МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ) ИМЕНИ И. М. ГУБКИНА

На правах рукописи

УДК 550.822.3

АБРОСИМОВ АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ И ОСТАТОЧНОЙ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Стрельченко Валентин Вадимович

Москва - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Повышение эффективности извлечения углеводородного сырья из продуктивных пластов является актуальной задачей, решение которой невозможно без знания фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора. Керновый материал является одним из базовых источников информации о месторождениях нефти и газа. Для ряда месторождений керновый материал не отбирают из-за низкой экономической рентабельности. Традиционно свойства коллекторов таких месторождений принимают аналогичными свойствам соседних месторождений. Подобные решения вносят большую ошибку в результаты прогнозирования показателей разработки. Бывают ситуации, когда скважины характеризуются малым выносом кернового материала вследствие его слабой консолидированности, из-за чего традиционные лабораторные методы вовсе не пригодны для исследований, либо не позволяют получить статистически достоверные петрофизические зависимости.

Решение вышеперечисленных проблем возможно с помощью применения технологий неразрушающего контроля. Одной из инновационных и активно развивающихся технологий в нефтегазовой отрасли является «Цифровой керн» (в англоязычной терминологии – «Digital Rock»). База данных, получаемых на его основе, определяется как «цифровое кернохранилище». В основе технологии лежит создание объёмной трёхмерной цифровой модели керна с использованием метода рентгеновской томографии (РТ) и последующее математическое моделирование происходящих в породе процессов. Идея создания «цифрового кернохранилища» привлекает внимание многих исследователей, петрофизиков, разработчиков месторождений, поскольку позволяет определить набор петрофизических характеристик керна и в потенциале апробировать методы воздействия на пласт путём математического моделирования.

Данная технология является относительно молодой, в связи с чем в ней существуют достаточное количество проблем. Среди них можно выделить

проблемы недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии, нехватку вычислительных ресурсов, ограничения математических алгоритмов при расчёте фильтрационных характеристик.

Метод рентгеновской томографии не позволяет построить гидродинамически связанное пустотное пространство и рассчитать проницаемость образцов, поры и каналы которых имеют размер меньше разрешающей способности прибора. Недостаток разрешения также является преградой к выделению в пустотном пространстве остаточных флюидов, глобулы и плёнки которых также имеют размеры меньше разрешающей способности томографа.

Другая важная проблема связана с недостаточностью вычислительных ресурсов. Так, для расчёта проницаемости стандартного петрофизического цилиндра сегодня необходимо применять суперкомпьютеры, которых в Российской Федерации (РФ) насчитывается единицы. В связи с этим распространенность и применимость метода рентгеновской томографии ограничена.

Таким образом, выбранное в диссертационной работе направление в области «цифровой петрофизики» является современным, актуальным и развивающимся.

Цель работы

Разработка и апробация новых методик определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

Основные задачи

1. Создание информационной базы для определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород с использованием метода рентгеновской томографии.

2. Разработка методики определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

3. Разработка алгоритма, обеспечивающего гидродинамическую связанность модели пустотного пространства горных пород в условиях недостатка разрешающей способности рентгеновской томографии.

4. Разработка методик определения остаточной водонасыщенности горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

5. Апробация разработанных методик на примере четырёх месторождений Российской Федерации.

Научная новизна

1. Разработан алгоритм обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства горных пород для оценки проницаемости и её анизотропии в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии.

2. Разработана методика определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования с использованием сформированного из цифровой модели керна массива виртуальных кубов.

3. Разработана методика анализа интегральных интенсивностей спектров поглощения рентгеновского излучения для количественного определения остаточной водонасыщенности горных пород.

4. Разработана методика расчёта остаточной водонасыщенности на основе данных поля скоростей однофазной фильтрации.

Практическая значимость

1. Предложены методики, позволяющие строить петрофизические связи $К_{пр}=f(К_{п})$ и $К_{ов}=f(К_{п})$ из ограниченного числа образцов керна, близкие к

фактическим лабораторным связям для всего геологического объекта (пласта). Полученные результаты позволяют рекомендовать данный подход для использования на объектах, где проведение традиционных лабораторных исследований по оценке пористости, проницаемости и остаточной водонасыщенности невозможно.

2. Предложенная методика с созданием виртуальных кубов позволяет формировать массив петрофизических данных по ограниченному количеству кернового материала и устанавливать петрофизические связи для отдельных литотипов.

3. Методики с использованием массива виртуальных кубов не требуют больших вычислительных мощностей, позволяют экономить время получения данных, ресурс рентгеновской трубки томографа.

4. Алгоритм обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства горных пород позволяет оценивать проницаемость и её анизотропию в условиях недостатка разрешающей способности рентгеновской томографии.

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в постановке целей, задач по выбранной теме диссертационной работы и формулировке её основных идей. Автор лично проводил экспериментальные исследования, обрабатывал и анализировал полученные данные. Положения и результаты, представленные в диссертации, получены при определяющем участии автора. На основании результатов исследования и их обобщения автором сформулированы выводы и заключения, вошедшие в диссертационную работу.

Достоверность предложенных автором выводов и рекомендаций проверялась путем сравнения результатов исследования керна с использованием метода рентгеновской томографии и численного моделирования с традиционным комплексом петрофизических исследований. Разработанные методики позволяют восстанавливать петрофизические зависимости с высокой степенью

достоверности, что подтверждено сопоставлениями данных лабораторных исследований керна с модельными значениями тех же параметров на представительной коллекции керна четырёх месторождений.

Методы исследования

При выполнении диссертационного исследования применялись следующие методы: анализ и систематизации литературных источников, посвященных определению фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности методом рентгеновской томографии; метод рентгеновской томографии; метод численного моделирования однофазной фильтрации флюида; метод сравнения результатов численных экспериментов и лабораторных данных.

Защищаемые положения

1. Алгоритм обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства горных пород для оценки проницаемости и её анизотропии в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии.
2. Формирование массива виртуальных кубов из цифровой модели горной породы для определения её фильтрационно-емкостных свойств по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.
3. Использование интегральных интенсивностей спектров поглощения рентгеновского излучения для количественного определения остаточной водонасыщенности горных пород.
4. Методика расчёта остаточной водонасыщенности на основе данных поля скоростей однофазной фильтрации.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: «XX Губкинские чтения» (Москва, 2013), 2-ая Всероссийская конференция «Практическая

микротомография» (Москва, 2013), 10-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России» (Москва, 2014), Республиканская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы нефтегазогеологической науки, техники и технологии глубокого бурения, исследований скважин» (Ташкент, 2014), Международная конференция «Трудноизвлекаемые запасы и нетрадиционные источники углеводородного сырья. Проблемы, перспективы, прогнозы» (Санкт-Петербург, 2015), 19-ая Международная конференция и выставка «Нефть и газ Сахалина 2015» (Южно-Сахалинск, 2015), 11-ая Всероссийская конференция «Новые технологии в газовой промышленности (нефть, газ, энергетика)» (Москва, 2015), 8-ое Всероссийское литологическое совещание «Эволюция осадочных процессов в истории Земли» (Москва, 2015), 7-ой Международный Молодежный научно-практический конгресс «Oil and Gas Horizons» (Москва, 2015), «XXI Губкинские чтения» (Москва, 2016), Международная научно-техническая конференция «Geopetrol 2016» (Краков, 2016), 5-ая Международная конференция «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям» (Москва, 2016).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 6 статей – в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. Подана 1 заявка на патент на изобретение.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, 4 глав, выводов. Содержание диссертации изложено на 107 страницах, содержит 57 рисунков, 7 таблиц и список использованной литературы из 93 наименований.

Благодарности

Автор благодарен научному руководителю, д.т.н., профессору Стрельченко В.В., за постоянное внимание и поддержку. Автор глубоко признателен к.г-м.н., доценту Язьниной И.В. за всестороннюю помощь при написании диссертации. Автор благодарен к.т.н. Шеляго Е.В., к.ф.-м.н. Д.А. Бикулову, к.г-м.н., доценту Городнову А.В., к.г-м.н., доценту Черноглазову В.Н., а также всему профессорско-преподавательскому составу кафедры геофизических информационных систем за ценные советы и замечания, полученные в ходе написания и обсуждения работы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 13.2653.2014/К.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

1.1 Краткая история развития метода рентгеновской томографии

После открытия в 1895 году немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рентгеном нового вида радиоактивного излучения, которое потом было названо по его фамилии, началась новая эра в истории медицины и других отраслей науки и техники - эпоха исследования внутренней структуры объекта с использованием рентгеновских лучей. За это открытие в 1901 году ему была присуждена первая в истории Нобелевская премия по физике.

Одним из самых распространенных видов рентгеновских исследований до сих пор остается рентгенография, суть которой заключается просвечивании объекта исследования рентгеновскими лучами, энергия которых при прохождении через вещество задерживается или поглощается, и получении рентгеновских снимков на специальной рентгеновской плёнке. Интенсивность рентгеновских лучей экспоненциально убывает в зависимости от пройденного пути в поглощающем слое по закону:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \tag{1.1}$$

где I_0 – интенсивность первоначального рентгеновского пучка, d — толщина слоя, μ коэффициент поглощения рентгеновского излучения, который зависит от природы вещества.

Впервые данный вид исследования был применен в медицине (Frost, 1896; Miller, 1896), а для изучения внутренней структуры геологических образцов используется с 60-х годов прошлого века (Baker and Friedman, 1969; Bouma, 1964; Calvert and Veevers, 1962; Hamblin, 1962; Herm, 1973 и др.).

В 1984 году Б.К. Прошляковым и др. [34, 31] было предложено использовать рентгенографический способ для исследования структуры пустотного пространства горных пород с применением рентгеноконтрастирующего вещества, которое повышало достоверность и

информативность исследований. Суть метода заключалась в насыщении горной породы рентгеноконтрастирующим веществом и последующем её просвечивании рентгеновскими лучами, регистрируя последние на рентгеновской плёнке. В результате получались снимки, на которых темным цветом отмечается пустотное пространство, а светлым – минеральная компонента. Далее при помощи цифрового дешифратора производился подсчёт пустот, заполненных рентгеноконтрастирующим веществом, оценивались их размеры, строились гистограммы распределения пор по размерам, определялась пористость образца. В целом, к преимуществам рентгенографии стоит отнести возможность исследования образцов, содержащих крупные пустоты. Недостатки же рентгенограммы, представляющей собой двумерную теневую проекцию реальной трёхмерной структуры, хорошо известны. Это - неизбежные наложения структурных элементов, невозможность количественного сопоставления отдельных локальных фрагментов тела по плотности и иным параметрам. Однако, располагая набором рентгенограмм, снятых с разных направлений, исследователь практически немного выиграет с точки зрения количества извлекаемой информации о внутреннем строении объекта, если будет действовать стандартным способом, последовательно разглядывая снимки.

Еще в 20-х годах французский врач Бокаж предложил идею, направленную на заметное повышение информативности рентгенограммы, которую вскоре реализовал на практике итальянский инженер Валлебона. Созданный им аппарат он назвал томографом, основная суть работы которого представлена рис. 1.1. Если во время съёмки рентгенограммы синхронно перемещать в параллельных плоскостях любые два из трёх участвующих в ней компонентов (рентгеновская трубка, объект, фотоплёнка), оставляя неподвижным третий, то на плёнке это даст чёткое изображение одного слоя, а элементы остальных слоёв будут размазаны. Управляя скоростями перемещений компонентов, появилась возможность выделять различные слои и тем самым последовательно изучать внутреннюю структуру трёхмерного объекта.

