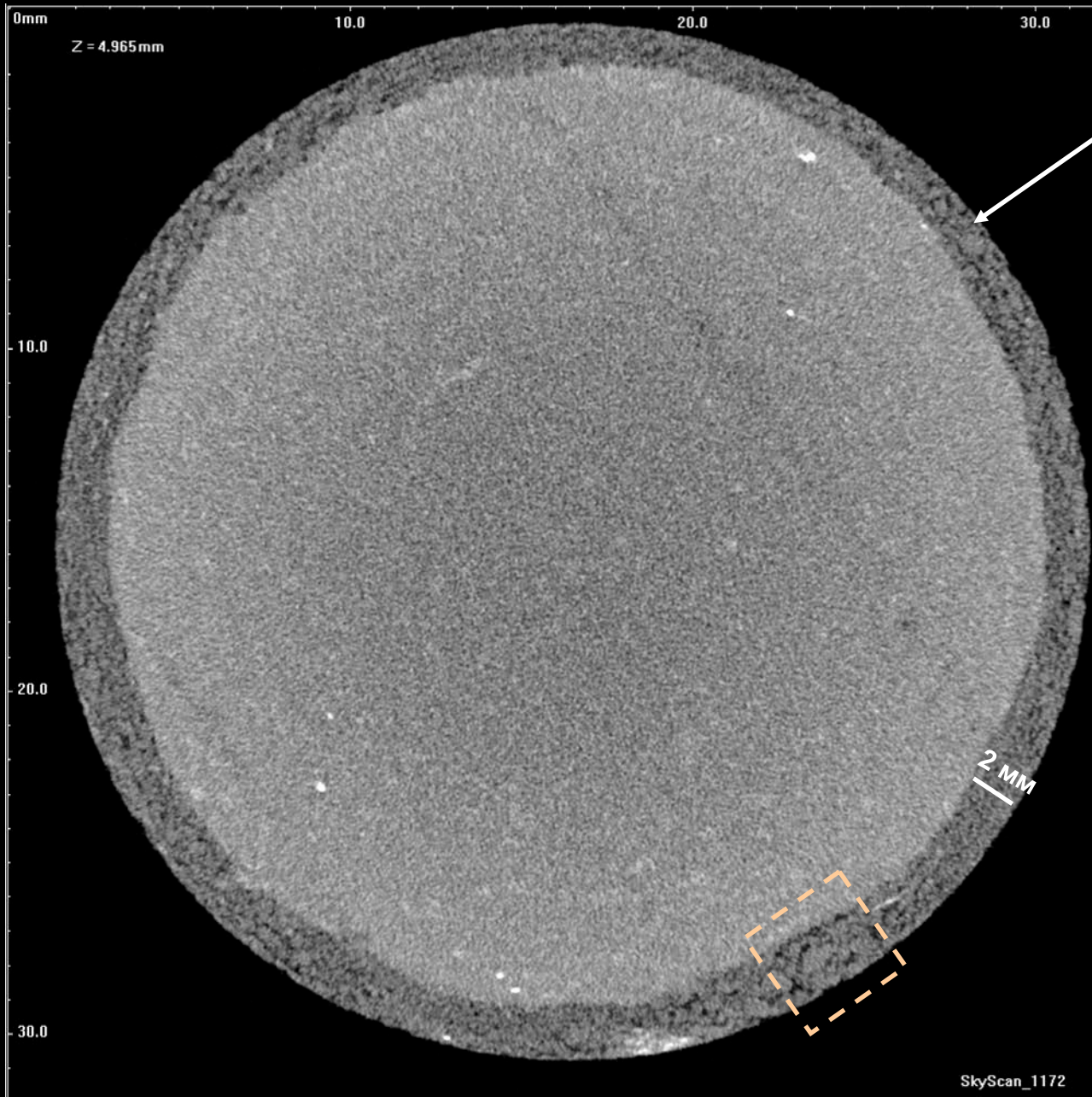
Контроль качества образцов



При макроописании образца системы трещин отмечены не были.

Специфическая “коническая” форма системы трещин была сформирована за счет деформационных нагрузок, возникших на образце в процессе его отбора из ствола скважины. Поровое пространства образца имеет **техногенное происхождение** и **не характеризует** реальную пористость отложений

Изучение засоленных кернов



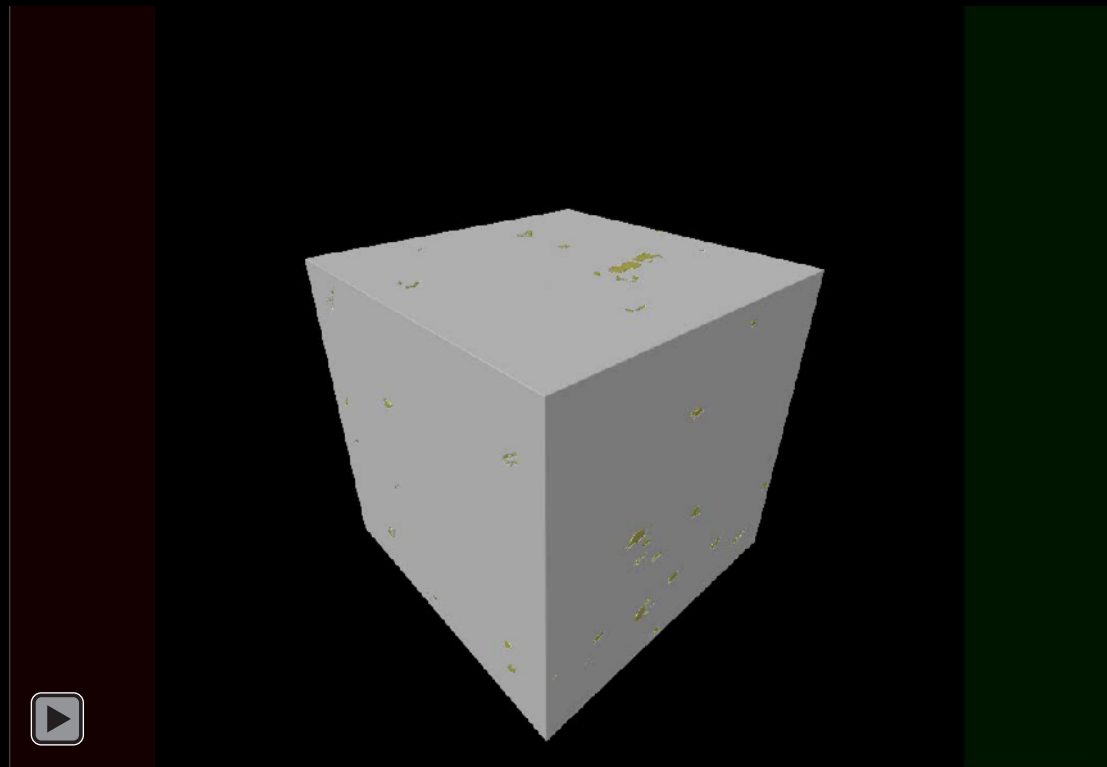
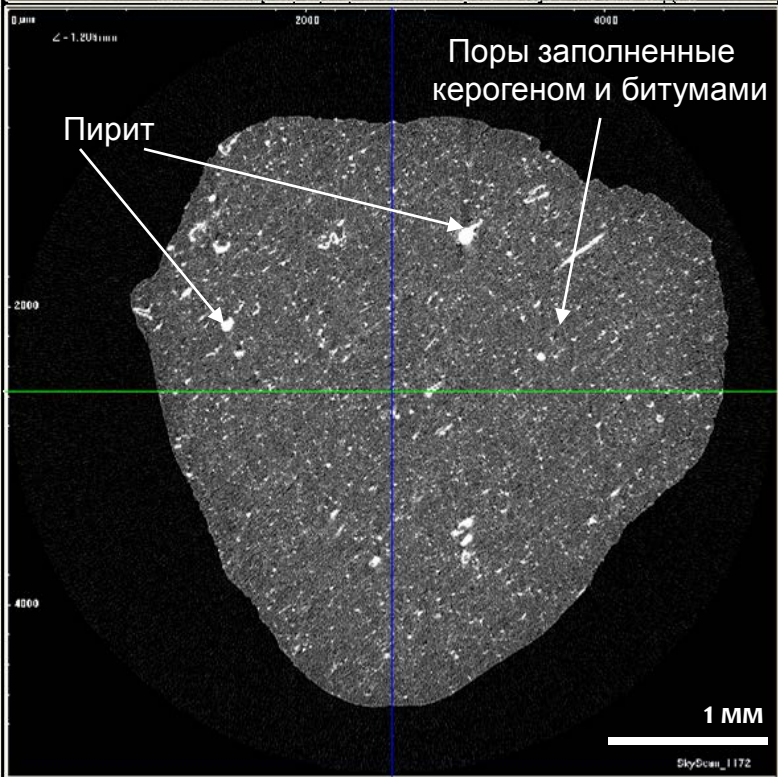
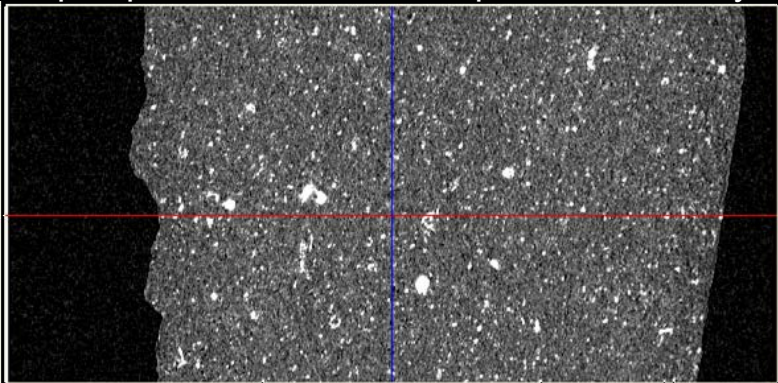
Зона размыва
цемента при
изготовлении образца

Палеонтологические исследования

Глинисто-кремнистая порода

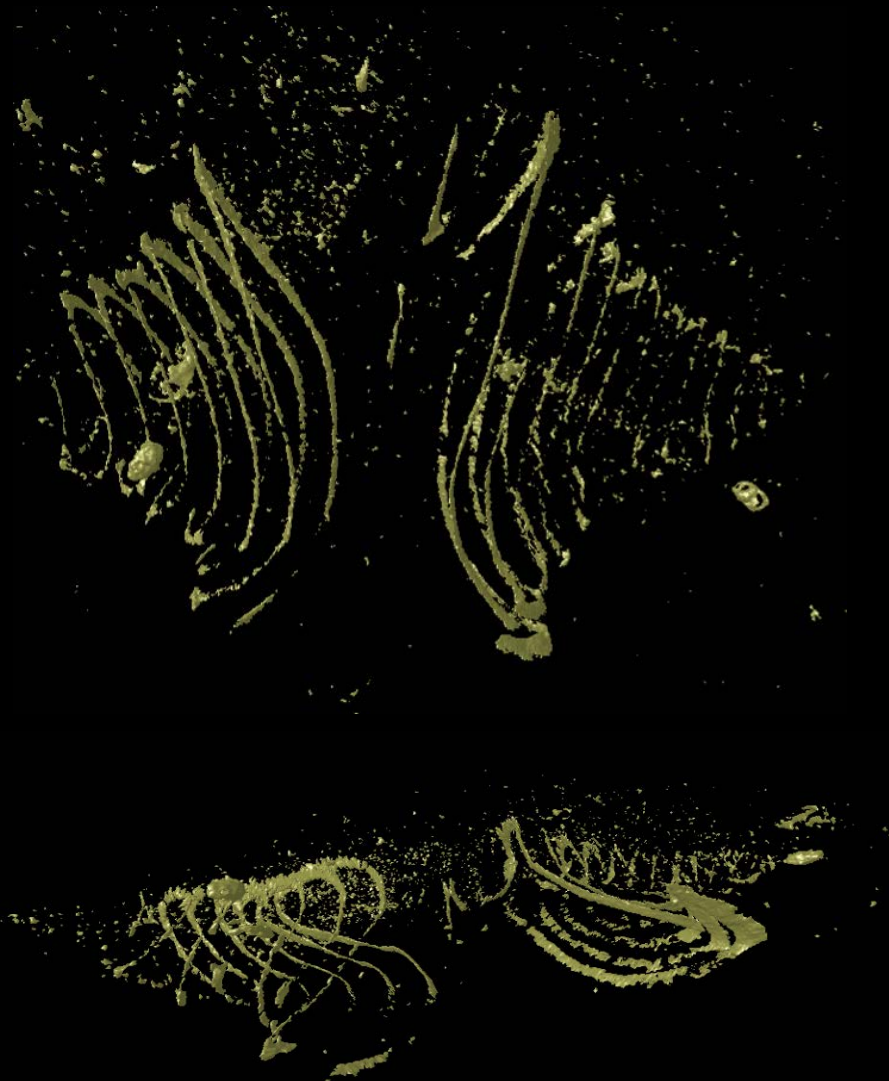
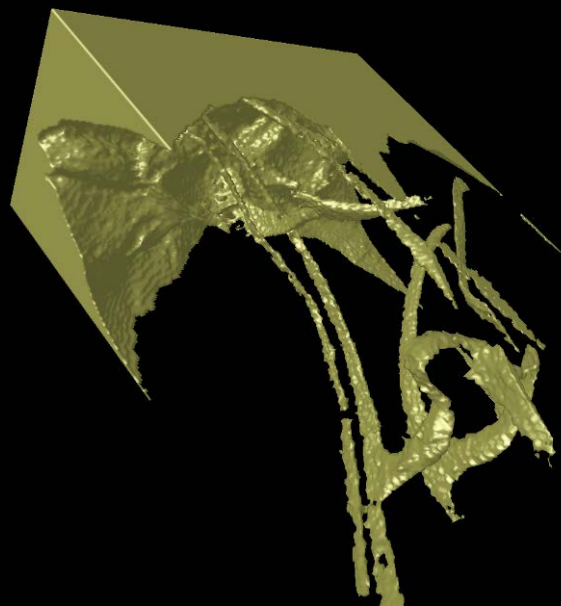
Баженовская свита

Пирит развит по останкам раковин и спикул



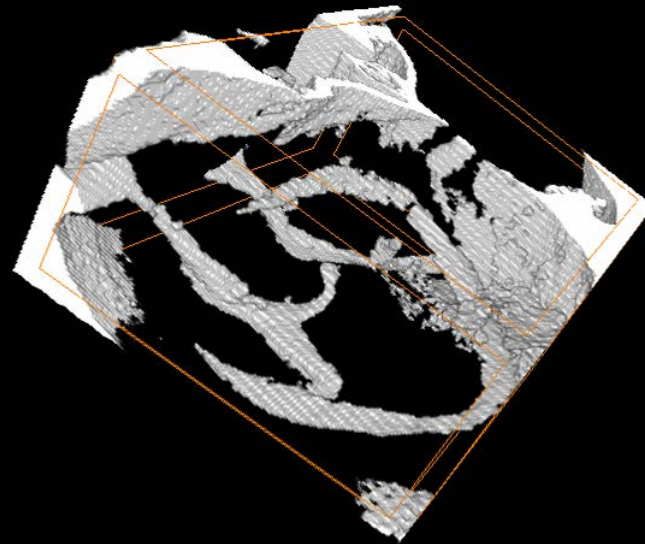
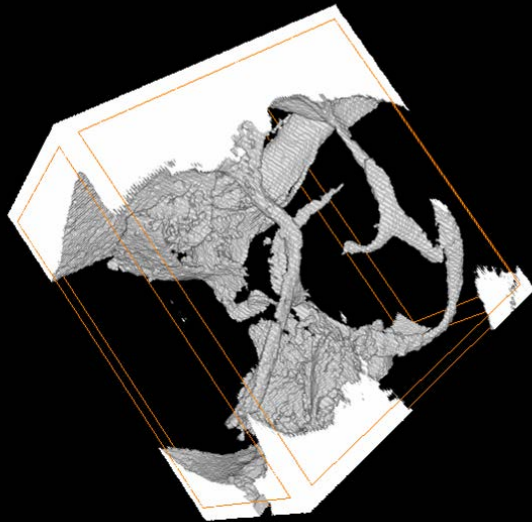
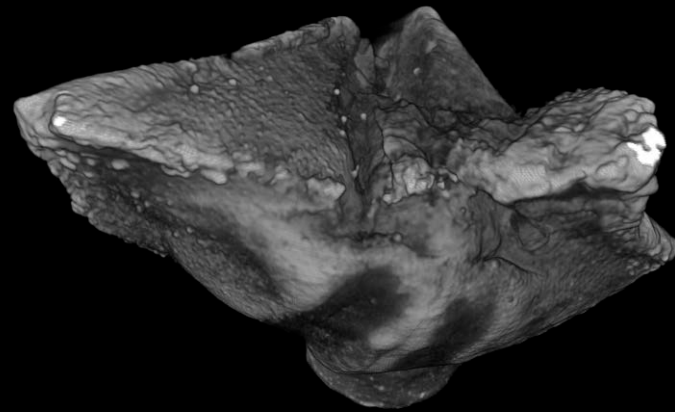
Пиритизация проходила выборочно, в зонах обогащенных органикой, где восстановительные условия, формирующиеся при разложении органического вещества послужили основными факторами аутигенной пиритизации

Палеонтологические исследования



Retzioides Wagner, 1888 (SKI)

