

ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗ ЁМКОСТНЫХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО КОЛЛЕКТОРА НА БАЗЕ ДАННЫХ МИКРОТОМОГРАФИИ

В. В. Химуля*,¹ 

¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Российская Федерация

* **Контакт:** Валерий Владимирович Химуля, valery.khim@gmail.com

Аннотация: В работе представлены результаты неразрушающих исследований и цифрового анализа внутренней структуры пород-коллекторов газоконденсатного месторождения северного шельфа. Исследование выполнено на основе методов рентгеновской микротомографии с использованием прибора Procon CT-MINI Института проблем механики РАН. Результаты получены в рамках нового цикла продолжающихся исследований арктических месторождений РФ. По полученным данным томографии построены трёхфазные 3D-модели, на базе которых созданы цифровые двойники коллектора. Проведены количественные порометрический и гранулометрический анализы, а также пространственная визуализация распределения неоднородностей. Определено, что исследуемый газовый коллектор представляет собой слабосцементированный песчаник с высокой пористостью и хорошо связным капиллярным поровым пространством. Основной объём пор представлен открытыми каналами, распределение пор обеспечивает устойчивый капиллярный режим фильтрации. Распределение зёрен матрицы близко к нормальному и характеризуется хорошей сортировкой. Соотношение размеров пор и зёрен около 1 : 2 типично для хорошо уплотнённых и фильтрующих песчаников. Металлические включения распределены равномерно, пространственно изолированы и не влияют на глобальную фильтрационную способность. Выявленные параметры пористости, распределения пор и зёрен могут служить первичной базой при оценке параметров воздействия на коллектор, включая гидроразрыв пласта, кислотную обработку и другие методы интенсификации. Учёт изолированных и тупиковых пор позволяет уточнять расчёты остаточной насыщенности при моделировании вытеснения флюидов. Разрабатываемая цифровая методика анализа имеет особую актуальность для условий арктического шельфа, в силу сложности по проведению массового отбора керна и сниженными прочностными характеристиками материала. В этих условиях цифровой анализ становится незаменимым инструментом неразрушающей диагностики, позволяющим экономить ценный керновый материал и расширить спектр получаемых данных о коллекторе.

Ключевые слова: цифровой анализ керна, рентгеновская томография горных пород, пористость, ёмкостные свойства коллекторов, порометрия, гранулометрия, структура порового пространства

Цитирование: Химуля В. В. Цифровой анализ ёмкостных и структурных характеристик газоконденсатного коллектора на базе данных микротомографии // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES3003. — DOI: 10.2205/2026es001057 — EDN: HHHMAY

RESEARCH ARTICLE

<https://elibrary.ru/HHHMAY>

Получено: 3 октября 2025 г.

Принято: 15 января 2026 г.

Опубликовано: 16 июля 2026 г.



© 2026. Коллектив авторов.

1. Введение

Изучение микроструктурных свойств пород-коллекторов играет ключевую роль в оценке их фильтрационно-ёмкостных характеристик, создании и корректировке механико-гидродинамических моделей, анализе запасов [Qian et al., 2022]. Традиционные методы лабораторного анализа, такие как ртутная порометрия и ситовой анализ,

обладают ограничениями по разрешению и могут быть разрушительными для образцов [Пазина и др., 2013]. В последние годы цифровая физика горных пород (Digital Rock Physics, DRP) стала мощным инструментом для неразрушающего исследования пористой структуры. С помощью микрокомпьютерной томографии высокого разрешения и последующего численного анализа стало возможным детально исследовать поровое пространство и матрицу коллекторов, а также проводить гранулометрический и порометрический анализ на цифровых моделях [Kim et al., 2013; Labati et al., 2019].

Цифровой анализ ядра позволяет проводить численные эксперименты на основе 3D-моделей, полученных с помощью микротомографии. Это обеспечивает более точную оценку пористости, проницаемости и других петрофизических свойств [Eggers et al., 2008; Stull et al., 2014]. Современные исследования указывают на то, что цифровые методы анализа могут эффективно заменять или дополнять традиционные лабораторные подходы, обеспечивая высокую точность и воспроизводимость результатов [Ganzer et al., 2013; Al-Marzouqi, 2018].

Гранулометрия позволяет получить информацию о размерах, форме и распределении зёрен минеральной матрицы, что напрямую связано с упаковкой, контактами между зёрнами и потенциальной проницаемостью породы [Корбанова, 1986]. Порометрический анализ, в свою очередь, даёт представление о размерах, форме, извилистости и связанности пор – параметрах, определяющих способность флюида свободно перемещаться в объёме породы [Hasiuk et al., 2018]. Сочетание этих методов расширяет возможности к точному описанию структуры коллектора [Moreno-Atanasio et al., 2010] и может позволить оценить его проницаемость, капиллярные свойства, остаточную насыщенность и потенциальную эффективность разработки.

Цифровой подход позволяет не только анализировать пористую структуру, но и выявлять локальные неоднородности, такие как минеральные примеси, остатки пластовых флюидов и участки с потенциальной закупоркой пор [Kyle and Ketcham, 2015]. Это имеет прямое прикладное значение для повышения надёжности геомеханических и гидродинамических моделей [Kozhevnikov et al., 2021], используемых в инженерных задачах – от выбора режимов закачки и оценки риска фильтрационных осложнений до проектирования методов повышения нефтеотдачи и разработки подземных хранилищ. Возможность численного анализа на цифровых двойниках породы делает этот подход мощным инструментом как для фундаментальных исследований, так и для оптимизации промышленной эксплуатации коллекторов [Li et al., 2022]. Кроме того, важным преимуществом цифрового подхода является возможность проведения неразрушающих исследований, что позволяет экономить ценный керновый материал, а также ускорить процесс получения широкого спектра данных о породе [Honarpour et al., 1985; Wevers et al., 2017].

