

Визуализация качества трехмерных томографических изображений при создании цифровой модели керна

А.С. Корнилов^{1,А,В}, И.А. Реймерс^{2,А,С}, И.В. Сафонов^{3,А}, И.В. Якимчук^{4,А}

^А Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже

^В Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

^С Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

¹ ORCID: 0000-0002-3651-0809, kranton94@mail.ru

² ORCID: 0000-0003-1086-7081, irene.ab18@gmail.com

³ ORCID: 0000-0002-8270-943X, isafonov@slb.com

⁴ ORCID: 0000-0003-2494-0542, iyakimchuk@slb.com

Аннотация

Различные виды томографии широко применяются в нефтегазовой отрасли для исследования внутреннего строения горных пород. С помощью изображений компьютерной рентгеновской или FIB-SEM томографии строят трехмерную модель керна с целью проведения математического моделирования течения флюида в поровом пространстве и оценки физических свойств породы. Поскольку изображения подвержены различным дефектам и искажениям, возникает задача выбора фрагмента наилучшего качества из исходного 3D изображения. На текущий момент эта операция производится вручную на основании субъективной оценки и может занимать ощутимое время. В данной статье исследуется применимость существующих безреференсных показателей качества для оценки слоёв томографических изображений и предлагается способ визуализации пространственного изменения качества трехмерного изображения. Данный способ включает в себя построение центрального сечения изображения и вывод на нем графиков показателей качества и похожести для каждого слоя, а также генерацию комбинированной тепловой карты качества фрагментов кубической формы разного размера. Предложенный подход значительно ускоряет и делает менее субъективным выбор фрагмента для дальнейшего математического моделирования в рамках концепции цифрового керна. Рассматривается выбор цветовой палитры, облегчающей анализ графической информации для людей с нарушением цветового восприятия.

Ключевые слова: безреференсная оценка качества изображений, визуализация качества, рентгеновская томография, микроКТ, FIB-SEM, цифровой керн, тепловая карта, показатель похожести, нарушения цветового восприятия.

1. Введение

Одной из важных задач в нефтегазовой промышленности является оценка фильтрационно-емкостных и прочностных свойств горных пород. Для оценки этих параметров широко применяется математическое моделирование, например, численный расчёт течения многофазной жидкости в поровом пространстве. Корректность производимых вычислений непосредственно зависит от точности трёхмерной модели нефтесодержащей породы, так называемого цифрового керна [1, 2]. Для изучения внутренней структуры и построения цифровой модели керна используются изображения компьютерной рентгеновской [3] и FIB-SEM [4] томографии. Данные технологии основаны на раз-

личных физических принципах и используются для исследования вещества на разных масштабах.

Рентгеновская компьютерная микротомография (микроКТ) относится к неразрушающим техникам визуализации внутреннего строения объектов. Образец с разных сторон облучается рентгеновским пучком. На практике это реализуется путём вращения объекта исследования. После прохождения через вещество интенсивность пучка уменьшается в соответствии с пространственным распределением поглощающей способности в образце и фиксируется детектором (рисунок 1а). По набору полученных теневых проекций с помощью специальных алгоритмов восстанавливают 3D изображение объекта (рисунок 1б). Пространственное разрешение современных лабораторных рентгеновских микротомографов достигает 1 мкм.

В установке FIB-SEM используется комбинация фокусируемого ионного пучка («focused ion beam», FIB) и растрового электронного микроскопа («scanning electron microscope», SEM) (рисунок 2). Ионным пучком с исследуемого образца удаляют тонкий слой вещества, а затем получают изображение поверхности с помощью электронного микроскопа. Многократно повторяя эти операции, формируют набор последовательных изображений слоев образца. Эта технология способна разрешить детали размером до 5-10 нанометров и широко используется для исследования наноструктуры не только горных пород, но и других объектов, таких как электроды топливных элементов, полупроводники, наноматериалы, сплавы, биологические ткани [4].

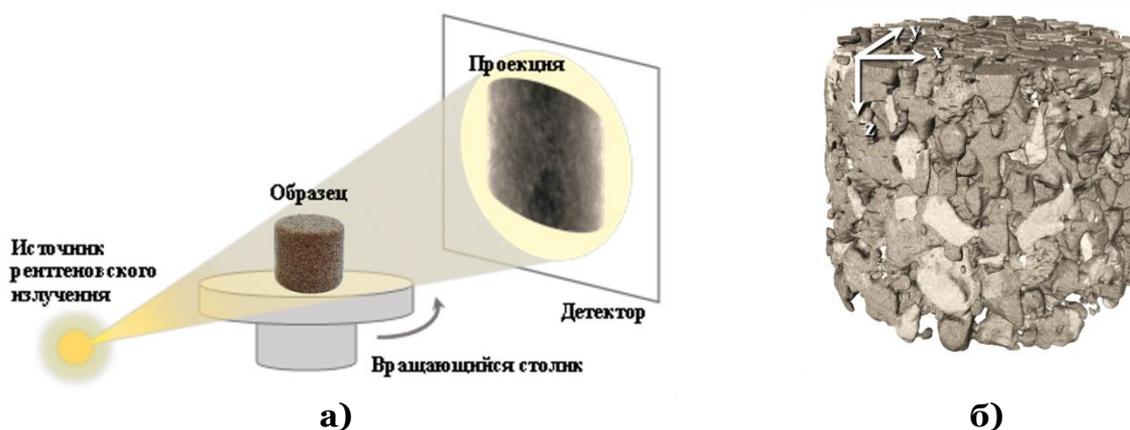


Рисунок 1. а) Схема рентгеновской микротомографии; б) восстановленное трехмерное изображение.

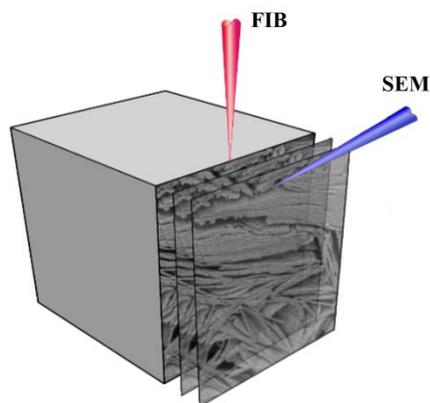


Рисунок 2. Схема FIB-SEM томографии.

Как рентгеновские, так и FIB-SEM изображения подвержены искажениям и артефактам. Дефекты могут быть как общими для любых типов растровых изображений, например, высокий уровень шумов, размытость и низкий контраст, так и специфиче-

скими для конкретной технологии регистрации изображений. Например, на микроКТ изображениях могут присутствовать артефакты в виде колец (рисунок 3). Кроме того, в образце могут быть участки высокой плотности, имеющие вид ярких пересвеченных областей, вокруг которых присутствуют локальные искажения интенсивности [3]. На FIB-SEM изображениях также встречаются подобные артефакты в виде засвеченных участков в связи с локальным накоплением электрического заряда на исследуемой поверхности. Внешне похожий эффект может наблюдаться на границах пор, где вероятность выхода вторичных электронов выше, чем внутри минеральной матрицы (выделено пунктирной линией на рисунке 4). Еще один распространенный артефакт FIB-SEM изображений — вертикальные полосы (т.н. «curtaining»), возникающие из-за отклонения ионного пучка во время травления образца (рисунок 4).