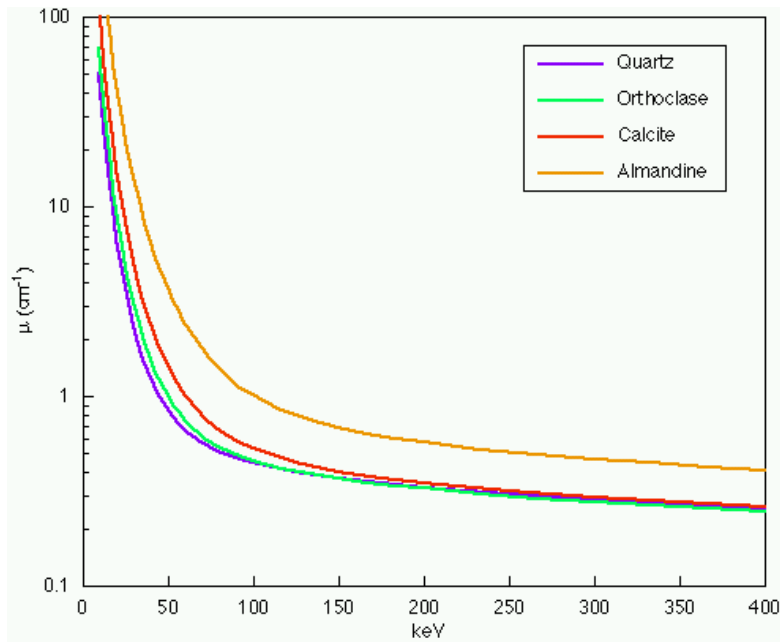
Палеонтологические исследования



? **Spiriferida Waagen, 1883 (O₃-T)**

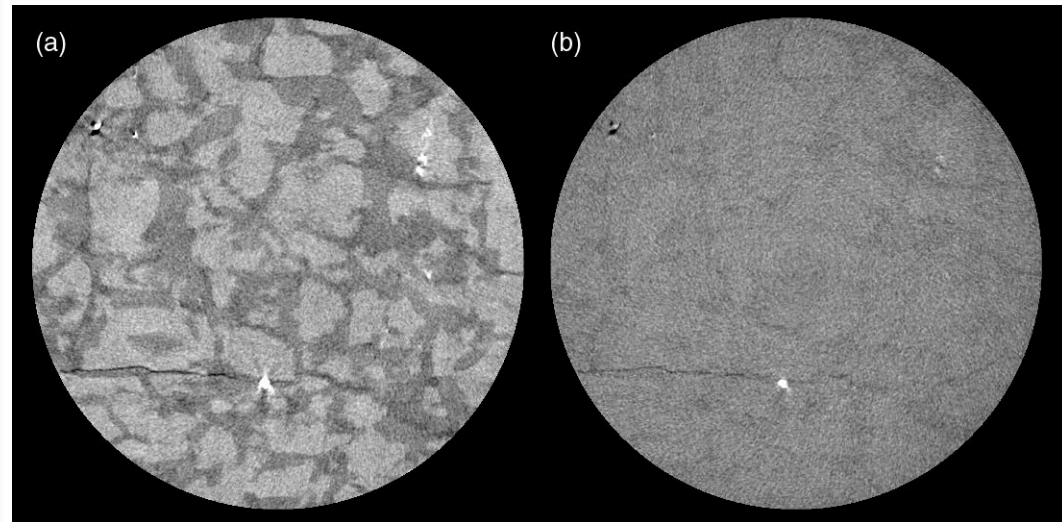
Определение состава

Разрешение метода по плотности



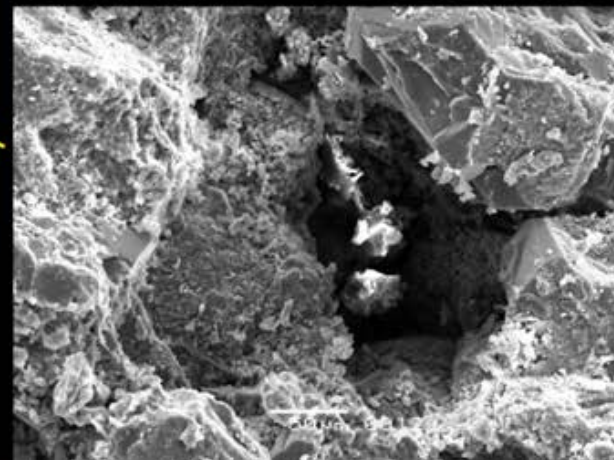
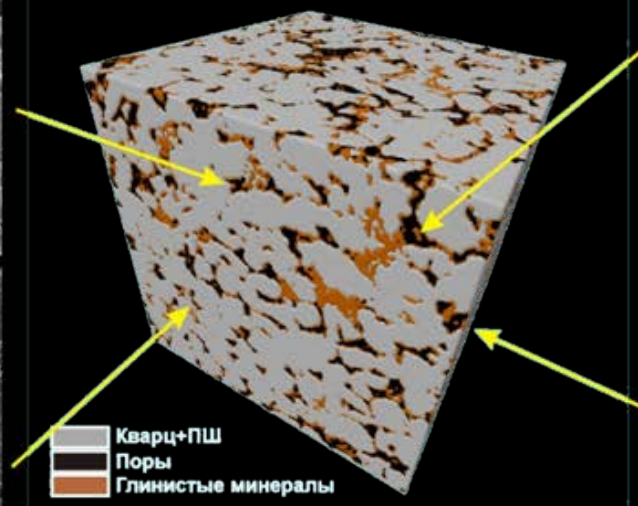
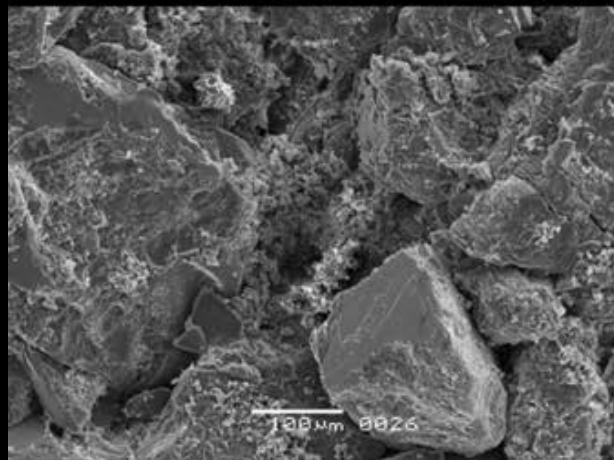
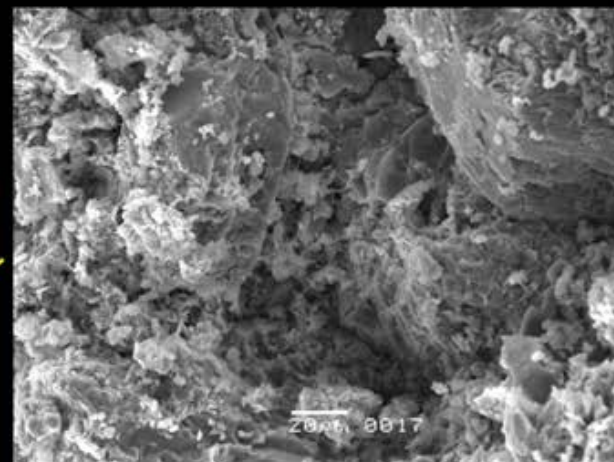
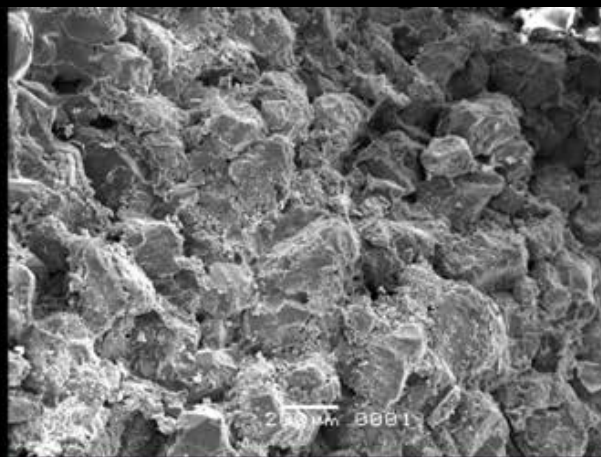
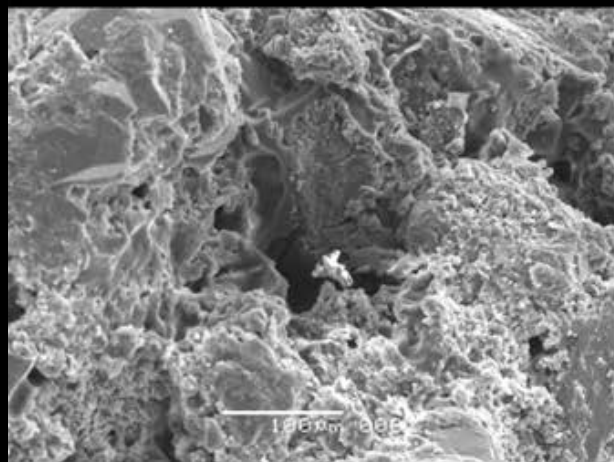
~ 60 кэВ

~ 400 кэВ

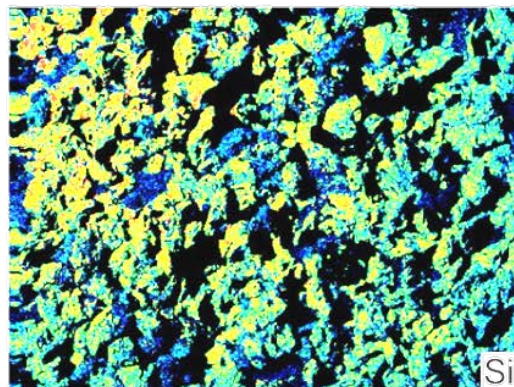
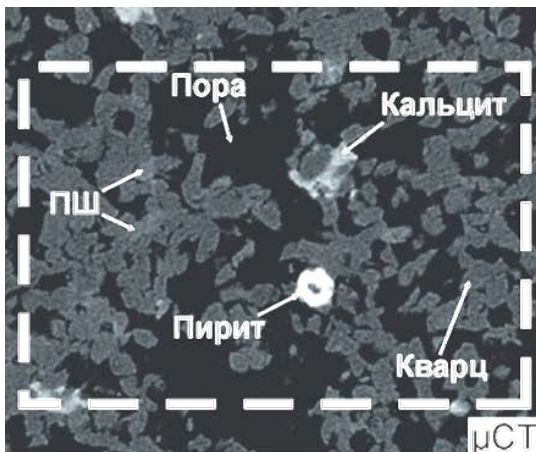


25 мм цилиндр
Гранит (кварц+ортоклаз)

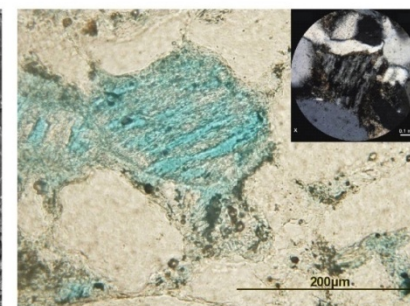
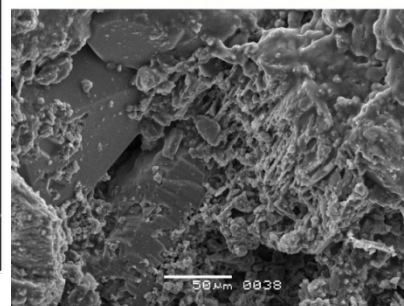
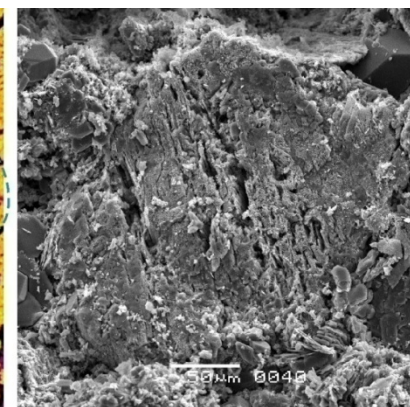
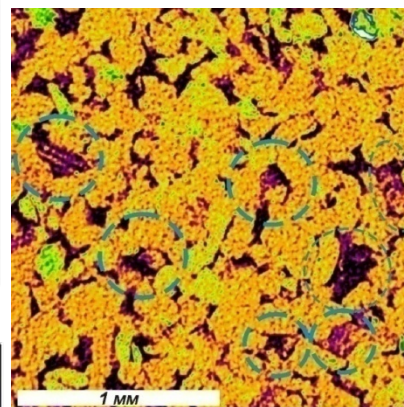
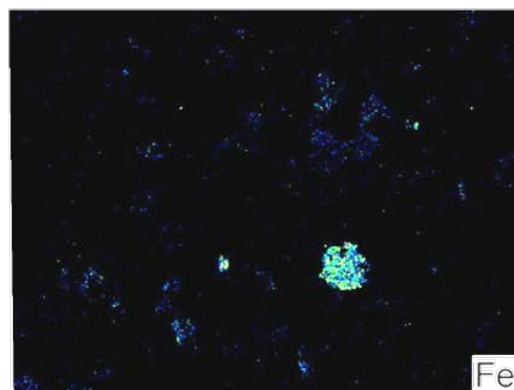
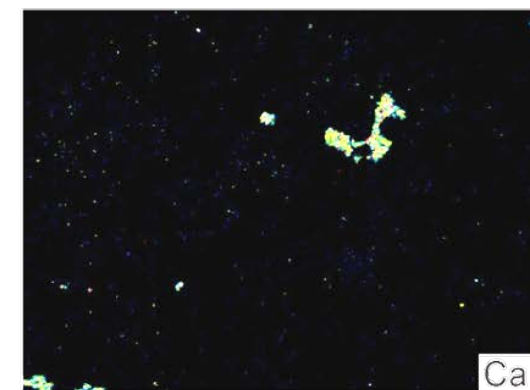
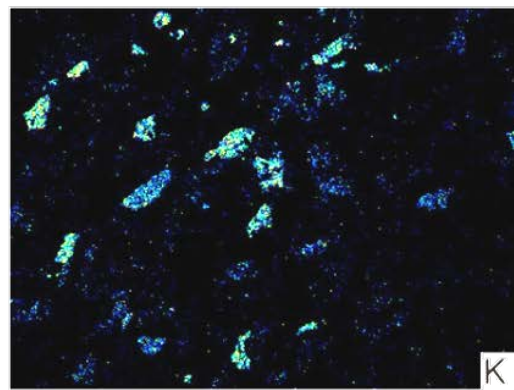
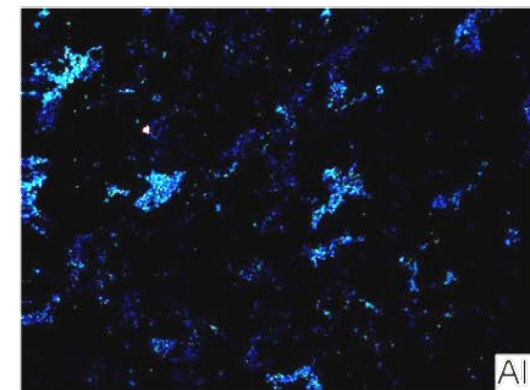
Построение объемной модели



Определение состава



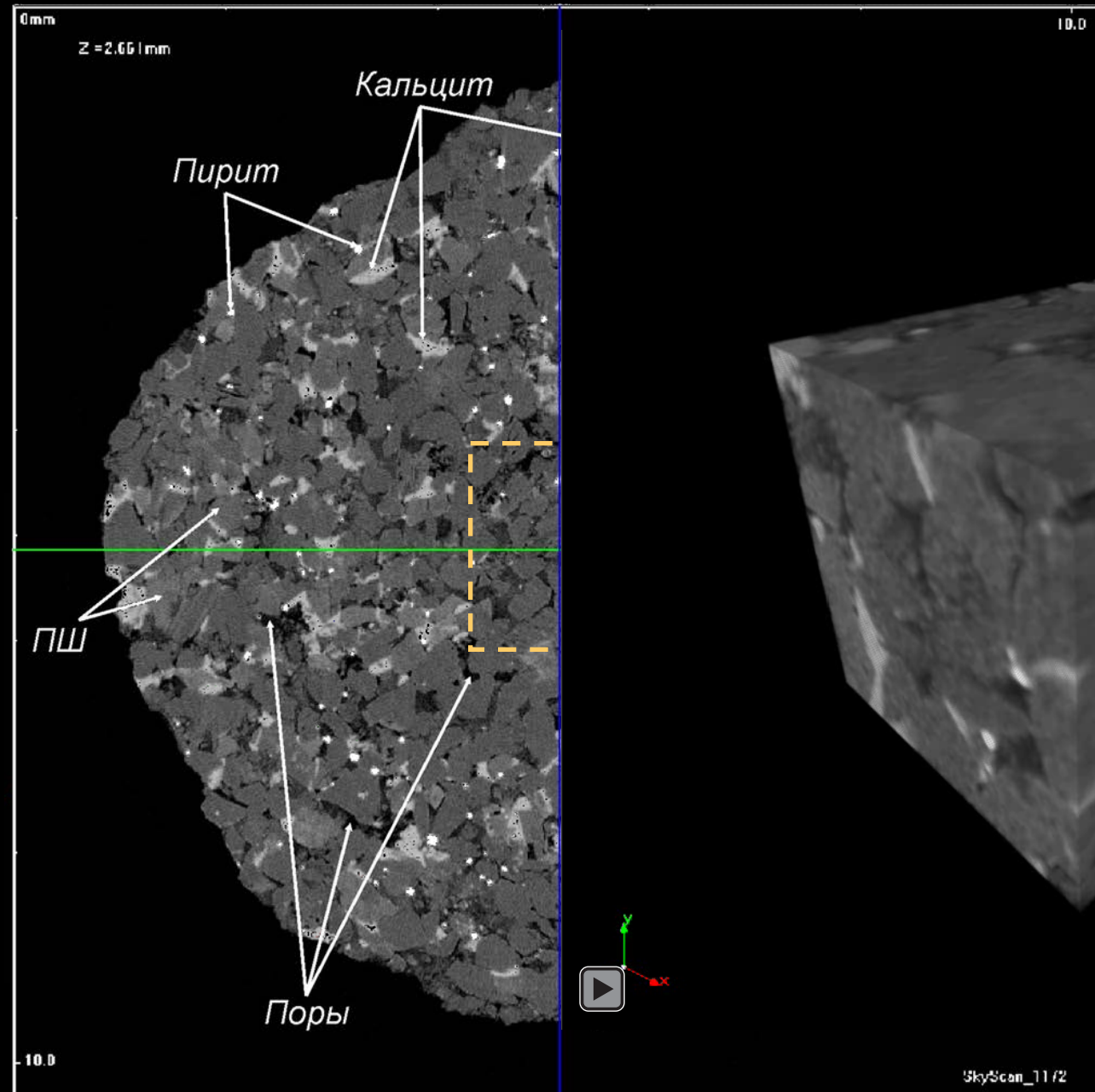
При решении геологических задач широко применяются методики идентификации состава с помощью классических петрографических методов



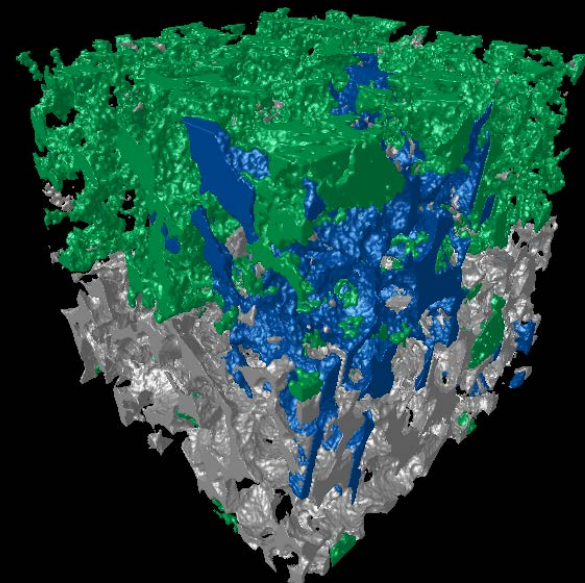
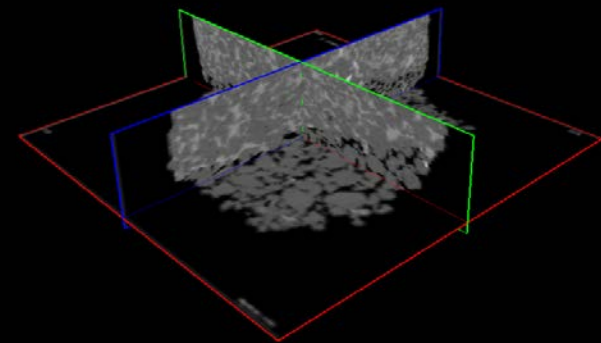
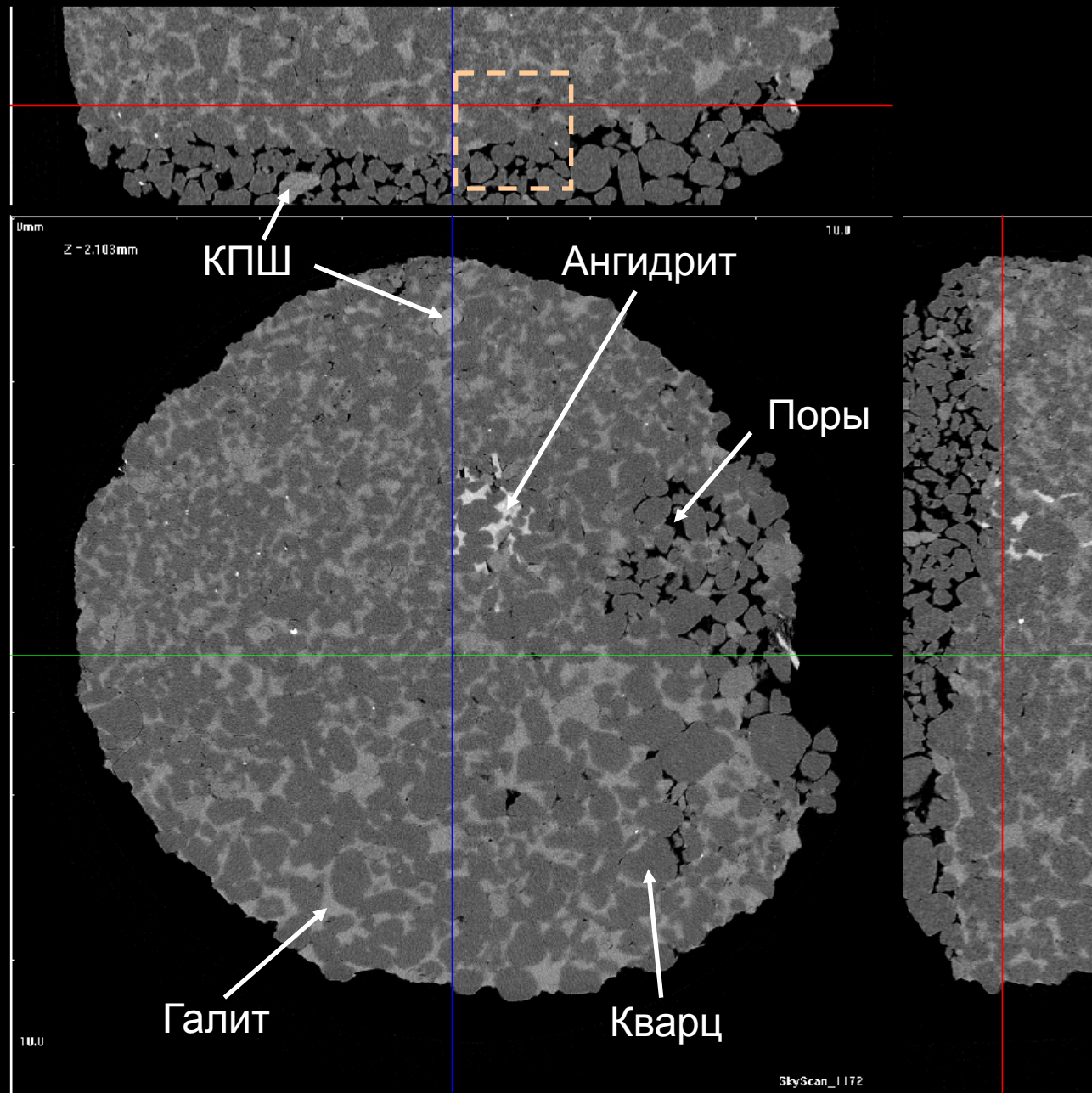
Использование сканирующего электронного микроскопа