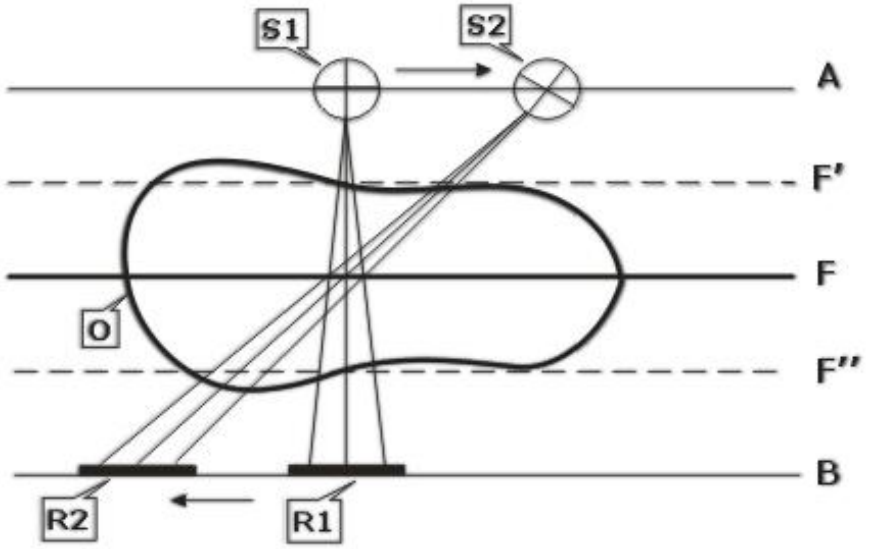


Рисунок 1.1 - Схема томографии по Бокажу

Источник S1 перемещается в положение S2 в плоскости A, в то время как рентгеновская плёнка R1 переходит в положение R2 (плоскость B). Резко воспроизводится плоскость F; детали объекта O, соответствующие плоскости F' и F'', размываются.

Тем не менее, принцип последовательного выделения сечений тела за счёт взаимных смещений компонентов диагностической установки нельзя считать сколько-нибудь универсальным. Если рассматривать медицинскую рентгенологию, то и в этом случае не удаётся достигнуть увеличения контраста различных органов из-за препятствующей неизбежной засветки от других, расфокусированных сечений тела. Последовательный перебор одного сечения за другим сопряжен с большими дозами облучения, что сказывается негативно на здоровье пациентов.

Современная рентгеновская томография использует совершенно иной подход (реконструктивный), при выделении интересующего нас сечения неоднородного объекта. Хотя математическая база данного подхода была, по существу, создана И. Радоном в 1917 г. [82], но активно развиваться он стал лишь в 60-х годах прошлого века. Так, прототип современного медицинского томографа был впервые описан в 1961 году нейрорентгенологом Ольдендорфом (W.Oldendorf) в одной из своих работ [77]. Немного позднее в 1963-1964 гг

математик А.Кормак (A.Cormack) предложил алгоритм реконструкции распределения коэффициента ослабления рентгеновского излучения по измерениям его интенсивности после прохождения через тело пациента [52]. После этого в 1972 г. Г. Хаунсфилдом был разработан первый серийный рентгеновский томограф – сканер головного мозга [62] и выпущен фирмой EMI (Великобритания). Хотя в современных томографах алгоритмы Кормака и Хаунсфилда не применяются, в 1979 г. им обоим была присуждена Нобелевская премия по физиологии и медицине. Высокая проникающая способность рентгеновского излучения дала исследователям уникальный инструмент для неразрушающего контроля изучаемых объектов и сегодняшний день рентгеновская томография актуальна во многих областях науки, таких как медицина, геология, материаловедение, археология и др.

Методика томографирования заключается в общем случае в просвечивании проникающим пучком исследуемого объекта под разными ракурсами и получении ряда его рентгеновских снимков. После этого путём математической обработки ослабления рентгеновского излучения различными по плотности объектами по ним и строятся карты трёхмерного распределения рентгеновских плотностей в исследуемом объекте.

Поясним его на примере, относящемуся к рентгеновской диагностике. На рис.1.2 показано получение трёх проекций: объект в данном случае неподвижен, а источник и детектор жестко закреплены друг относительно друга и вращаются в плоскости сканирования вокруг исследуемого объекта, при этом постоянно идёт испускание и улавливание рентгеновских лучей. К основным источникам излучения относят рентгеновские трубки, представляющие собой вакуумный сосуд с катодом и анодом внутри, находящиеся под высоким напряжением. Улавливание проходящего рентгеновского излучения происходит с помощью детектора, который на сегодняшний день выпускается в виде нескольких разновидностей: ионизационный, сцинтилляционный, CCD-матрица. Наиболее распространёнными детекторами являются CCD-матрицы, представляющие собой набор полупроводниковых ячеек, способных накапливать на себе заряд,

пропорциональный числу попадающих на неё фотонов. Таким образом, рентгеновские лучи, проходя через объект, ослабляются из-за поглощения и рассеяния, после чего попадают на детектор, данные с которого считываются в компьютер, формируя теневую проекцию. Поворачивая затем источник в той же плоскости на малый угол, повторяем процесс регистрации рентгеновских лучей и получаем новую проекцию и т.д. Процесс сканирования по углу продолжается до тех пор, пока полный угол поворота не составит 180°.

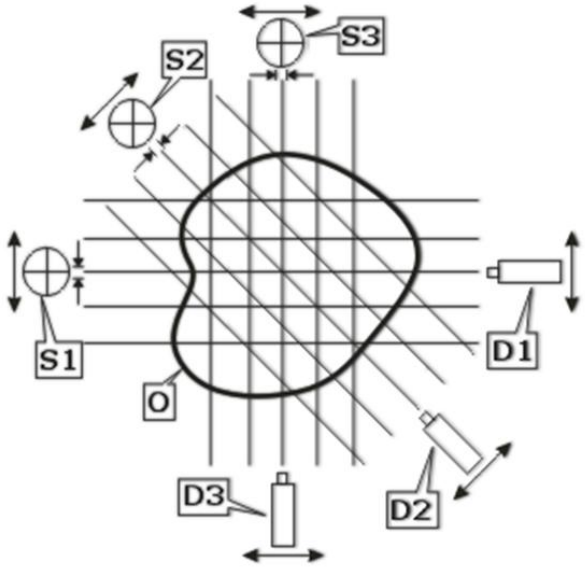


Рисунок 1.2 - Пример схемы вычислительной томографии

В результате в памяти электронной вычислительной машины (ЭВМ) накапливается необходимая исходная информация для реконструкции изображения в выделенного сечения. На данный момент существует большое количество математических методов восстановления, которые можно разделить на итерационные и аналитические [33, 21]. Аналитические методы основаны на точных математических решениях уравнений восстановления изображения. В основе большинства из них используются аппарат преобразования Фурье и преобразования Радона. В итерационных методах системы линейных алгебраических уравнений решаются итерационными методами, поэтому поправки вносятся на каждой итерации. Реализация любого алгоритма зависит от

схемы генерации рентгеновского излучения, которая может быть конусной, веерной, параллельной.

Таким образом, используя различные алгоритмы реконструкции появляется возможность восстанавливать внутреннюю структуру объекта и далее при помощи специализированных программ строить объёмную трёхмерную модель.

Рассмотренный пример на рис.1.2 относится больше к традиционной медицинской томографии, т.к. объект остается неподвижным, в то время как полный источник рентгеновского излучения и детектор вращается вокруг объекта. В большинстве систем микротомографии используется метод, при котором образец вращается, а источник рентгеновского излучения и детектор остаются неподвижными. Эта установка даёт большую механическую стабильность, которая необходима при высоких разрешениях.

Подводя итог вышеописанному, преимуществами РТ по сравнению с традиционной рентгенографией является:

- отсутствие теневых наложений на изображения;
- более высокая точность измерения;
- метод позволяет получать и изучать внутреннюю трёхмерную структуру объектов, что, несомненно, является очень ценным качеством при изучении неоднородностей объекта.

1.2 Проблема определения фильтрационно-емкостных свойств и построения петрофизических зависимостей по данным рентгеновской томографии и численного моделирования

Первые работы в области использования РТ для изучения горных пород, в том числе коллекторов нефти и газа, относятся к концу 80-х годов прошлого века [89]. В СССР для изучения горных пород метод РТ был впервые применён в 1992 году М.С. Хозяиновым и Э.И. Вайнбергом [38]. Первоначально он предназначался для определения с невысокой точностью пористости, однако технологии не стоят на месте, совершенствуется как аппаратная часть

рентгеновских томографов, так и ЭВМ, и на сегодняшний день «поромасштабные» исследования керна на основе томографических изображений находятся в той стадии, когда их сложный анализ и интерпретация являются нормой. Количество работ, описывающих РТ-исследования керна продуктивных нефтегазоносных отложений, растёт.

В последнее время, как правило, РТ дополняет литологическое описание керна, применяется для качественного описания структуры пустотного пространства и количественной оценки пористости [8, 18, 24, 40]. Также метод РТ применяют для изучения поведения структуры пустотного пространства и пористости город в результате различного воздействия, например, термического [13], быстрой заморозки в жидком азоте [25], в результате нагружения образцов керна [8], физического моделирования процесса бурения [37] или для расчёта профилей пористости по всему образцу в результате фильтрации через него глинистых частиц [32].

В то же время всё больший интерес у добывающих нефтяных компаний вызывают работы, рассматривающие применение РТ для описания коллекторов и фильтрационных процессов в них. Целями томографии обычно являются вопросы изучения некондиционного керна и шлама, поскольку РТ является неразрушающим методом и требует для исследования небольшой объём образца любой формы. В связи с этим, из возможных задач, выполнения которой можно ожидать от метода РТ - построение петрофизических связей пористость-проницаемость на объектах, где проведение стандартных петрофизических экспериментов невозможно.

В настоящее время во всем мире активно развиваются различные методы использования томографии и математического моделирования для описания фильтрационных процессов в масштабе пор, среди которых можно выделить два основных направления: расчёт с использованием сеточных моделей (pore-network) или с использованием реальной структуры пустотного пространства.

Первый предполагает аппроксимацию пустотного пространства в виде сети каналов и узлов [12, 43, 45, 49, 66, 71, 72, 73, 79].

Плюсами первого подхода можно назвать:

- Высокая скорость моделирования фильтрационных процессов. За счёт упрощения геометрии пор и каналов возможно создание эффективного вычислительного алгоритма.

- Возможны расчёты образцов большого объёма за счёт простоты модели.

Минусы подхода:

- Затрачивается дополнительное время на генерацию сети из пор и каналов.

- Искажается реальная геометрия пор и каналов, т.е. уменьшается достоверность результатов.

Второй подход основан на использовании трёхмерной модели пустотного пространства без каких-либо преобразований и дополнительных изменений. С такой средой работает ряд математических моделей: модели, основанные на решении уравнений Навье-Стокса/Стокса методами конечных элементов [7, 59], конечных разностей [58], методом сглаженных частиц [68, 86], метод решёточных уравнений Больцмана (РУБ) [22, 23, 85, 87].

Плюсами подхода с использованием вышеуказанных методов являются:

- Высокая скорость создания модели скелета и пустотного пространства.

- Максимально возможно отображается реальная геометрия пор и каналов.

Минусы подхода:

- Требуется большие объёмы компьютерной памяти для проведения вычислений.

Несмотря на достаточно большое количество подходов к расчёту фильтрационных характеристик, исследователи сталкиваются с проблемами недостаточного разрешения рентгенотомографической съёмки (РТ-съёмки), ограничением математических алгоритмов, с недостатком вычислительных ресурсов [12, 15, 91]. Ниже приводятся существующие ограничения (возможности) расчёта фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) из данных РТ (табл.1.1).