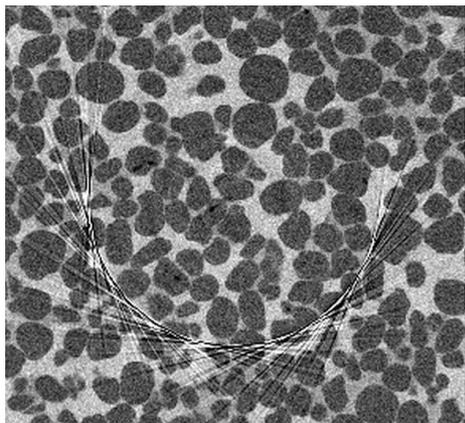


Рисунок 3. Пример кольцевых артефактов на микроКТ изображении.

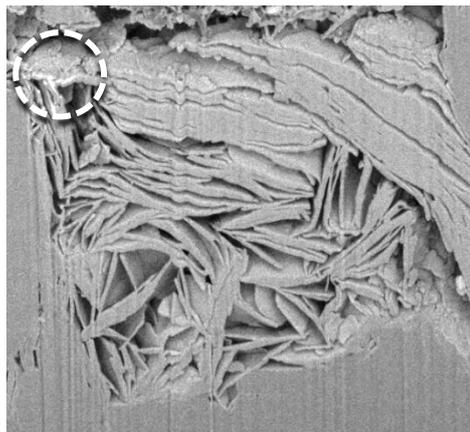


Рисунок 4. Пример засветки краев пор и вертикальных полос на FIB-SEM изображении.

Типичные изображения рентгеновской микротомографии имеют размер 2000^3 вокселей и больше. Изображения FIB-SEM имеют схожие размеры. Однако область, относящаяся к образцу, может занимать только часть такого изображения. Для последующего численного моделирования используется, как правило, фрагмент кубической формы со стороной от 400 до 1000 вокселей. Следовательно, появляется необходимость выделения из исходного 3D изображения фрагмента наилучшего качества (в частности, с наименьшим количеством артефактов), который будет использоваться для дальнейшего анализа и расчетов. В настоящее время оператор, как правило, субъективно оценивает качество и не имеет средств визуализации для выбора наиболее подходящей области. Таким образом, возникают задачи количественной оценки качества локальных фрагментов трёхмерного томографического изображения и визуализации таких оценок.

В области обработки и анализа изображений на текущий момент предложено несколько безреференсных (слепых) критериев качества, то есть таких показателей, которые позволяют оценивать качество на основе только самого изображения без размеченных эталонных данных. Как правило, они были разработаны для двумерных фотографий природы, архитектуры и бытовых сцен, поэтому их применимость для оценки качества микроКТ или FIB-SEM изображений необходимо исследовать. Тем не менее, предполагается, что для выбора наиболее качественного 3D фрагмента имеет смысл анализировать качество слоёв (срезов) микроКТ и FIB-SEM изображений с помощью существующих безреференсных критериев.

Иногда для того, чтобы характеризовать локальное качество двумерных изображений, используют тепловые карты, в которых для каждого пикселя изображения с помощью уровня яркости или цвета обозначают качество фрагмента. Например, в работе [5] тепловая карта используется для визуализации качества изображений отпечатков паль-

цев, а в [6] — для изображений предметных стёкол. Однако такой способ неэффективен для объёмных изображений, так как требует существенного времени для просмотра внутренних частей изображения. Кроме того, качество фрагмента изображения требуется оценивать для фрагментов различного размера, так как качество в числе прочих факторов может влиять на выбор размера модели цифрового ядра. В целом, можно утверждать, что в настоящий момент задача наглядного представления информации о локальном качестве 3D изображений не решена.

В данной статье мы предлагаем подход к количественной оценке качества слоёв и фрагментов трёхмерного томографического изображения и способ его визуализации, который существенно облегчает процесс выбора фрагмента для последующего количественного анализа структуры образца и математического моделирования.

2. Существующие безреференсные критерии качества изображения

В работе [7] приведена таксономия существующих безреференсных методов оценки качества фотографий. Их можно разделить на две основные категории: специфические, которые предназначены для конкретного дефекта, и универсальные. Специфические метрики качества используются, например, для оценки уровня шума [8], резкости [9], размытости [10], а также артефактов, возникающих при сжатии с потерями. Часто подобные оценки качества делаются перед коррекцией соответствующего дефекта: резкость оценивается с целью нахождения параметров для ее коррекции, а уровень JPEG-артефактов оценивается для улучшения качества сжатых изображений [11]. Однако, большинство узконаправленных метрик предназначены для идеальных моделей искажений, например анализируется только аддитивный белый гауссовский шум. Также данные критерии качества основаны на допущении, что рассматриваемые дефекты преобладают над другими, тогда как реальные изображения подвержены нескольким видам искажений одновременно. Таким образом, применение подобных частных метрик должно основываться на тщательном анализе возможных дефектов для данного типа изображений и взаимного влияния этих искажений.

Универсальные метрики качества, как правило, основаны на машинном обучении: из изображений сначала извлекаются числовые признаки, а затем регрессионная модель обучается таким образом, чтобы сопоставить признаки с оценками наблюдателей [12, 13]. Регрессионные модели обучались на фотографиях из набора данных LIVE [14], который содержит 29 неискаженных изображений и их 779 копий, подвергнутых искажениям различной степени. Использовалось одно из пяти типов искажений: аддитивный белый гауссовский шум, размытие фильтром Гаусса, артефакты JPEG сжатия, артефакты JPEG2000 сжатия, изменение яркости и контраста. В некоторых случаях модели настраивались на дополнительных наборах изображений с похожими характеристиками, например TID2008 [15].

В качестве кандидатов для оценки качества слоев микроКТ изображения были рассмотрены алгоритмы BIQI (Blind Image Quality Index) [12], BRISQUE (Blind Referenceless Image Spatial Quality Evaluator) [13], OG-IQA (Oriented Gradients Image Quality Assessment) [16], NIQE (Natural Image Quality Evaluator) [17] и IL-NIQE (Integrated Local Natural Image Quality Evaluator) [18]. Алгоритм BIQI [12] реализует двухэтапный подход для оценки качества изображений. Он основан на статистической модели естественных сцен (NSS - natural scene statistic) в вейвлет-области [19]. Предполагается, что естественные изображения обладают определёнными статистическими свойствами, а при внесении различных искажений эти статистические характеристики изменяются таким образом, что тип и степень искажения могут быть оценены с высокой степенью достоверности. Первый этап BIQI — это идентификация наиболее вероятного типа искажения. Второй этап заключается в количественной оценке степени искажения. Модели для классификации на первом этапе и регрессии на втором обучаются с помощью ме-