Идентификация отдельных зерен по особенностям их морфологии

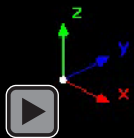
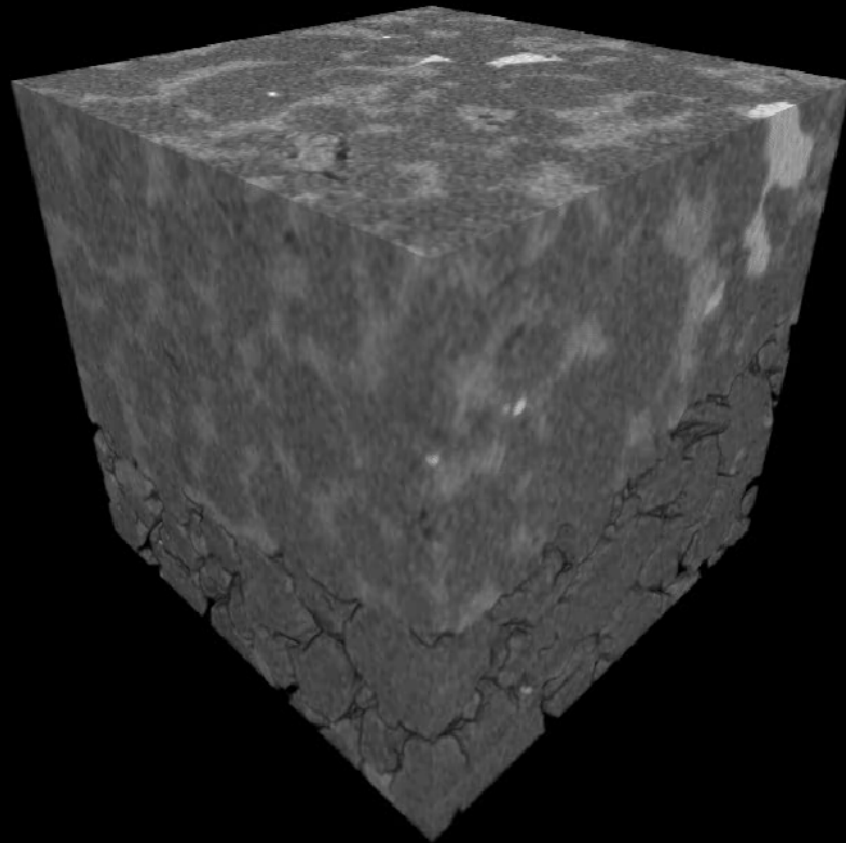
Построение объемной модели



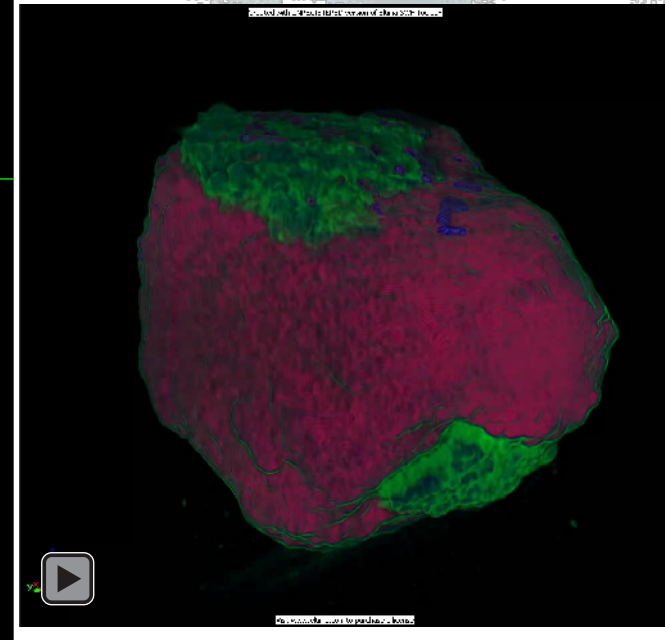
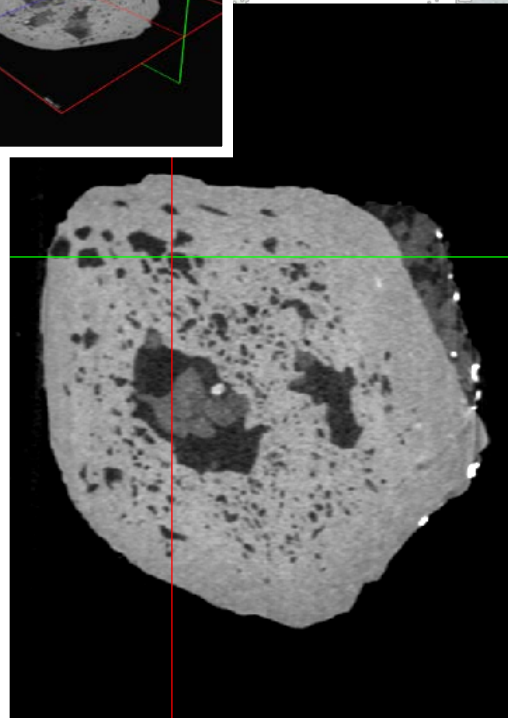
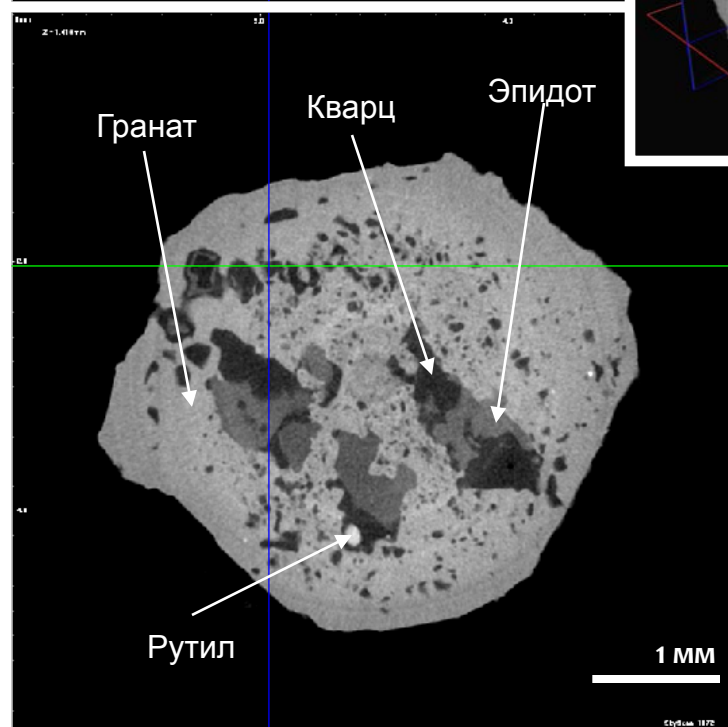
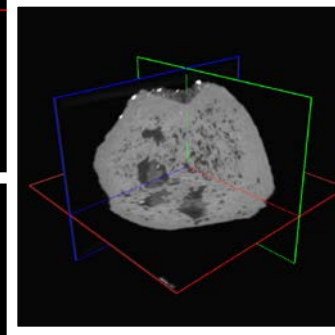
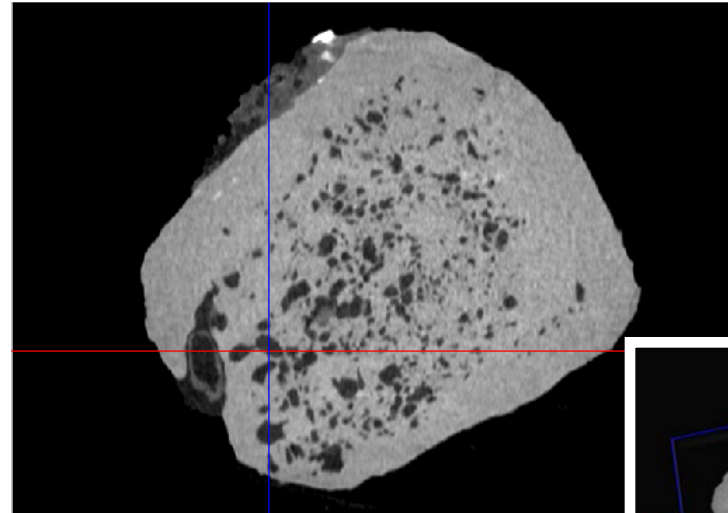
Построение объемной модели



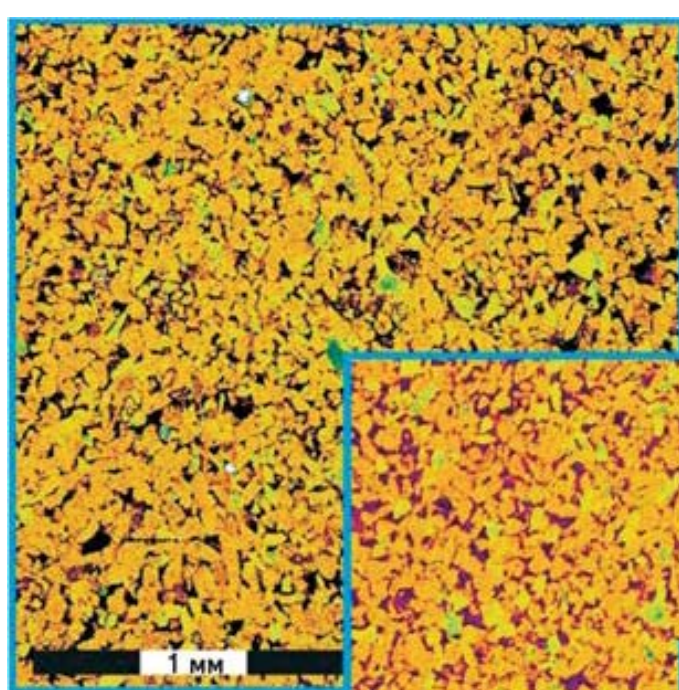
Изучение засоленных кернов



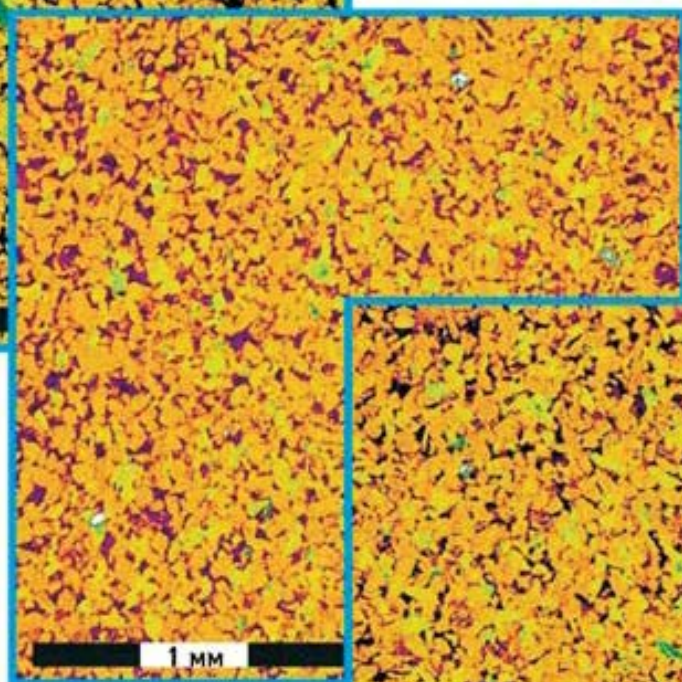
Гранат



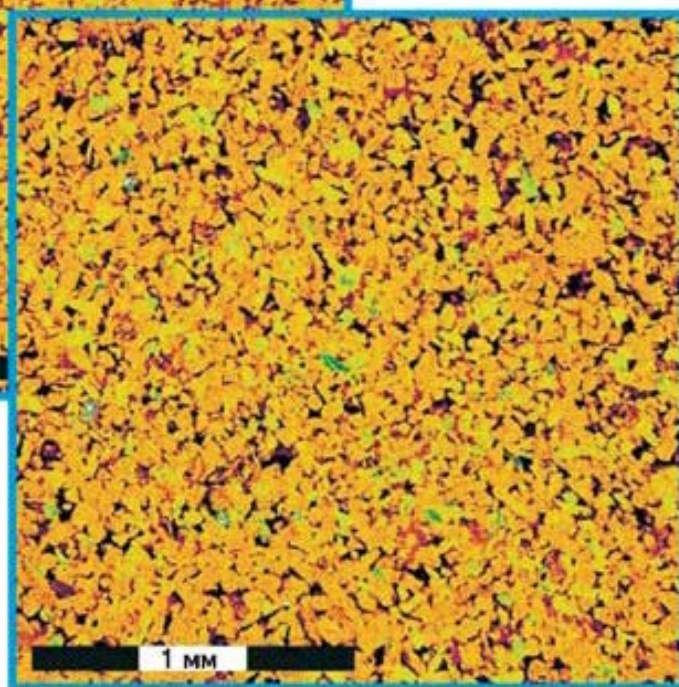
А Изучение строения пустотного пространства при переменной насыщенности



Сухой образец
 $P_C = \infty$



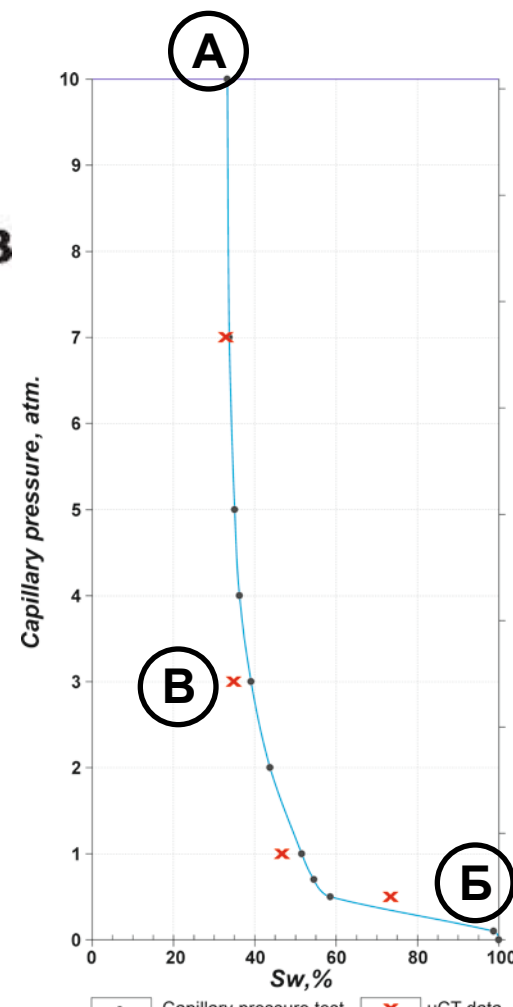
Насыщенный образец $P_C=0$



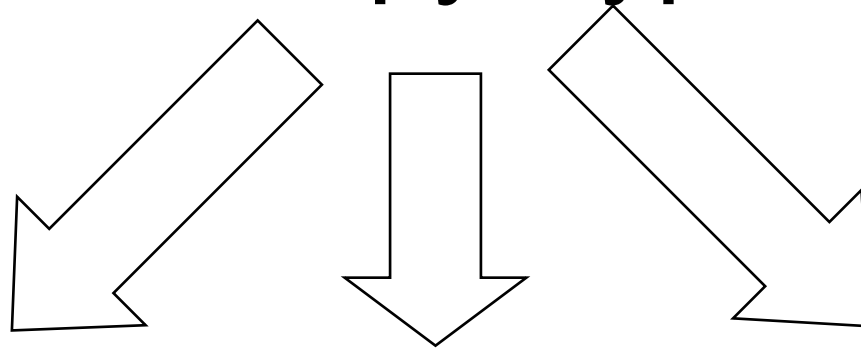
Частично насыщенный образец
 $P_C=3$

Б

В



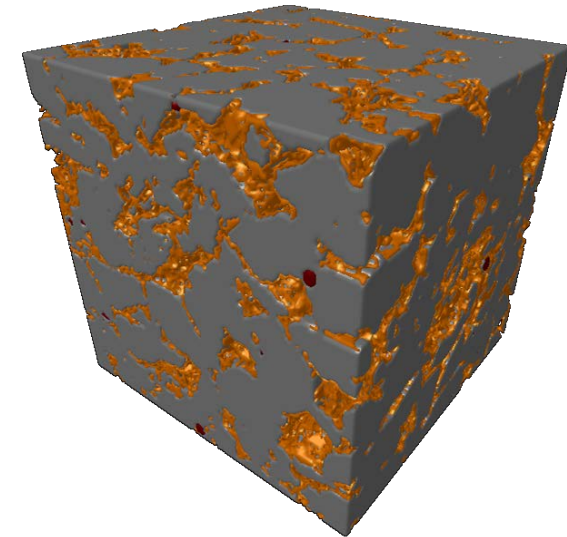
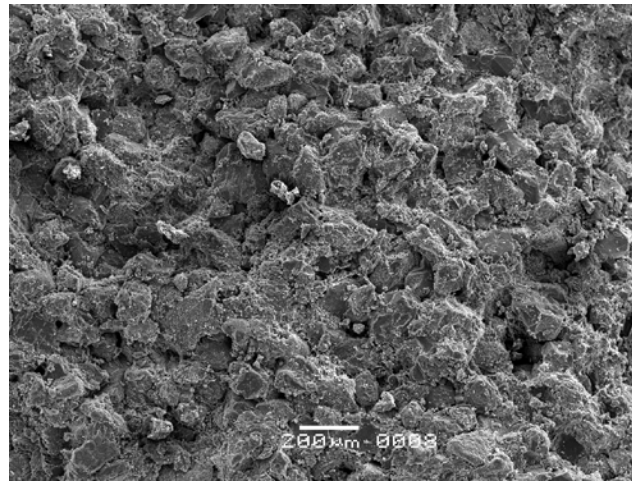
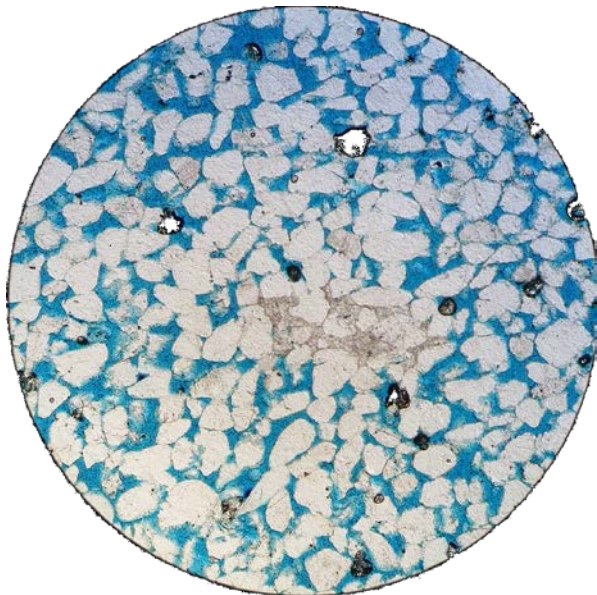
Описание структуры породы