Таблица 1.1 - Существующие возможности расчёта фильтрационно-емкостных свойств из данных РТ

Параметр	**Плюсы**	**Минусы**
Размер виртуального куба порядка 1000×1000×1000 (10^9) ячеек и больше	● Представительный объём ● Выше вероятность учёта неоднородностей различных масштабов, что особо актуально при изучении карбонатных коллекторов	● Большой, часто недостижимый, объём необходимых вычислительных ресурсов, который есть только в распоряжении суперкомпьютеров ● Большое время счёта (несколько суток)
Размер виртуального куба порядка 100×100×100 (10^6) ячеек и меньше	● Маленькое время счёта (часы) ● Малый объём необходимых вычислительных ресурсов для современной ЭВМ	● Результаты расчётов носят локальный характер из-за малой представительности виртуального куба
Разрешение исходной РТ-съёмки, имеет порядок 2-10 мкм (микронная съёмка)	● Низкие требования к сканирующей технике ● Среднее время сканирования и реконструкции (часы)	● Низкая достоверность исходных данных, из модели пропадают все поры и каналы субмикронного размера ● Добавление в модель искусственных параметров для учёта скрытой структуры
Разрешение исходной РТ-съёмки, имеет порядок 0.1 мкм (субмикронная съёмка)	● Высокая достоверность исходных данных ● В модель не нужно вводить дополнительные, искусственные параметры	● Высокие требования к сканирующей технике, субмикронные томографы сегодня – уникальное оборудование ● Долгое время сканирования и реконструкции (несколько суток) ● Исходная модель ещё до вырезания кубов имеет низкую представительность

Продолжение таблицы 1.1

Для расчёта флюидодинамики используют алгоритмы, явно учитывающие морфологию пустотного пространства (например, алгоритмы на базе решёточных уравнений Больцмана, МКЭ и др.)	● Легкость подготовки исходных данных модели ● Возможность оценки пространственных характеристик насыщающих фаз	● Большое время счёта (сутки) ● Высокие требования к качеству исходных данных, рекомендуется субмикронное разрешение съёмки
Для расчёта флюидодинамики используют алгоритмы, упрощающие пустотное пространство (например, pore-network)	● Малое время счёта (минуты, часы) ● Средние требования к качеству исходных данных, можно использовать результаты микронной съёмки	● Сложность подготовки исходных данных (интерпретация пустотного пространства) ● Сложность оценки пространственного распределения насыщающих фаз

И хотя на сегодняшний день с появлением суперкомпьютеров становится возможен расчёт фильтрационных характеристик петрофизического образца керна, вследствие малого их распространения (в России это единицы, например, «Ломоносов» (МГУ), «Cyberia» (ТГУ)) проблема нехватки вычислительных ресурсов является одной из наиболее актуальных.

Одним из возможных подходов решения данной проблемы является расчёт фильтрационных характеристик на представительных объёмах (в англоязычной литературе REV – representative elementary volume). С одной стороны, объём в виде куба должен быть достаточно большим, представительным по отношению к образцу, с другой – достаточно маленьким, чтобы не перегружать ЭВМ [20, 53, 56].

Алгоритмы (как РУБ, так и pore-network) могут иметь разную производительность на одной и той же ЭВМ. Современные алгоритмы используют возможность параллельных вычислений на многопроцессорных ЭВМ [91]. В подавляющем большинстве работ сегодня проницаемость рассчитывают на представительных объёмах с количеством ячеек порядка 10^6 – 10^9, что позволяет на кластере или мощном персональном компьютере (ПК) рассчитать проницаемость за несколько часов или дней. Таким образом, сегодня расчёт единственного значения проницаемости по данным РТ в среднем занимает часы и дни, а с учётом времени съёмки – порядка нескольких суток машинного времени. В итоге для построения корреляционной связи $К_{пр}=f(К_п)$ при вышеперечисленных подходах для коллекции образцов уйдёт достаточно большое количество времени, что существенно снижает эффективность метода.

Как было сказано ранее, другой распространенной проблемой при расчёте ФЕС коллекторов является недостаток разрешения для обеспечения связной модели пустотного пространства. Исследователи предлагают различные пути решения данной проблемы: улучшение качества РТ-съёмки за счёт измельчения образца, комбинирование данных РТ с растровой электронной микроскопией (РЭМ) или методом ядерно-магнитного резонанса [12, 40, 84]. В первом случае порой все же недостаточно разрешающей способности РТ из-за того, чтобы создать связанную модель пустотного пространства для низкопроницаемых коллекторов. С другой стороны, предлагается разрабатывать новые математические алгоритмы для восстановления модели пустотного пространства. Например, в работе [12] предлагается добавление «невидимых пор» в модель с использованием различных подходов: по результатам измерений ядерно-магнитного резонанса, стохастической реконструкции трёхмерной структуры микропористости по двумерным срезам, полученных с электронного микроскопа, с последующей экстракцией сеточных моделей. Основной проблемой при данном подходе становится добавление структур пор, полученных разными методами, а также восстановление анизотропной структуры пустотного пространства по

двумерному срезу, сложностью учёта структуры пор в другом, невидимом направлении.

1.3 Проблема определения текущего остаточного флюидонасыщения по данным рентгеновской томографии

Одной из задач, которую исследователи ставят перед РТ, является регистрация флюидов (нефти, воды и газа) в пустотном пространстве. Научных целей у подобных работ несколько. Визуализация флюидов даёт возможность подтвердить или опровергнуть правильность численного моделирования двухфазной фильтрации на уровне пор [83]. В случае, когда фильтрация сопровождается рентгеновским контролем можно получить представление о характере продвижения фронта вытеснения в масштабах образца пористой среды [74], структуре остаточной насыщенности. В случае применения химических агентов может быть интересным расчёт площади контакта фаз [81]. Ряд работ в области экологии посвящён секвестрации газа – с помощью РТ визуализируют пузырьки (кластеры) защемлённого газа [63].

Стандартным приёмом для выделения жидкой фазы является применение рентгеноконтрастов – как правило, это водорастворимые йодистые соли. Добавка тяжёлых солей (бариевых, вольфрамовых и др.) увеличивает рентгеновскую плотность вещества. Так, первые измерения насыщенности пустотного пространства для построения кривых относительной фазовой проницаемости (ОФП) в системе нефть-вода для песчаника Berea с пористостью 26% и проницаемостью $400 \cdot 10^{-3}$ мкм^2 были получены в 1988 г. [92]. Для контрастирования воды использовался NaI (конц. 100 г/л). Было показано, что рентгеновское поглощение водо-нефтенасыщенного керна меняется в достаточно узком диапазоне 1550-1850 единиц шкалы Хаунсфилда при изменении водонасыщенности от 0 до 1 д.ед. В работе отмечалось хорошее совпадение насыщенности, зарегистрированной с помощью РТ и традиционных методов. Также подчеркивалось, что изменение насыщенности пустотного пространства

приводит к незначительному изменению рентгеновской плотности образца. В свободном объёме газ, вода, нефть и природные минералы имеют сильно разнящиеся значения рентгеновской плотности (табл.1.2). С увеличением дисперсности системы вследствие недостаточности разрешения РТ-съёмки значения плотностей усредняются, сегментация фаз усложняется или становится невозможной.

Таблица 1.2 – Рентгеновская плотность различных веществ по шкале Хаунсфилда [92]

Материал	Число КТ (СТ(Н)) 130 keV	Число КТ 100 keV	Плотность (кг/м^3)
Воздух	-1000	-	1.82
Н-гексан	-285	-	660
Н-декан	-283	-	730
Вода	0	-	1000
KBr в воде (1% масс.)	70	91	1005
KBr в воде (2% масс.)	142	183	1013
KBr в воде (8% масс.)	565	725	1058
Поливинилхлорид	620	-	1400
Кварц	1589	1836	2190
Песчаник Berea	1608	1835	2120
Песчаник Colton	1629	1840	2270
Песчаник Navaho	1858	2102	2360
Песчаник Red Navaho	1912	2156	2390
Известняк Indiana	1531	1750	2220
Алюминий	2478	2866	2820

Стоит подчеркнуть, что о визуализации флюидов в масштабе пор в то время говорить было рано из-за недостатка разрешения медицинского томографа. Одно из первых исследований в масштабе пор было опубликовано в 1998 г. [51]. Объектом исследования являлся крупнозернистый песчаник с пористостью 26,4%, и газопроницаемостью 15,3 мкм^2. Диаметр образца – 2,54 см, высота – 3,18 см. Разрешение съёмки – 30 мкм. Выполнялась РТ-съёмка сухой породы и насыщенной остаточной нефтью после заводнения. Авторы отметили хорошую качественную сходимость РТ-изображений (размер области анализа - 128×128

пикселей или 3,84×3,84 мм) с водонасыщенностью, рассчитанной по гидродинамическим моделям.

Важным аспектом любого РТ-исследования является соотношение разрешения РТ-съёмки и физического размера образца (или зоны съёмки). Известно, что улучшение качества съёмки или увеличение разрешающей способности достигается за счёт уменьшения физического размера образца. Именно с этим связано использование образцов уменьшенного, нестандартного размера (за стандарт принимается образец цилиндрической формы 30×30 мм). Так, в работе [88] использовали приём мультимасштабной съёмки с разрешением от 368 до 6,7 мкм (диаметр образца от 76 до 1,5 мм соответственно) для изучения процесса дренирования водонасыщенных насыпных моделей. Объектом исследования выступали пески со средним размером зёрен 0,17 и 0,45 мм; для контрастирования жидкости использовали KI с концентрацией 5-15 % (масс.). Были показаны различия в распределениях поглощения рентгеновского излучения по высоте образца при съёмке с различным разрешением (сравнивались разрешения 17,1 и 6,7 мкм). Авторы заключили, что разрешение съёмки может существенно исказить конечный результат по оценке насыщенности пустотного пространства. Съёмка с лучшим разрешением даёт более правильные сведения, но снижает представительность образца.

Для изучения морфологии смачивающей фазы в работе [88] наряду с песчаником Berea использовали насыпную модель из акриловых шариков. Диаметр шариков составлял 1,62 мм, межзерновое пространство насыщали растительным маслом, проводили съёмку с разрешением 33,6 мкм. Насыпную модель снимали в сухом, полностью насыщенном состоянии и после создания остаточной насыщенности (самопроизвольный дренаж - заполнение межзернового пространства газом). Авторы отметили непрерывный характер распределения остаточной фазы при её содержании в 13-15%. Изучение тонких адсорбированных плёнок остаточных фаз как правило затруднено из-за недостаточности разрешения РТ-съёмки.

В работе [83] приведены расчётные капиллярные кривые для крупнозернистых песчаников Frio и Berea с поправкой на остаточную водонасыщенность (0.22 д.ед.), не зарегистрированную микротомографом из-за недостаточности разрешения (съёмку проводили с разрешением 4,48 мкм, диаметр образца – 5,5 мм).

Изучать морфологию несмачивающей фазы с помощью РТ проще, поскольку глобулы жидкости и пузырьки газа на порядки крупнее адсорбированных плёнок. Работа [46] направлена на статистическое описание глобул остаточной воды в водо-нефтенасыщенной насыпной модели, сложенной из гидрофобных сфер (средний радиус сфер составляет 500 мкм). Разрешения съёмки в 12,5 мкм было достаточным для изучения связанности глобул, их формы, площади межфазной поверхности. Авторы подтвердили наличие связи между архитектурой сети поровых каналов и морфологией несмачивающей фазы: как и ожидалось, несмачивающая фаза защемляется преимущественно в крупных порах, а также в порах с большим координационным числом.

С улучшением качества РТ-съёмки появляется возможность определять значение краевого угла смачивания в порах. В работе [75] изучали краевой угол на границе вода – сверхкритический углекислый газ – минеральная поверхность известняка. Авторы указывают, что выбрали заведомо удобный объект для решения поставленной задачи – горная порода сложена сферическими зёрнами оолита размером до 600 мкм. Разрешение съёмки составило 2 мкм, диаметр образца – 4 мм, физический размер области съёмки – 2×2×2 мм, для контрастирования воды использовали KI. Разброс значений краевого угла составил 45 ± 6^{o}.