тогда опорных векторов (SVM) на данных из LIVE набора. Способ BRISQUE [13] использует признаки модели естественных сцен, вычисленные в пространственной области [20]. Единая регрессионная модель для всех типов искажений также обучается на наборе изображений LIVE с помощью метода опорных векторов. Алгоритм OG-IQA [16] анализирует корреляционную структуру ориентации градиентов изображения. Предполагается, что при искажении естественных изображений ориентации локальных градиентов изменяются предсказуемым образом. Для обучения регрессионной модели, применяемой для всех типов искажений из LIVE набора данных, был использован алгоритм AdaBoost для деревьев решений. К недостаткам вышеперечисленных моделей можно отнести небольшое количество фотографий и ограниченное число деформаций в обучающем наборе, что приводит к низкой обобщающей способности алгоритмов. Критерий оценки качества NIQE [17] не использует искаженные изображения для обучения. Он базируется на построении многомерного нормального распределения (multivariate Gaussian, MVG) статистических признаков, основанных на модели естественных сцен, вычисленных в пространственной области [20]. Качество оцениваемого изображения определяется как расстояние между многомерным нормальным распределением признаков данного изображения и эталонным MVG, полученным в результате обучения на признаках неискаженных изображений из LIVE набора. IL-NIQE [18] использует аналогичную идею, но работает с цветовыми RGB каналами фото и фрагментами, в которых существуют значимые изменения интенсивности. Мы предполагаем, что способ IL-NIQE может быть эффективно использован для сравнительной оценки качества слоёв микроКТ и FIB-SEM изображений. Во-первых, он чувствителен к таким общим для любых типов изображений дефектам как шум и размытость. С другой стороны, ряд специфических артефактов, например, кольцевые артефакты в микроКТ и curtaining в FIB-SEM изображениях также влияют на данный критерий, т.к. они изменяют MVG модель изображения.

3. Выбор алгоритма оценки качества томографических изображений

Для выбора наиболее подходящего в рассматриваемой задаче алгоритма безреференсной оценки качества было проведено исследование на слоях томографических изображений песчаника. Были отобраны 10 изображений одного и того же образца, отсканированного несколькими микроКТ системами в различных режимах. Три эксперта независимо друг от друга попарно сравнили их качество. Оценки экспертов были преобразованы в непрерывную шкалу [21]. Затем на основании коэффициента корреляции проводилось сравнение с оценками вышеперечисленных алгоритмов. На рисунке 5 представлены центральные фрагменты двух изображения из данного набора.

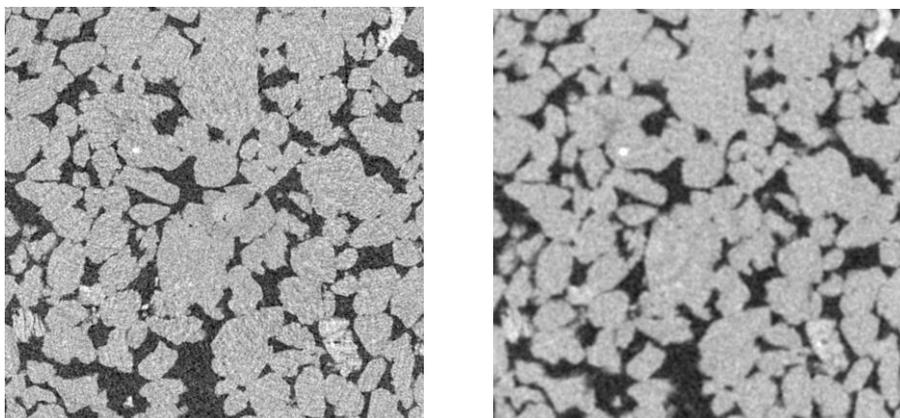


Рисунок 5. Примеры фрагментов изображений различного качества из тестового набора.

В таблице 1 представлены значения коэффициента корреляции Пирсона между оценками экспертов и показателями качества, вычисленными при помощи рассматриваемых алгоритмов для тестового набора изображений. Качество оценивалось для всего изображения слоя и для его центральной части (с каждой стороны исключались по 25% изображения). Дополнительный выбор центральной части обусловлен тем, что на краях слоя, как правило, присутствуют не относящиеся к образцу участки.

Наилучший результат показал алгоритм IL-NIQE для центральной части слоя. Можно предположить, что это объясняется тем, что он менее других показателей связан с фиксированным набором искажений данных, используемых для обучения, а также применяет более простую модель, менее склонную к переобучению.

Таблица 1. Коэффициент корреляции Пирсона между оценками экспертов и рассматриваемыми критериями качества микроКТ изображений.

Алгоритм	Коэффициент корреляции (для всего слоя)	Коэффициент корреляции (для центральной части)
BIQI	0.03	0.86
BRISQUE	0.69	0.43
NIQE	0.63	0.16
IL-NIQE	0.53	0.94
OG-IQA	0.48	0.39

На FIB-SEM изображение (рисунок 4) был добавлен аддитивный белый гауссовский шум с различным стандартным отклонением, а затем рассчитаны нормированные показатели качества (рисунок 6). Критерии BIQI и OG-IQA не сохраняют монотонность с возрастанием дисперсии шума, поэтому не могут быть использованы для оценки качества FIB-SEM изображений.