**Оптический
микроскоп**

РЭМ

**Томография
 μ КТ**

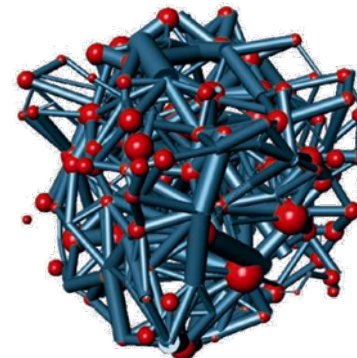
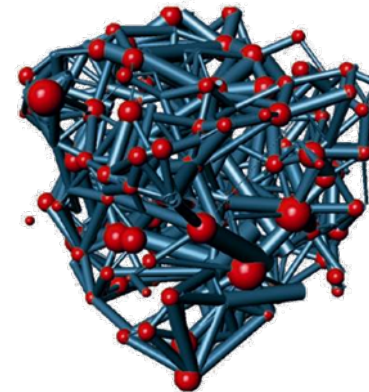
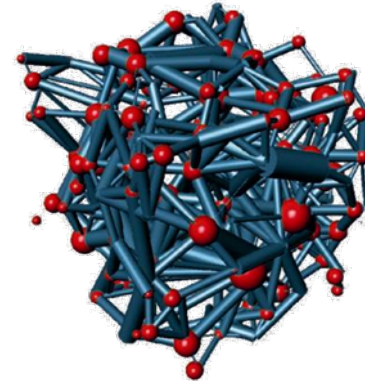
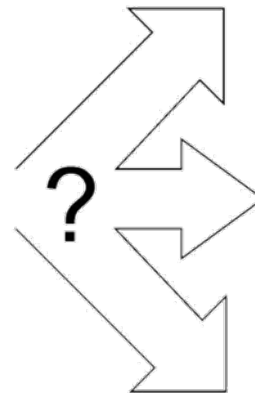
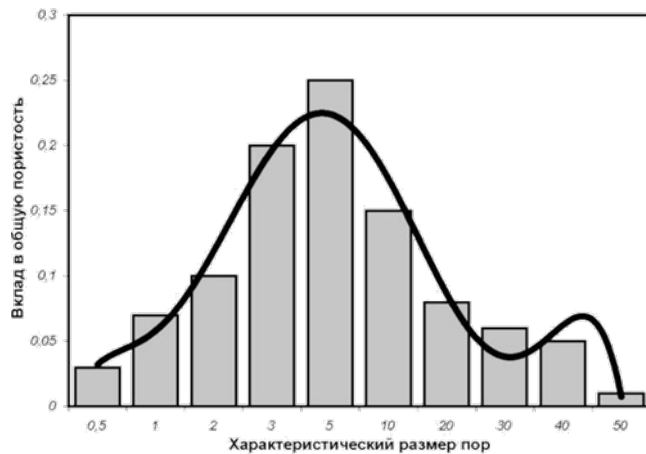


2D

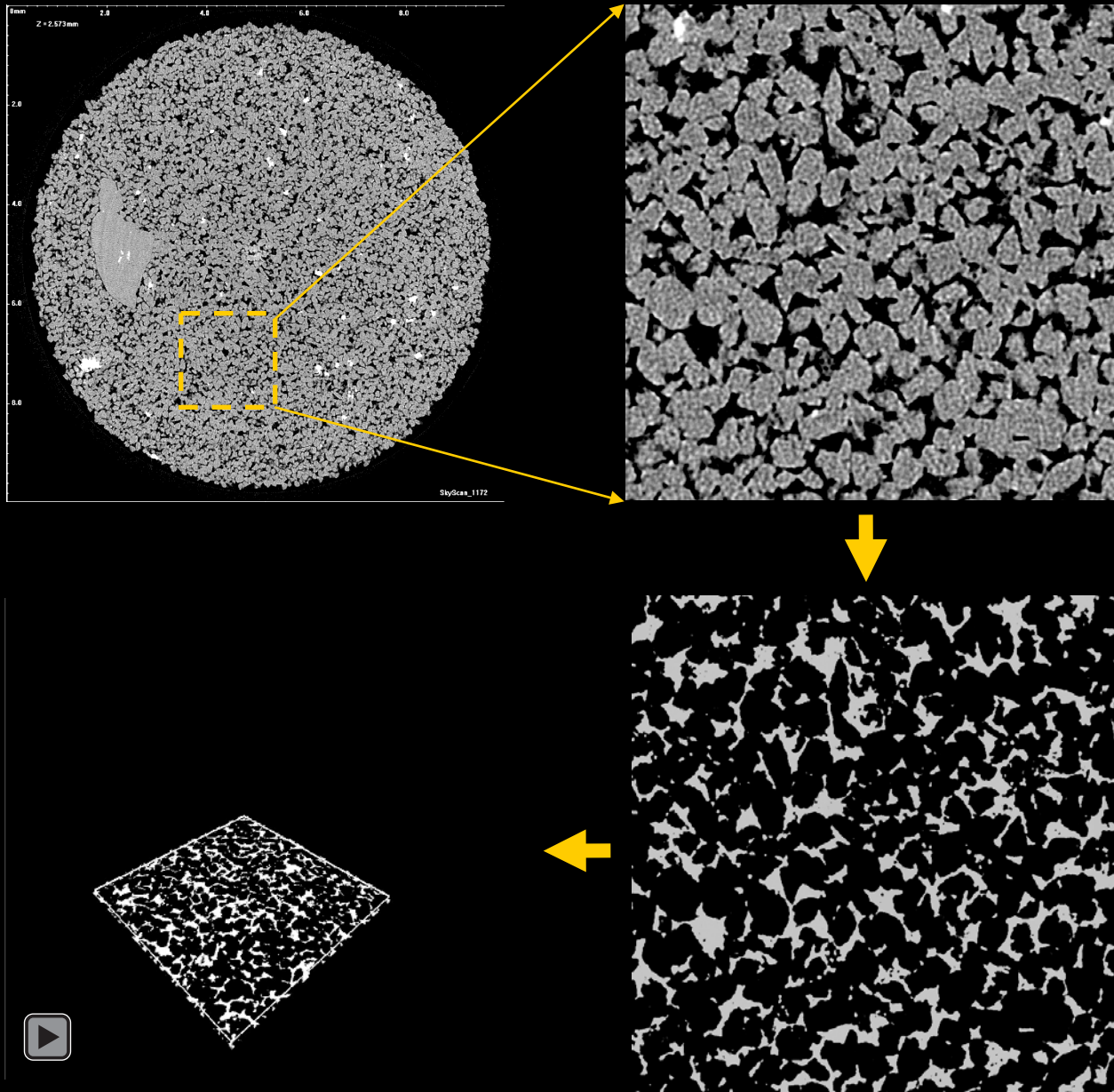
Псевдо 3D

3D

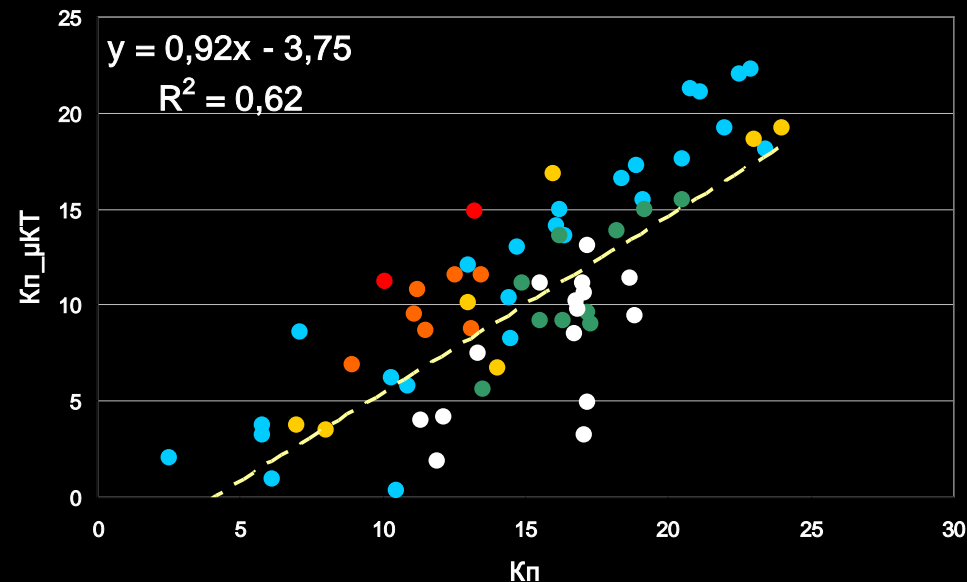
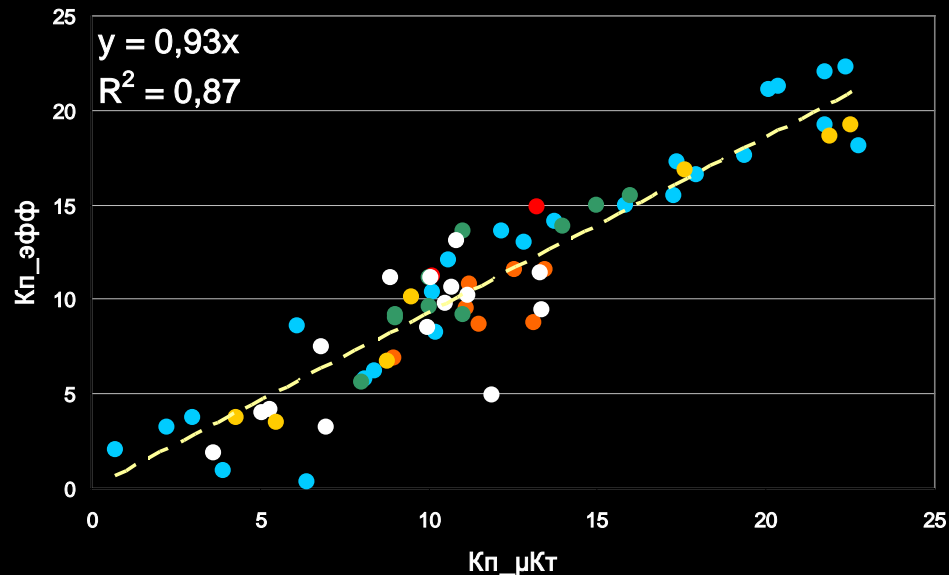
Полуинтегральная характеристика структуры пустотного пространства



Построение объемной модели



Оценка корректности модели

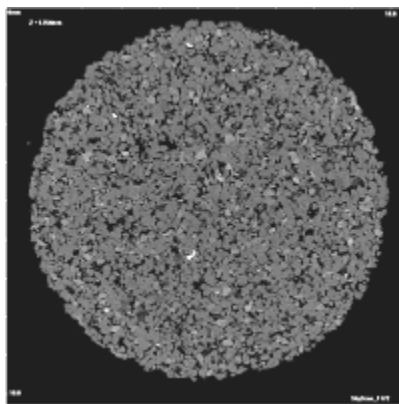
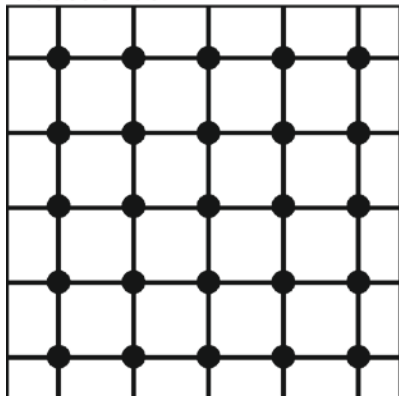


Район	Возраст	Тип пород	Цемент	Кпр, мД
Зап. Сибирь	● J_{2k}	Алевролит, песч. м/з	Глины, карб.	0,01-200
Зап. Сибирь	● J_{1a}	Песч. м/з	Глины, карб.	10-40
Зап. Сибирь	● K_{1b-v}	Песч. м-с/з	Глины	0,01-20
Зап. Сибирь	● K_{1b-v}	Песч. м-с/з	Глины, карб.	0,01-15
Вост. Сибирь	● V	Песч. с/з	Глины, карб.	0,01-50
Прикаспий	● D_{2g}	Песч. м/з	Соли	1-1000

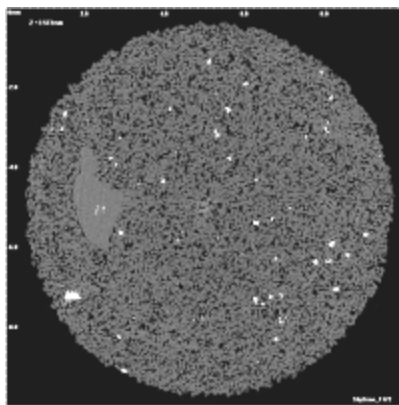
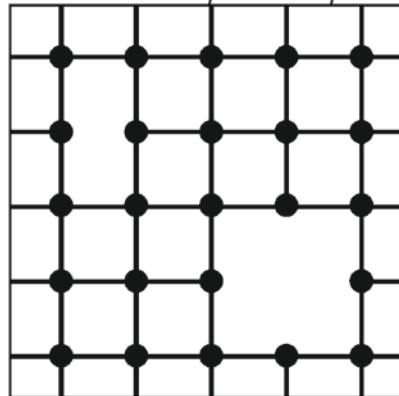
Выделение типов строения пустотного пространства

Первично-реликтовые

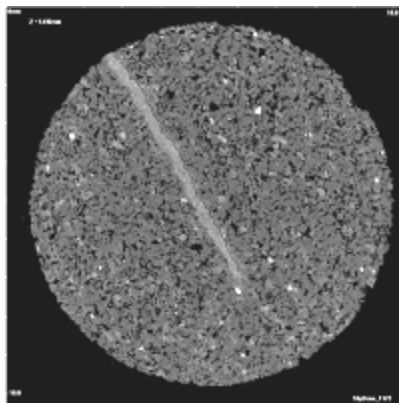
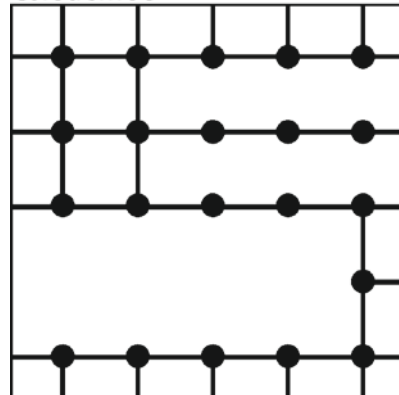
Массивное



Массивное неравномерное

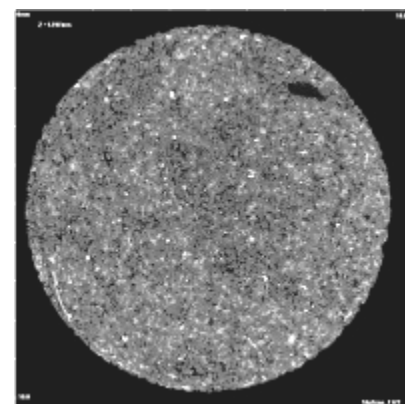
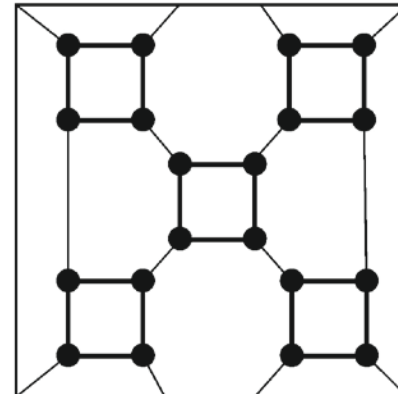


Слоистое

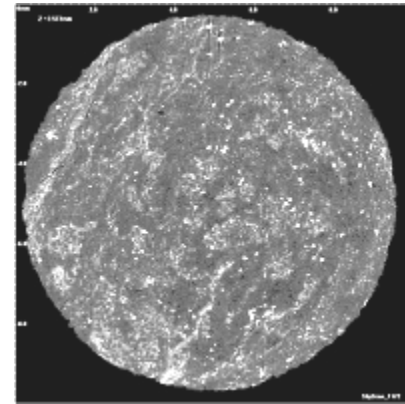
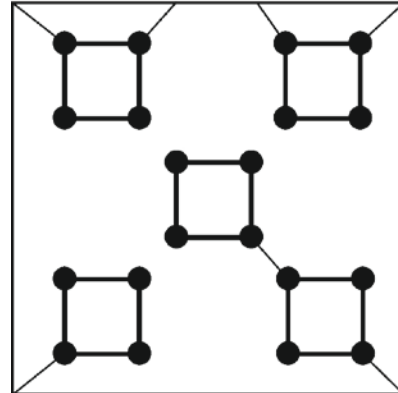


Вторично-преобразованные

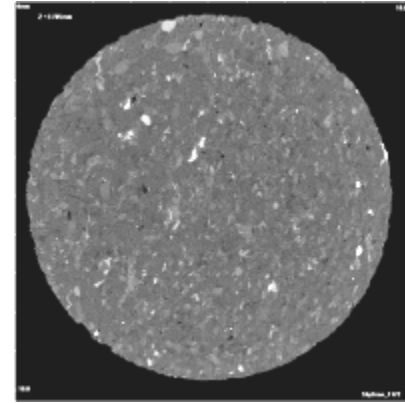
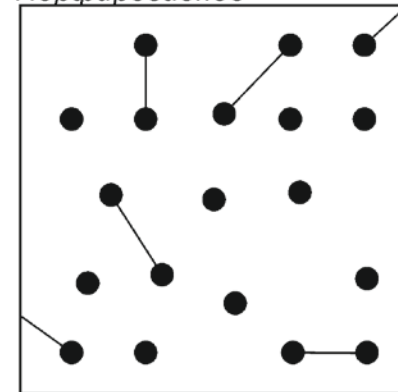
Ячеистое