Известны работы, посвящённые изучению смачивающих характеристик пористых сред, в том числе в случае применения микробиологического воздействия на остаточную нефть [54, 66, 69]. Большинство подобных работ выполнено на насыпных моделях разного состава. Например, в работе [69] показано, как при изменении смачивающих характеристик насыпной модели из стеклянных шариков меняется количество и размер глобул остаточной фазы.

Таким образом, проблема недостаточности разрешения РТ-съёмки при работе с насыщенными образцами более актуальна, чем при работе с сухими, поскольку размер глобул и плёнок остаточных фаз меньше размера пор, что затрудняет их выделение и, соответственно, количественное определение в объёме исследуемого образца.

1.4 Выводы из главы, постановка цели и задач диссертационного исследования

1. Недостаточность разрешающей способности РТ ведет к отсутствию в виртуальной модели пустотного пространства пор и каналов, обеспечивающих протекание флюидов в реальном керне. В связи с этим она утрачивает гидродинамическую связанность и это делает невозможным расчёт фильтрационных свойств низкопроницаемых коллекторов. Некоторые исследователи делают попытки комбинировать РТ с электронной микроскопией и другими методами, однако основной проблемой при таком подходе становится совмещение структур пор, полученных разными способами.

2. Определение фильтрационно-емкостных свойств по всему стандартному петрофизическому образцу с использованием численного моделирования требует длительного времени и огромных вычислительных ресурсов. На сегодняшний день наиболее распространенным подходом является использованием представительного объёма образца - REV. Данный подход требует меньшие мощности, например, кластер, однако расчёт значения пористости и проницаемости представительного объёма все же занимает часы и дни, а с учётом времени съёмки – порядка нескольких суток времени. Таким образом, описанные в литературе методы основаны на принципе «один образец керна – одна пара значений пористости и проницаемости». В итоге на построение петрофизической связи $К_{пр}=f(К_{п})$ уйдёт достаточно большое количество времени, что, несомненно, снижает эффективность метода.

3. Основной проблемой при определении остаточной флюидонасыщенности является недостаточность разрешающей способности РТ, снижающая достоверность сегментации фаз. Данный вопрос решается путём физического уменьшения образца, однако это влечёт за собой дополнительные проблемы – с одной стороны приходится разрушать исходный петрофизический цилиндр, с другой - распространённые модели петрофизического оборудования нужно адаптировать под новые размеры образца.

4. Основная часть работ по оценке остаточной насыщенности выполнена на насыпных модельных системах или грубодисперсных образцах с высокой пористостью (более 25%) и проницаемостью (более $1000 \cdot 10^{-3}$ мкм^2).

В соответствии с этим, **целью** диссертационного исследования является разработка и апробация новых методик определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород по данным численного моделирования и рентгеновской томографии.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих **задач**:

1. Создание информационной базы для определения фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности горных пород с использованием метода рентгеновской томографии.

2. Разработка методики определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

3. Разработка алгоритма, обеспечивающего гидродинамическую связанность модели пустотного пространства горных пород в условиях недостатка разрешающей способности рентгеновской томографии.

4. Разработка методики определения остаточной водонасыщенности горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования.

5. Апробация разработанных методик на примере четырёх месторождений Российской Федерации.

ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Литолого-петрофизическая характеристика исследуемого кернового материала

В работе предлагается разработать и апробировать методики по определению ФЕС и остаточной водонасыщенности на коллекторах Красноленинского, Харьягинского, Возейского и Москудьинского месторождений. Ниже приводятся результаты литологических и петрофизических исследований керна. Оценка пористости стандартных петрофизических образцов проводилась газоволюметрическим способом по гелию, коэффициент абсолютной газопроницаемости определялся методом стационарной фильтрации газа через образец горной породы в линейном направлении под действием разности давлений согласно ГОСТ 26450.2-85 [14], остаточная водонасыщенность определена капилляриметрическим методом по ОСТ 39-204-86 [26].

Объектом исследования Харьягинского месторождения являются песчаные отложения среднего отдела девонской системы афонинского горизонта (D_2af) – рис. 2.1.

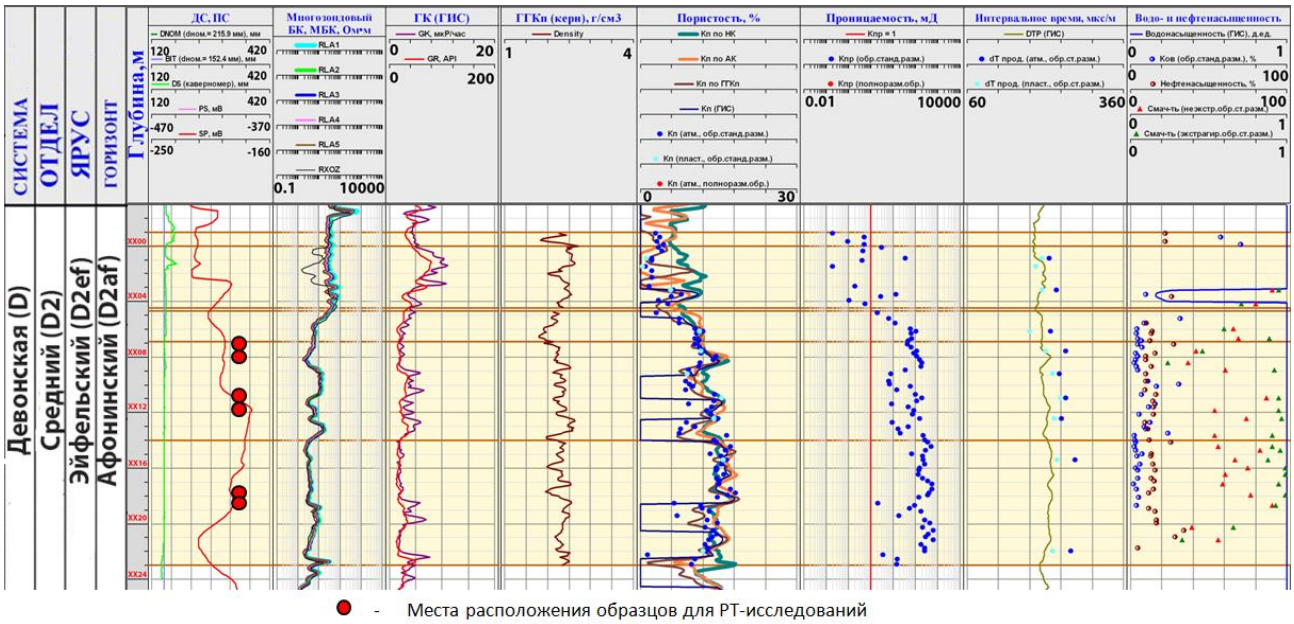


Рисунок 2.1 – Типовой геофизический разрез афонинского горизонта (D_2af) Харьягинского месторождения

ФЕС пород данных отложений изучены на 208 образцах керна стандартного размера (∅ 30 мм) и характеризуются следующими значениями (рис.2.2): пористость изменяется в диапазоне 0.97 - 18.31 %, проницаемость: 0.02 – $650 \cdot 10^{-3}$ мкм^2.

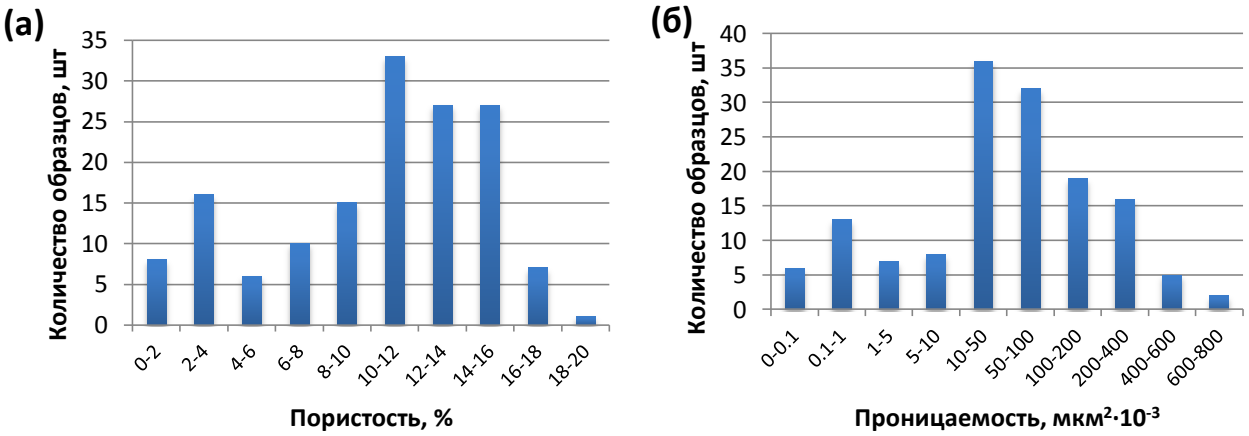


Рисунок 2.2 – Распределение пористости (а) и проницаемости (б) для исследованных отложений

Для рентгенотомографических исследований были отобраны образцы с проницаемостью от 9 до $800 \cdot 10^{-3}$ мкм^2, пористостью от 7 до 18.5% (рис.2.3) и остаточной водонасыщенностью от 2 до 70% (рис.2.4).

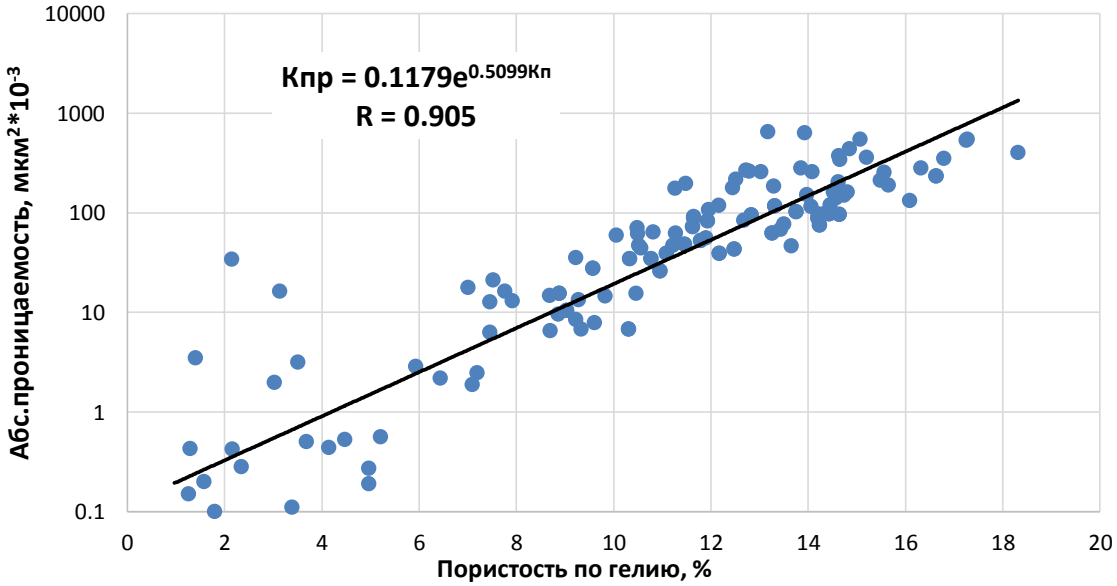


Рисунок 2.3 – Зависимость абсолютной проницаемости от пористости для отложений афонинского горизонта