В условиях арктического шельфа эта информация приобретает особое значение, так как газовые коллекторы часто представлены хрупкими, слабосцементированными породами [Palmer and Croasdale, 2013], уязвимыми к механическому разрушению. Понимание их структуры критически важно для оценки устойчивости коллекторов к техногенным воздействиям [Skolotnev et al., 2022]. Кроме того, порометрия помогает выявлять тупиковые поры, в которых может накапливаться остаточный газ – это важно при прогнозе извлекаемых запасов в сложных температурно-геологических условиях [Васильев, 2014]. При оценке коэффициента извлечения газа важно учитывать величину остаточного зацементированного газа при внедрении пластовых вод в залежь, которую можно прогнозировать на основе таких характеристик ёмкостного пространства породы, как соотношение диаметров пор к диаметрам фильтрующих каналов. Таким образом, комплексное исследование гранулометрических и порометрических параметров коллекторов критически важно для обоснованного проектирования и безопасной эксплуатации газовых месторождений на арктическом шельфе [Khimulia, 2024].

2. Методика и объекты исследований

Объектами исследования являлись породы коллектора газоконденсатного месторождения, расположенного на северном шельфе России. Результаты получены в рамках нового цикла исследований арктических месторождений РФ и разработки для них

комплексного подхода к определению оптимальных параметров эксплуатации, описанного ранее в [Khimulia et al., 2025]. Развитие применяемых методов проводится для пород нового интервала месторождения. Образцы кернового материала представляли собой фрагменты произвольной формы с размерами от нескольких миллиметров до сантиметров и были представлены слабосцементированными высокопроницаемыми песчаниками, содержащими вкрапления минеральных соединений и металлов. Образцы изготавливались из экстрагированного кернового материала продуктивного пласта, а также использовались осколки керна произвольной формы для расширения выборки. Комплекс неразрушающих исследований данного интервала, включая описанное в статье направление работ, проводился на выборке из более чем десяти цифровых двойников образцов с отсутствием новообразованных в ходе транспортировки и хранения трещин.

Для анализа внутреннего строения и характеристик порового пространства породы применялся неразрушающий метод рентгеновской микротомографии, дополненный цифровой обработкой полученных изображений. Съёмка проводилась с использованием микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI [Khimulia and Karev, 2024], при этом размер одного вокселя реконструированной 3D-модели составил 4,995 мкм. Методика включала три основных этапа: получение проекционных снимков, реконструкция объёмного изображения и его последующая сегментация – то есть цифровое разделение модели на поры, матрицу зёрен и плотные включения на основе градаций серого цвета. Каждый из этапов требует точной калибровки параметров съёмки и внимательной предварительной обработки данных, включая коррекцию яркости, устранение шумов и сглаживание краёв фазовых границ. На рис. 1а представлена часть проекции реконструированного снимка после предварительной обработки и сглаживания. На рис. 1б показан результат сегментации изображения на три фазы: серым изображены зерна матрицы, чёрным – поры, зелёным – плотные минеральные примеси. На рис. 1в показана характерная 3D-структура после сегментации.

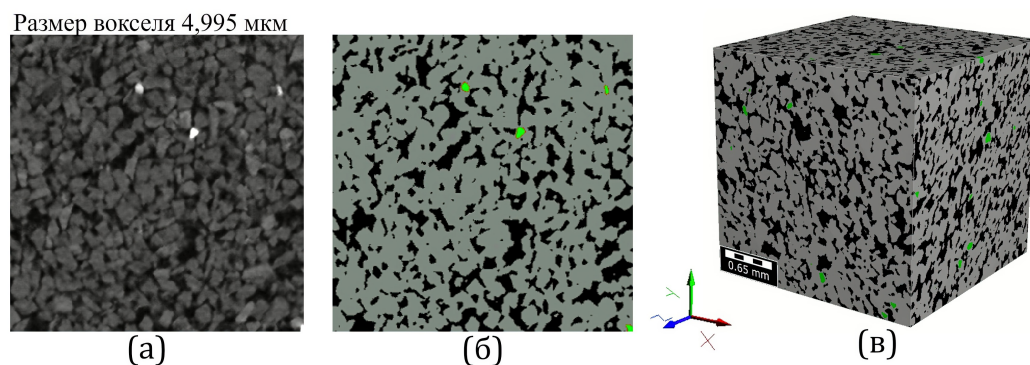


Рис. 1. а – часть проекции реконструированного снимка после предварительной обработки и сглаживания; б – часть проекции снимка после сегментации на три фазы: серым изображены зерна матрицы, чёрным – поры, зелёным – плотные минеральные примеси; в – характерная цифровая 3D-модель после сегментации.

Цифровая порометрия осуществлялась путём анализа выделенной поровой фазы: рассчитывались объёмные характеристики пор, их распределение по эквивалентным диаметрам, степень связности и доля закрытых и тупиковых участков. Одновременно с этим проводилась гранулометрия – автоматическое выделение отдельных зёрен твёрдой матрицы и статистическая оценка их размеров и распределения. Полученные характеристики, включая медианный диаметр зёрен и пор (D_{50}), степень сортировки и присутствие аномально крупных включений, являются важными входными данными для моделирования механических свойств и фильтрационного поведения породы.

Дополнительно в рамках исследования выполнялась сегментация плотных неоднородностей, присутствующих в порах. В результате удалось выделить фазу метал-

лических или плотных примесей, оставшихся после фильтрации пластовых флюидов. Их пространственное положение внутри порового каркаса позволяет не только оценить степень загрязнения или насыщения остатками флюидов, но и понять, как такие включения могут влиять на локальную проницаемость.