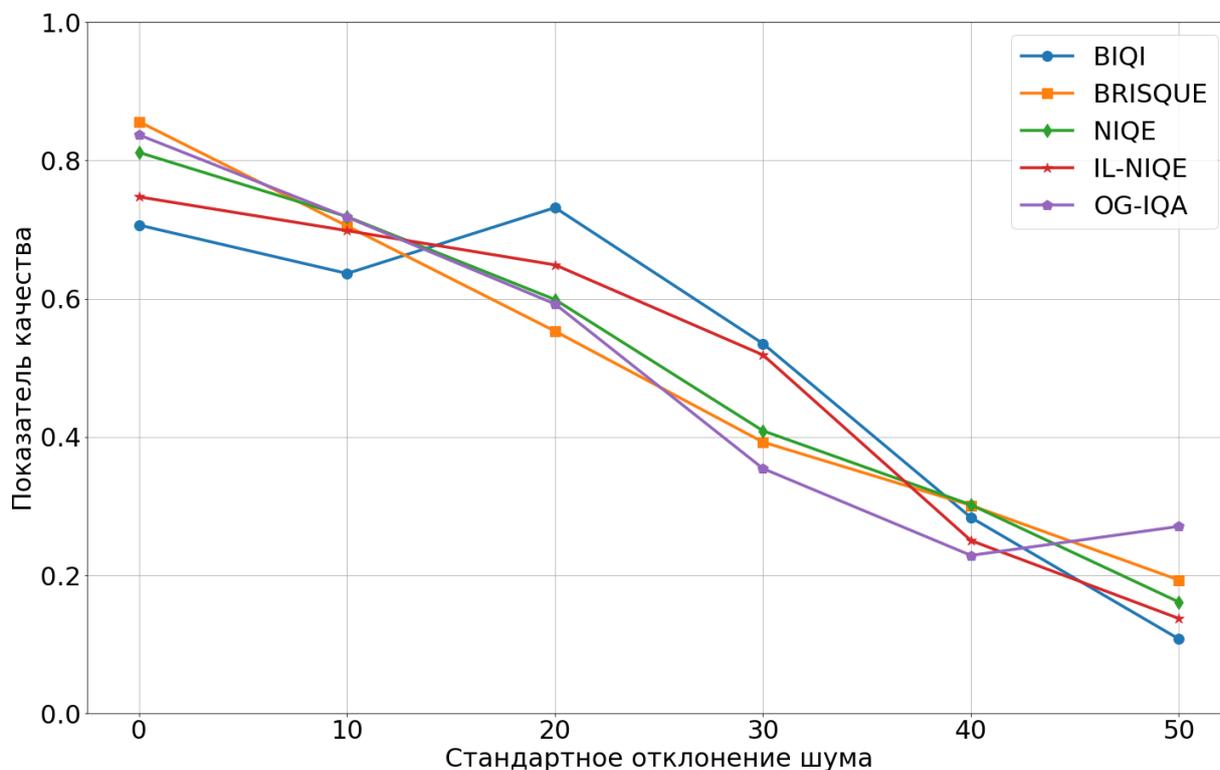


Рисунок 6. Зависимость показателя качества от стандартного отклонения аддитивного белого гауссовского шума, наложенного на FIB-SEM изображение.

Далее при оценке качества каждого слоя будет использоваться критерий качества IL-NIQE, так как он лучше коррелирует с мнением экспертов о качестве микроКТ изображений, а также монотонно убывает при возрастании шума на FIB-SEM изображениях.

4. Способ визуализации качества 3D томографических изображений

Трёхмерные микроКТ и FIB-SEM изображения, как правило, хранятся в виде слоёв в плоскости (xy), и чаще всего просматриваются/анализируются в этой же плоскости. Специализированные программные пакеты такие, как Avizo® (Thermo Fisher Scientific) [22], в интерактивном режиме позволяют визуализировать любые проекции и сечения 3D изображения. С целью оперативной оценки качества томографических изображений и выбора фрагмента для дальнейших исследований полезным является анализ центрального сечения изображения в плоскости (xz) или (yz). В случае рентгеновской томографии такое центральное сечение позволяет увидеть, какая часть изображения относится к образцу. Для FIB-SEM изображений с помощью бокового вида легко понять насколько хорошо выровнены слои друг относительно друга. Наличие относительных смещений в плоскости (xy) между соседними слоями приводит к неровным краям пор на боковом виде (рисунок 7).

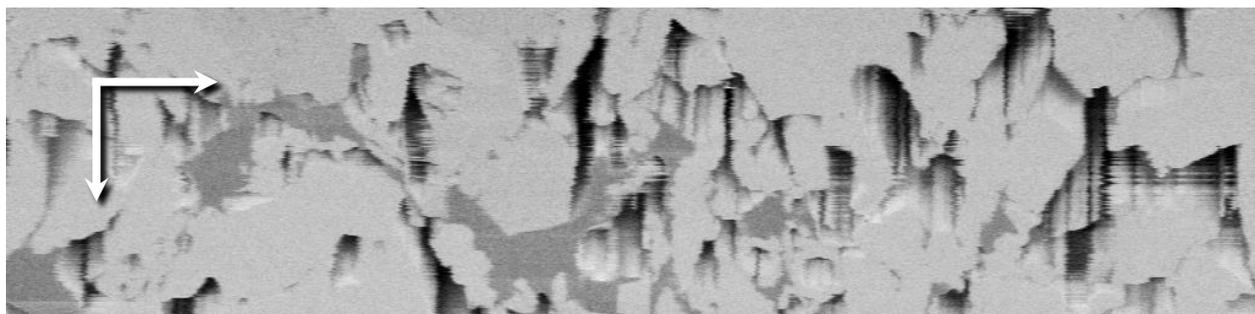


Рисунок 7. Центральное сечение FIB-SEM изображения в плоскости (xz).

Помимо качества изображения важным параметром при выборе наилучшего фрагмента являются его однородность и представительность (мера сходства его характеристик с аналогичными по всему объёму образца). Для характеристики однородности трехмерного изображения и последующего выбора представительного фрагмента полезно ввести показатель «похожести» слоев. Пусть H_c — совокупная гистограмма набора нескольких центральных слоев. Пусть также H — гистограмма произвольного слоя внутри области интереса. После соответствующей нормировки обе гистограммы H_c и H могут рассматриваться как распределения вероятностей. Для двух дискретных распределений вероятностей H_c и H схожесть определяется как единица минус расстояние Хеллингера [23]:

$$D_{sim} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{i=0}^{255} (\sqrt{H_{c_i}} - \sqrt{H_i})^2} \quad (1)$$

Полученные значения показателей качества и схожести каждого слоя целесообразно показывать на изображении центрального сечения в плоскости (xz) или (yz) (рисунок 8). Такой способ визуализации позволяет оператору выбрать диапазон слоёв, наиболее подходящий для последующего моделирования в рамках концепции цифрового ядра.

