

Использование рентгеновской компьютерной микротомографии для характеристики механизмов повреждения проницаемости нефте/газосодержащих пластов компонентами бурового раствора

Рыжиков Н.И.

Московский Физико-Технический Институт

Московский научно-исследовательский центр технической компании Шлюмберже

Schlumberger

1. Введение
2. Постановка задачи
2. Используемый метод
3. Примеры применения метода
4. Модификация метода для случая слабоконтрастных компонентнов бурового раствора
5. Заключение

Повреждение пласта буровым раствором

Назначение бурового раствора (б/р):

- Вынос шлама
- Противодействие
- Охлаждение буровой коронки

Основные исследуемые компоненты:

- Глины
- Полимеры
- Взвешенные частицы (кальциты, бариты и пр.)

Результат проникновения компонентов б/р в пористую среду:

- Снижение пористости
- Снижение проницаемости

Основные механизмы влияния компонентов б/р на свойства пористой среды:

- Внешняя корка
- Внутренняя корка (проникшие частицы)
- Проникновение фильтрата

Экспериментальное оборудование:

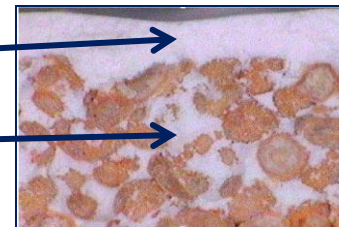
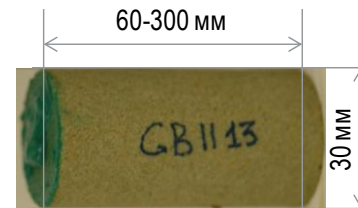


Фильтрационная установка



Динамический фильтр-пресс

Размеры образцов:



Повреждение поровы мелкими карбонатными частицами $d=4\mu\text{m}$ (SPE 54762)

Schlumberger

Постановка задачи

Практическая значимость:

- Численная характеристика повреждения пласта
- Калибровка моделей повреждения пласта

Задача исследования:

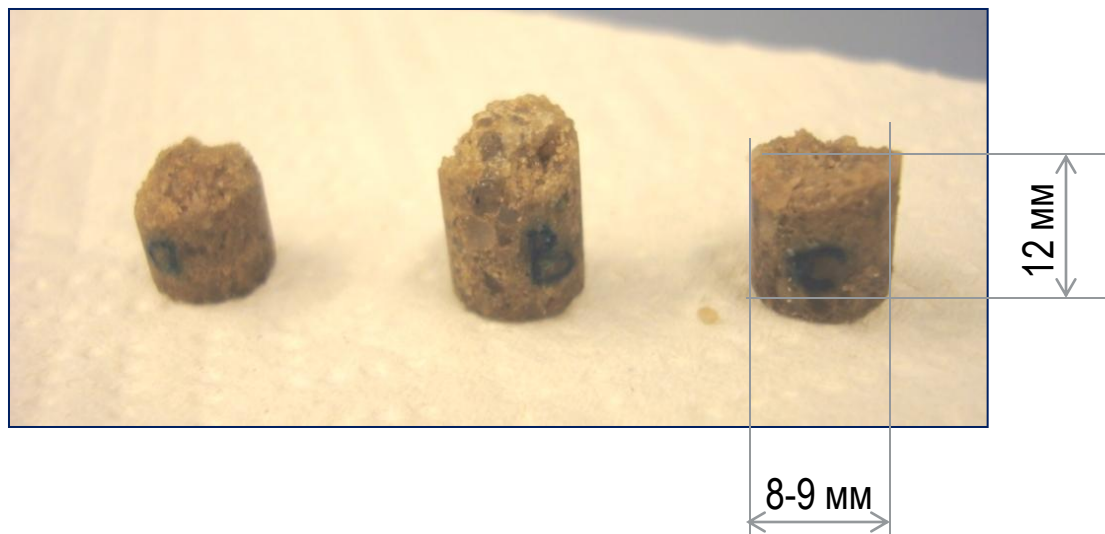
Определение профиля концентраций проникшей примеси для образцов пористой среды после фильтрационного эксперимента

Использовалось:

- Фильтрационные эксперименты с модельными буровыми растворами (бентонит, кальциты, полимер)
- Искусственные и природные образцы
- Рентгеновская компьютерная микротомография (Skyscan 1172)

Подготовка образцов для томографии

Для получения достаточного разрешения (~ 2.5 м) из образцов высверливаются мини-керна:



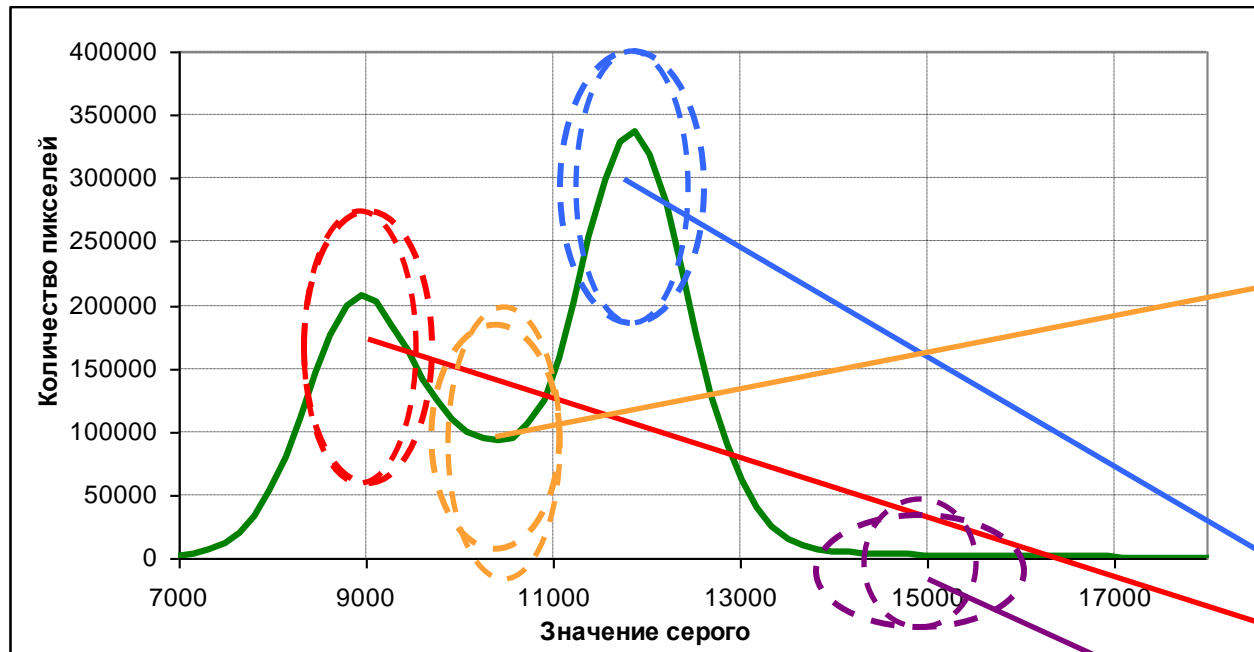
В зависимости от конкретного случая образцы сканируются:

- в насыщенном состоянии до фильтрации
- в насыщенном состоянии после фильтрации
- сухие образцы до фильтрации
- сухие образцы после фильтрации

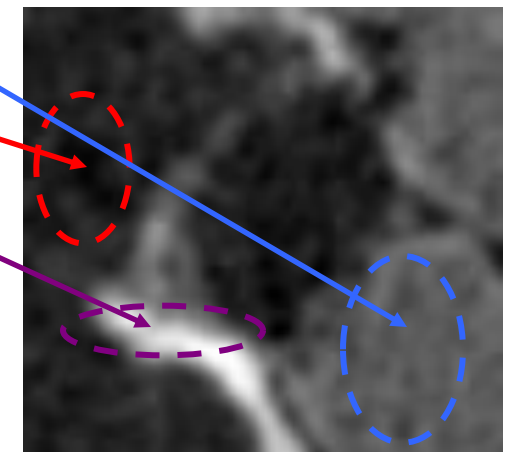
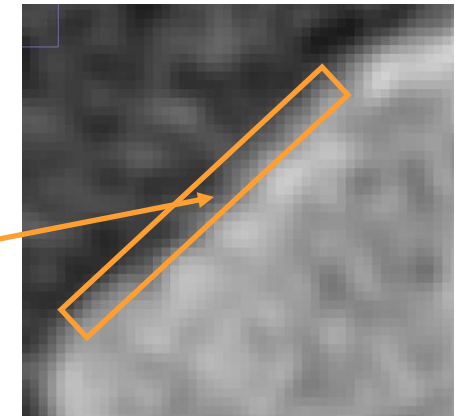
Schlumberger

Schlumberger Confidential

Пример гистограммы для трехкомпонентного образца



- Наполнитель порового пространства
- Скелет
- Контрастный компонент бурового раствора
- Переходная зона



Schlumberger Confidential

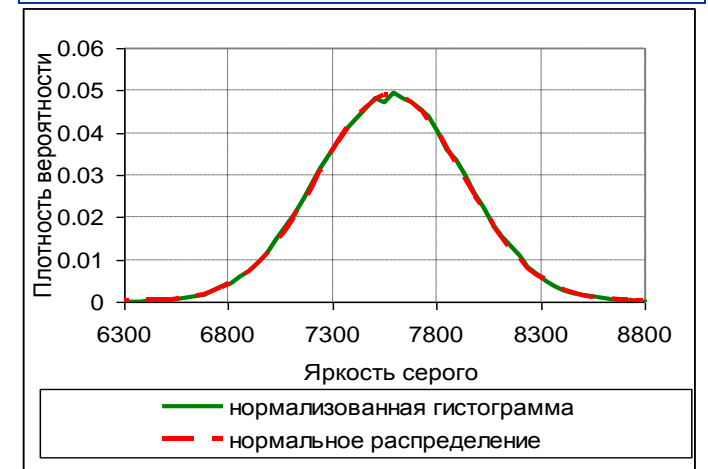
Schlumberger

Метод расчета профилей концентрации компонент бур

- Нормализованная гистограмма – функция плотности вероятности (ФПВ) распределения серого на сечении
- Форма ФПВ для области сечения, содержащей один материал, соответствует нормальному распределению (гауссиану)
- ФПВ всего сечения можно представить в виде суперпозиции гауссианов, соответствующих отдельным материалам

$$H(z) = \sum_{i=1}^n A_i \exp\left(-\left(\frac{B_i - z}{C_i}\right)^2\right)$$

где z – градации серого, $H(z)$ – нормализованная гистограмма сечения, A, B, C – коэффициенты гауссианов, n – число материалов на гистограмме



Аппроксимация ФПВ отдельного материала (воздуха) с помощью Гауссиана

Schlumberger

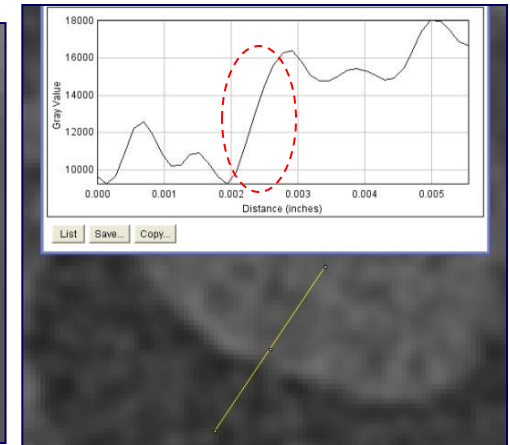
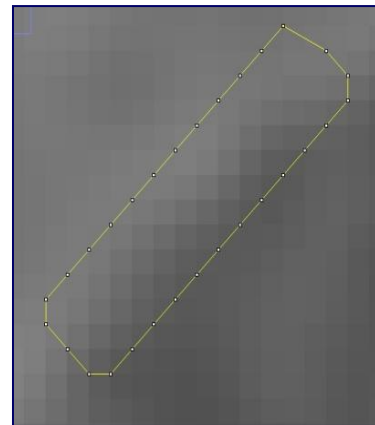
Модель ФПВ для переходной зоны