3. Результаты

По описанной выше методике были созданы наборы цифровых 3D-моделей пород (двойники) с размером вокселя 4,955 мкм. В процессе перехода от реконструированных изображений к воксельной модели проводилась сегментация (бинаризация) снимков с разделением на три фазы: пустотное пространство и матрица зёрен породы, металлические примеси и неоднородности. В силу особенностей геометрической формы сканированных образцов итоговые модели имели различный воксельный объём. Тем не менее, линейный размер моделей составлял не менее 350 вокселей. Визуализация результатов будет выполнена на примере кубической модели с линейным размером 500 вокселей. На рис. 2 на примере одного из образцов показана цифровая структура с разделением на три типа материалов: серым отображены воксели матрицы, чёрным – порового пространства, зелёным – металлические соединения и неоднородности состава.

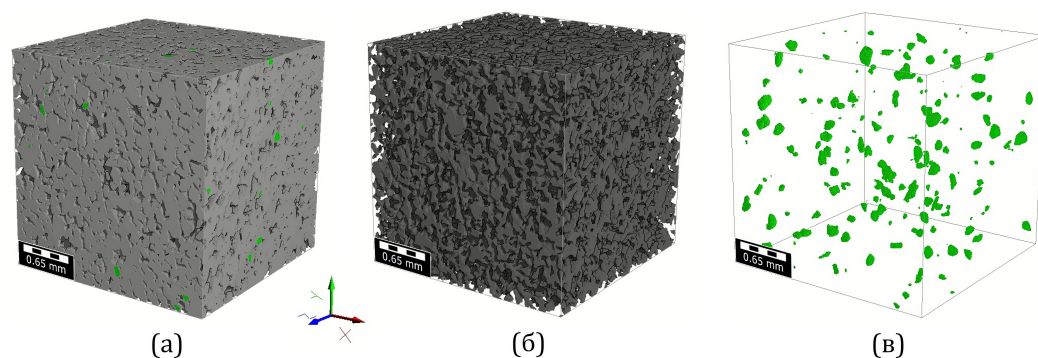


Рис. 2. а – цифровая модель матрицы пород характерного образца; б – цифровая модель порового пространства характерного образца; в – цифровая модель соединений металлов в составе породы.

Путем статистического подсчёта было определено, что объёмное содержание металлических соединений в породе не превышает по всем образцам 3%, несмотря на кажущееся визуально плотное пространственное распределение (рис. 2в). Также подтверждено, что данные примеси находятся внутри порового пространства породы, т. е. оставлены экстрагированным пластовым флюидом.

Из рис. 2б видно, что поровое пространство представляет собой высокосвязную структуру. Для оценки общей пористости производился подсчёт общего числа вокселей пор по отношению к полному числу вокселей модели. Были определены значения общей, открытой и закрытой (изолированной) пористостей. Средняя для рассматриваемой выборки общая пористость пород составила 26%, из них на открытую пористость пришлось в среднем 25,5%, на закрытую около 0,05%, на тупиковую 0,013%.

Для оценки размеров пор и их пространственного распределения применялись методы цифровой порометрии. Ниже на рис. 3 представлены гистограмма распределения объёмной доли пор по их размерам для одного из образцов и пространственная визуализация пор с разделением по цветовой шкале. Такой подход позволяет детально исследовать структуру порового пространства и отследить однородность распределения пор и каналов разного диаметра.

С заявленным разрешением сканирования возможно достоверно определить поры с линейными размерами от ~20 мкм. Из рис. 3а видно, что диапазон размеров выделенных пор моделей меняется преимущественно от 20 до 136 мкм. Распределение имеет выраженный правосторонний сдвиг, при этом основной вклад в объёмное заполнение

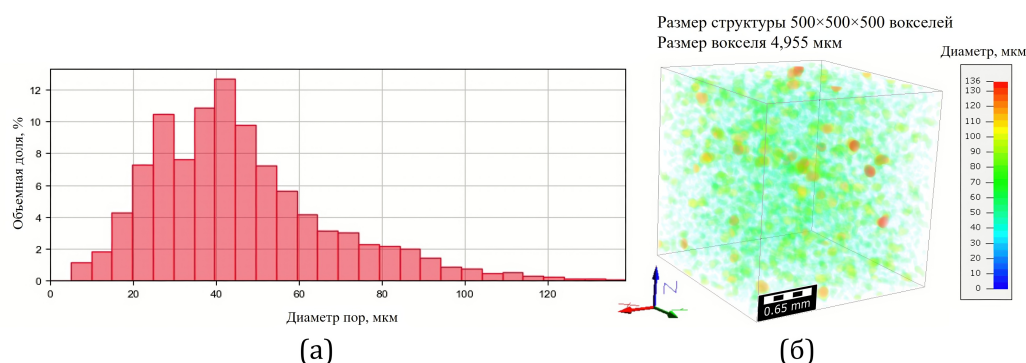


Рис. 3. а – гистограмма распределения пор по размерам; б – пространственное распределение пор по размерам в образце.

вносят поры с диаметрами от 25 до 60 мкм. Пик распределения приходится на диапазон около 40 мкм, что подтверждает доминирование пор среднего размера. Поры диаметром свыше 100 мкм встречаются редко и составляют незначительную часть объёма, что указывает на отсутствие развитых кавернозных элементов в структуре. Цветовая шкала на рис. 3б от синего (мелкие поры) до красного (крупные поры) позволяет оценить неоднородность по размерам: преобладают поры в диапазоне 30–60 мкм, что визуально соответствует основному пику на гистограмме. Наличие участков с крупными порами (окрашенных в оранжево-красные оттенки) указывает на локальные каналы с повышенной проницаемостью, однако их объёмная доля незначительна.