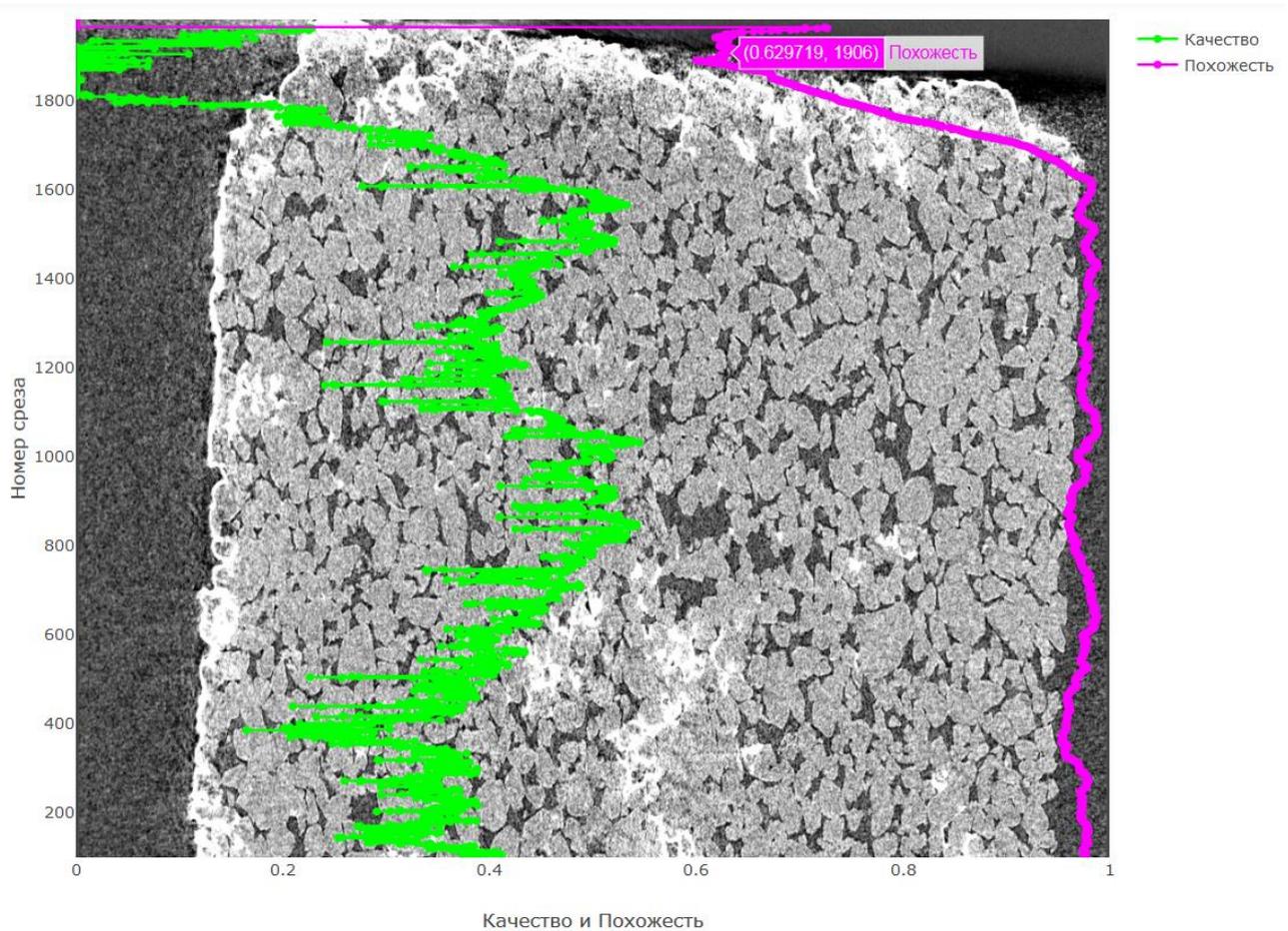


Рисунок 8. Зависимости показателей качества и похожести слоя от его номера на центральном сечении изображения в плоскости (xz).

Ещё одним параметром задачи выбора оптимального фрагмента является его размер. В зависимости от целей исследования и особенностей строения образца требуются фрагменты различного объёма (как правило, от 0.1 мм^3 до 10 мм^3). Таким образом, представляет интерес информация об интегральном качестве вырезаемого фрагмента изображения в зависимости от его размера. С этой целью предлагается оценивать и визуализировать качество кубического фрагмента изображения с центром в заданном слое для фрагментов разного размера. Значение качества для такого фрагмента вычисляется как среднее значение из показателей качества слоев, пересекающих данный куб перпендикулярно оси z . Результаты продемонстрированы на рисунке 9. По оси ординат отложена z -координата центра вписанного куба, а по оси абсцисс — его размер. Цвет характеризует качество данного куба. По сути, для каждого размера фрагмента строится тепловая карта вдоль оси z . Комбинация таких тепловых карт в единый рисунок дает оператору возможность одновременно определить оптимальное положение фрагмента в исходном 3D изображении и выбрать его размер. Отметим, что продемонстрированный выше подход для простоты изложения подразумевает оценку качества фрагментов, выбираемых строго из центра слоёв. Не составляет труда осуществлять поиск оптимального расположения куба в плоскости ($xу$). В этом случае на тепловой карте следует отмечать максимально достижимое значение качества для заданных значений размера и номера центрального среза куба.

Использование библиотеки Plotly [24] позволяет добавить интерактивный просмотр значений на графике (рисунок 7) и комбинированной тепловой карты (рисунок 8).

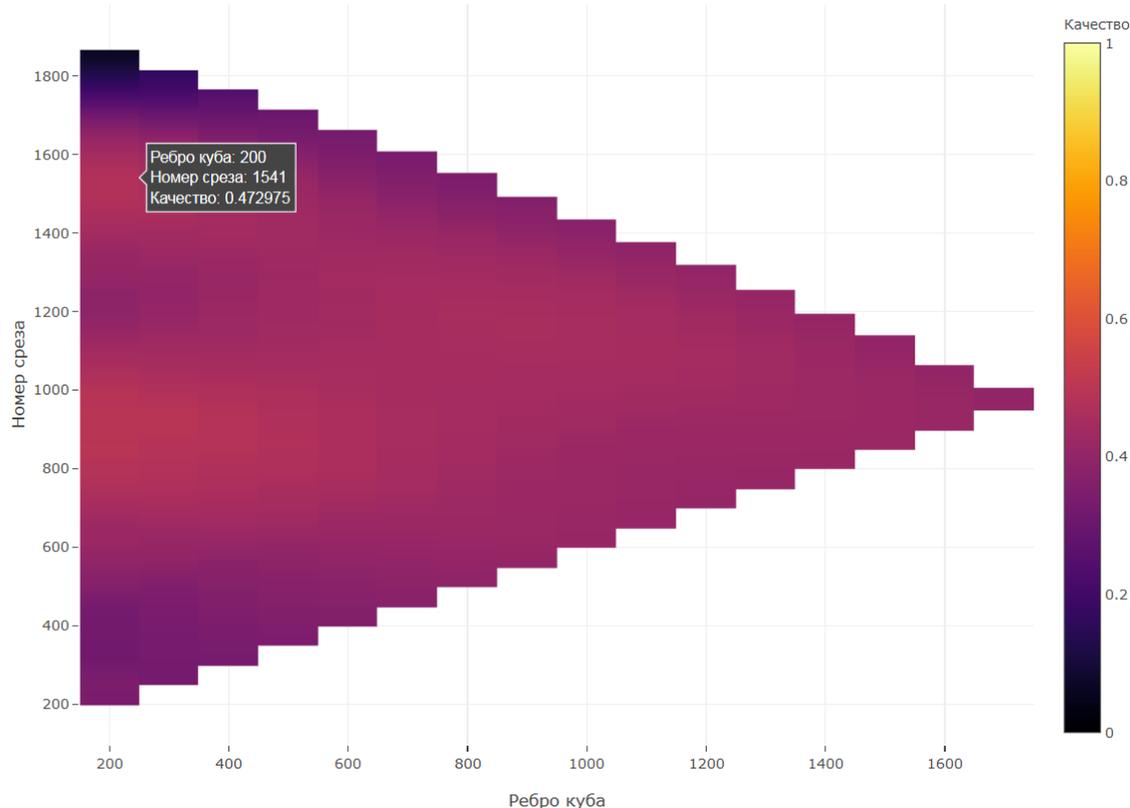


Рисунок 9. Комбинированная тепловая карта качества фрагмента кубической формы.

5. Особенности визуализации при нарушениях цветового зрения

Недостатком использования цветных графиков и тепловых карт является то, что люди, имеющие различные степени нарушения цветового восприятия, могут испытывать сложности с анализом цветовой информации в зависимости от выбранной палитры. При построении цветных графиков следует избегать не только комбинаций красного и зеленого, но и зеленого и коричневого, желтого и салатного, зеленого и синего, синего и серого, синего и пурпурного и др. [25, 26] На рисунке 10 показана неудачная цветовая комбинация и то, как она выглядит при дейтеранопии — нечувствительности к зеленому цвету. Изображение получено с помощью инструмента Color Blindness Simulator [27].