1. Делается предположение, что значение серости в переходной зоне является средним арифметическим значений серого в граничных точках
2. Параметры ФПВ переходной зоны зависят от параметров ФПВ граничащих веществ
3. Весовой коэффициент при ФПВ переходной зоны зависит от общей длины границы переходной области

Тогда форму ФПВ можно рассчитать так:

$$z_i = \frac{(m+1-i)z_1 + iz_2}{m+1}$$
$$\mu_i = \frac{(m+1-i)\mu_1 + i\mu_2}{m+1}, \sigma_i^2 = \frac{(m+1-i)\sigma_1^2 + i\sigma_2^2}{m+1}$$
$$p(z_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$$
$$p(z_{transit}) = \sum_i^n p(z_i)$$

m – ширина переходной зоны в пикселях



Пример переходной зоны на сечении

Минимизируемая функция

- Учитывая переходную зону, конечная функция для минимизации принимает вид:

$$\sum_{j=1}^m \left| H(z_j) - \sum_{i=1}^n G(z_j, A_i, B_i, C_i) - \sum_{i_{trans}=1}^{\frac{n(n-1)}{2}} \sum_m G(z_j, A_{i_{trans}}, B_{i_{trans}}, C_{i_{trans}}) \right| \rightarrow 0$$

$$G(x, A, B, C) = A \exp \left(- \left(\frac{x - B}{C} \right)^2 \right)$$

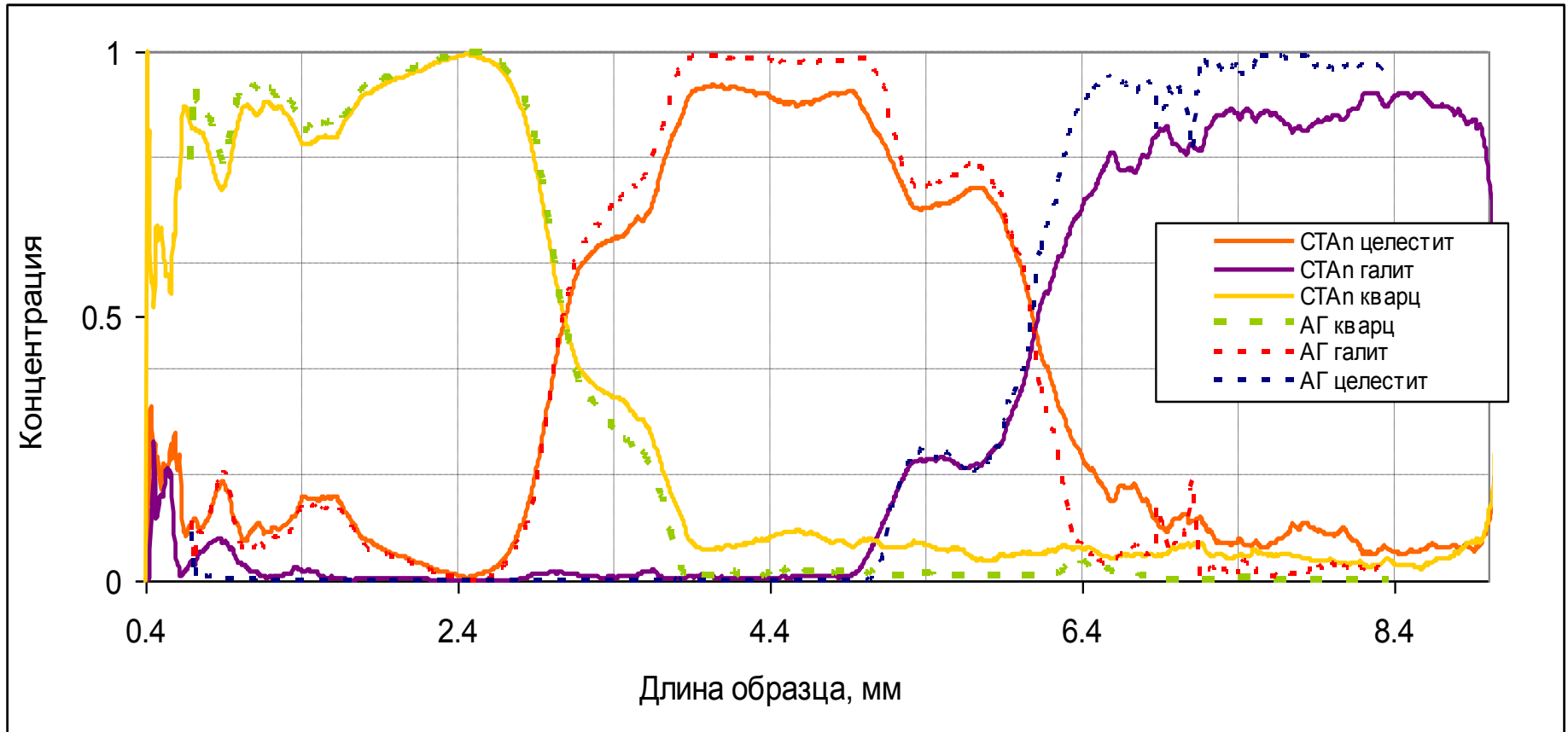
Здесь, m – ширина переходной зоны в пикселях, z_j – i -й диапазон серого в гистограмме, A, B, C – параметры гауссианов, i – индекс материала, i_{trans} – индекс переходной зоны

- Общая площадь материала S_m в сечении:

$$S_i = S_{G_i} + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} S_{tr_{ji}}; S_{G_i} = \int A_i \exp \left(- \left(\frac{x - B_i}{C_i} \right)^2 \right) dx = A_i C_i \sqrt{2\pi}$$

- Общее число управляющих параметров минимизации $N = [3n + n(n-1)/2]$, где n – общее число материалов в сечении. Для оптимизации применялась процедура Shuffle Complex Evolution.
- При расчете профиля использовалась последовательная обработка сечений. В качестве первого приближения для i -ого сечения использовались результаты оптимизации для $(i-1)$ -ого.