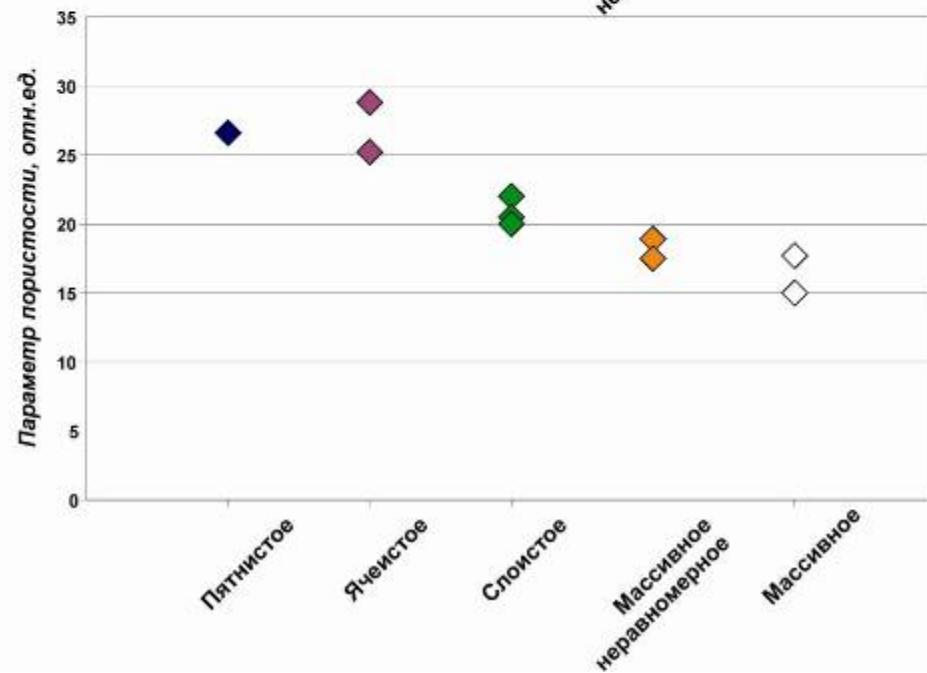
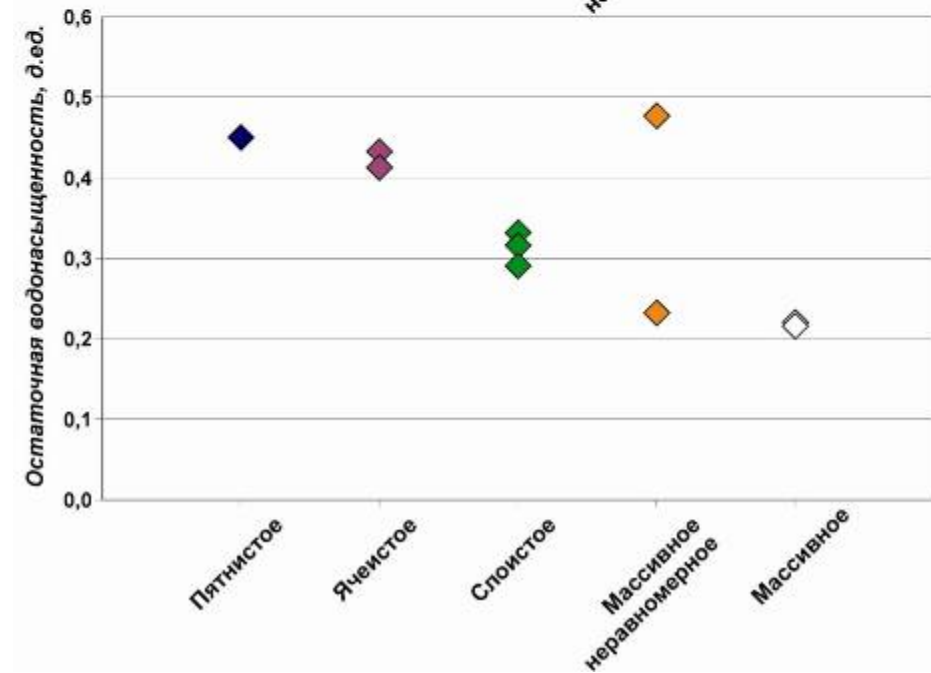
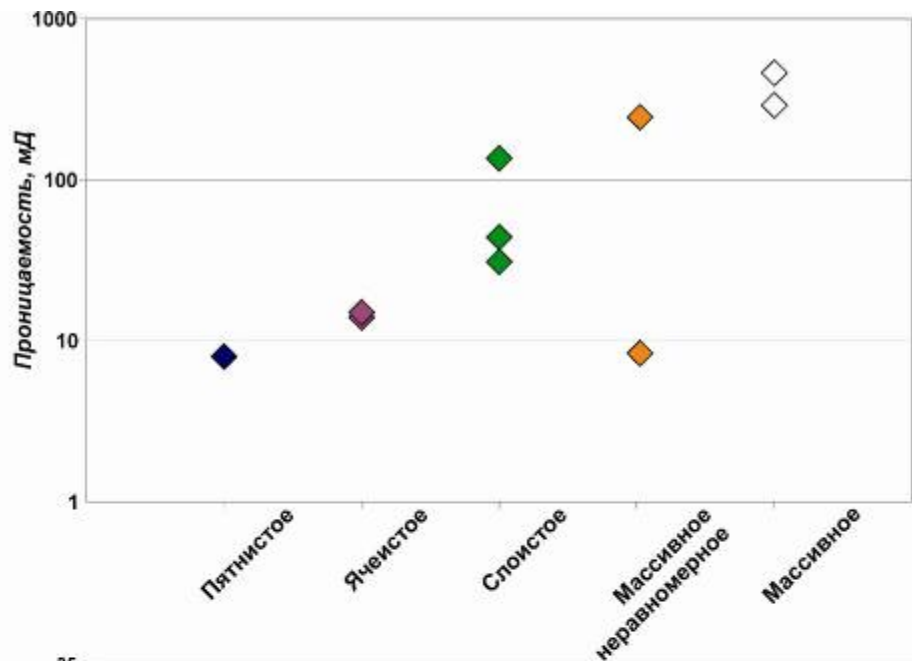
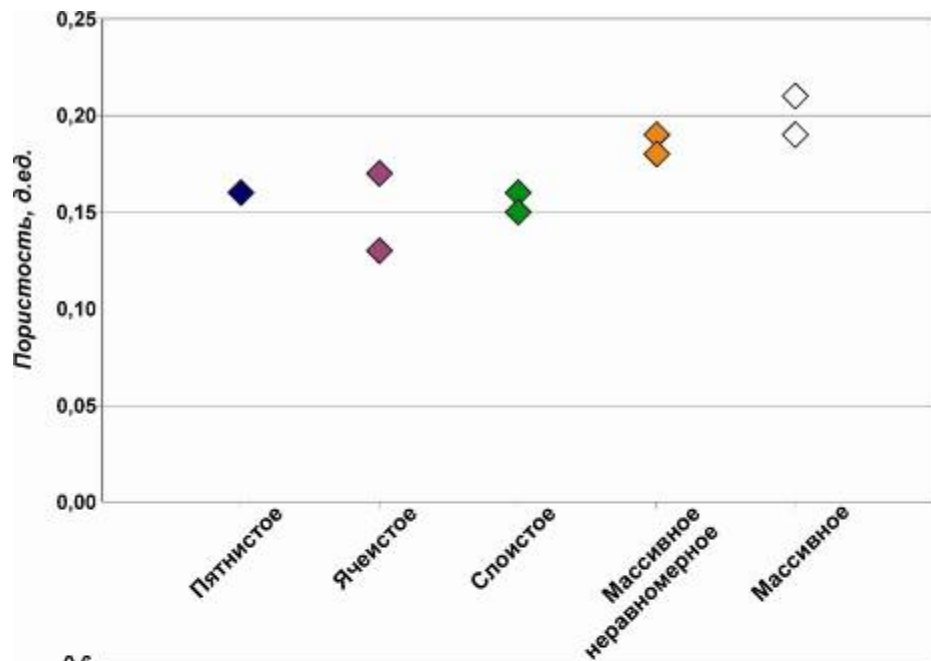
Пятнистое



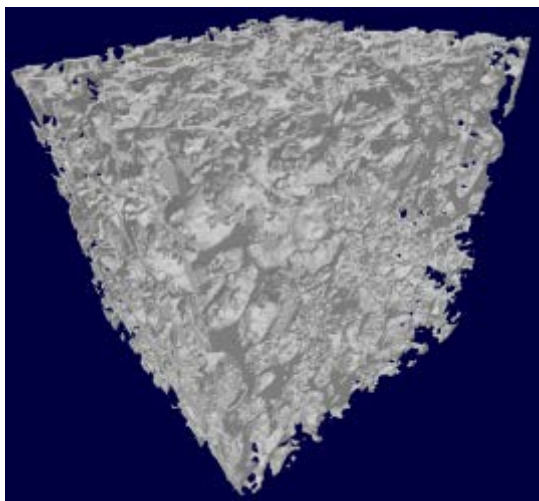
Порфировидное



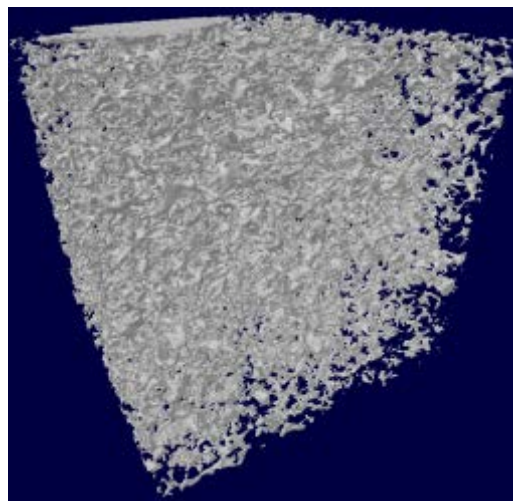
Выделение типов строения пустотного пространства



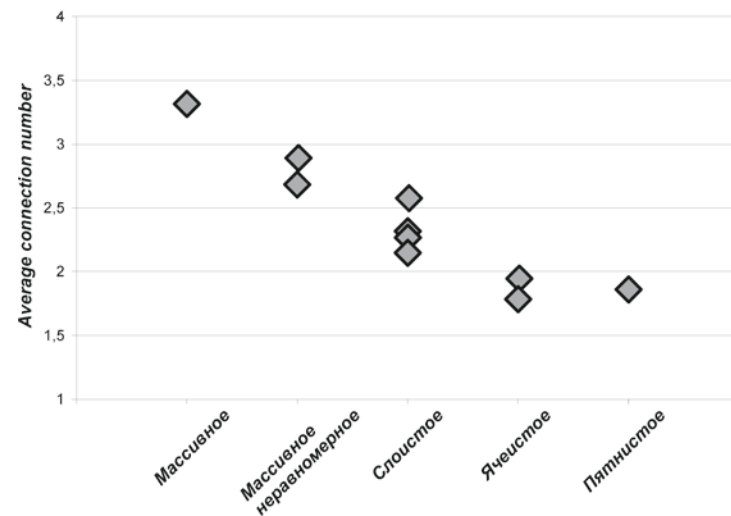
Выделение типов строения пустотного пространства



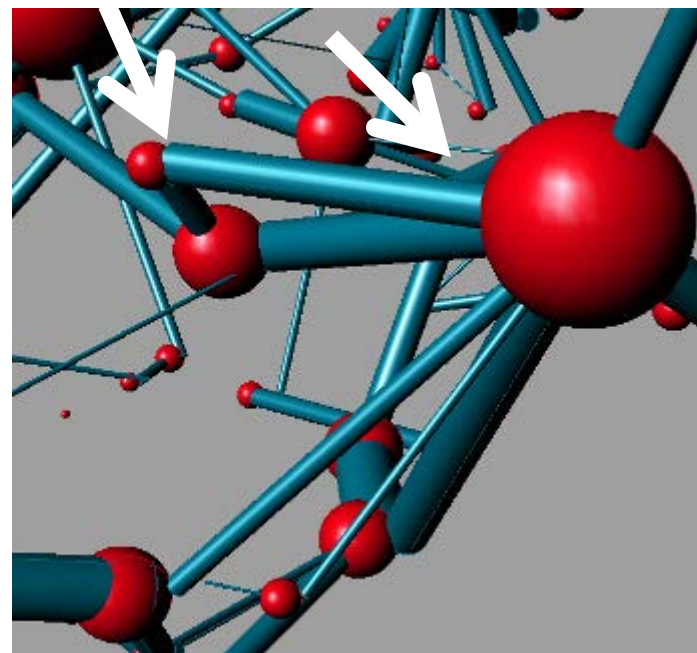
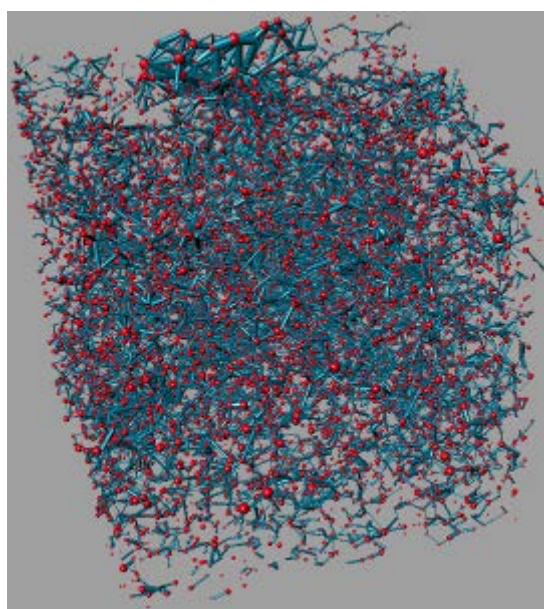
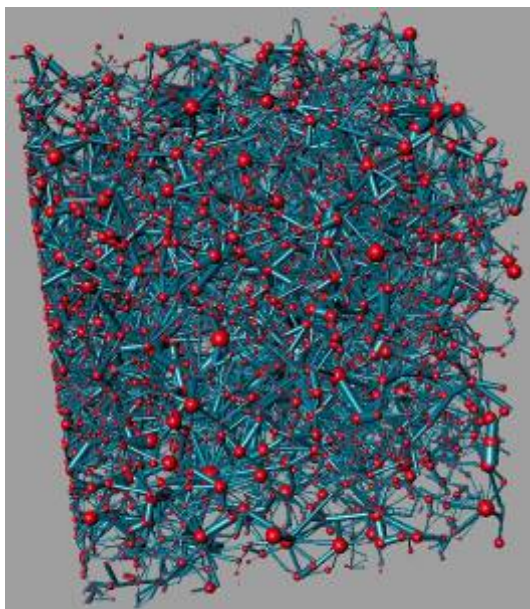
Пор/перемычек 6054/ 12813
 Ave. connect. number 4.15461
 Проницаемость 560 мД



Пор/перемычек 12698 / 14263
 Ave. connect. number 2.1968
 Проницаемость 3.6 мД



Average connection number – среднее количество фильтрующих радиусов у поры (Al-Kharusi, 2007)

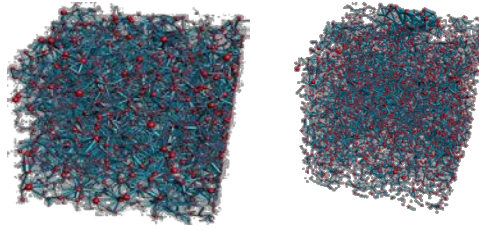


Численные методы

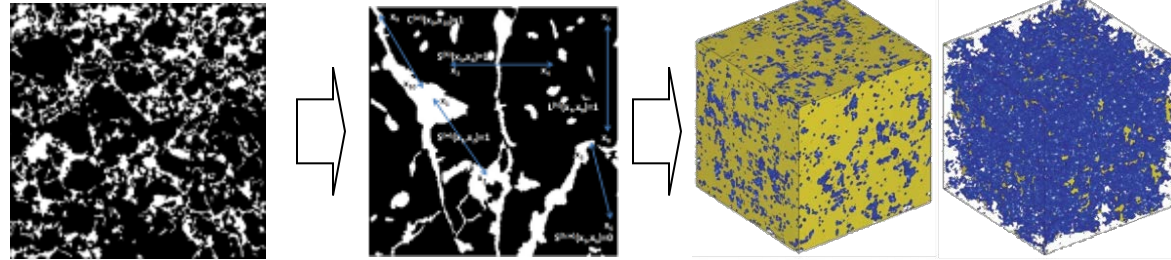
Модель Козени-Кармана и ее модификации

$$k = \phi^2 / 2F\bar{s}^2$$

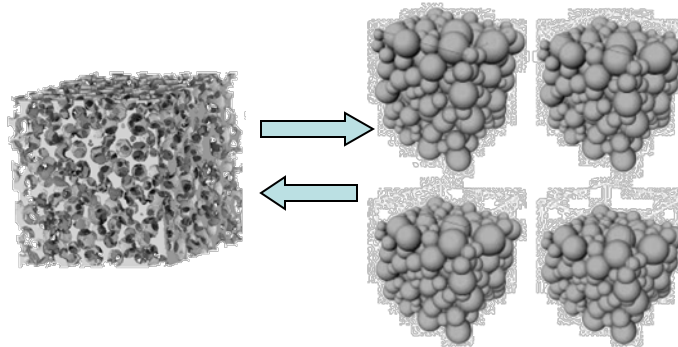
Сеточные модели 2D/3D



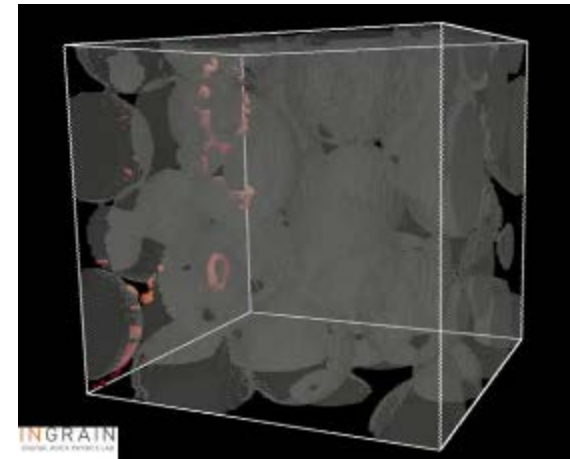
Статистические методы



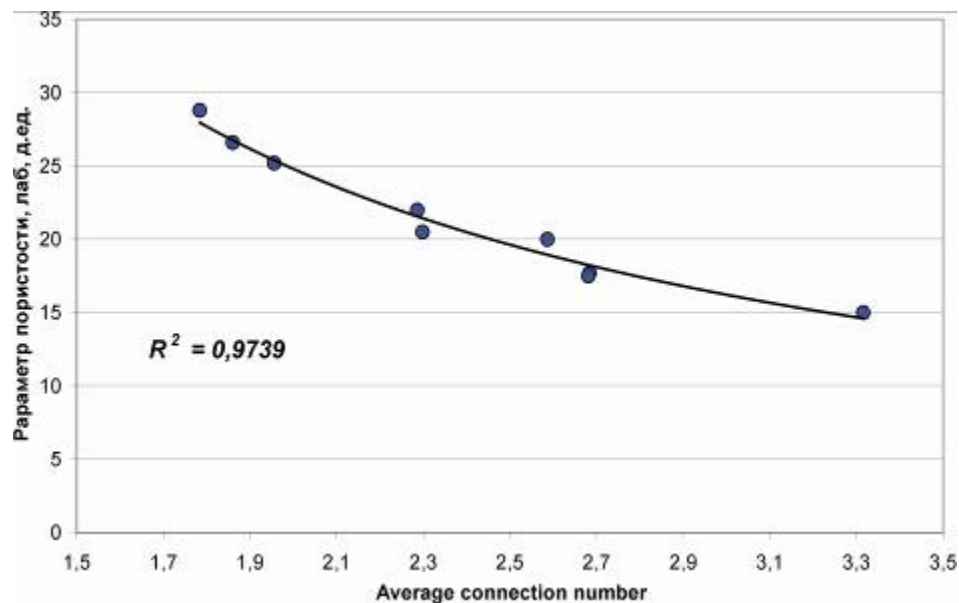
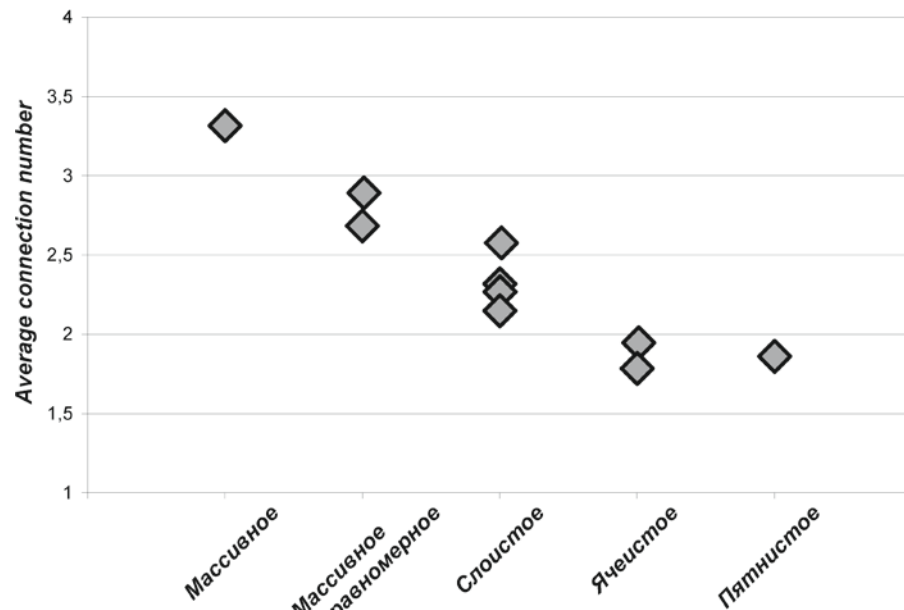
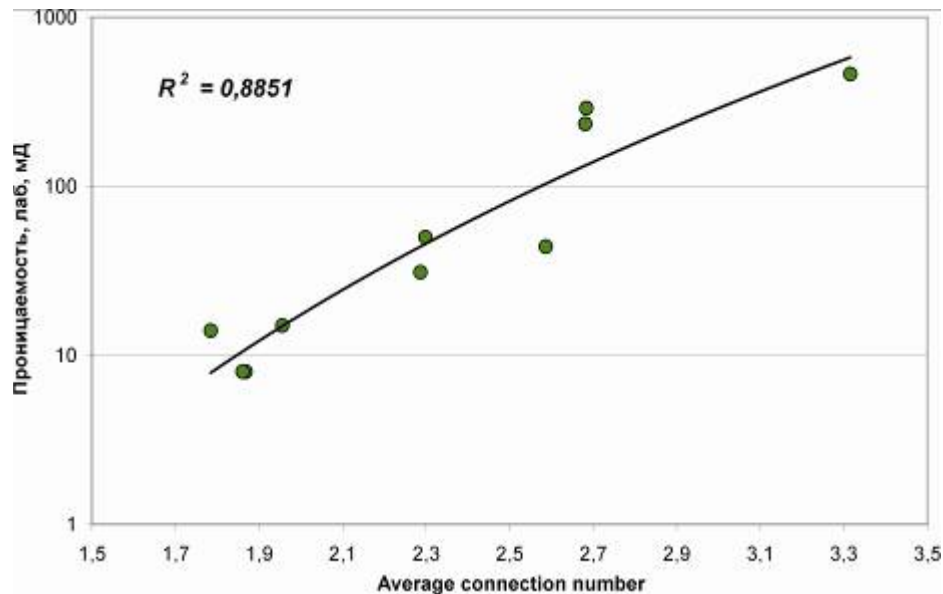
Processed-based метод



