

## ВЫРАВНИВАНИЕ СЛОЕВ FIB-SEM ИЗОБРАЖЕНИЯ С ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СТРУКТУРАМИ

*Реймерс Ирина Анатольевна*<sup>1,2</sup>

*1: стажер-исследователь, научно-исследовательский центр компании  
Schlumberger, Москва, Россия*

*2: аспирант, факультет управления и прикладной математики МФТИ,  
Москва, Россия*

*E-mail: irene.ab18@gmail.com*

*Научный руководитель — Сафонов Илья Владимирович*

Одним из передовых подходов, используемых в нефтегазовой промышленности, является проведение различного рода моделирований на цифровых образцах горной породы. Для получения модели породы с нанометровым разрешением используют FIB-SEM установки, состоящие из фокусируемого ионного пучка (FIB) и растрового электронного микроскопа (SEM). Ионный пучок удаляет слой вещества, а электронный микроскоп снимает изображение поверхности. В результате многократного повторения этих операций формируется набор двумерных слоёв, из которых требуется сформировать как можно более точную трехмерную модель.

Одной из проблем при построении 3D модели является смещение слоев друг относительно друга, вызванное различными случайными флуктуациями. В ряде случаев могут присутствовать не только смещения, но и скос или поворот на небольшой угол. Грубое выравнивание, как правило, выполняется по реперным точкам непосредственно в FIB-SEM установке. Точное выравнивание слоёв требуется выполнить программным способом.

Существующие способы выравнивания основаны на последовательной обработке соседних слоев: либо на их корреляции или сравнении; либо на поиске соответствующих друг другу характерных точек с последующим нахождением матрицы преобразования; либо на алгоритмах стабилизации видео с помощью анализа оптического потока [1]. В случае направленных структур в изображении, которые почти всегда присутствуют, по крайней мере, на локальных 3D фрагментах, все эти алгоритмы ошибочно стремятся выровнять структуру и, таким образом, искажают истинную форму образца. Это можно наглядно продемонстрировать на синтетическом изображении, содержащем ориентированные в заданном направлении цилиндры.

Мы предлагаем скорректировать ошибочные сдвиги, вызванные присутствием ориентированных структур, основываясь на том фак-

те, что такие сдвиги имеют детерминированный характер на протяжении нескольких последовательных срезов, а смещения, вызванные флуктуациями в приборе, случайны. Таким образом, массивы смещений по осям  $X$  и  $Y$  в зависимости от номера слайса представляют собой одномерные сигналы, которые можно разделить на высокочастотную составляющую, соответствующую случайным флуктуациям, и низкочастотный тренд, соответствующий сдвигу по причине ориентированных структур. Данный тренд необходимо скорректировать. Для выделения низкочастотной компоненты используется фильтр Савицкого-Голея [2]. Результаты применения данного метода продемонстрированы на поперечном сечении FIB-SEM изображения, так называемом, боковом виде (рис. 1):

### Иллюстрации

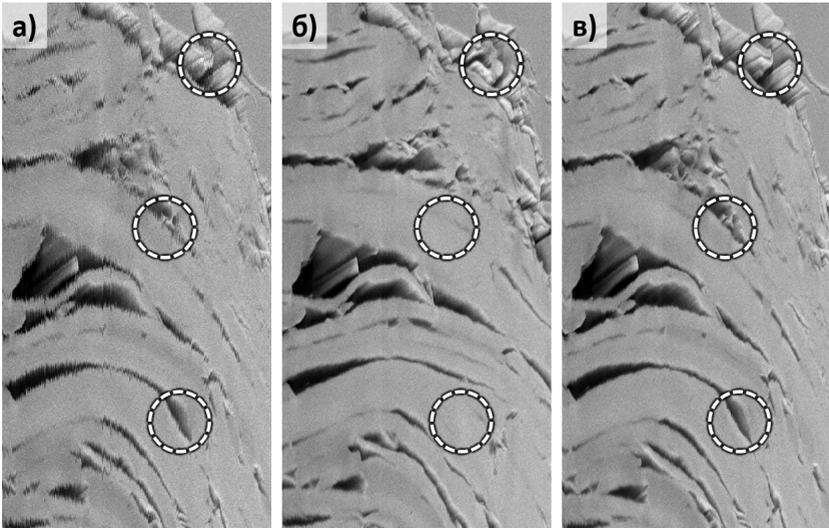


Рис. 1. а) Боковой вид исходного изображения со случайными смещениями слоев. По горизонтали изменяется номер слоя. б) Результат выравнивания с помощью поиска характерных точек SIFT и нахождения матриц преобразования с помощью RANSAC. Случайные смещения исправлены, но появляется тренд, искажающий изначальную направленность пор. в) Тренд скорректирован.

Данный подход может быть обобщен на случай, когда искажения представляют собой произвольные аффинные преобразования, включающие не только параллельный перенос, но и скос, масштабирование, поворот на небольшой угол. В таком случае выполняется декомпозиция каждой матрицы преобразования между двумя соседними слоями на произведение матриц масштабирования, скоса, поворота и параллельного переноса [3]. Далее сглаживаются сигналы углов поворота и скоса, коэффициентов масштабирования и параллельного переноса. Подстановка отфильтрованных значений сигналов в соответствующие матрицы и вычисление их произведения дает, так называемые, сглаженные матрицы трансформации. Произведение исходных матриц трансформации на обратные сглаженные матрицы позволяет получить матрицы, соответствующие случайным флуктуациям, и затем скорректировать только их.

### Литература

1. Reimers I., Safonov I., Yakimchuk I. Construction of 3D Digital Model of a Rock Sample Based on FIB-SEM Data // Proceedings of the 24th Conference of Open Innovations Association FRUCT. – 2019. – С. 352–359.
2. Savitzky A., Golay M. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // Analytical chemistry. – 1964. – Т. 36. – № 8. – С. 1627–1639.
3. Путятин Е. П., Яковлева Е. В., Любченко В. А. Разложение матрицы центроаффинного преобразования для нормализации изображений // Радиоэлектроника и информатика. – 1998. – № 4(5).