Порометрический анализ цифровой модели порового пространства коллектора показал, что структура характеризуется умеренной гетерогенностью. Согласно результатам, 10% пор имеют диаметр менее 21,77 мкм (D_{10}), медианный диаметр (D_{50}) составляет 42,21 мкм, отражая доминирующий масштаб пор в образце, а значение D_{90} , равное 76,51 мкм, означает, что 90% пор имеют диаметр меньше этой величины. Наличие таких пор в верхней части распределения говорит о присутствии более крупных, но менее многочисленных пустот. Совокупность этих характеристик указывает на хорошо развитое поровое пространство, потенциально обеспечивающее эффективные фильтрационные свойства.

Для исследования свойств матрицы коллектора и неоднородностей состава был проведён гранулометрический анализ. Были построены гистограммы распределения объёмной доли твёрдых фракций по размерам, представлены пространственные распределения. На рис. 4а–в показаны гистограммы гранулометрии для матрицы породы и обнаруженных ранее металлических примесей и неоднородностей в составе породы. На рис. 4б–г показано пространственное распределение зёрен и неоднородностей по размерам.

Гистограмма на рис. 4а показывает, что основная часть зёрен имеет диаметр в диапазоне от 70 до 110 мкм, с максимумом около 90 мкм. Распределение близко к нормальному, симметричное, без ярко выраженных хвостов, что говорит о хорошей сортированности материала. Наличие зёрен диаметром свыше 150 мкм фиксируется, но их доля в объёме крайне мала.

Числовые параметры распределения зёрен в матрице подтверждают эти наблюдения: диаметр D_{10} составляет 55,87 мкм, что указывает на границу для наиболее мелкой фракции; медианный диаметр D_{50} равен 89,03 мкм и отражает наиболее типичный размер зёрен; значение D_{90} составляет 118,54 мкм, что соответствует верхней границе основного распределения. Превышение этой величины фиксируется у небольшой доли крупных зёрен.

Визуализация распределения размеров зёрен в объёме подтверждает равномерное пространственное распределение. В основной массе преобладают зерна диаметром от 70 до 120 мкм, окрашенные в зелёные и светло-оранжевые оттенки. Локальные вклю-

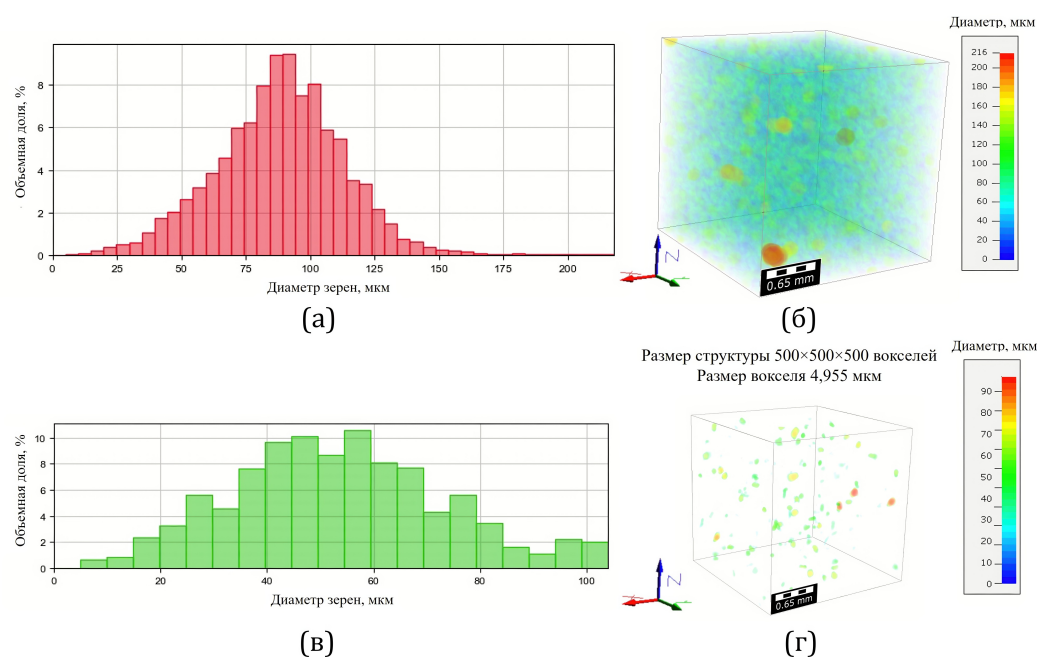


Рис. 4. а – гистограмма распределения зёрен матрицы по размерам; б – пространственное распределение зёрен матрицы по размерам в образце; в – гистограмма распределения примесей по размерам; г – пространственное распределение примесей по размерам в образце.

чения крупных зёрен диаметром свыше 150 мкм (отмеченные красным) встречаются редко и не формируют протяжённых скоплений.

Анализ распределения металлических включений (рис. 4в–г), визуализированных на рис. 2в, показал, что частицы примесей характеризуются диаметрами, преимущественно лежащими в диапазоне от 30 до 70 мкм, с наиболее часто встречающимся размером вблизи 50 мкм. Распределение имеет умеренную асимметрию с хвостом в сторону более крупных включений, однако доля таких частиц в общем объёме невелика. Общая форма распределения указывает на присутствие изолированных включений с относительно компактной формой и ограниченным вкладом в общий объём твёрдой фазы. На 3D-визуализации (рис. 4г) показано пространственное распределение металлических примесей в объёме структуры размером $500 \times 500 \times 500$ вокселей. Частицы окрашены в оттенки от зелёного до красного в зависимости от диаметра. Преобладают мелкие и средние включения (до 70 мкм), распределённые по объёму равномерно, без признаков агломерации или скоплений. Более крупные частицы встречаются редко и пространственно изолированы.