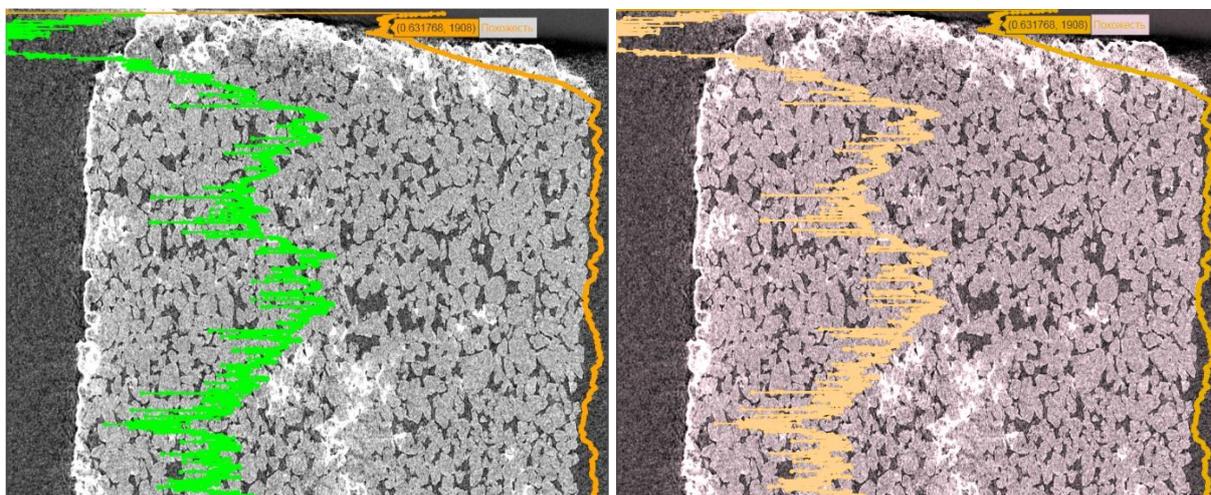


Рисунок 10. Вид цветных графиков при отсутствии нарушений цветового восприятия и при дейтеранопии.

Удачных комбинаций, которые одновременно подходили бы для большинства видов нарушений цветового восприятия, намного меньше. Такими являются, например, зеленый (0, 255, 0) и пурпурный (255, 0, 255), синий (0, 127, 255) и оранжевый (255, 127, 0) (рисунок 11) [29]. В целом, рекомендуется использовать различные маркеры, текстуры, цвета разной интенсивности.

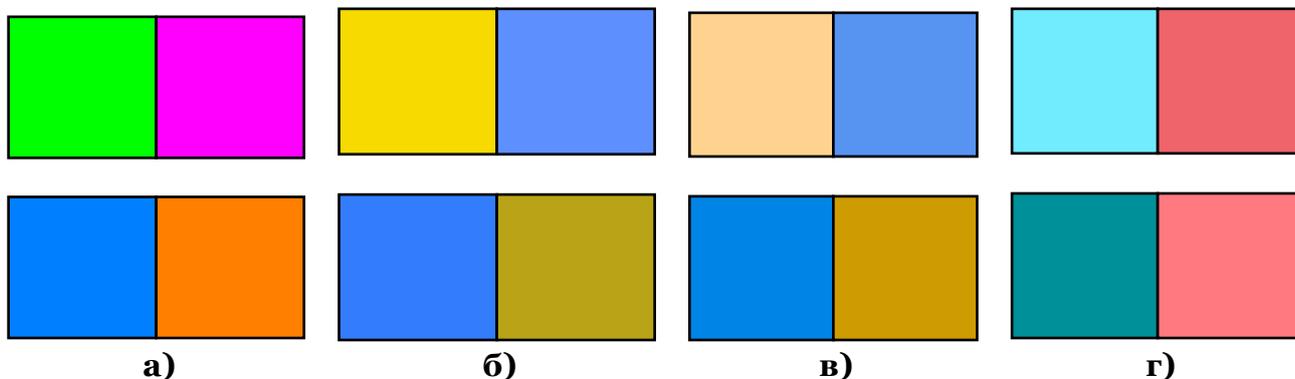


Рисунок 11. Комбинации зеленого и пурпурного, синего и оранжевого цветов, какими их видят: а) при отсутствии нарушений цветового восприятия; б) при протанопии; в) при дейтеранопии; г) при тританопии.

При построении тепловых карт для людей с нарушением цветового зрения наиболее критичным искажением является потеря монотонности цветовой палитры, когда одному цвету начинает соответствовать несколько абсолютно разных числовых значений. Однако даже сохраняющие монотонность палитры, в любом случае, частично теряют цветовой контраст на всем интервале или на некоторых участках. При неудачном совпадении диапазона данных и искажения палитры тепловая карта может потерять информативность. Оптимальное решение — проверять тепловые карты с помощью симулятора цветовой слепоты и при необходимости корректировать выбор цветовой шкалы в соответствии с числовым диапазоном данных.

Для построения тепловых карт вне зависимости от наличия нарушений цветового зрения рекомендуется использовать цветовые палитры с линейно возрастающей интенсивностью. В противном случае возможно восприятие ложных градиентов, поскольку интенсивность является наиболее важной характеристикой для человеческого зрения. Кроме того, оттенки цветов должны быть подобраны таким образом, чтобы восприниматься эквидистантными в цветовом пространстве (т.е. быть “perceptually uniform”) [29]. Популярными палитрами, которые удовлетворяют этим требованиям, являются, например, *viridis* из библиотеки *matplotlib* [30], *parula* в пакете *Matlab* и набор палитр *stosean* для океанографических приложений [31].

При использовании палитры *viridis* тепловая карта на рисунке 9 имела низкий цветовой контраст, а при некоторых видах цветовой слепоты становилась несодержательной. Поэтому нами была выбрана палитра *inferno* из библиотеки *matplotlib*, также относящаяся к классу “perceptually uniform”. В целом, она сохраняет информативность при различных искажениях, а также в черно-белом представлении, однако переходит в оттенки одного цвета при одном из самых редких нарушений цветового зрения — тританопии (0,0001% населения [32]) (рисунок 12). Возможное решение — изменение настроек монитора, повышение контраста изображения или автоматическое масштабирование цветовой шкалы для каждой карты в отдельности.



Рисунок 12. Вид палитры *inferno* в норме и при различных типах нарушений цветового восприятия.

6. Заключение

В работе исследована применимость пяти существующих безреференсных показателей качества для оценки слоёв томографических изображений. Наибольшее совпадение с оценками экспертов показал критерий IL-NIQE. Вероятная причина этого состоит в том, что он меньше других показателей связан с фиксированным набором искажений данных, используемых при обучении, а также применяет более простую модель, менее склонную к переобучению.