Проверка метода: профилирование образца с тремя минералами

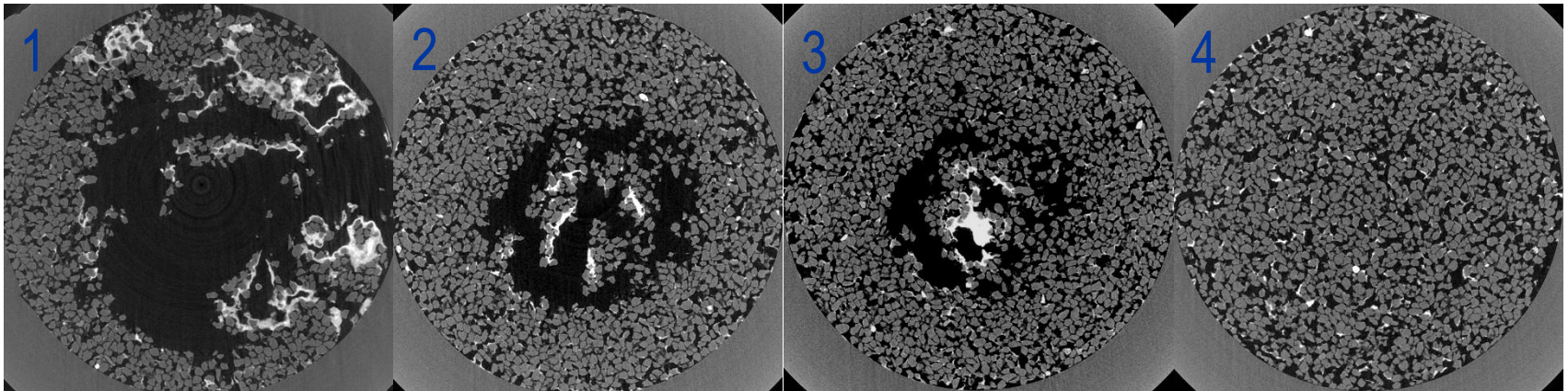
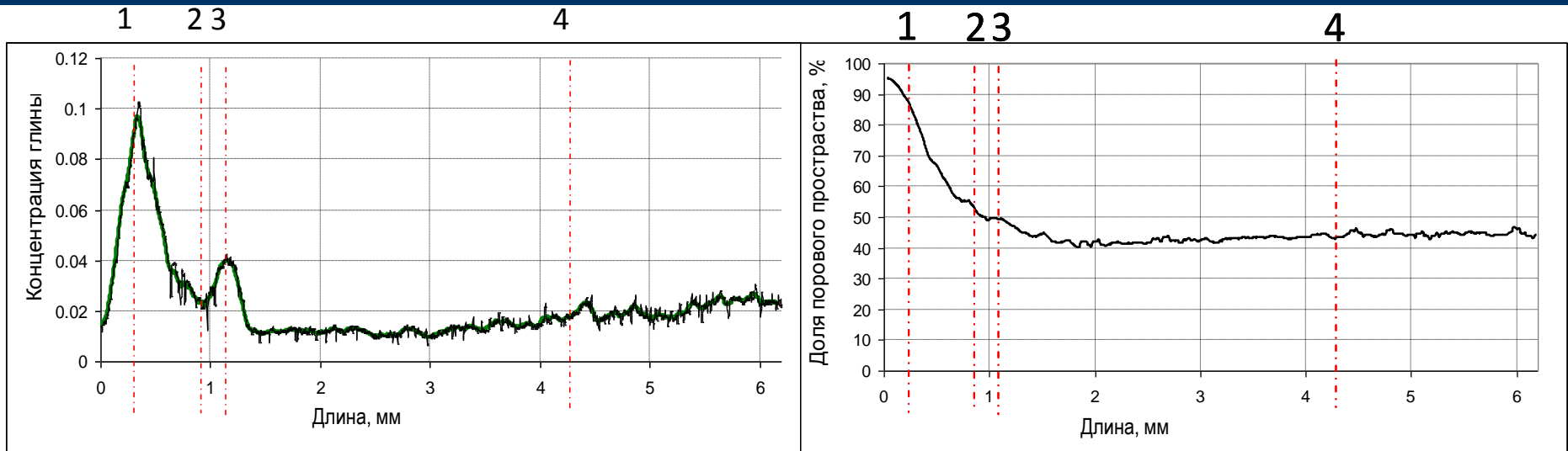


Schlumberger Confidential

Сравнение профилей, полученных методом анализа гистограм и с помощью специального обычного метода установки порога

Schlumberger

Искусственный образец после фильтрации глины

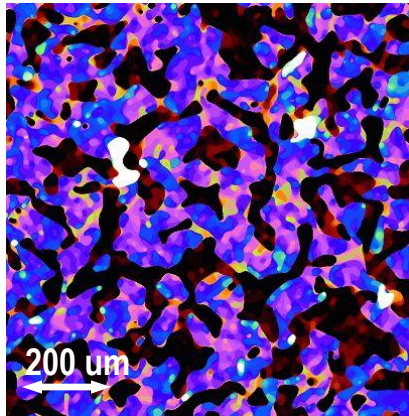



- Повреждение на входе в образец
- Увеличение концентрации глины с глубиной в неповрежденной зоне (объясняется особенностями фильтрационного эксперимента)


Schlumberger


Керамический диск после фильтрации б/р с частицами CaCO_3

До фильтрации:

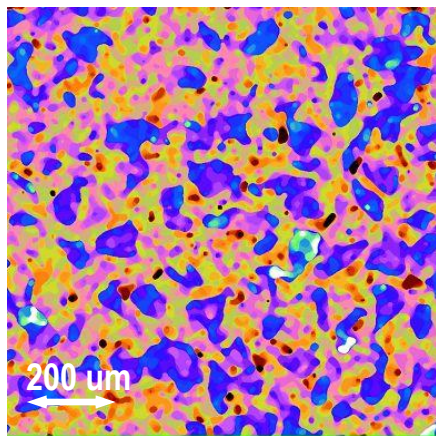


 — Образец

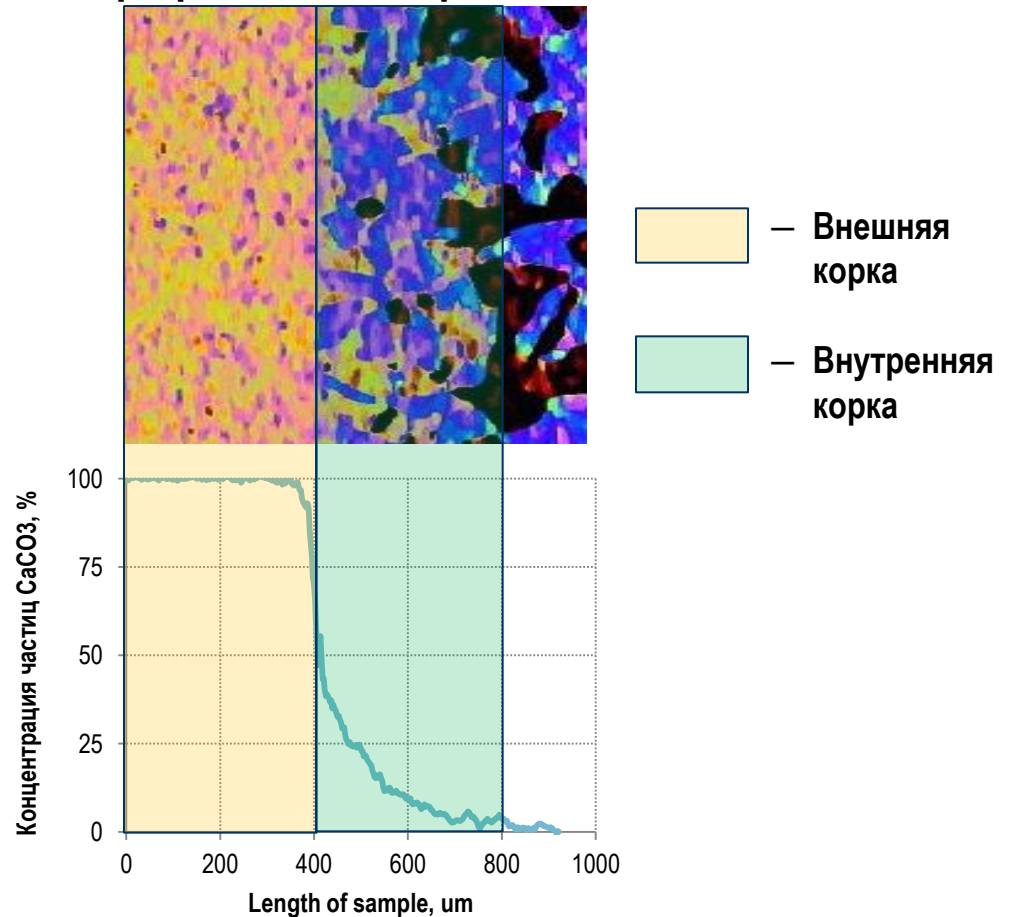
 — Воздух

 — Частицы CaCO_3

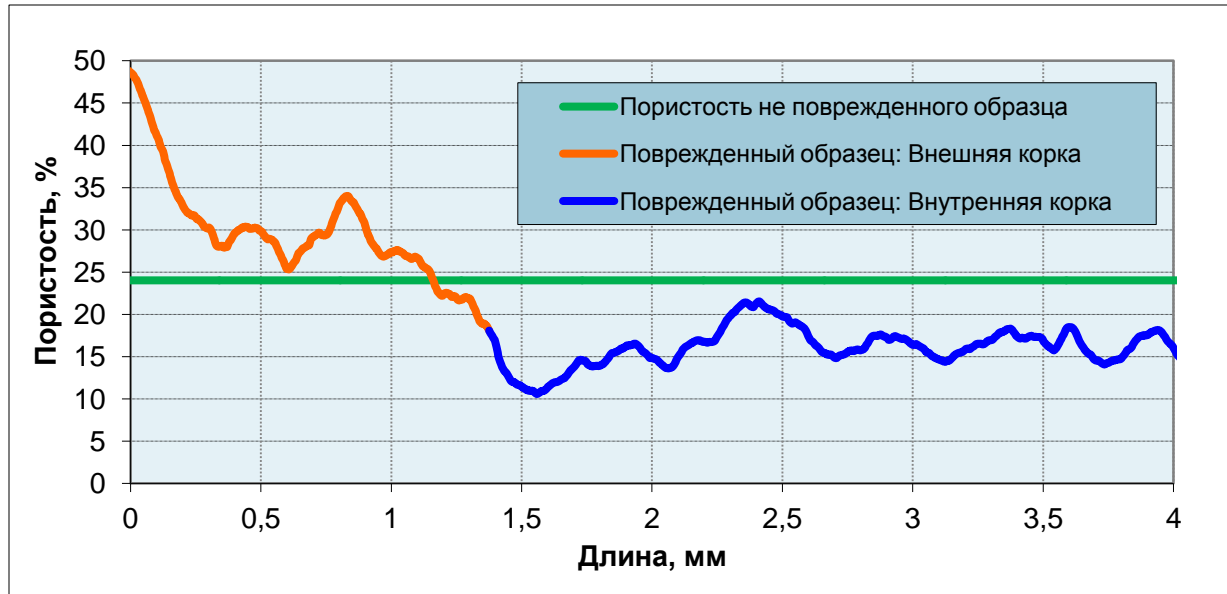
После фильтрации:



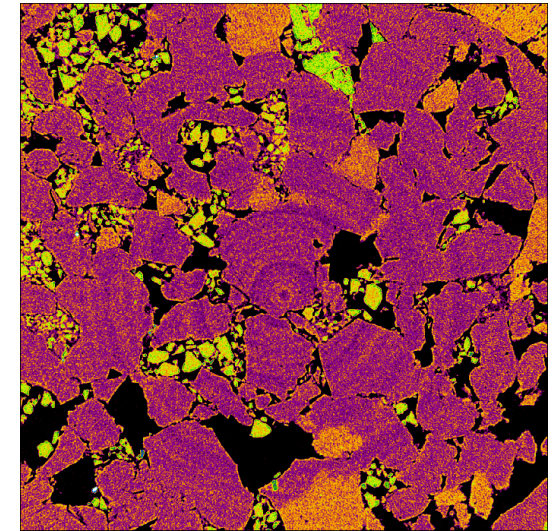
Разрез томографии вдоль образца и профиль концентрации частиц:



Природный образец после фильтрации б/р с частицами CaCO₃



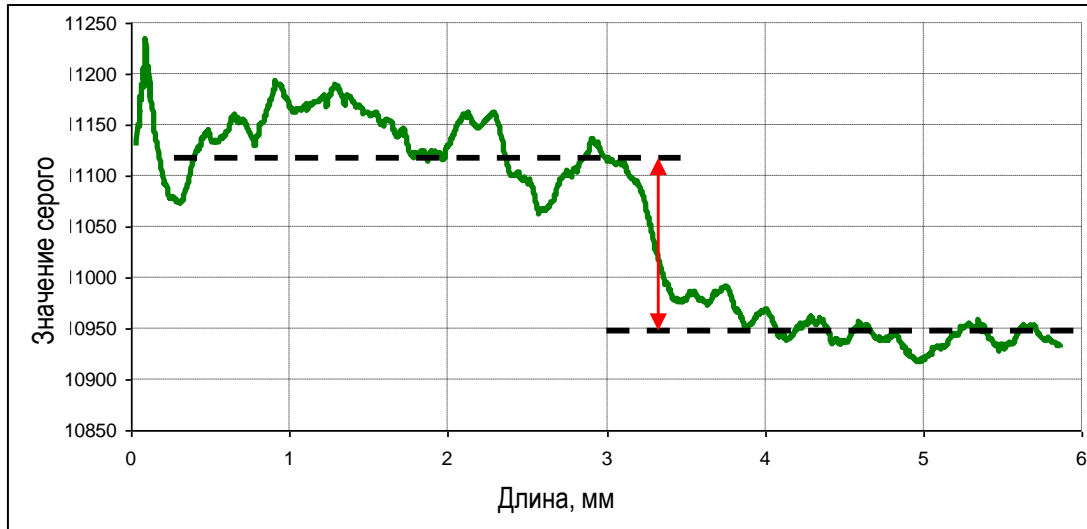
Сравнение профиля измененной пористости с исходной величиной позволяет охарактеризовать повреждение горной породы



-  — Образец
-  — Частицы CaCO₃
-  — Воздух

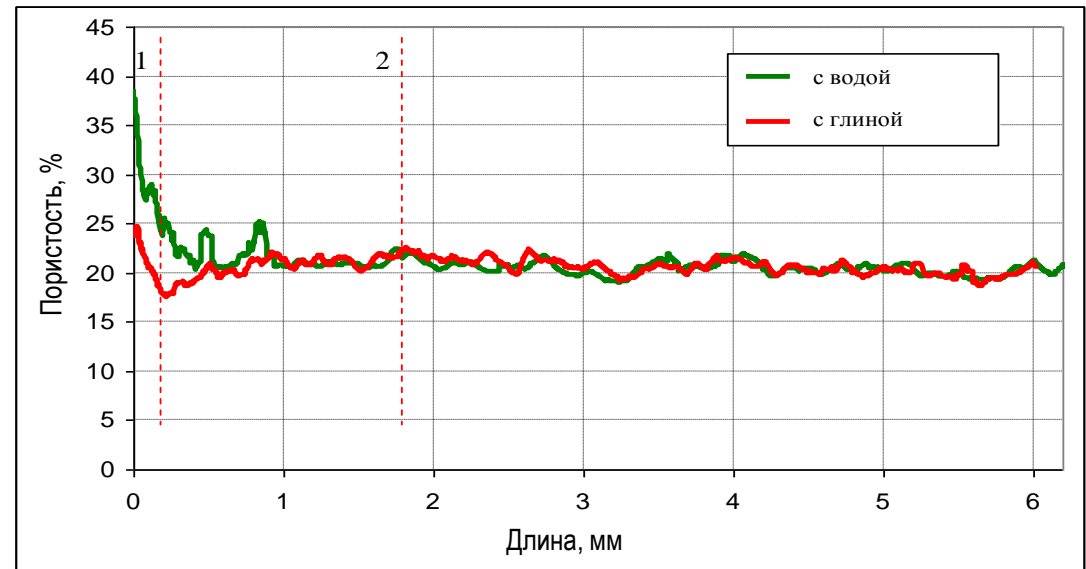
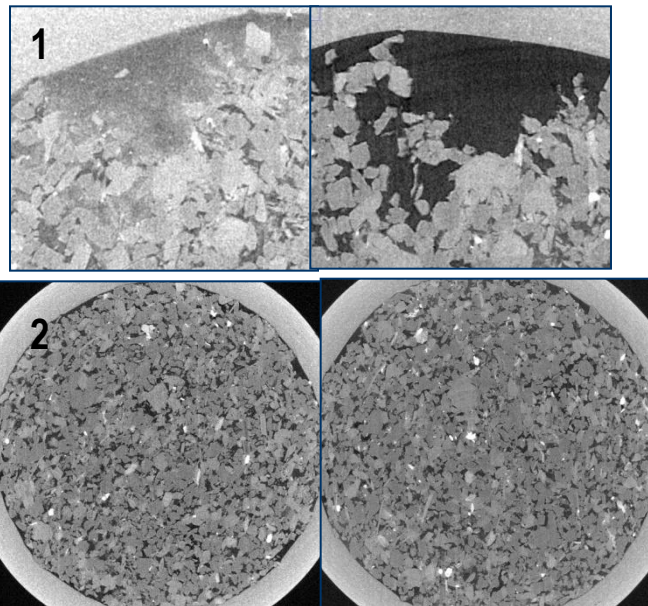
Schlumberger