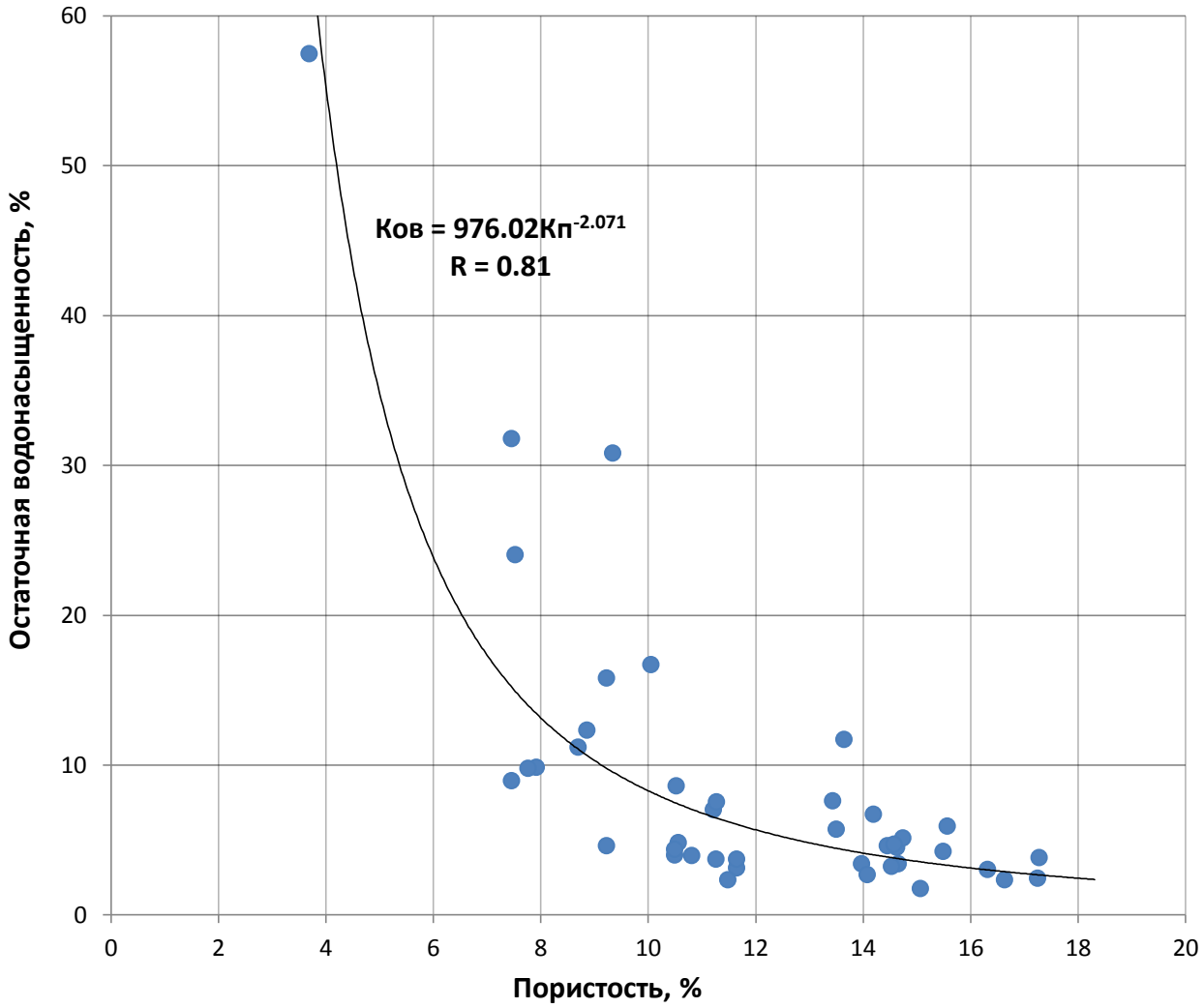


Рисунок 2.4 – Зависимость остаточной водонасыщенности от пористости для отложений афонинского горизонта

В отобранных для РТ-исследований образцах встречаются песчаники мелко-среднезернистые кварцевые, слабоглинистые, а также мелкозернистые кварцевые, слабоглинистые.

В песчанике мелко-среднезернистом кварцевом размер обломков варьирует от 0.04 до 0.65 мм с преобладанием песчаной фракции 0.25-0.5 мм (55-60%). Форма обломков окатанная, полуугловатая, полуокатанная, редко угловатая. Сортировка плохая. Минеральный состав обломков: кварц (95-99%).

Цементирующая часть представлена карбонатным (доломитовым) и глинистым (каолинитовым) цементом порового, сгусткового типа.

Пустотное пространство представлено порами межзернового типа, которое распределено относительно равномерно (рис. 2.5б). Часть пустотного пространства представлена микропористостью по каолинитовому цементу.

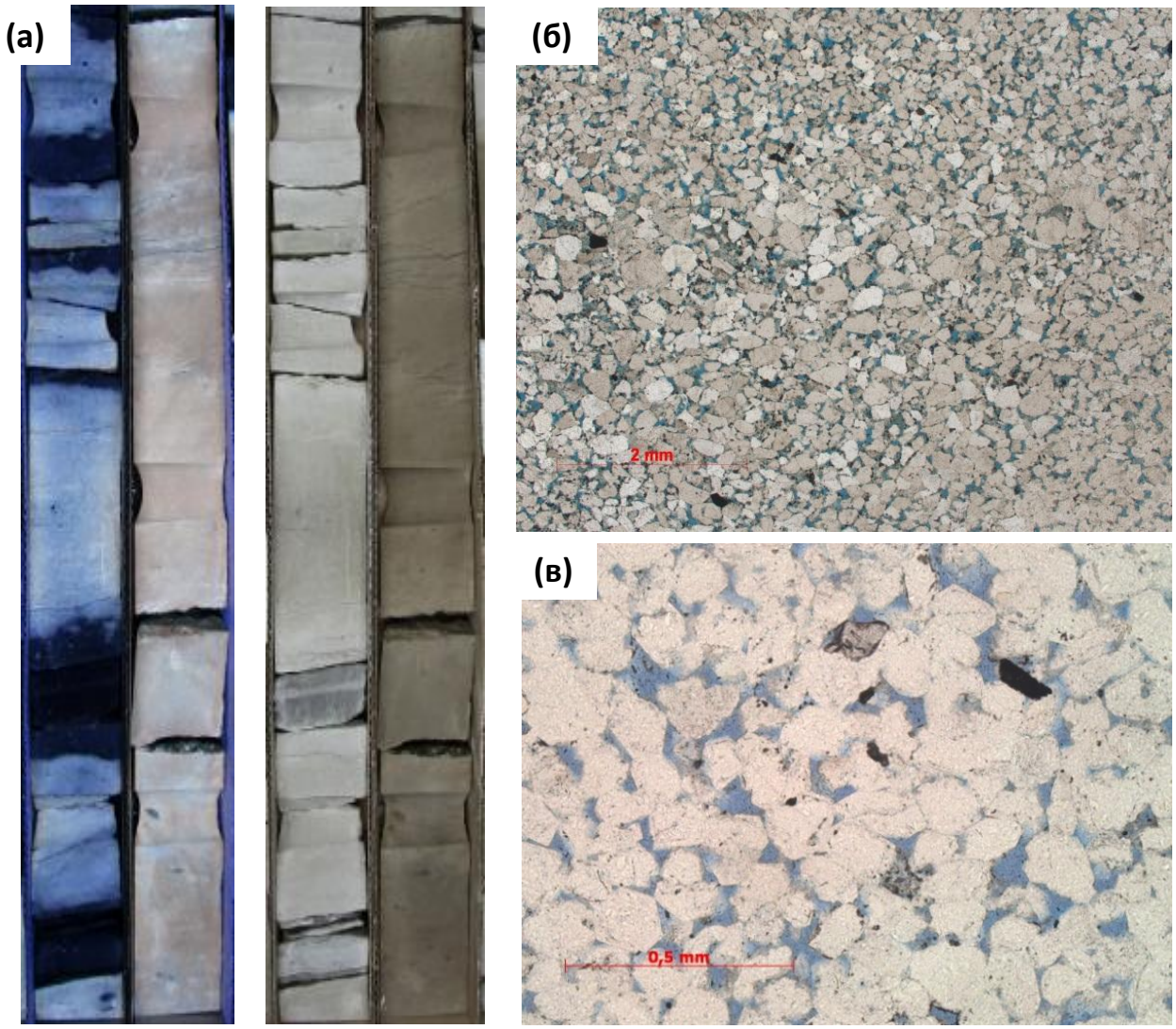


Рисунок 2.5 – Фото керна в ультрафиолетовом и дневном свете (а);
пустотное пространство песчаника средне-мелкозернистого (б);
пустотное пространство песчаника мелкозернистого (в);

Другая разновидность - песчаник мелкозернистый кварцевый. Текстура массивная, обломочная часть составляет 70-80% матрицы породы. Размер обломков варьирует 0.1-0.26 мм, преобладает 0.15-0.20 мм (до 90-95%). Форма обломков полуугловатая, угловатая, полуокатанная, окатанная. Сортировка хорошая. Минеральный состав обломков: кварц (96-98%).

Цементирующая часть представлена регенерационным кварцевым цементом, на единичных участках глинистым (каолинитовым), порового типа.

Пустотное пространство представлено порами межзернового типа и распределено равномерно (рис.2.5в).

На основании результатов лабораторных исследований ФЕС горных пород, отобранные образцы афонинского горизонта Харьягинского месторождения характеризуются низкой проницаемостью, невысокой пористостью и являются коллекторами порового типа IV класса (по Ханину А.А.).

Объектом РТ-исследований Красноленинского месторождения являются песчаные отложения Викуловской свиты (K_1vk).

ФЕС пород данных отложений изучены на 280 образцах керна стандартного размера (∅ 30 мм) и характеризуются следующими значениями (рис.2.6): пористость изменяется в диапазоне 0.24 - 27.6 %, проницаемость: 0.02 - 254·10^{-3} мкм^2.

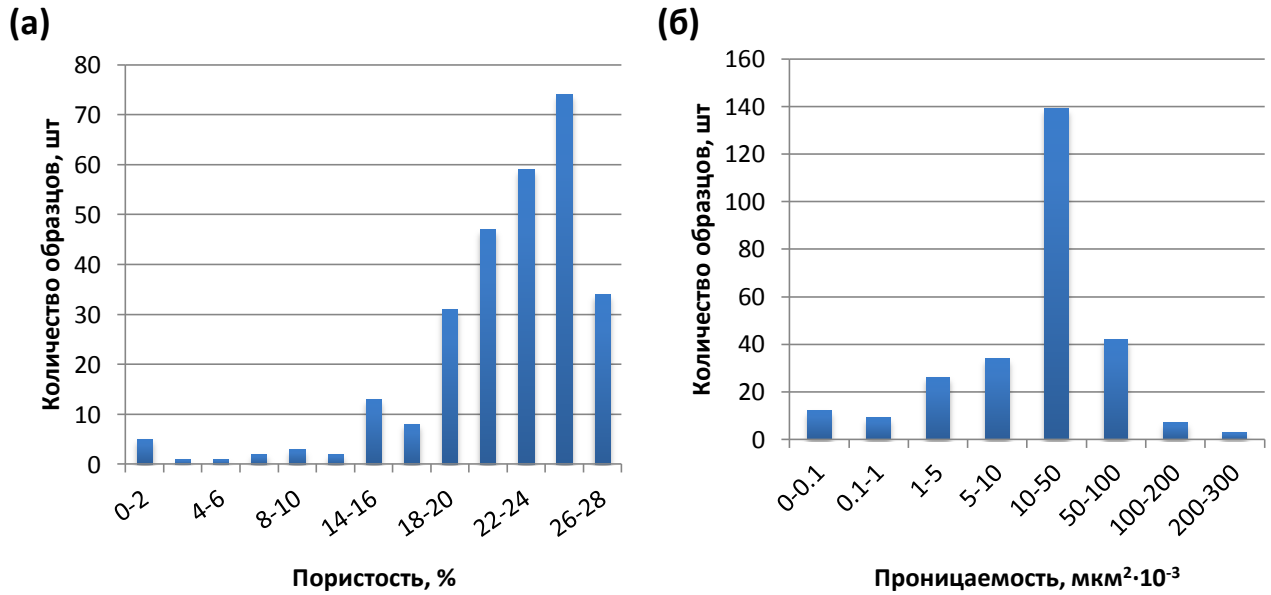


Рисунок 2.6 – Распределение пористости (а) и проницаемости (б) для исследованных отложений

В отобранных для РТ-исследований образцах пористость изменяется в диапазоне 22 - 27.6 %, проницаемость: 34 - 254·10^{-3}мкм^2 (рис.2.7) и остаточная водонасыщенность от 22 до 42 % (рис.2.8).