Метод конечных элементов (FEM)
и решеточные методы Больцманна (LBM)



Выделение типов строения пустотного пространства

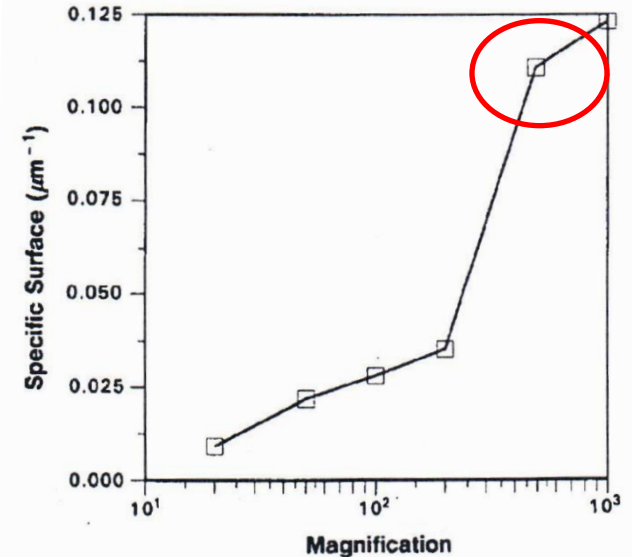
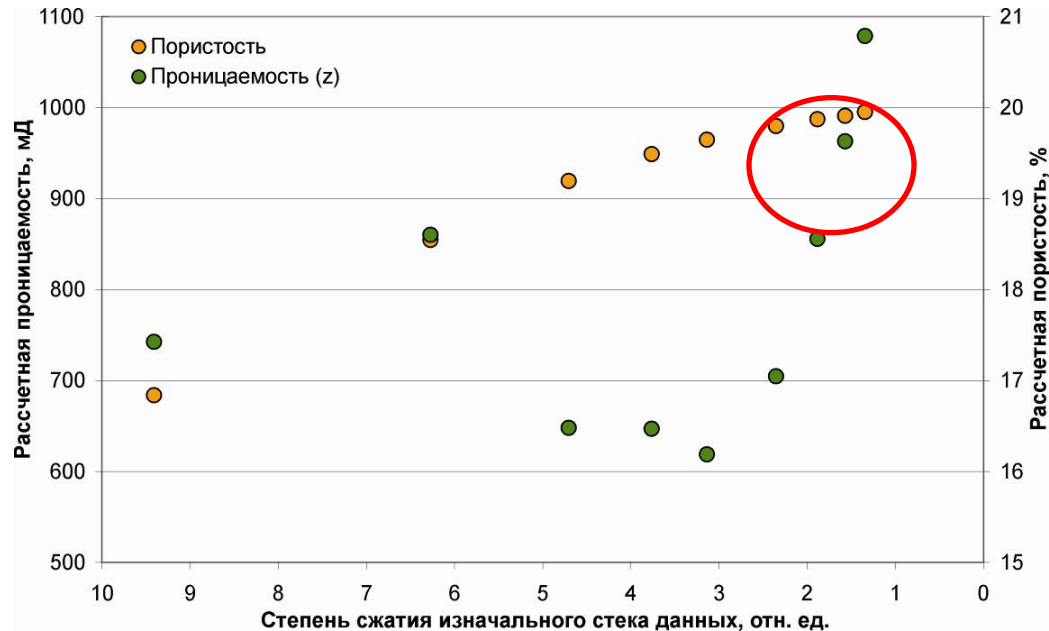


Строение пустотного пространства определяет основные ФЕС пород

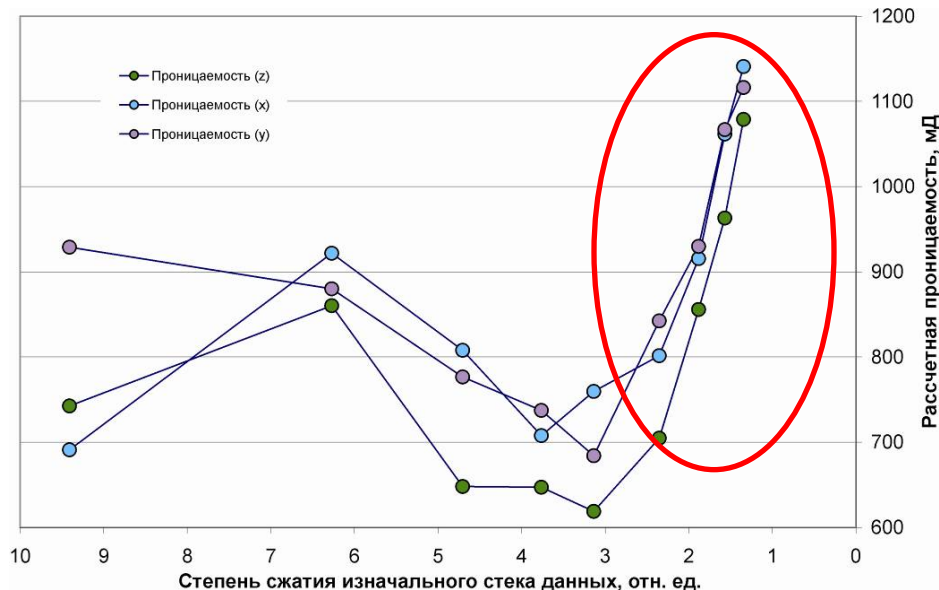
Предложенные типы строения пустот могут служить новым классификационным признаком качества коллекторов

Моделирование свойств

Влияние степени сжатия изображения на качество моделирования



[Berryman and Blair, 1986]



Разрешение образца является важным фактором, который необходимо учитывать при моделировании.

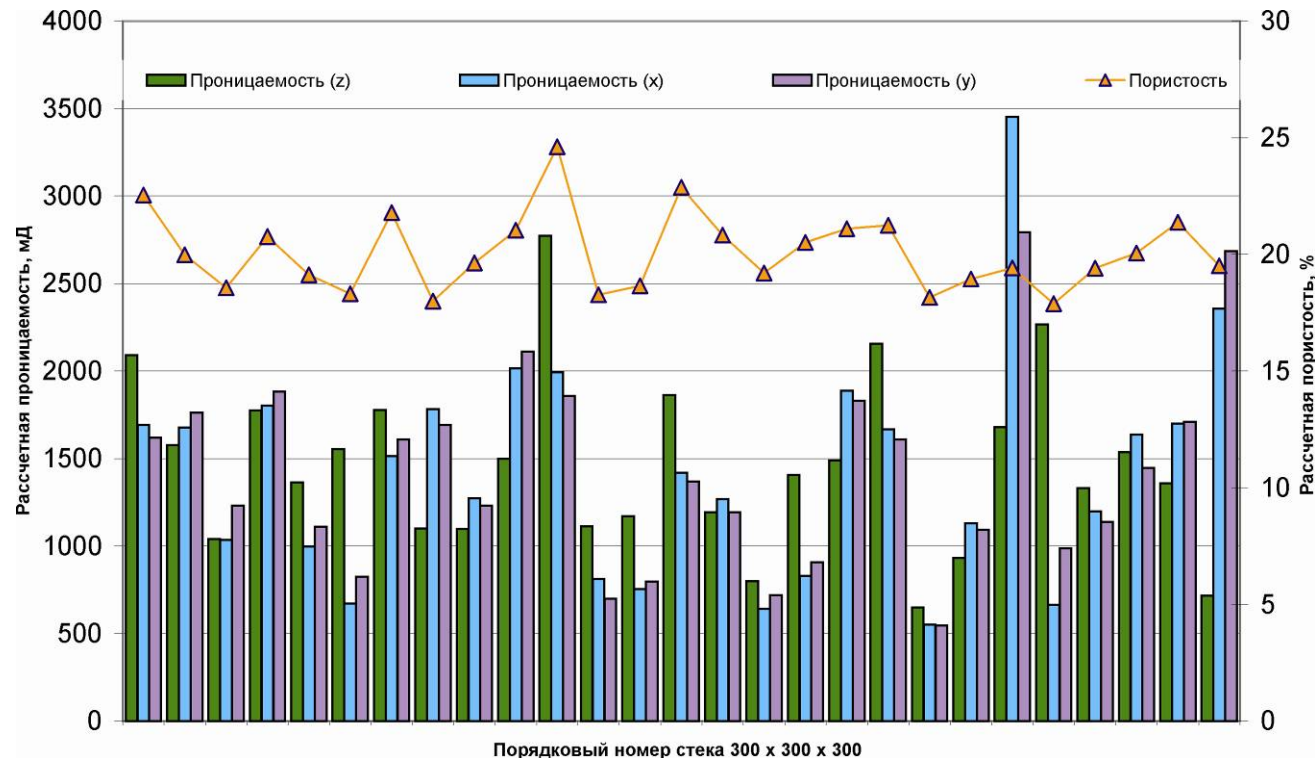
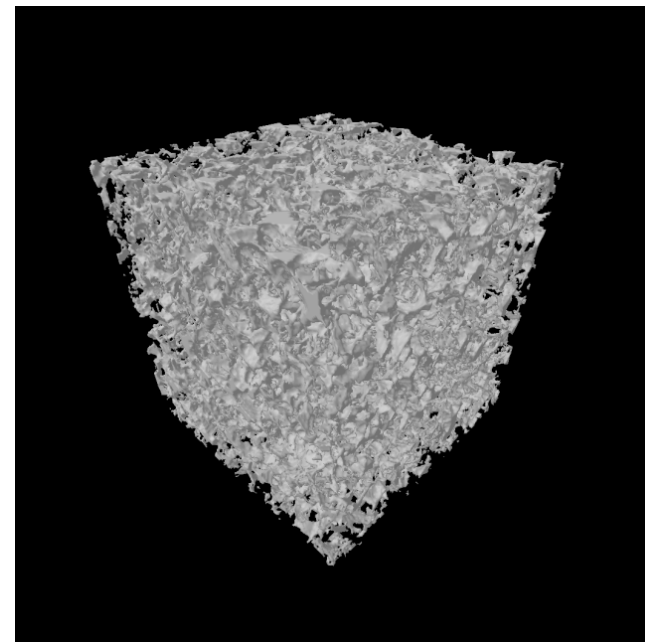
Размер имеет значение!

Необходимы высокопроизводительные вычисления

Моделирование свойств

Вариабельность свойств в пространстве для нерепрезентативных образцов

- 1) Из большого образца объемом 900^3 вокселей были выделены 27 кубиков (300^3 вокселей каждый)
- 2) Для каждого кубика были определены проницаемости по трем основным направлениям и расчетные пористости
- 3) Проверка для объема 700^3 вокселей



- 1) Значительное изменение свойств по объему
- 2) Образцы 300^3 вокселей не представительны
- 3) Необходим количественный алгоритм оценки представительности образца

Моделирование свойств

Local porosity theory

Оценка модели на основе теории “локальной пористости”

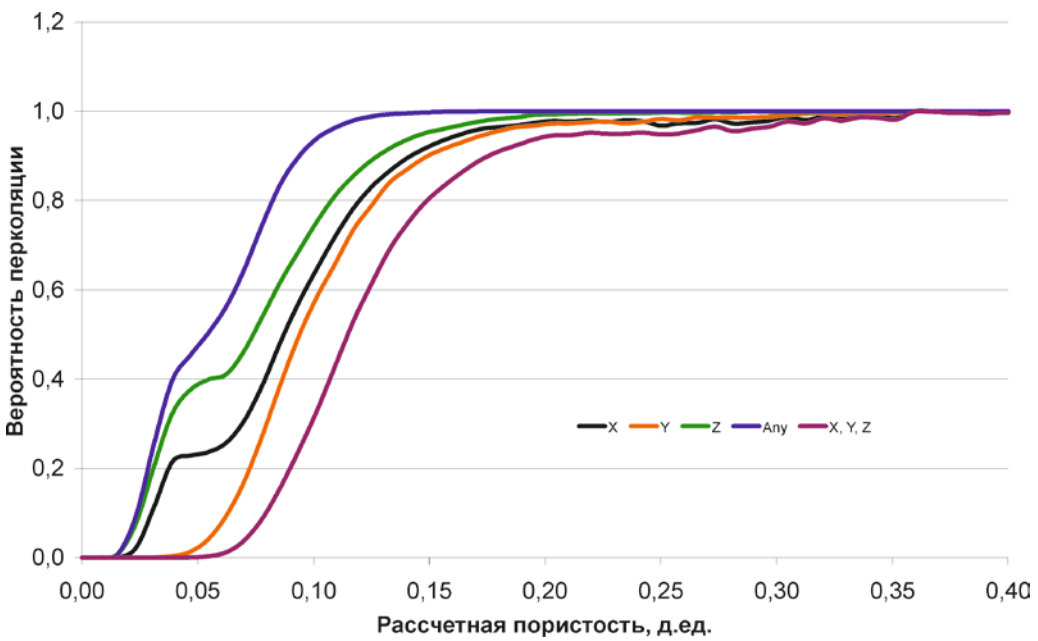
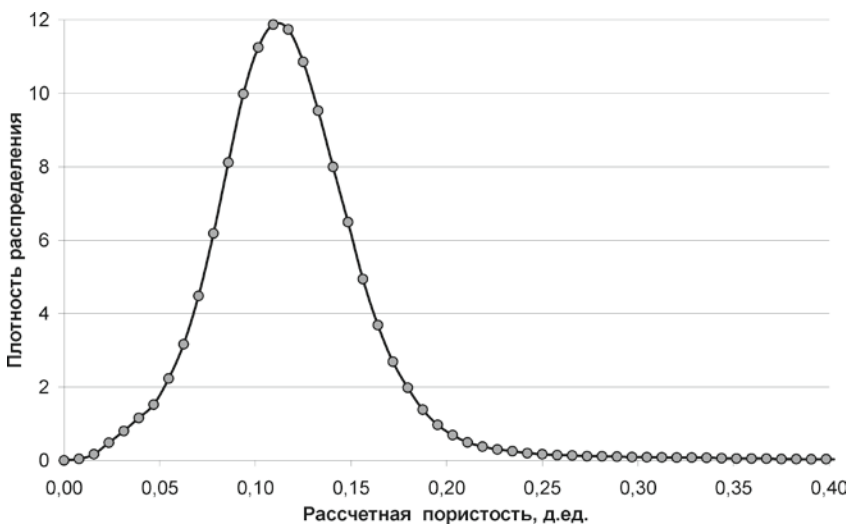
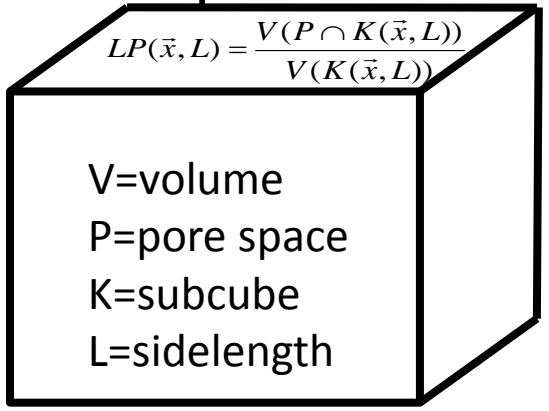
Local porosity analysis [Hilfer, 1991]:

$$LPD(\phi, L) = \frac{1}{m} \sum_x \delta(\phi - \phi(\vec{x}, L))$$

$$L^* = \min\{L : LPD(0, L) = LPD(1, L) = 0\}$$

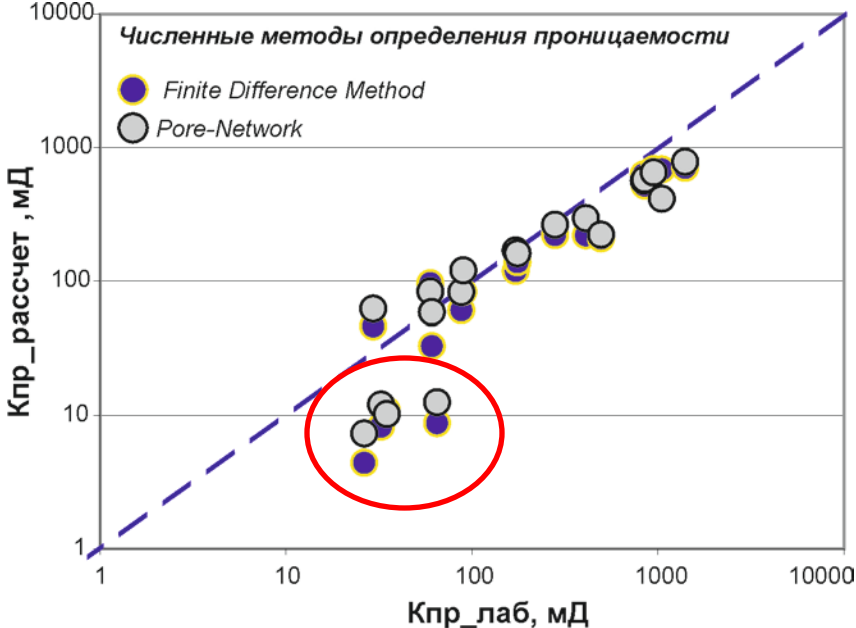
$$LPP(\phi, L) = \frac{\sum_{\vec{x}} I(\vec{x}, L) \delta_{\phi, \phi(\vec{x}, L)}}{\sum_{\vec{x}} \delta_{\phi, \phi(\vec{x}, L)}}$$

$$TFPC(L) = \int_0^1 LPD(\phi, L) LPP(\phi, L) d\phi$$

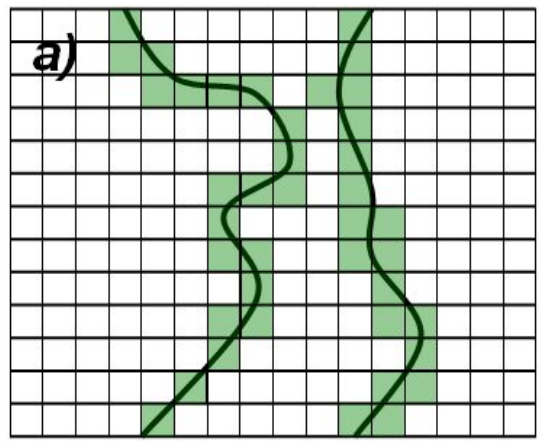


➡ Автоматизированная выборка REV

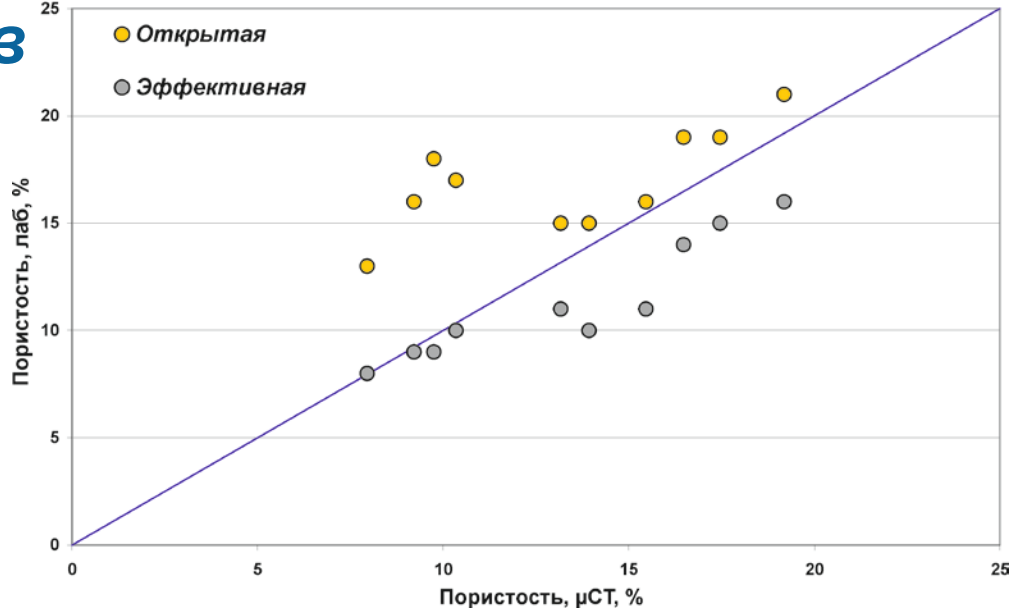
Моделирование свойств



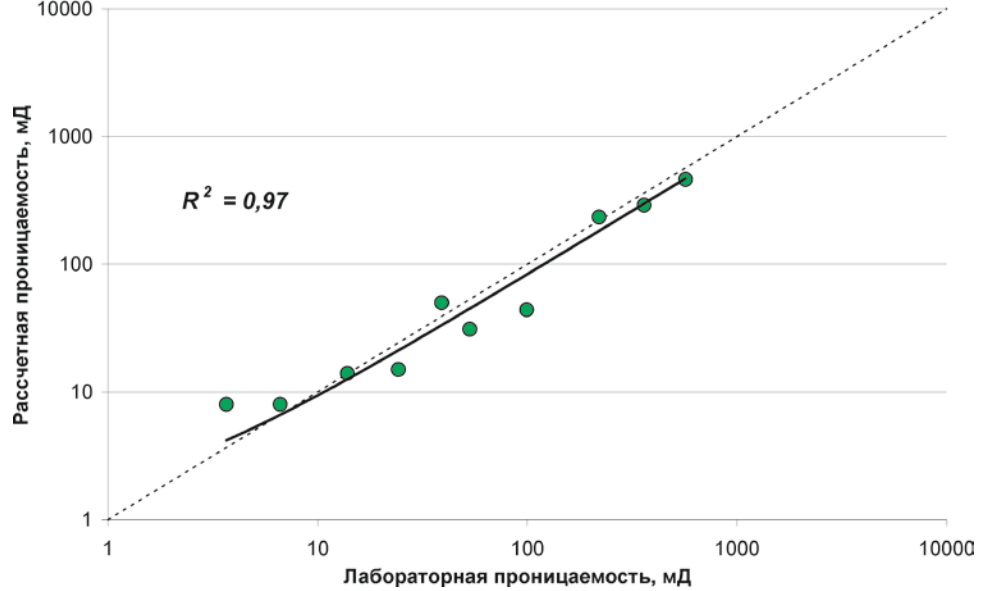
Образцы объемом 300³ вокселей



Эффект схлопывания пор [Gerke, Skvortsova, Korost, 2012]