Предложен способ визуализации качества трехмерного томографического изображения с целью выбора наилучшего фрагмента для последующего математического моделирования в рамках задач цифрового керн. Данный подход включает в себя вывод на экран центрального сечения изображения в плоскости (xz) или (yz) и построение на нем значений показателей качества и похожести для каждого слоя, где показатели похожести слоев вычисляются как обратное расстояние Хеллинджера. Также предлагается строить комбинированную тепловую карту качества фрагментов кубической формы разного размера, вписанных в исходное трехмерное изображение. Построение графиков и тепловой карты осуществляется с учетом их возможных искажений при ограниченном цветовом восприятии наблюдателя. Главным требованием при выборе палитры цветов было сохранение ее монотонности и информативности при различных видах нарушений цветового зрения. Палитра *inferno* библиотеки *matplotlib* в наибольшей степени соответствует данным требованиям.

Недостатком предложенного подхода является невозможность при выборе наиболее качественного фрагмента принять во внимание локальные артефакты, которые могут присутствовать в отдельных слоях томографического изображения. Реализация такого функционала требует разработки собственного алгоритма оценки качества анализируемых изображений, способного обнаруживать артефакты и оценивать качество в локальной области. Разработка алгоритма для обнаружения специфических артефактов изображений рентгеновской микротомографии и FIB-SEM, а также визуализация пространственной карты артефактов в виртуальной реальности, являются предметом наших будущих исследований.

Список литературы

1. Koroteev D. et al. Direct hydrodynamic simulation of multiphase flow in porous rock // *Petrophysics*. – 2014. – Т. 55. – № 04. – С. 294-303.
2. Berg C. F., Lopez O., Berland H. Industrial applications of digital rock technology // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – Т. 157. – С. 131-147.
3. Buzug T. M. *Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 522 с.
4. Holzer L., Cantoni M. Review of FIB Tomography // *Nanofabrication Using Focused Ion and Electron Beams: Principles and Applications* / ред. I. Utke, S. Moshkalev, P. Rusell. New York: Oxford University Press, 2012. – 752 с.

5. Tabassi E., Wilson C. L. A novel approach to fingerprint image quality //IEEE International Conference on Image Processing 2005. – 2005. – Т. 2. – С. II-37.
6. SlideNet: Zhang T. et al. Slidenet: Fast and accurate slide quality assessment based on deep neural networks // 2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – 2018. – С. 2314-2319.
7. Jenadeleh M., Masaeli M. M., Moghaddam M. E. Blind image quality assessment based on aesthetic and statistical quality-aware features //Journal of Electronic Imaging. – 2017. – Т. 26. – № 4. – С. 043018.
8. Pyatykh S., Hesser J., Zheng L. Image noise level estimation by principal component analysis //IEEE transactions on image processing. – 2013. – Т. 22. – № 2. – С. 687-699.
9. Safonov I. V. et al. Adaptive sharpening of photos //Color Imaging XIII: Processing, Hardcopy, and Applications. – 2008. – Т. 6807. – С. 68070U.
10. Crete F. et al. The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric //Human vision and electronic imaging XII. – 2007. – Т. 6492. – С. 64920I.
11. Safonov I. V., Kurilin I. V., Rychagov M.N., Tolstaya E.V. Adaptive Image Processing Algorithms for Printing. Springer Singapore, 2018. – 304 с.
12. Moorthy A. K., Bovik A. C. A two-step framework for constructing blind image quality indices //IEEE Signal processing letters. – 2010. – Т. 17. – № 5. – С. 513-516.
13. Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C. No-reference image quality assessment in the spatial domain //IEEE Transactions on Image Processing. – 2012. – Т. 21. – № 12. – С. 4695-4708.
14. Sheikh H. R., Sabir M. F., Bovik A. C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms //IEEE Transactions on image processing. – 2006. – Т. 15. – № 11. – С. 3440-3451.
15. Ponomarenko N. et al. TID2008-a database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics //Advances of Modern Radioelectronics. – 2009. – Т. 10. – № 4. – С. 30-45.
16. Liu L. et al. Blind image quality assessment by relative gradient statistics and adaboosting neural network //Signal Processing: Image Communication. – 2016. – Т. 40. – С. 1-15.
17. Mittal A., Soundararajan R., Bovik A. C. Making a “completely blind” image quality analyzer //IEEE Signal Processing Letters. – 2013. – Т. 20. – № 3. – С. 209-212.
18. Zhang L., Zhang L., Bovik A. C. A feature-enriched completely blind image quality evaluator //IEEE Transactions on Image Processing. – 2015. – Т. 24. – № 8. – С. 2579-2591.
19. Srivastava A. et al. On advances in statistical modeling of natural images //Journal of mathematical imaging and vision. – 2003. – Т. 18. – № 1. – С. 17-33.
20. Ruderman D. L., Bialek W. Statistics of natural images: Scaling in the woods //Advances in neural information processing systems. – 1994. – С. 551-558.
21. Mantiuk R. K., Tomaszewska A., Mantiuk R. Comparison of four subjective methods for image quality assessment //Computer graphics forum. – Т. 31. – № 8. – С. 2478-2491.
22. Веб-сайт программного пакета Avizo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thermofisher.com/ru/ru/home/industrial/electron-microscopy/electron-microscopy-instruments-workflow-solutions/3d-visualization-analysis-software.html> (дата обращения 01.03.2019).
23. Hellinger E. Neue begründung der theorie quadratischer formen von unendlichvielen veränderlichen //Journal für die reine und angewandte Mathematik. – 1909. – Т. 136. – С. 210-271.
24. Веб-сайт графической библиотеки Plotly [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plot.ly> (дата обращения 01.03.2019).
25. Рабкин Е. Б. Полихроматические таблицы для исследования цветоощущения. – Москва: Медицина, 1971. – 174 с.

26. Okabe M., Ito K. Color Universal Design (CUD): How to make figures and presentations that are friendly to colorblind people [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jfly.iam.u-tokyo.ac.jp/color> (дата обращения 01.03.2019)
27. Daniel Flück. Color Blindness Simulator [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator> (дата обращения 01.03.2019).
28. Nuñez J. R., Anderton C. R., Renslow R. S. Optimizing colormaps with consideration for color vision deficiency to enable accurate interpretation of scientific data //PloS one. – 2018. – Т. 13. – № 7. – С. e0199239.
29. Geissbuehler M., Lasser T. How to display data by color schemes compatible with red-green color perception deficiencies //Optics express. – 2013. – Т. 21. – № 8. – С. 9862-9874.
30. Веб-сайт библиотеки matplotlib [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matplotlib.org/> (дата обращения 01.03.2019).
31. Thyng K. M. et al. True colors of oceanography: Guidelines for effective and accurate colormap selection //Oceanography. – 2016. – Т. 29. – № 3. – С. 9-13.
32. Sharpe L. T., Stockman A., Jagle H. and Nathans J. 1999. Opsin Genes, Cone Pigments, Color Vision and Color Blindness //Color vision / ред. К. R. Gegenfurtner, L. T. Sharpe. – Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

Visualization of quality of 3D tomographic images in construction of digital rock model