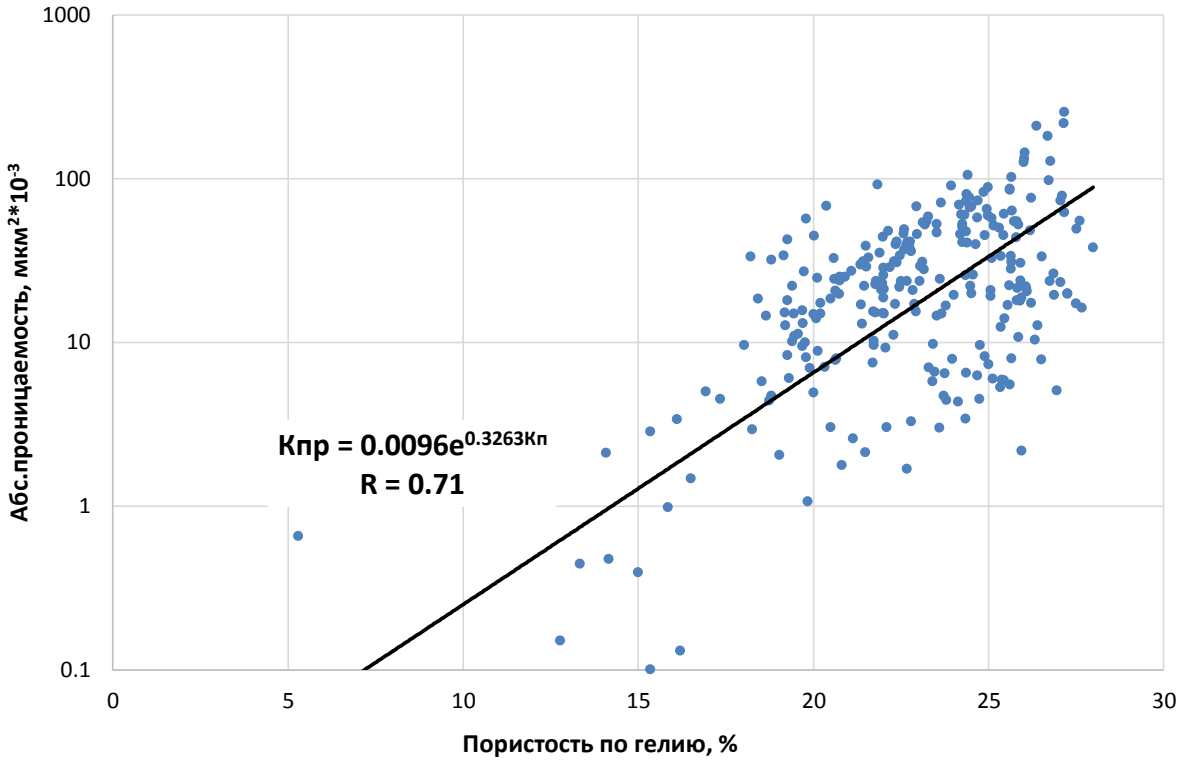


Рисунок 2.7 – Зависимость абсолютной проницаемости от пористости для викуловской свиты

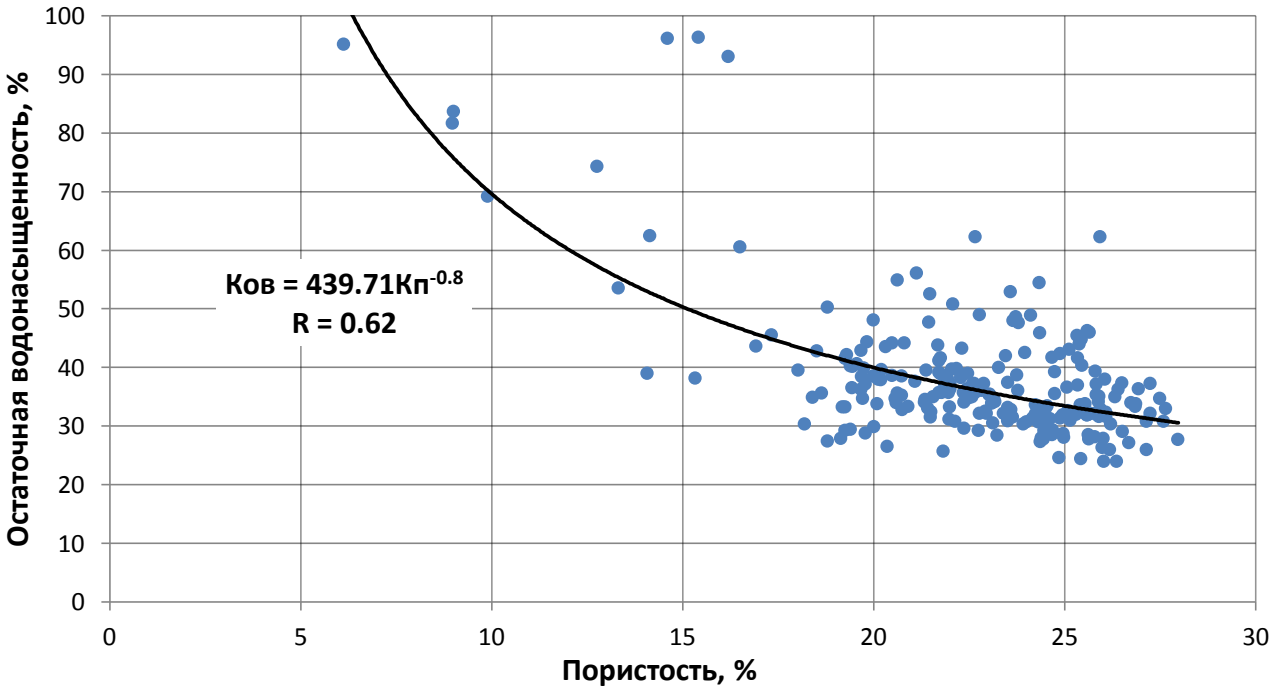


Рисунок 2.8 – Зависимость остаточной водонасыщенности от пористости для отложений викуловской свиты

Среди отобранных образцов встречаются как песчаники среднезернистые, мелкозернистые, так и крупнозернистые алевролиты.

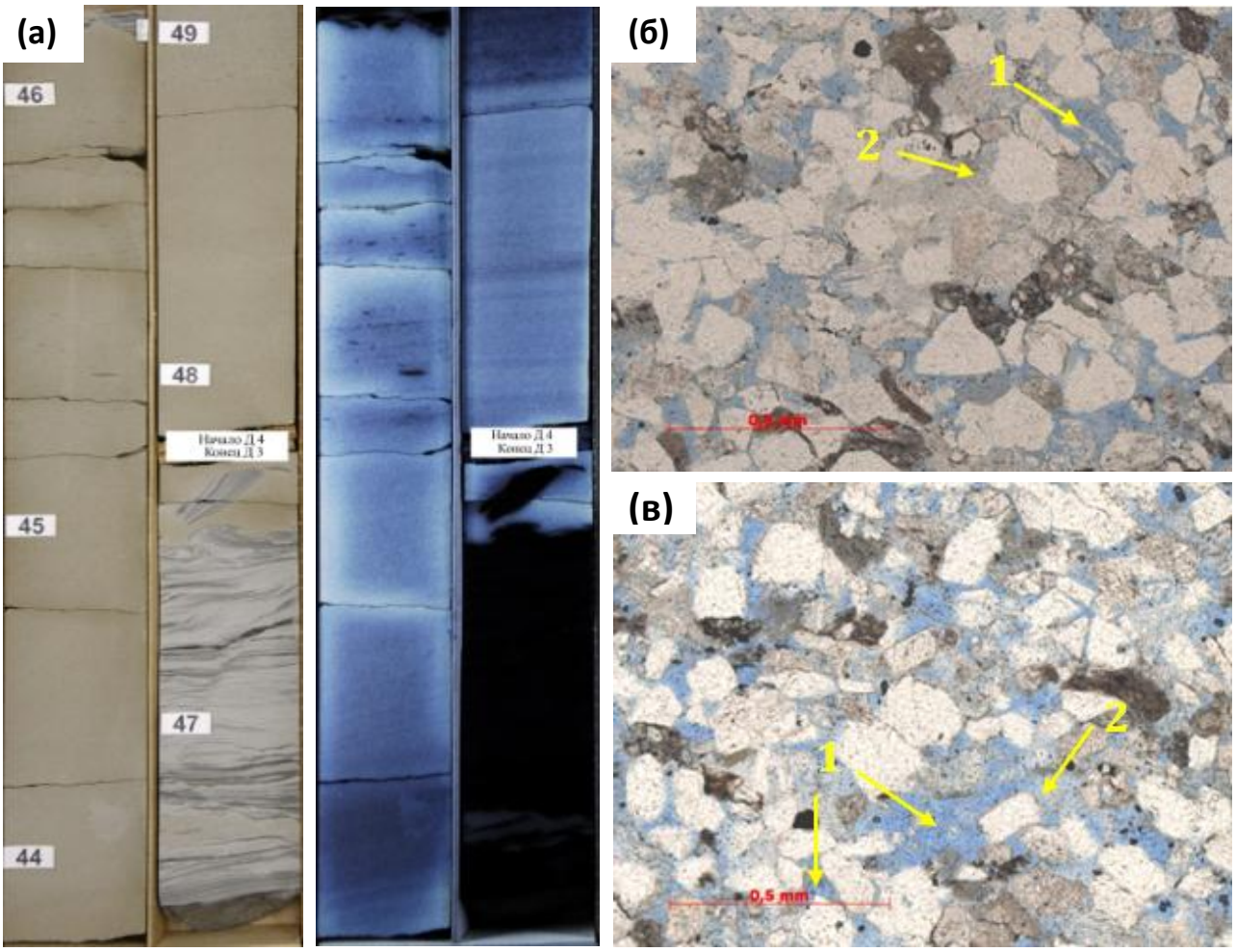


Рисунок 2.9 – Фото керна в дневном и ультрафиолетовом свете (а); межзерновые поры (1) и каолинитовый цемент (2) в песчанике мелкозернистом (б, в)

В песчанике мелкозернистом с поровым глинистым цементом обломочная часть составляет 70-75% матрицы породы, размер обломков варьирует 0.03-0.34 мм, преобладает 0.15-0.20 мм. Форма обломков полуугловатая, угловатая, полуокатанная, окатанная. Сортировка хорошая. Минеральный состав обломков: кварц – 50-60%; полевые шпаты (плагиоклазы, микроклины, ортоклазы) – 35-45%, обломки эффузивных пород – 1-2%.

Цементирующая часть представлена глинистым (каолинитовым) цементом сгусткового, порового типа.

Пустотное пространство представлено порами межзернового типа, другая часть пустотного пространства представлена микропористостью по каолинитовому цементу (рис.2.9б,в).

В крупнозернистых алевролитах размер обломков варьирует 0.03-0.35 мм, в алевритовой фракции преобладают зерна размером 0.06-0.08 мм. Форма обломков полуугловатая, вытянутая, полуокатанная, угловатая. Сортировка хорошая.

Минеральный состав обломков: кварц – до 45-55%, полевые шпаты – 40-50%, чешуйки слюды –3-5%, обломки кремнистых пород 1-3%.

Цементирующая часть представлена глинистым (каолинитовым) цементом сгусткового, порового типа.

Пустотное пространство в них представлено порами межзернового типа и внутризерновой пористостью (рис.2.10а,б).