4. Обсуждение результатов

Цифровые 3D-модели, построенные с воксельным разрешением 4,955 мкм, позволили сегментировать внутреннее пространство образцов песчаников на три фазы: поровое пространство, матрицу зёрен и металлические примеси. Несмотря на вариативность в объёме полученных моделей, линейные размеры составляли не менее 350 вокселей, что обеспечивает достоверность статистического анализа: представительный элементарный объём (REV), рассчитанный на базе значений пористости, показал, что достоверными являются кубические структуры с линейными размерами от 150 вокселей.

Анализ пористости показал, что ее подавляющая часть приходится на открытую пористость (25,5%), а доля закрытых и тупиковых пор не превышает 0,1%. Такая структура указывает на хорошо связанное и проницаемое поровое пространство, подтверждаемое визуализацией пор и их геометрической непрерывностью на цифровых моделях. Эти данные коррелируют с результатами порометрии, где медианный диа-

метр пор (D_{50}) составил порядка 42 мкм, а основной вклад в объём дают поры размером от 30 до 60 мкм. Поры с такими размерами обеспечивают капиллярный режим фильтрации и формируют эффективную дренажную сеть в объёме породы.

Гранулометрический анализ зёрен матрицы подтвердил, что основная часть зёрен имеет размеры в диапазоне от 70 до 110 мкм, с медианой около 89 мкм. Распределение зёрен близко к нормальному, с хорошей сортировкой и умеренной гетерогенностью. Таким образом, соотношение размеров пор и зёрен составляет примерно 1 : 2, что характерно для уплотнённых песчаников с высоким коэффициентом фильтрации. Размеры пор, сопоставимые с межзёрненным пространством, обеспечивают устойчивую проницаемость без выраженных ограничивающих узких горлышек. Совокупность гранулометрических и порометрических характеристик указывает на сбалансированную структуру, обеспечивающую хорошее сочетание фильтрационных свойств и снижение рисков деформаций скелета или выдавливания мелких частиц в ходе фильтрации.

Распределение неоднородностей в породе может влиять на проницаемость и связанность порового пространства. Такие включения могут блокировать поры, снижая эффективность фильтрации. Они также позволяют интерпретировать остаточные процессы, связанные с пластовыми флюидами. Пространственный анализ неоднородностей помогает учитывать их влияние в цифровом моделировании и геомеханике. Это повышает точность прогноза поведения коллектора и эффективности его эксплуатации. Объёмная доля неоднородностей в данных породах не превышала 3%. Эти включения пространственно изолированы, преимущественно локализируются в пределах порового пространства и не блокируют основные пути фильтрации. Гранулометрический анализ металлических фаз показал, что большинство включений имеют диаметры до 70 мкм, что сопоставимо с размерами пор, но существенно меньше, чем размеры зёрен матрицы. Их распределение по объёму равномерное, агрегация не наблюдается. Полученные результаты подтверждают эффективность цифрового анализа при выявлении и количественном описании малораспространённых фаз в сложных пористых средах.

Полученные данные могут использоваться для оценки применимости эмпирических уравнений для конкретных пористых сред, например, уравнения Козени – Кармана, сопоставляя рассчитанную по цифровой модели пористость, размеры пор и удельную поверхность с численно смоделированной или измеренной проницаемостью. Такой подход позволяет оценить точность классической зависимости для конкретной породы и выявить отклонения, связанные с геометрической сложностью порового пространства. Особенно ценно это при наличии данных об извилистости и фракции тупиковых пор. Теоретическая основа метода изложена, например, в работе [Bear, 1972], где представлена классическая формулировка уравнения.

Методика, включающая порометрию, гранулометрию и фазовую сегментацию с выделением примесей, обеспечивает целостное представление о микроструктуре породы без разрушения образца. Это особенно важно для построения и корректировки механико-гидродинамических моделей, оценки фильтрационно-ёмкостных свойств, геомеханической устойчивости и остаточной насыщенности. Данные о геометрии внутреннего пространства и распределении элементов и неоднородностей в совокупности с другими петрофизическими данными могут применяться при проектировании методов интенсификации (например, ГРП или кислотной обработки), обеспечивая более точное понимание путей фильтрации и зон риска закупорки. Цифровые модели порового пространства могут служить для моделирования процесса гидроразрыва и оценки влияния микрогетерогенности на распространение трещин, а равномерное распределение пор и отсутствие значимых глинистых включений снижает риск локального цементующего эффекта и «закупорки» после обработки. Отсутствие крупных включений и цементующего вещества снижает риск неконтролируемого или асимметричного роста трещин. Соотношение размеров пор ($D_{50} \approx 42$ мкм) и зёрен ($D_{50} \approx 89$ мкм) $\sim 1 : 2$ является оптимальным для удержания стандартных пропантов (например, размером 20/40 или 40/70): поры достаточно малы, чтобы препятствовать свободному проникновению пропанта вглубь пласта, но при этом размер зёрен обеспечивает хорошую

«опору» для удержания пропанта в трещине. Несмотря на то, что породы слабоконсолидированы, равномерность сортировки и отсутствие значительного количества мелких зёрен (симметричность гистограммы гранулометрии, $D_{10} = 55,87$ мкм) снижают потенциал мобилизации и выноса частиц после ГРП и при последующей эксплуатации. Это подтверждается и пространственной изолированностью мелких включений. Отсутствие очень крупных каверн (> 100 мкм) и равномерное распределение пор минимизируют риск образования направленных каналов при закачке кислоты, которые могут приводить к локальному преждевременному расходу кислоты и неоднородной обработке. Равномерность структуры способствует более предсказуемому и контролируемому распространению кислоты.