Использование значения серости материала

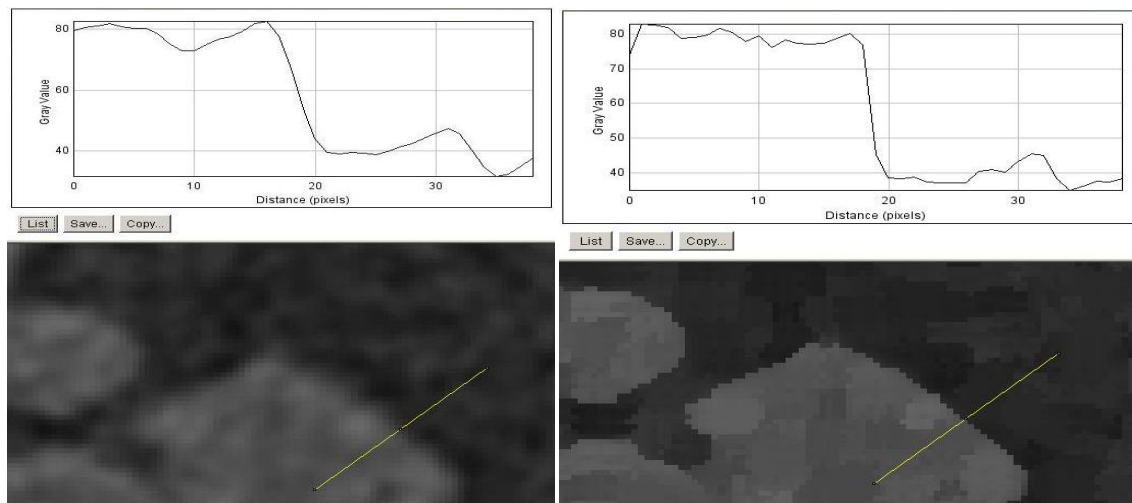


Изменение уровня серого для жидкой фазы как индикатор глубины проникновения фильтрата

На входе в образец (1) видна плотная глинистая корка, в глубине образца (2) не наблюдается значительной разницы в пористости



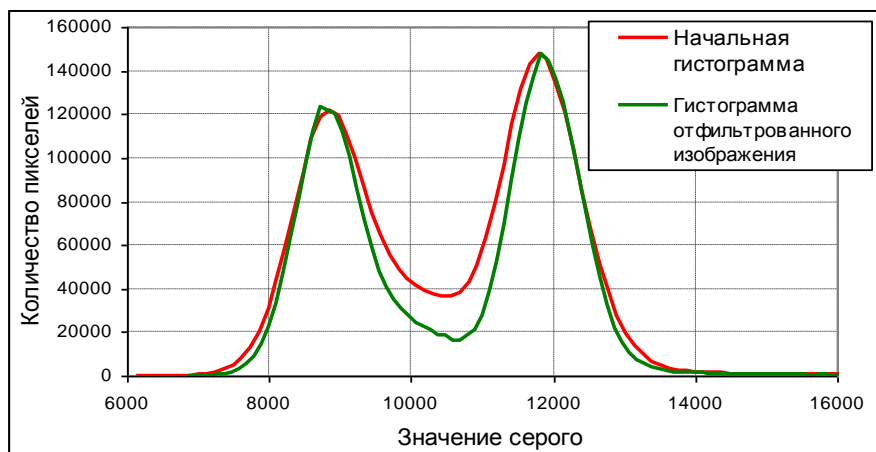
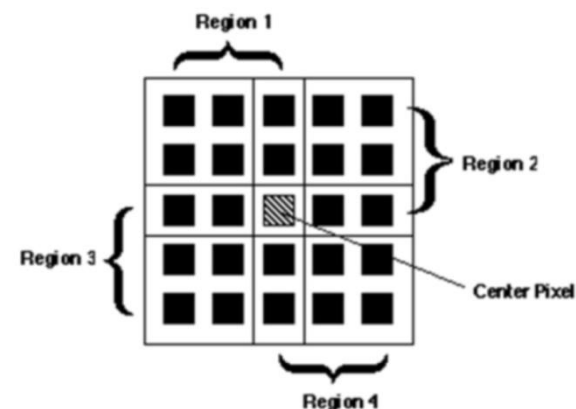
Фильтр Кувахары (Kuwahara Filter)



Начальное изображение

Отфильтрованное изображение

Ширина переходной зоны сократилась с 3 до 1

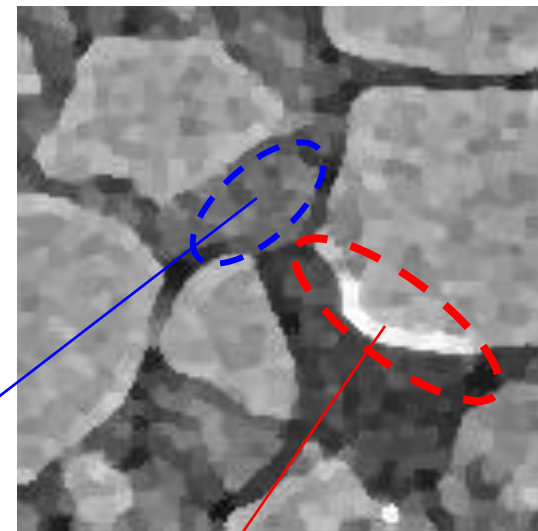
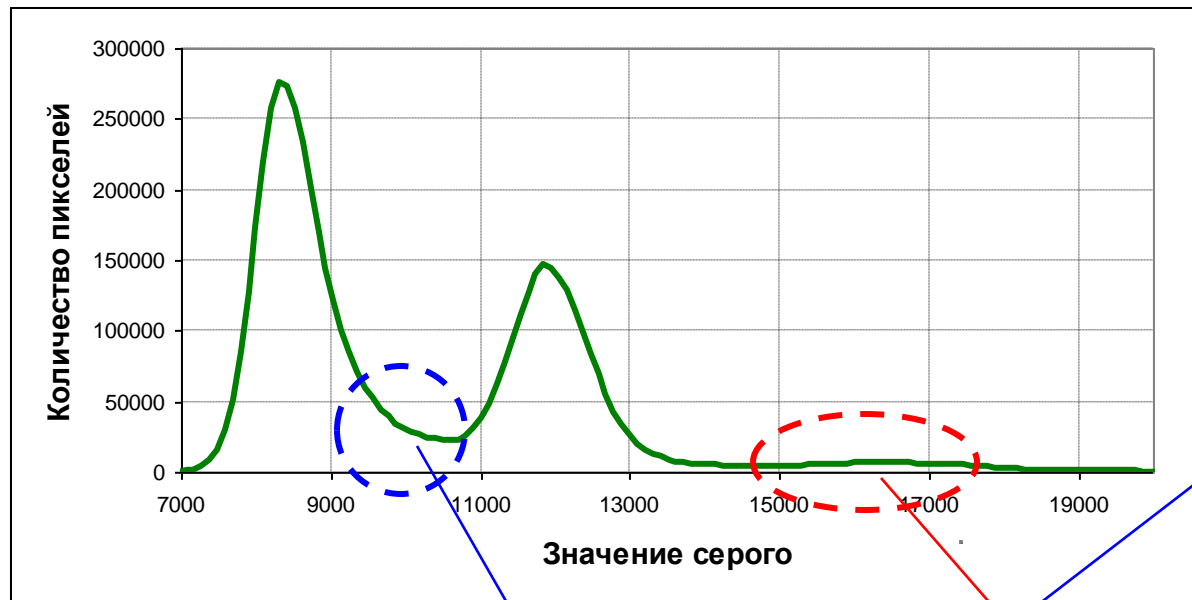