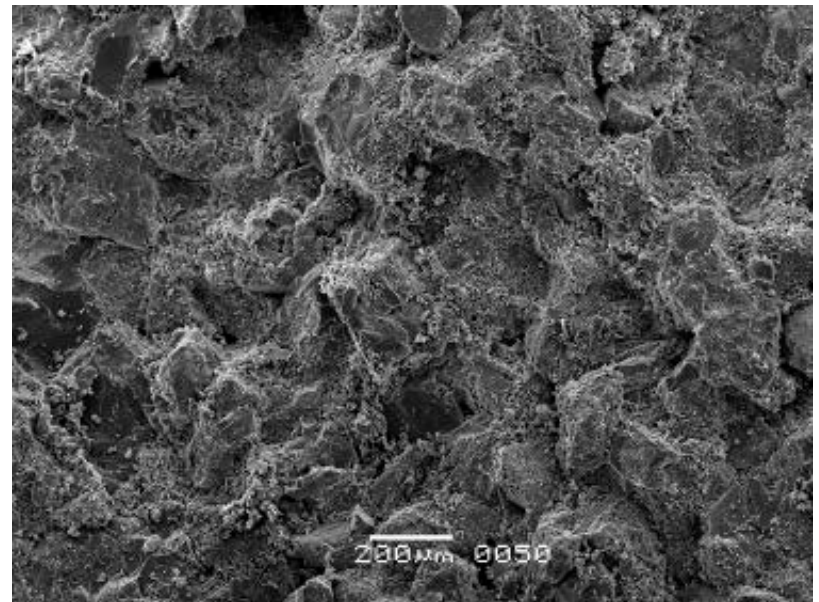
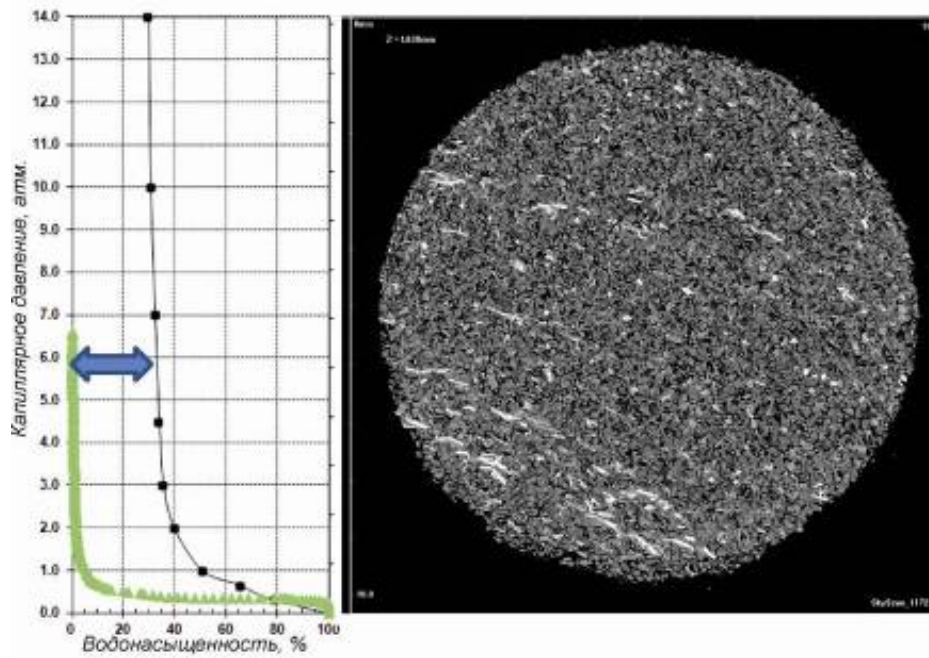
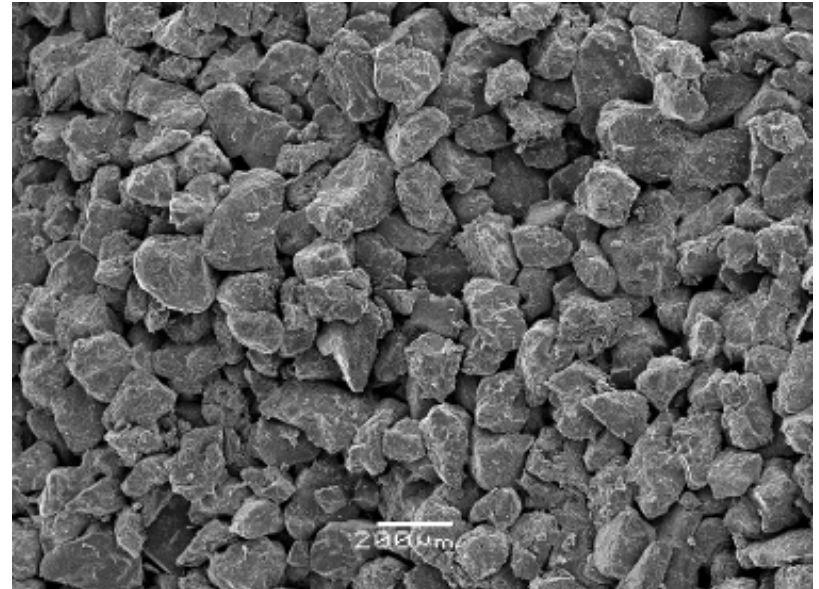
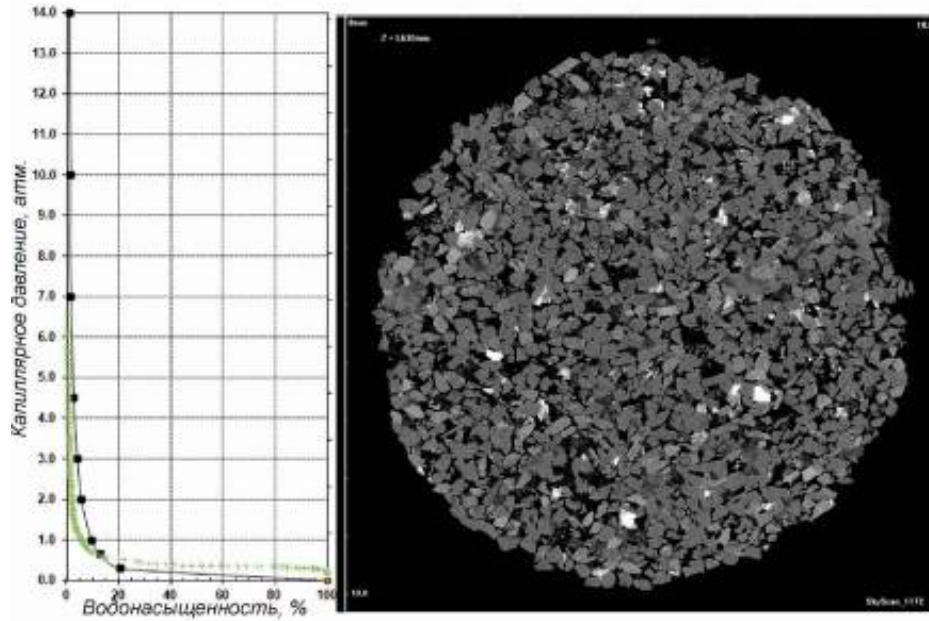


Образцы объемом 700³ вокселей



Девиации за счет соотношения размера образца и вырезки, сегментации

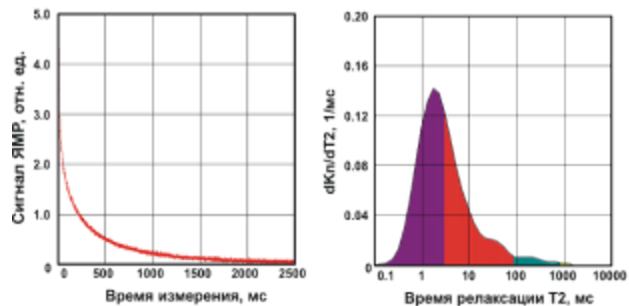
Причины погрешностей



Добавление “невидимой” пористости

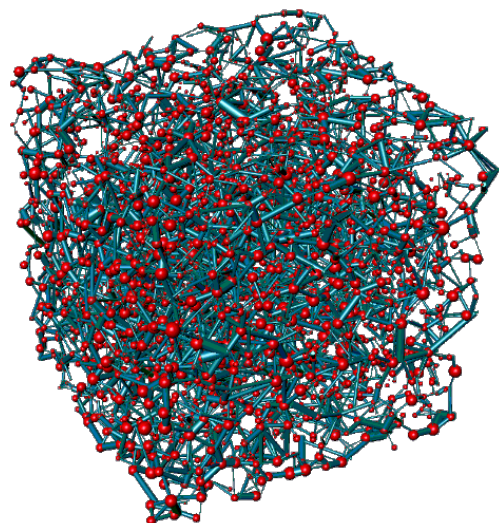
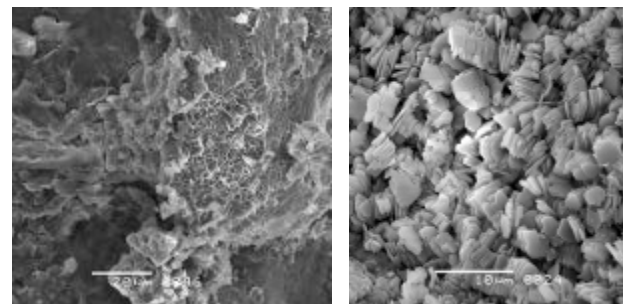
Объем и дифференциации
искомой части пор

ЯМР

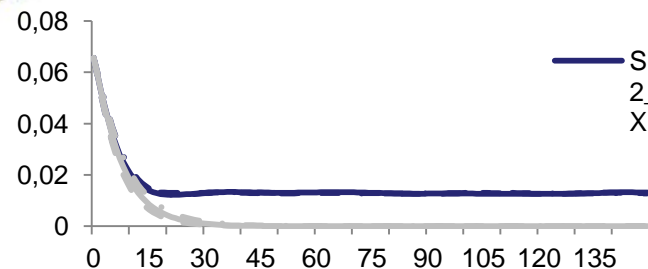
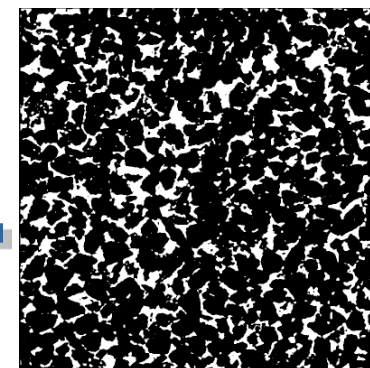
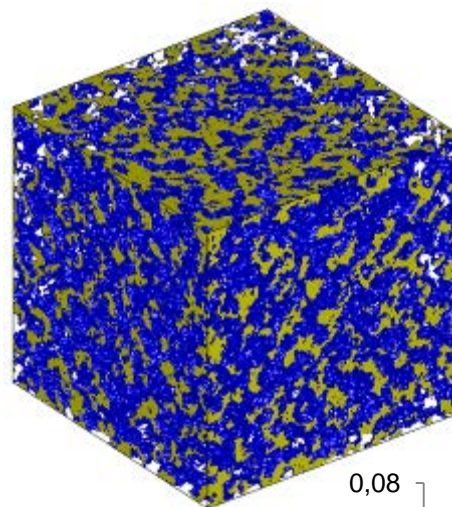


2D структура искомой части
пустотного пространства

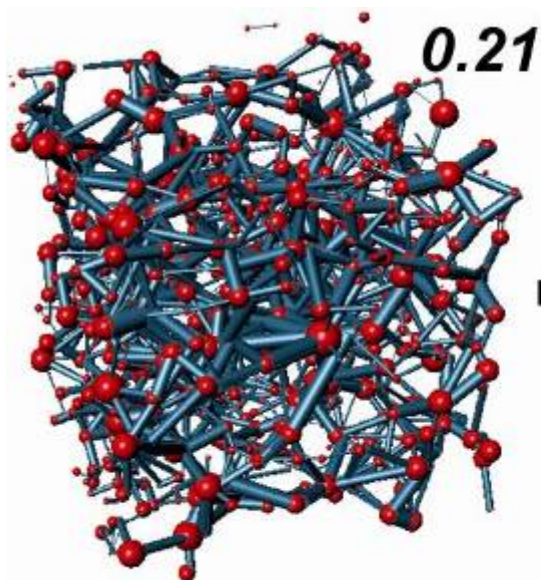
SEM



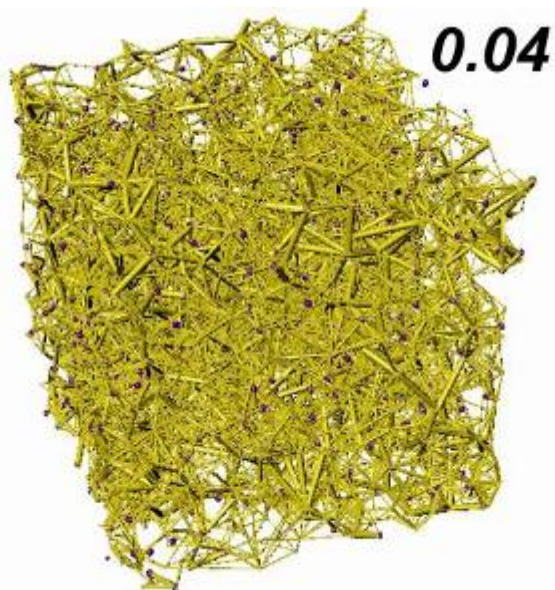
Сеточная модель
“невидимой” части
пористости



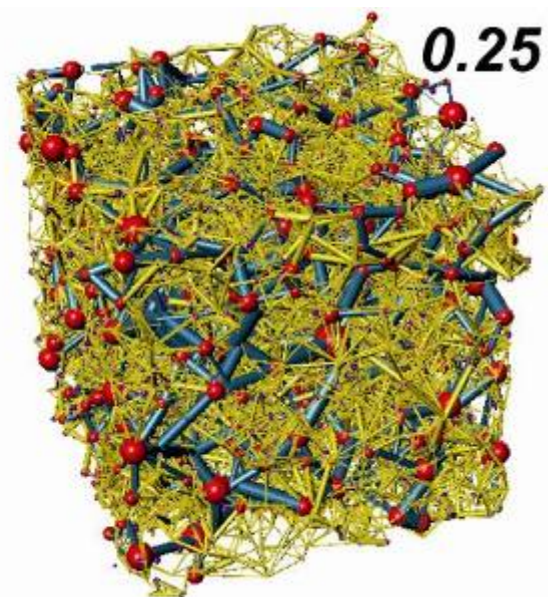
Добавление “невидимой” пористости



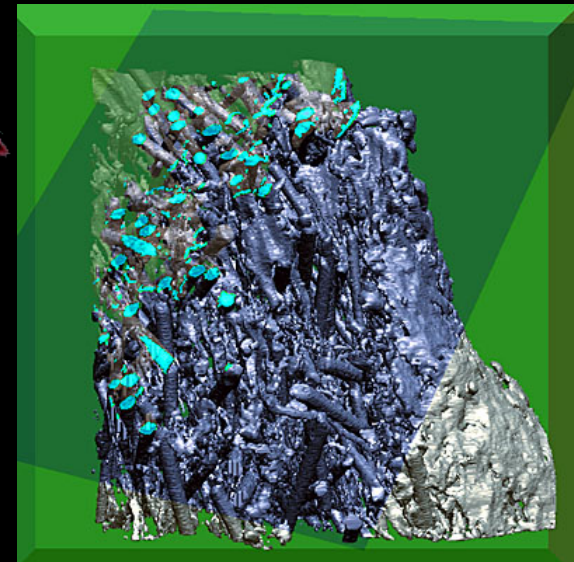
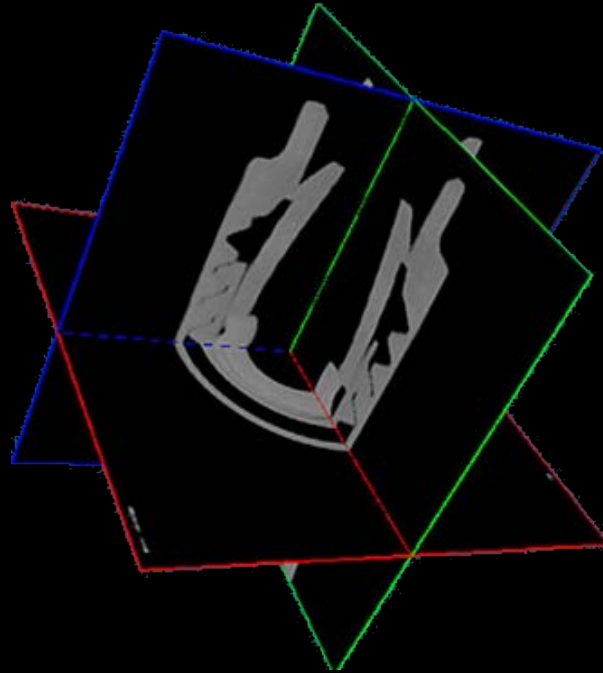
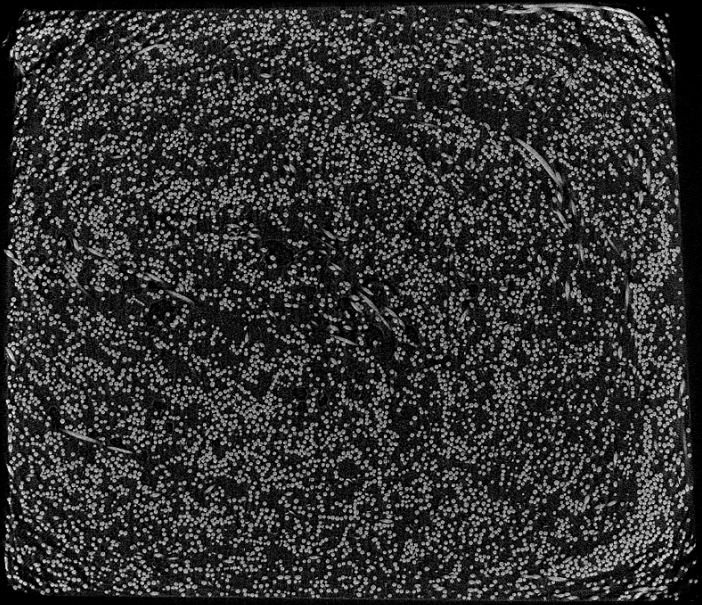
+