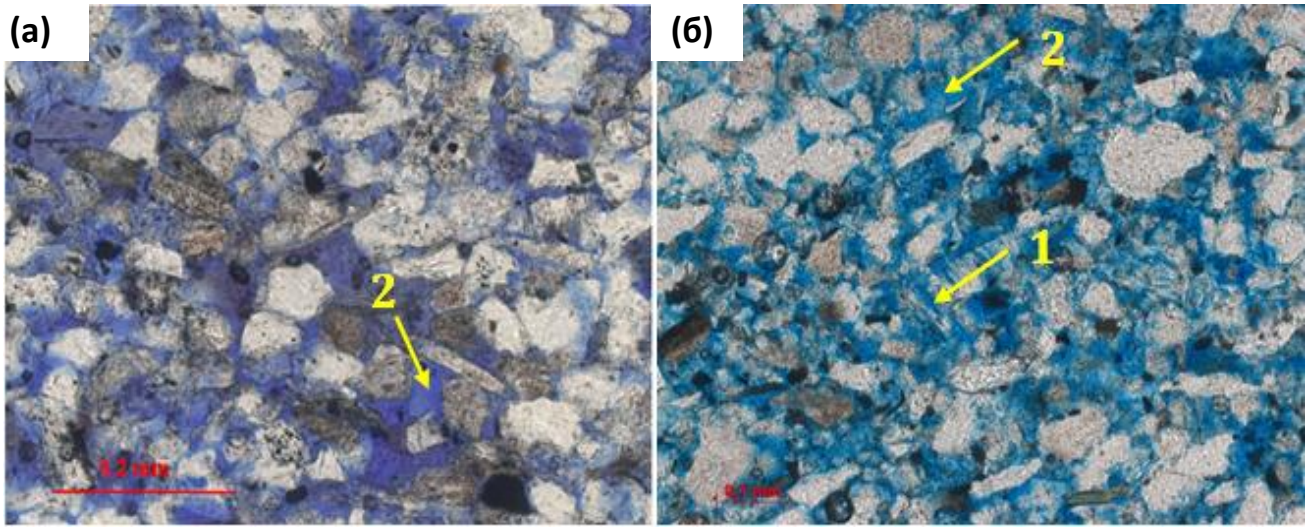


Рисунок 2.10 - Внутризерновая (1) и межзерновая (2) пористости в алевролите крупнозернистом

Отобранные образцы с Красноленинского месторождения характеризуется низкой проницаемостью и высокой пористостью, и по классификации Ханина А.А.являются коллекторами порового типа IV–V классов.

Объектом исследования Москудьинского месторождения являются карбонатные отложения среднего отдела каменноугольной системы башкирского яруса (C_2b) – рис. 2.11.

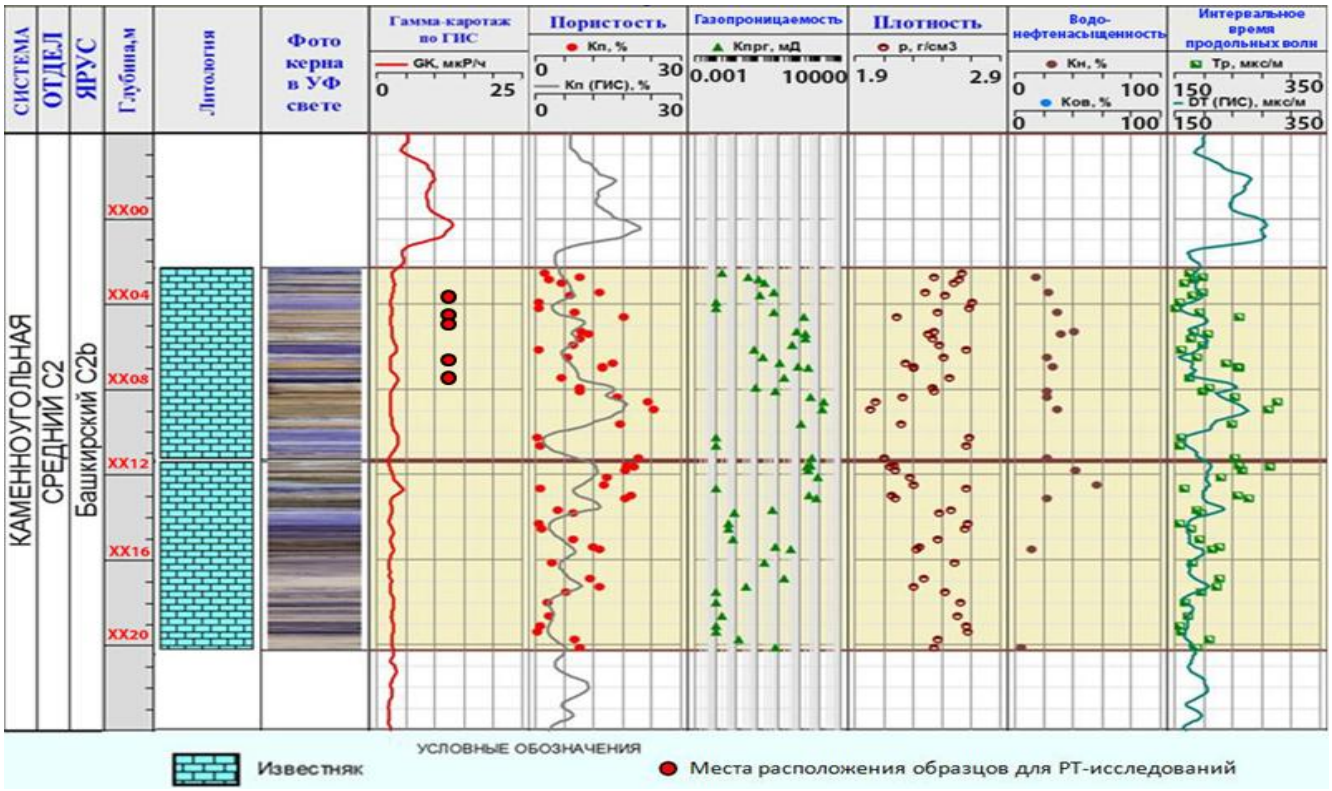


Рисунок 2.11 - Типовой геофизический разрез отложений башкирского яруса (C_2b) Москудьинского месторождения

Фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) пород данных отложений изучены на 268 образцах керна стандартного размера (∅ 30 мм). ФЕС характеризуются следующими значениями (рис.2.12): пористость изменяется в диапазоне 0.36 - 28.91 %, проницаемость: 0.001 – $3745 \cdot 10^{-3}$ мкм^2.

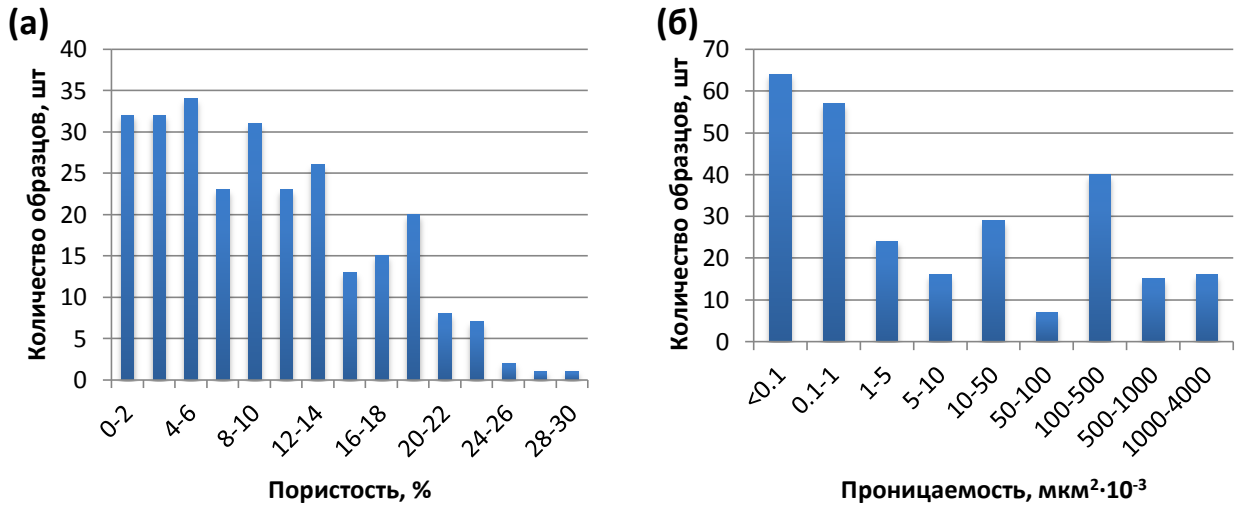


Рисунок 2.12 – Распределение пористости (а) и проницаемости (б) для исследованных отложений

В отобранных для РТ-исследований образцах пористость изменяется в диапазоне 2.5 – 27 %, проницаемость: 0.1 - 2610·10^{-3} мкм^2 (рис.2.13) и остаточная водонасыщенность от 2 до 60 % (рис.2.14).

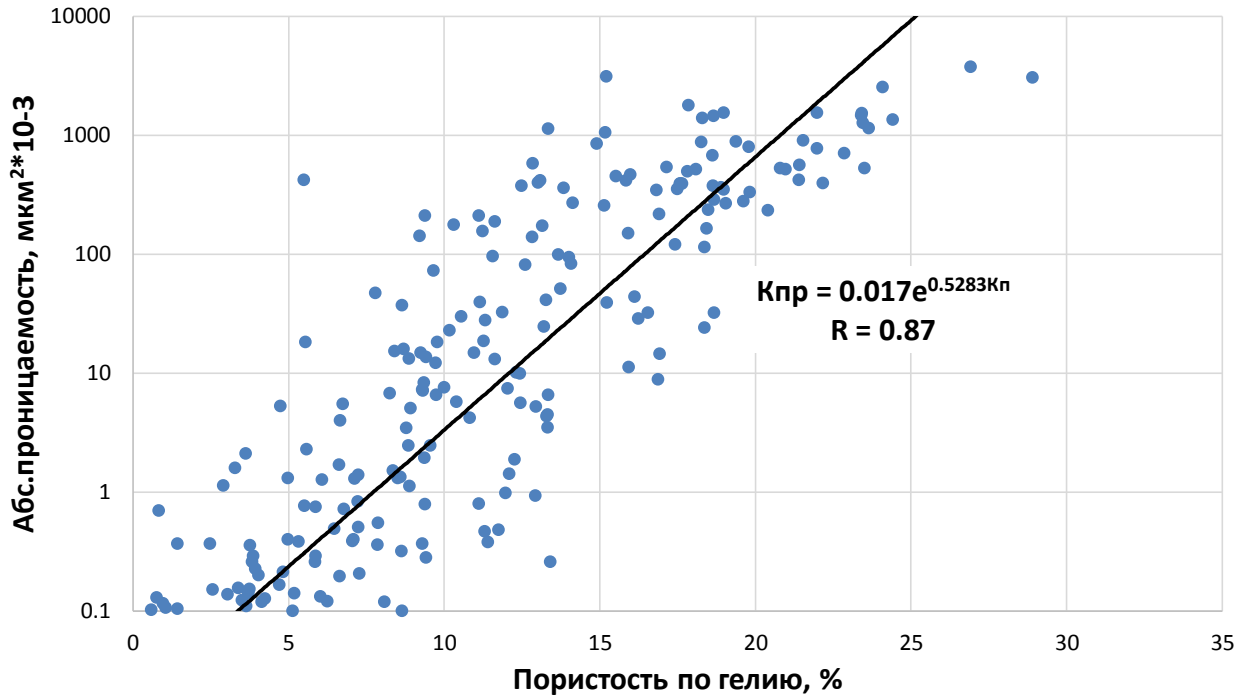


Рисунок 2.13 – Зависимость абсолютной проницаемости от пористости для отложений башкирского яруса