Изменение формы гистограммы после использования фильтра

- Увеличивает контрастность границ
- Уменьшает эффект переходной зоны
- Позволяет обнаруживать скрытые на гистограмме вещества

Schlumberger

Пример анализа гистограммы после фильтрации. Искусственный образец



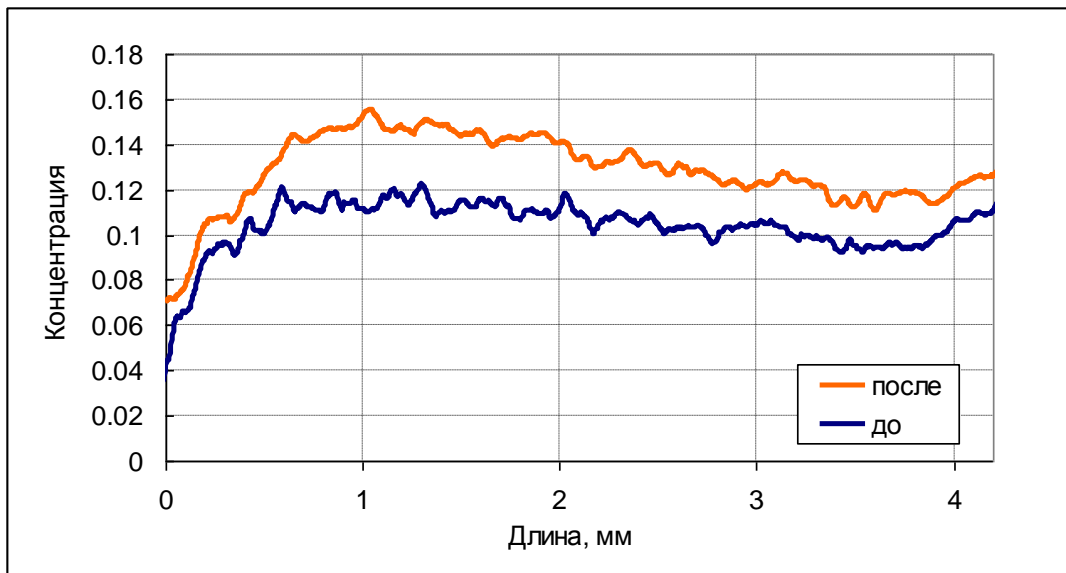
Неконтрастный компонент б/р
и клей

Контрастный компонент б/р

Schlumberger

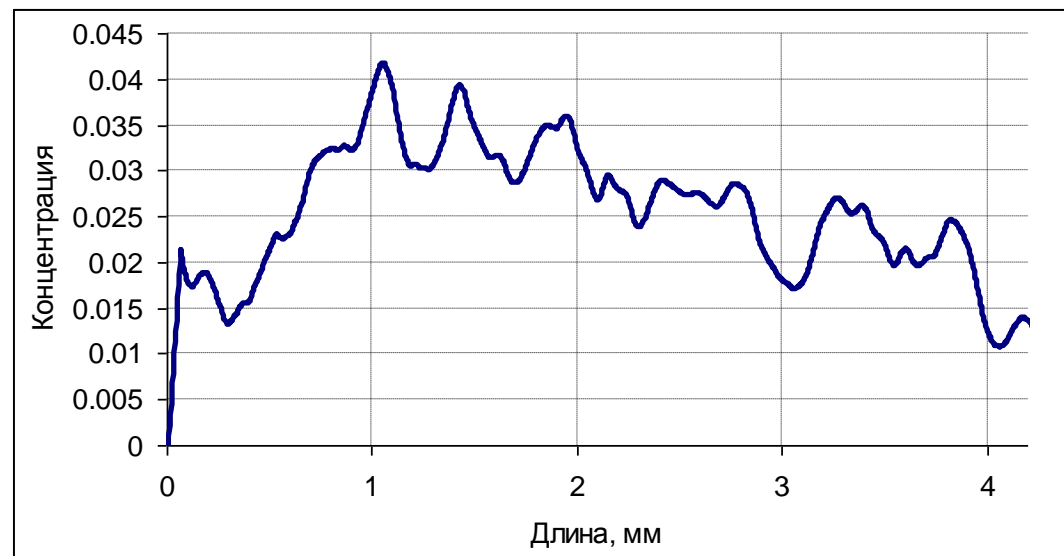
Schlumberger Confidential

Искусственный образец с неконтрастными компонентами б/р



Профили «скрытого» материала до и после закачки глины

Концентрация неконтрастного компонента



Заключение

- Предложен метод анализа гистограмм распределения серости, полученных с использованием рентгеновской микротомографии, для профилирования объемных долей фаз в образцах пористых сред
- Метод опробован на серии образцов горных пород
- Для выделения слабоконтрастных компонент разработана модификация метода с применением фильтра Кувахары
- Утверждены 2 патентные заявки, включающие описанный метод анализа томографии