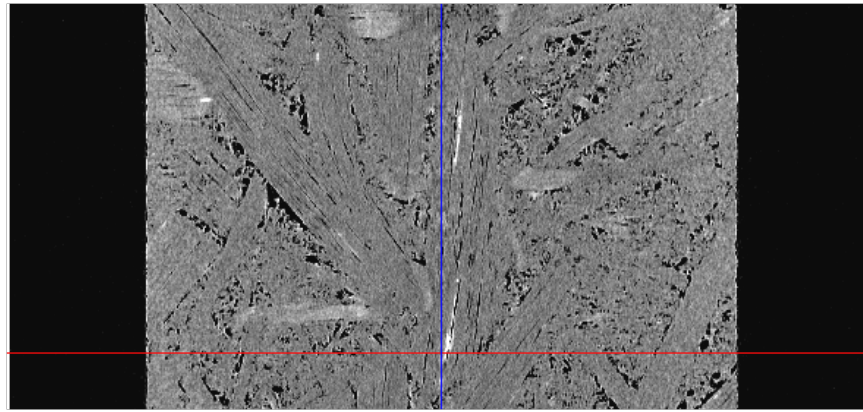
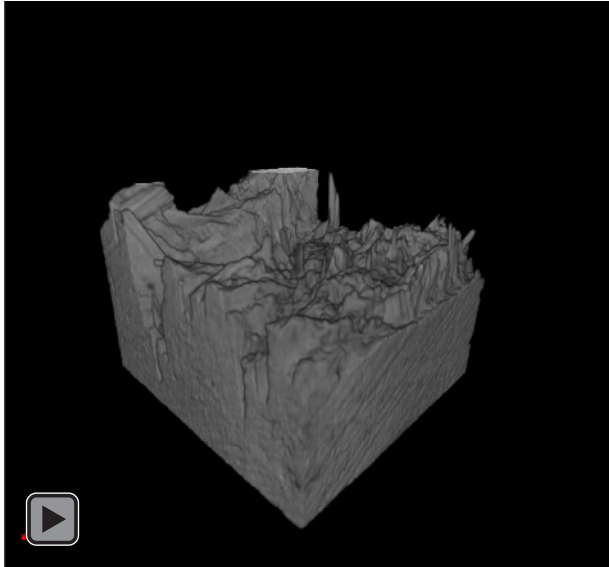
=



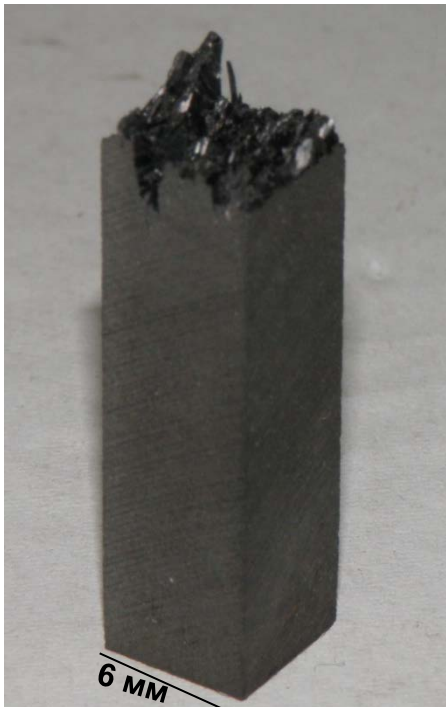
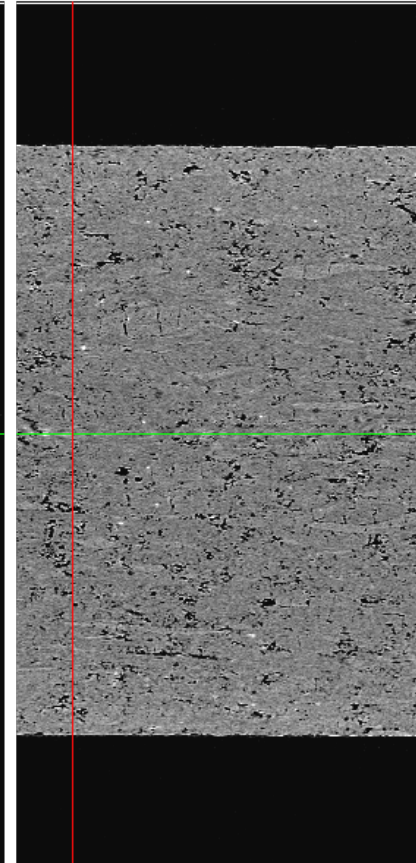
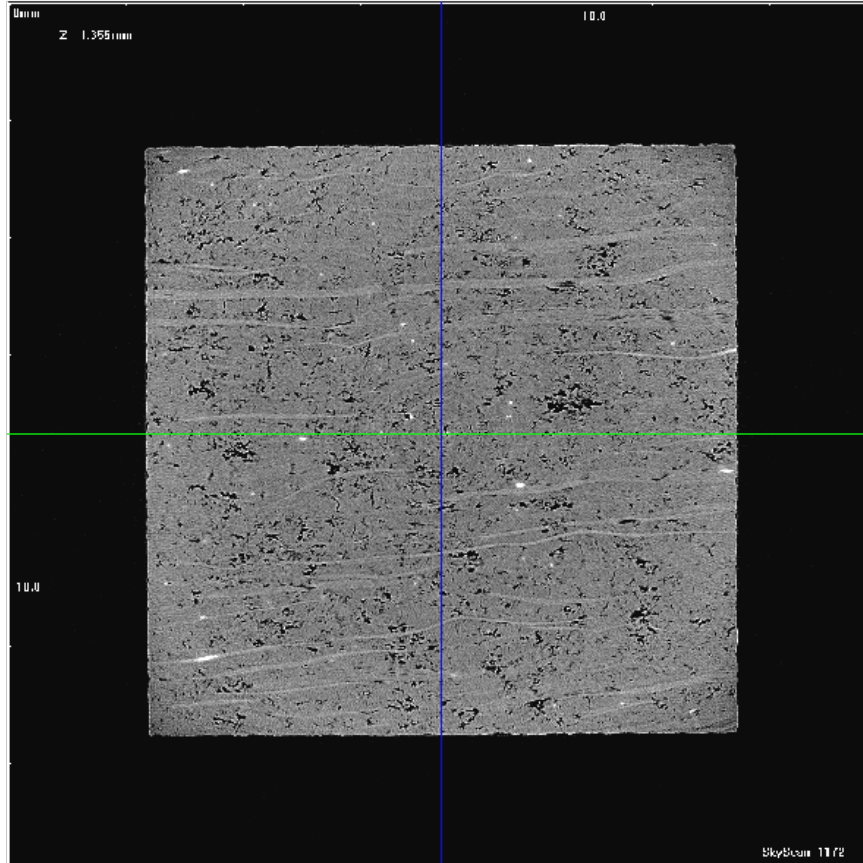
Всякое-разное))



Углерод-углеродные композиты

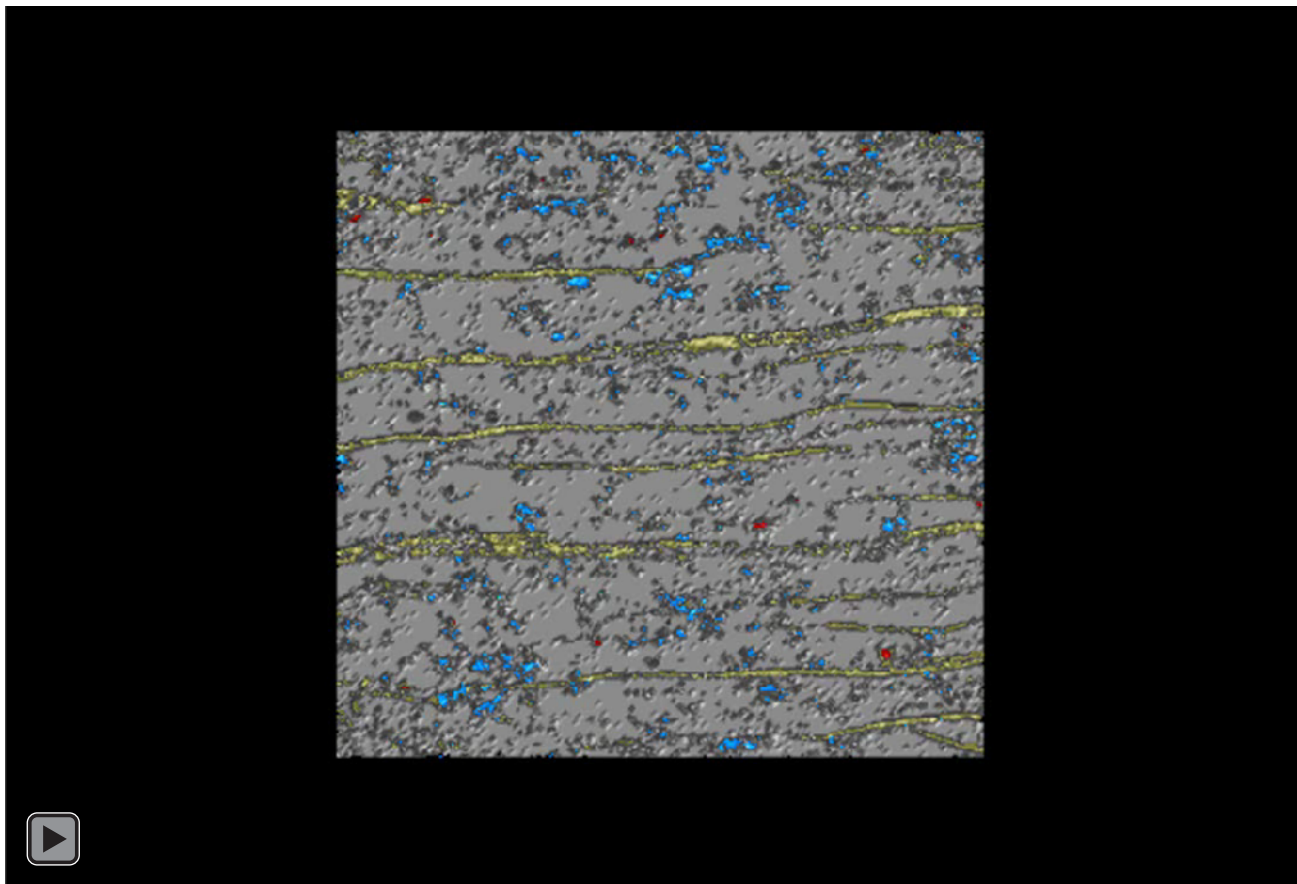
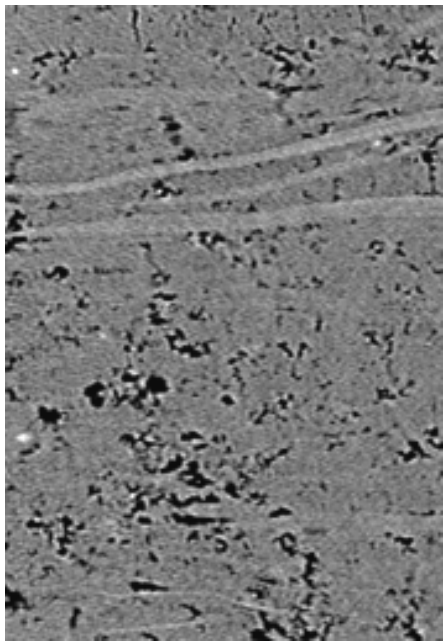
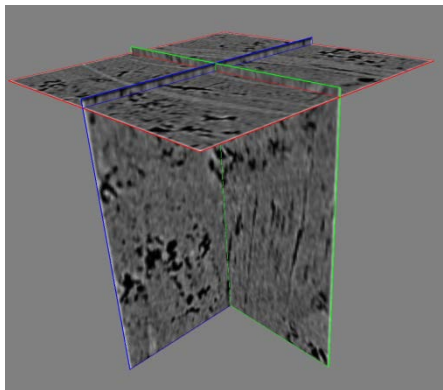


**Тормоз с
электрическим
приводом**

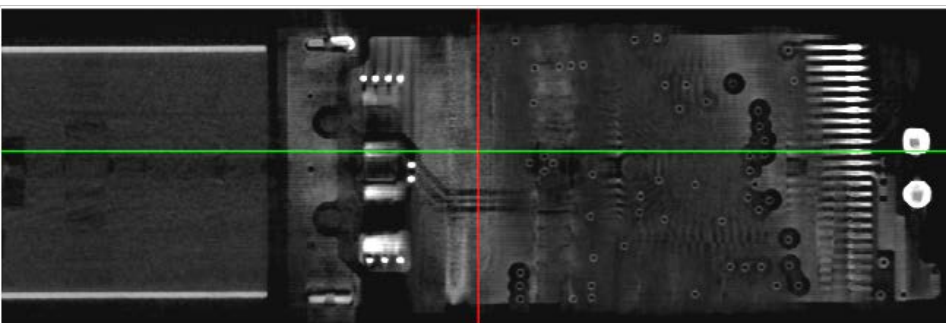
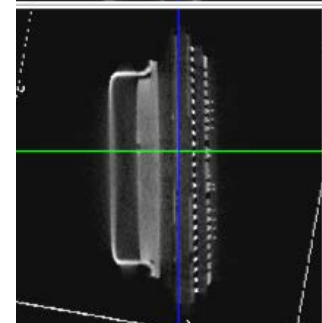
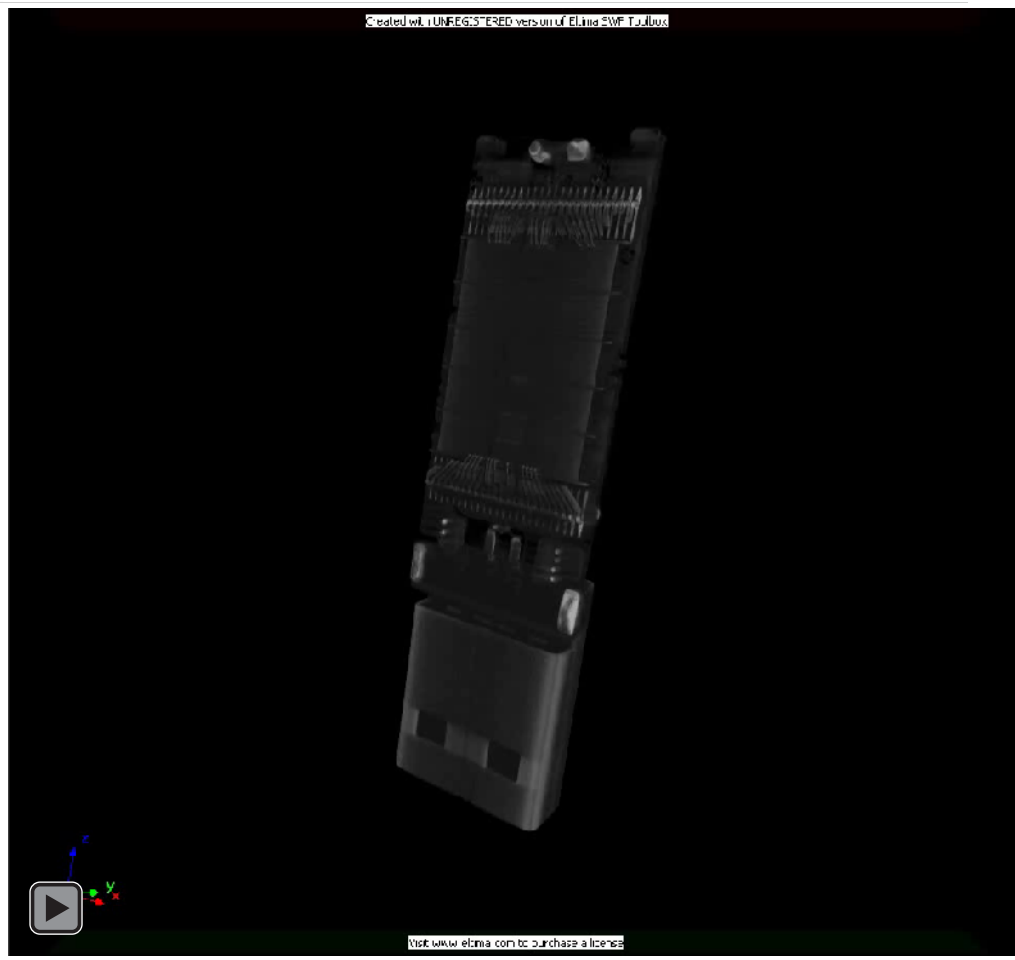
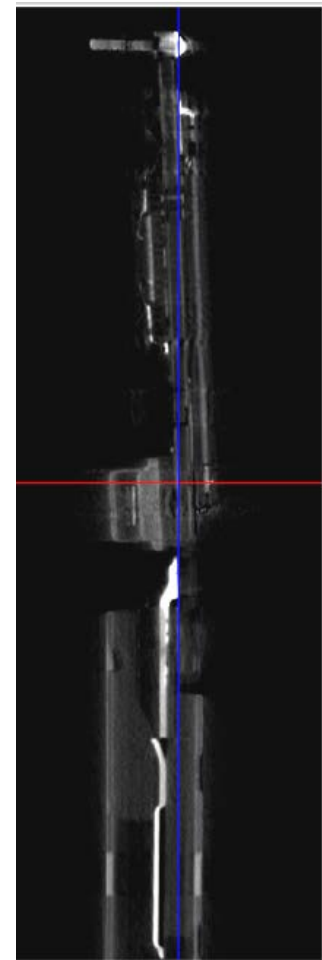


Углерод-углеродные композиты

Тормоз с электрическим приводом

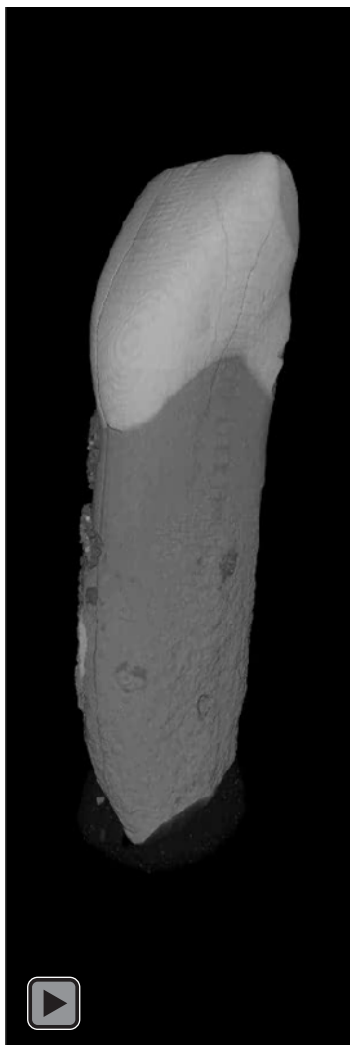
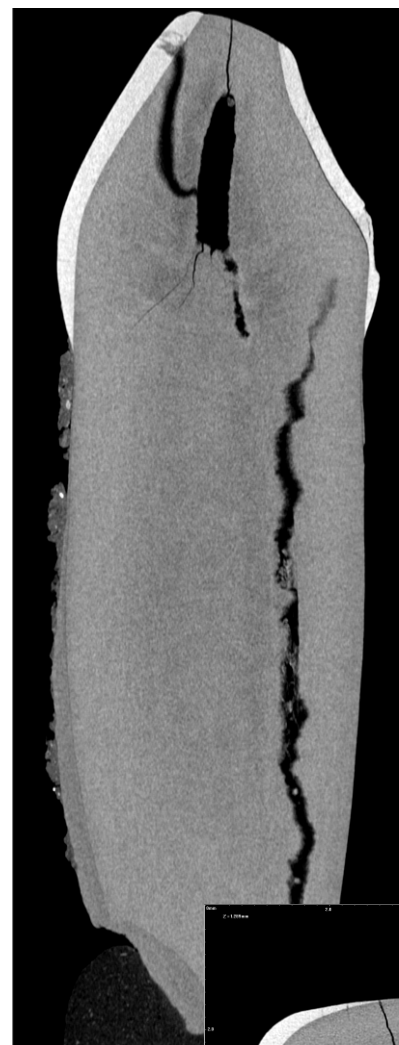


Электронные компоненты



USB флеш-накопитель

Зубы человека из Денисовой пещеры



The End