Результаты также могут использоваться при оценке качества и пригодности пород-коллекторов для подземного хранения флюидов, включая CO_2 или ППД-воду, что особенно актуально в контексте задач углеродного регулирования и устойчивого недропользования. Выявленные размеры пор могут свидетельствовать о возможности вмещения значительных масс флюида, а связность каналов обеспечивает низкое сопротивление потоку. Отсутствие крупных каверн и равномерность пор способствуют равномерному фронту вытеснения и эффективному выведению флюида/конденсата. Доля малых пор невелика, что также снижает остаточное удержание флюида – эти данные можно использовать при уточнении относительной проницаемости и построения кривых насыщения. Отсутствие крупных каверн исключает риск «прорыва» закачиваемого агента по единичным магистральным каналам и неравномерного вытеснения буферного флюида, что критично для стабильности фронта вытеснения и минимизации остаточной буферной фазы в циклическом режиме.

5. Заключение и выводы

В работе представлены результаты нового цикла неразрушающих цифровых исследований структурных и ёмкостных характеристик коллектора газоконденсатного месторождения северного шельфа. Получены снимки компьютерной рентгеновской томографии с использованием высокоразрешающего томографа ProCon X-Ray CT-MINI Института проблем механики РАН. На базе снимков созданы 3D-модели коллектора для проведения цифрового анализа свойств пород.

Полученные результаты указывают на то, что исследуемый газовый коллектор представляет собой слабосцементированный песчаник с высокой пористостью и хорошо связным капиллярным поровым пространством. Основной объём пор представлен открытыми порами, доля закрытых и тупиковых пор не превышает 0,1%, что указывает на высокую потенциальную проницаемость. Поры преимущественно имеют размеры в диапазоне 30–60 мкм с медианой около 42 мкм, что обеспечивает устойчивый капиллярный режим фильтрации. Зерна минеральной матрицы варьируют в размерах от 70 до 110 мкм, медианный диаметр составляет 89 мкм; распределение близко к нормальному и характеризуется хорошей сортировкой. Соотношение размеров пор и зёрен около 1 : 2 типично для хорошо уплотнённых и фильтрующих песчаников. Металлические включения имеют размеры до 70 мкм, распределены равномерно, пространственно изолированы и не влияют существенно на глобальную фильтрационную структуру. В совокупности, структуру породы можно охарактеризовать как сбалансированную, с высокой фильтрационной способностью и устойчивостью к закупорке и разрушению.

Полученные цифровые двойники породы могут быть использованы для прямого применения в численном моделировании фильтрационных и геомеханических процессов. Выявленные параметры пористости, распределения пор и зёрен, в совокупности с другими петрофизическими данными, служат основой для оценки потенциального воздействия на коллектор. В частности, они могут быть использованы при планировании гидроразрыва пласта, кислотной обработки и других методов интенсификации. Кроме того, эти результаты позволяют обосновать применимость пород в качестве среды для подземного хранения газа, закачки CO_2 и иных флюидов: высокая откры-

тая пористость, равномерное распределение каналов и отсутствие выраженных каверн обеспечивают устойчивый циклический режим закачки и отбора. Учёт изолированных и тупиковых пор позволяет уточнять расчёты остаточной насыщенности при моделировании вытеснения флюидов. Цифровая методика анализа особенно ценна для условий арктического шельфа, где невозможно проводить массовый отбор керна, а породы отличаются хрупкостью. В этих условиях цифровая микротомография становится незаменимым инструментом неразрушающей диагностики, позволяющим заранее оценить фильтрационно-ёмкостные и структурно-механические свойства коллекторов и существенно расширить спектр получаемых при петрофизических исследованиях данных.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-77-10005, <https://rscf.ru/project/25-77-10005/>.

Список литературы

- Васильев Ю. Н. Новое уравнение фильтрации, учитывающее влияние погребенной воды и тупиковых пор на движение газа в продуктивном пласте // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». — 2014. — № 4. — С. 4–15.
- Корбанова В. Н. Петрофизика. Учебник для вузов. — 2nd. — Москва : Недра, 1986. — 392 с.
- Разина И. С., Семенова С. Г., Саттаров А. Г. и др. Применение микротомографии для исследования новых материалов. Обзор // Вестник Казанского технологического университета. — 2013. — Т. 16, № 19. — С. 163–169.
- Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. — New York : Elsevier, 1972. — 764 p.
- Eggers G., Klein J., Welzel T., et al. Geometric accuracy of digital volume tomography and conventional computed tomography // British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. — 2008. — Vol. 46, no. 8. — P. 639–644. — <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2008.03.019>.
- Ganzer L., Qi M., Schatzmann S., et al. Evaluation of digital rock methodology to complement rock laboratory experiments // Oil Gas European Magazine. — 2013. — Vol. 39. — P. 43–47.
- Hasiuk F., Ishutov S. and Pacyga A. Validating 3D-printed porous proxies by tomography and porosimetry // Rapid Prototyping Journal. — 2018. — Vol. 24, no. 3. — P. 630–636. — <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2017-0121>.
- Honarpour M. M., Cromwell V., Hatton D., et al. Reservoir Rock Descriptions Using Computed Tomography (CT) // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. — SPE, 1985. — <https://doi.org/10.2118/14272-ms>.
- Khimulia V. V. Digital Examination of Pore Space Characteristics and Structural Properties of a Gas Condensate Field Reservoir on the Basis of μ CT Images // Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes (PMMEEP 2023) / ed. by V. Karev. — Cham : Springer, 2024. — (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). — https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_3.
- Khimulia V. V. and Karev V. I. Pore-Scale Computational Study of Permeability and Pore Space Geometry in Gas Condensate Reservoir Rocks // Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes (PMMEEP 2023) / ed. by V. Karev. — Cham : Springer, 2024. — (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). — https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_26.
- Khimulia V. V., Kovalenko Y., Karev V., et al. Determination of well stability and sand risk minimization parameters for gas condensate field conditions using geomechanical and CT-based approaches // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2025. — Vol. 18, no. 2. — P. 1570–1586. — <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.02.017>.
- Kim F. H., Penumadu D., Schulz V. P., et al. Pore Size Distribution and Soil Water Suction Curve from Micro-tomography Measurements and Real 3-D Digital Microstructure of a Compacted Granular Media by Using Direct Numerical Simulation Technique // Multiphysical Testing of Soils and Shales. — Springer Berlin Heidelberg, 2013. — P. 171–176. — https://doi.org/10.1007/978-3-642-32492-5_20.
- Kozhevnikov E. V., Turbakov M. S. and Riabokon E. P. A Model of Reservoir Permeability Evolution during Oil Production // Energies. — 2021. — Vol. 14, no. 9. — P. 2695. — <https://doi.org/10.3390/en14092695>.
- Kyle J. R. and Ketcham R. A. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing // Ore Geology Reviews. — 2015. — Vol. 65. — P. 821–839. — <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.034>.