A.S. Kornilov^{1,A,B}, I.A. Reimers^{2,A,C}, I.V. Safonov^{3,A}, I.V. Yakimchuk^{4,A}

^A Schlumberger Moscow Research Center

^B National Research Nuclear University MEPhI

^C Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

¹ ORCID: 0000-0002-3651-0809, kranton94@mail.ru

² ORCID: 0000-0003-1086-7081, irene.ab18@gmail.com

³ ORCID: 0000-0002-8270-943X, isafonov@slb.com

⁴ ORCID: 0000-0003-2494-0542, iyakimchuk@slb.com

Abstract

Various types of tomography are widely employed in oil and gas industry for studying structure of rocks. Using X-ray or FIB-SEM tomography, a 3D model of a core sample is constructed for mathematical simulations of fluid flow in porous media and evaluation of physical characteristics of rock. Since images have various defects and distortions, there is a problem of selection of a fragment with the best quality from the initial 3D image. At the moment this operation is made manually on the basis of an expert's opinion and takes significant time. In this paper, we investigate applicability of existing non-reference quality metrics for evaluation of tomographic images and propose the approach for visualization of spatial change of 3D image quality. The method includes the construction of central cross-section; plotting graphs of quality and similarity measures for each slice over the cross-section; generation of combined heat map of quality of cubic fragments with various size. The proposed approach significantly accelerates and makes less subjective selection of the best region for further simulations in digital rock workflow. The choice of colour scale is considered to facilitate the analysis of graphical information for people with colour vision deficiency.

Keywords: referenceless assessment of image quality, quality visualization, X-ray tomography, microCT, FIB-SEM, digital rock, heat map, similarity index, colour vision deficiency.

References

1. Koroteev D. et al. Direct hydrodynamic simulation of multiphase flow in porous rock. *Petrophysics*, 2014, vol. 55, No 04, pp. 294-303.
2. Berg C. F., Lopez O., Berland H. Industrial applications of digital rock technology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 157, pp. 131-147.
3. Buzug T. M. *Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 522 pp.
4. Holzer L., Cantoni M. Review of FIB Tomography. *Nanofabrication Using Focused Ion and Electron Beams: Principles and Applications*, edited by I. Utke, S. Moshkalev, P. Russell, 2012, 752 pp.
5. Tabassi E., Wilson C. L. A novel approach to fingerprint image quality. *IEEE International Conference on Image Processing 2005*, 2005, vol. 2, p. II-37.
6. SlideNet: Zhang T. et al. Slidenet: Fast and accurate slide quality assessment based on deep neural networks. *2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2018, pp. 2314-2319.

7. Jenadeleh M., Masaeli M. M., Moghaddam M. E. Blind image quality assessment based on aesthetic and statistical quality-aware features. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, vol. 26, № 4, pp. 043018.
8. Pyatykh S., Hesser J., Zheng L. Image noise level estimation by principal component analysis. *IEEE transactions on image processing*, 2013, vol. 22(2), pp. 687-699.
9. Safonov I. V. et al. Adaptive sharpening of photos. *Color Imaging XIII: Processing, Hard-copy, and Applications*, 2008, vol. 6807, p. 68070U.
10. Crete F. et al. The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric. *Human vision and electronic imaging XII*, 2007, vol. 6492, p. 64920I.
11. Safonov I. V., Kurilin I. V., Rychagov M.N., Tolstaya E.V. *Adaptive Image Processing Algorithms for Printing*. Springer Singapore, 2018. – 304 p.
12. Moorthy A. K., Bovik A. C. A two-step framework for constructing blind image quality indices. *IEEE Signal processing letters*, 2010, vol. 17(5), pp. 513-516.
13. Mittal A., Moorthy A. K., Bovik A. C. No-reference image quality assessment in the spatial domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, vol. 21(12), pp. 4695-4708.
14. Sheikh H. R., Sabir M. F., Bovik A. C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms. *IEEE Transactions on image processing*, 2006, vol. 15(11), pp. 3440-3451.
15. Ponomarenko N. et al. TID2008-a database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics. *Advances of Modern Radioelectronics*, 2009, vol. 10(4), pp. 30-45.
16. Liu L. et al. Blind image quality assessment by relative gradient statistics and adaboosting neural network. *Signal Processing: Image Communication*, 2016, vol. 40, pp. 1-15.
17. Mittal A., Soundararajan R., Bovik A. C. Making a “completely blind” image quality analyzer. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, vol. 20(3), pp. 209-212.
18. Zhang L., Zhang L., Bovik A. C. A feature-enriched completely blind image quality evaluator. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, vol. 24(8), pp. 2579-2591.
19. Srivastava A. et al. On advances in statistical modeling of natural images. *Journal of mathematical imaging and vision*, 2003, vol. 18(1), pp. 17-33.
20. Ruderman D. L., Bialek W. Statistics of natural images: Scaling in the woods. *Advances in neural information processing systems*. – 1994, pp. 551-558.
21. Mantiuk R. K., Tomaszewska A., Mantiuk R. Comparison of four subjective methods for image quality assessment. *Computer graphics forum*, vol. 31(8), pp. 2478-2491.
22. Avizo web-site [Online]: <https://www.thermofisher.com/ru/ru/home/industrial/electron-microscopy/electron-microscopy-instruments-workflow-solutions/3d-visualization-analysis-software.html> (accessed on 01.03.2019).
23. Hellinger E. Neue begründung der theorie quadratischer formen von unendlichvielen veränderlichen. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1909, vol. 136, p. 210-271.
24. Plotly web-site [Online]: <https://plot.ly> (accessed on 01.03.2019).
25. Rabkin E. B. Polychromaticheskie tablitsy dlya issledovania tsvetooshushenia [Polychromatic tables for research of colour perception]. Moscow, 1971, 174 p. [in Russian].
26. Okabe M., Ito K. Color Universal Design (CUD): How to make figures and presentations that are friendly to colorblind people [Online]: <http://jfly.iam.u-tokyo.ac.jp/color> (accessed on 01.03.2019).
27. Daniel Flück. Color Blindness Simulator [Online]: <https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator> (accessed on 01.03.2019).
28. Nuñez J. R., Anderton C. R., Renslow R. S. Optimizing colormaps with consideration for color vision deficiency to enable accurate interpretation of scientific data. *PloS one*, 2018, vol. 13(7), p. e0199239.
29. Geissbuehler M., Lasser T. How to display data by color schemes compatible with red-green color perception deficiencies. *Optics express*, 2013, vol. 21(8), pp. 9862-9874.
30. Matplotlib web-site [Online]: <https://matplotlib.org/> (accessed on 01.03.2019).

31. Thyng K. M. et al. True colors of oceanography: Guidelines for effective and accurate colormap selection. *Oceanography*, 2016, vol. 29(3), pp. 9-13.
32. Sharpe L. T., Stockman A., Jagle H. and Nathans J. Opsin Genes, Cone Pigments, Color Vision and Color Blindness. *Color vision*, edited by K. R. Gegenfurtner, L. T. Sharpe. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.