- Labati R. D., Genovese A., Munoz E., et al. 3-D Granulometry Using Image Processing // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2019. — Vol. 15, no. 3. — P. 1251–1264. — <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2856466>.
- Li Y., Liu C., Bao W., et al. Oil Production Optimization by Means of a Combined "Plugging, Profile Control, and Flooding" Treatment: Analysis of Results Obtained Using Computer Tomography and Nuclear Magnetic Resonance // Fluid Dynamics & Materials Processing. — 2022. — Vol. 18, no. 3. — P. 737–749. — <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.019139>.
- Al-Marzouqi H. Digital Rock Physics: Using CT Scans to Compute Rock Properties // IEEE Signal Processing Magazine. — 2018. — Vol. 35, no. 2. — P. 121–131. — <https://doi.org/10.1109/msp.2017.2784459>.
- Moreno-Atanasio R., Williams R. A. and Jia X. Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials // Particuology. — 2010. — Vol. 8, no. 2. — P. 81–99. — <https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.01.001>.
- Palmer A. and Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. — World Scientific, 2013. — 538 p.
- Qian Y., Gao P., Fang X., et al. Microstructure characterization techniques for shale reservoirs: A review // Frontiers in Earth Science. — 2022. — Vol. 10. — <https://doi.org/10.3389/feart.2022.930474>.
- Skolotnev S. G., Freiman S. I., Khisamutdinova A. I., et al. Sedimentary Rocks in the Basement of the Alpha-Mendeleev Rise, Arctic Ocean // Lithology and Mineral Resources. — 2022. — Vol. 57, no. 2. — P. 121–142. — <https://doi.org/10.1134/s0024490222020079>.
- Stull K. E., Tise M. L., Ali Z., et al. Accuracy and reliability of measurements obtained from computed tomography 3D volume rendered images // Forensic Science International. — 2014. — Vol. 238. — P. 133–140. — <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.03.005>.
- Wevers M., Nicolai B., Verboven P., et al. Applications of CT for Non-destructive Testing and Materials Characterization // Industrial X-Ray Computed Tomography. — Springer International Publishing, 2017. — P. 267–331. — https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3_8.

DIGITAL ANALYSIS OF CAPACITIVE AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF GAS CONDENSATE RESERVOIR BASED ON MICROTOMOGRAPHY DATA

V. V. Khimulia **,1 
¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Correspondence to: Valerii Khimulia, valery.khim@gmail.com

Abstract: The paper presents the results of non-destructive studies and digital analysis of the internal structure of reservoir rocks of the northern shelf gas condensate field. The study was carried out on the basis of X-ray microtomography methods using the Procon CT-MINI device of the Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. The results were obtained as part of a new cycle of ongoing research on Arctic deposits. Three-phase 3D models were constructed based on the obtained tomography data, on the basis of which digital twins of the reservoir were created. Quantitative porometric and granulometric analysis as well as spatial visualization of heterogeneity distribution were performed. It was determined that the studied gas reservoir is a weakly cemented sandstone with high porosity and well-connected capillary pore space. The main volume of pores is represented by open channels, pore distribution provides stable capillary filtration mode. The distribution of matrix grains is close to normal and is characterized by good sorting. The pore-to-grain size ratio of about 1 : 2 is typical for well-compacted and filtering sandstones. Metal inclusions are uniformly distributed, spatially isolated and do not affect the global filtration capacity. The identified parameters of porosity, pore and grain distribution provide a reliable basis for evaluating reservoir resistance to hydraulic fracturing, acid stimulation and other stimulation methods. It is shown that the rocks can be used as a storage medium for underground storage of gas and CO₂ due to high open porosity, uniform distribution of channels and absence of pronounced caverns, which will contribute to a stable cyclic injection and withdrawal regime. Taking into account isolated and dead-end pores allows refining residual saturation calculations in fluid displacement modeling. The digital analysis technique is of particular relevance for the Arctic shelf conditions due to the difficulties in mass core extraction and lower strength characteristics of the material. In these conditions digital microtomography becomes an indispensable tool of non-destructive diagnostics, allowing researchers to save valuable core material and expand the range of obtained data on the reservoir.

Keywords: digital core analysis, X-ray tomography of rocks, porosity, capacitive properties of reservoirs, porometry, granulometry, pore space structure

Citation: Khimulia V. V. (2026), Digital Analysis of Capacitive and Structural Characteristics of Gas Condensate Reservoir Based on Microtomography Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES3003, <https://doi.org/10.2205/2026ES001057>, EDN: HHHMAY

RESEARCH ARTICLE

Received: October 3, 2025

Accepted: January 15, 2026

Published: July 16, 2026



© 2026. The Authors.

References

- Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. — New York : Elsevier, 1972. — 764 p.
- Eggers G., Klein J., Welzel T., et al. Geometric accuracy of digital volume tomography and conventional computed tomography // British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. — 2008. — Vol. 46, no. 8. — P. 639–644. — <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2008.03.019>.
- Ganzer L., Qi M., Schatzmann S., et al. Evaluation of digital rock methodology to complement rock laboratory experiments // Oil Gas European Magazine. — 2013. — Vol. 39. — P. 43–47.
- Hasiuk F., Ishutov S. and Pacyga A. Validating 3D-printed porous proxies by tomography and porosimetry // Rapid Prototyping Journal. — 2018. — Vol. 24, no. 3. — P. 630–636. — <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2017-0121>.
- Honarpour M. M., Cromwell V., Hatton D., et al. Reservoir Rock Descriptions Using Computed Tomography (CT) // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. — SPE, 1985. — <https://doi.org/10.2118/14272-ms>.
- Khimulia V. V. Digital Examination of Pore Space Characteristics and Structural Properties of a Gas Condensate Field Reservoir on the Basis of μ CT Images // Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes (PMMEEP 2023) / ed. by V. Karev. — Cham : Springer, 2024. — (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). — https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_3. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_3.
- Khimulia V. V. and Karev V. I. Pore-Scale Computational Study of Permeability and Pore Space Geometry in Gas Condensate Reservoir Rocks // Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes (PMMEEP 2023) / ed. by V. Karev. — Cham : Springer, 2024. — (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). — https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_26. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54589-4_26.
- Khimulia V. V., Kovalenko Y., Karev V., et al. Determination of well stability and sand risk minimization parameters for gas condensate field conditions using geomechanical and CT-based approaches // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2025. — Vol. 18, no. 2. — P. 1570–1586. — <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.02.017>. — (in press).
- Kim F. H., Penumadu D., Schulz V. P., et al. Pore Size Distribution and Soil Water Suction Curve from Micro-tomography Measurements and Real 3-D Digital Microstructure of a Compacted Granular Media by Using Direct Numerical Simulation Technique // Multiphysical Testing of Soils and Shales. — Springer Berlin Heidelberg, 2013. — P. 171–176. — https://doi.org/10.1007/978-3-642-32492-5_20.
- Kobranova V. N. Petrophysics. Textbook for universities. — 2nd. — Moscow : Nedra, 1986. — 392 p. — (In Russian).
- Kozhevnikov E. V., Turbakov M. S. and Riabokon E. P. A Model of Reservoir Permeability Evolution during Oil Production // Energies. — 2021. — Vol. 14, no. 9. — P. 2695. — <https://doi.org/10.3390/en14092695>.
- Kyle J. R. and Ketcham R. A. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing // Ore Geology Reviews. — 2015. — Vol. 65. — P. 821–839. — <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.034>.
- Labati R. D., Genovese A., Munoz E., et al. 3-D Granulometry Using Image Processing // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2019. — Vol. 15, no. 3. — P. 1251–1264. — <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2856466>.
- Li Y., Liu C., Bao W., et al. Oil Production Optimization by Means of a Combined "Plugging, Profile Control, and Flooding" Treatment: Analysis of Results Obtained Using Computer Tomography and Nuclear Magnetic Resonance // Fluid Dynamics & Materials Processing. — 2022. — Vol. 18, no. 3. — P. 737–749. — <https://doi.org/10.32604/fdm.2022.019139>.
- Al-Marzouqi H. Digital Rock Physics: Using CT Scans to Compute Rock Properties // IEEE Signal Processing Magazine. — 2018. — Vol. 35, no. 2. — P. 121–131. — <https://doi.org/10.1109/msp.2017.2784459>.
- Moreno-Atanasio R., Williams R. A. and Jia X. Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials // Particuology. — 2010. — Vol. 8, no. 2. — P. 81–99. — <https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.01.001>.
- Palmer A. and Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. — World Scientific, 2013. — 538 p.
- Qian Y., Gao P., Fang X., et al. Microstructure characterization techniques for shale reservoirs: A review // Frontiers in Earth Science. — 2022. — Vol. 10. — <https://doi.org/10.3389/feart.2022.930474>.
- Razina I. S., Semenova S. G., Sattarov A. G., et al. Application of microtomography for the study of new materials. A review // Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta. — 2013. — Vol. 16, no. 19. — P. 163–169. — (In Russian).

- Skolotnev S. G., Freiman S. I., Khisamutdinova A. I., et al. Sedimentary Rocks in the Basement of the Alpha-Mendeleev Rise, Arctic Ocean // *Lithology and Mineral Resources*. — 2022. — Vol. 57, no. 2. — P. 121–142. — <https://doi.org/10.1134/s0024490222020079>.
- Stull K. E., Tise M. L., Ali Z., et al. Accuracy and reliability of measurements obtained from computed tomography 3D volume rendered images // *Forensic Science International*. — 2014. — Vol. 238. — P. 133–140. — <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.03.005>.
- Vasiliev Yu. N. New filtration equation taking into account the impact of connate water and one-side open pores on gas movement in a productive reservoir // *Vesti Gazovoy Nauki: collected scientific technical papers*. — 2014. — No. 4. — P. 4–15. — (In Russian).
- Wevers M., Nicolai B., Verboven P., et al. Applications of CT for Non-destructive Testing and Materials Characterization // *Industrial X-Ray Computed Tomography*. — Springer International Publishing, 2017. — P. 267–331. — https://doi.org/10.1007/978-3-319-59573-3_8.