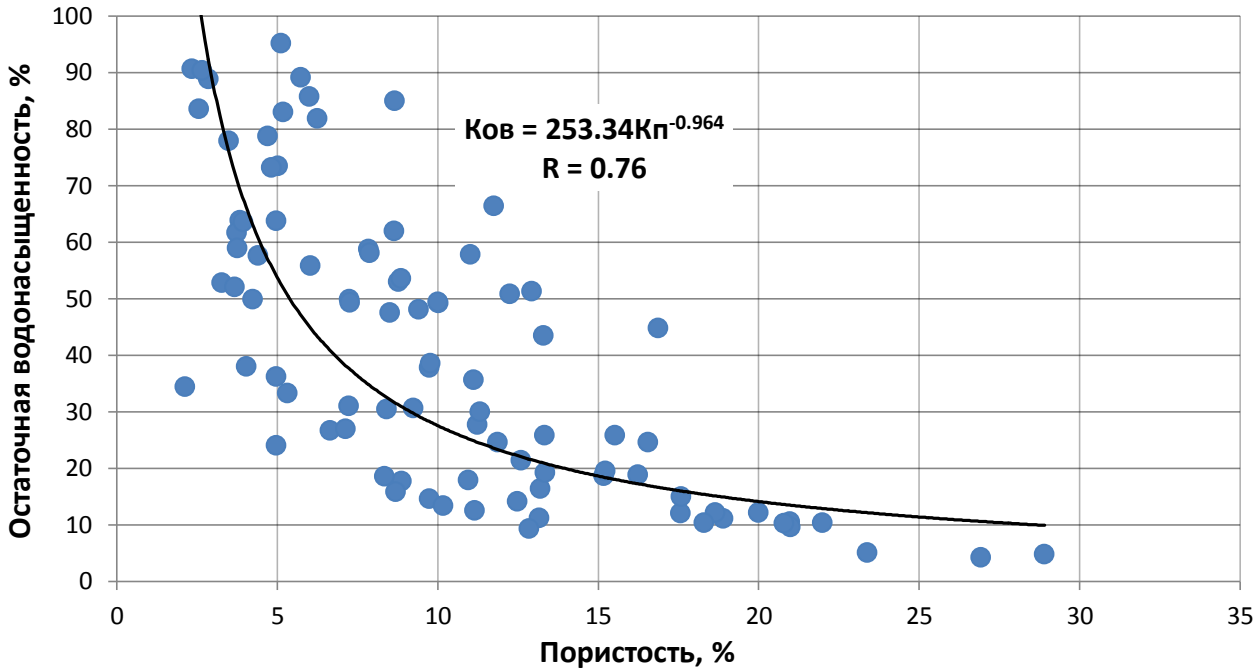


Рисунок 2.14 – Зависимость остаточной водонасыщенности от пористости для отложений башкирского яруса

Образцы для РТ-исследований были отобраны из интервалов пород, представленных известняком водорослевым с органогенным детритом. По текстуре порода массивная, по структуре водорослевая, органогенно-детритовая.

Порода сложена водорослями, которые образуют каркас (видны отдельные участки и реликты водорослевой структуры), в котором присутствуют органогенные остатки, представленные: обломками криноидей, обломками и раковинами фораминифер, брахиопод, пелеципод, обломки микросгустковых известняков.

За счёт активного выщелачивания пустотное пространство представлено преимущественно кавернами, размеры которых достигают 4.4 мм, встречаются единичные внутриформенные и межформенные поры (рис.2.15б, в).

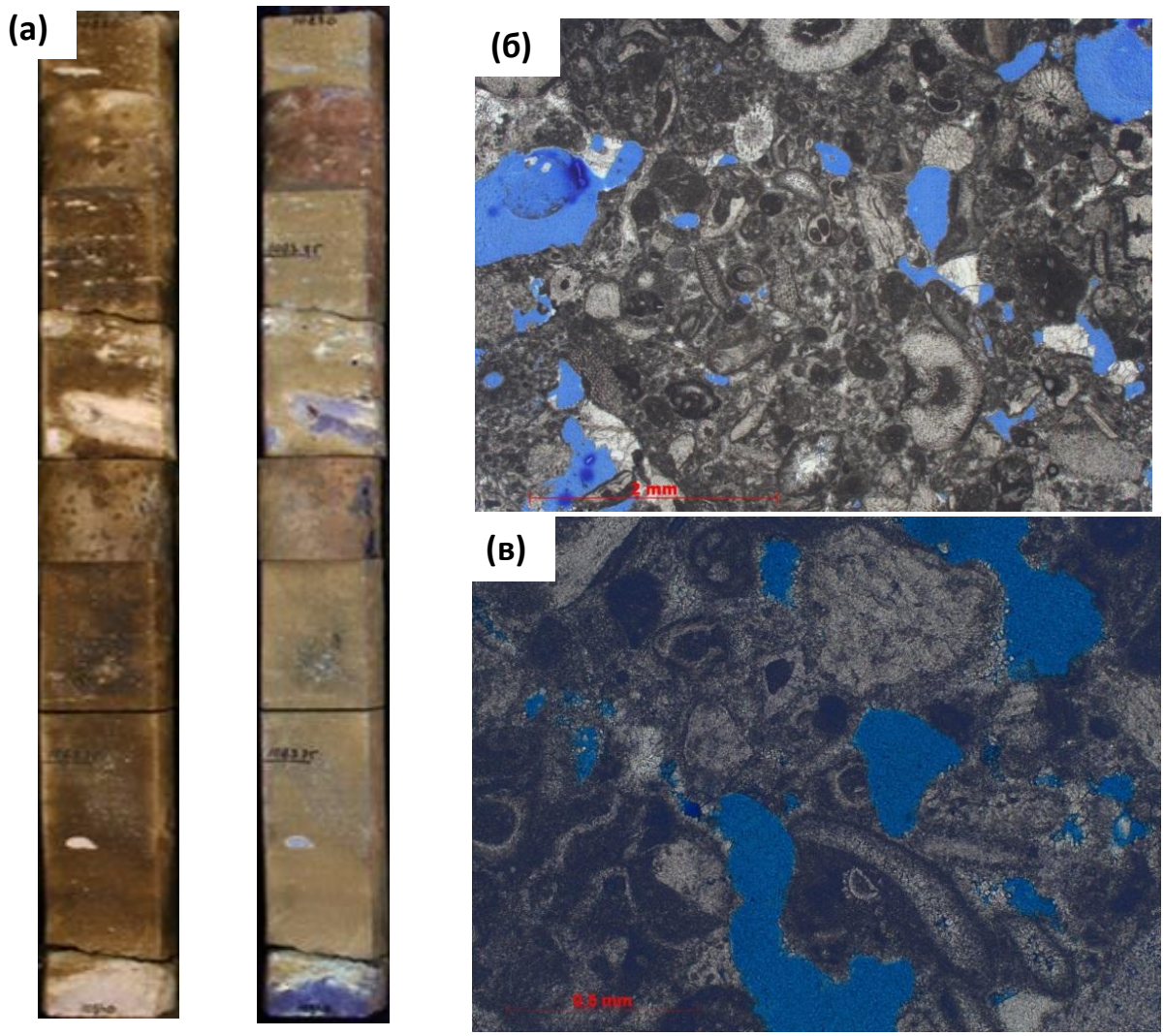
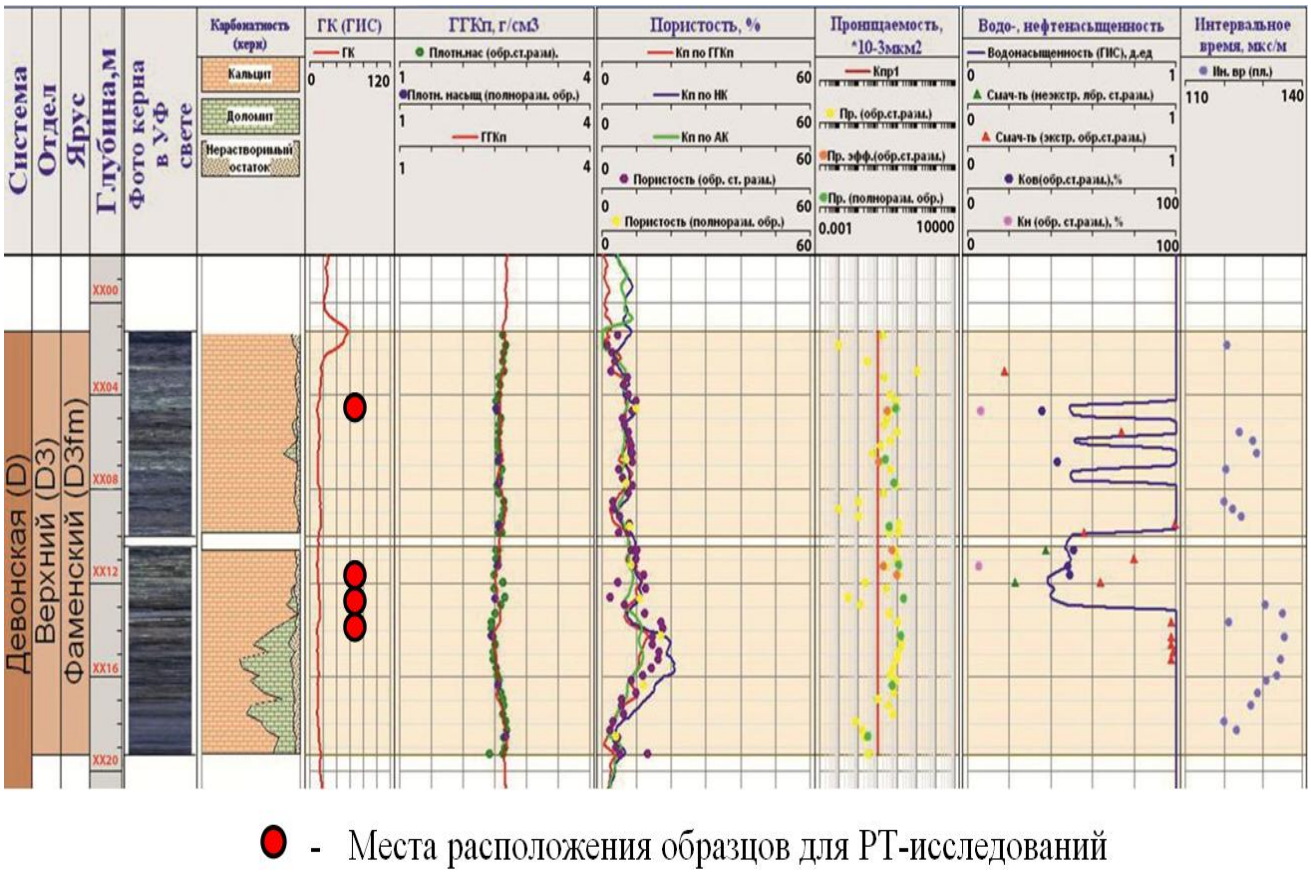


Рисунок 2.15 - Фото керна в дневном и ультрафиолетовом свете (а); поры и каверны в известняке водорослевом (б,в)

Изучаемые образцы пород Москудьинского месторождения можно назвать высокопористыми и проницаемыми. Их можно отнести к коллекторам каверно-порового типа.

Объектом исследования Возейского месторождения являются карбонатные отложения верхнего отдела девонской системы фаменского яруса (D_3fm) – рис. 2.16.



- Места расположения образцов для РТ-исследований

Рисунок 2.16 - Типовой геофизический разрез фаменских отложений (D_3fm) Возейского месторождения

ФЕС пород данных отложений изучены на 150 образцах керна стандартного размера (∅ 30 мм) и характеризуются следующими значениями: пористость изменяется в диапазоне 0.72 – 17.78 %, проницаемость: 0.02 - $135 \cdot 10^{-3}$ мкм^2 (рис. 2.17).

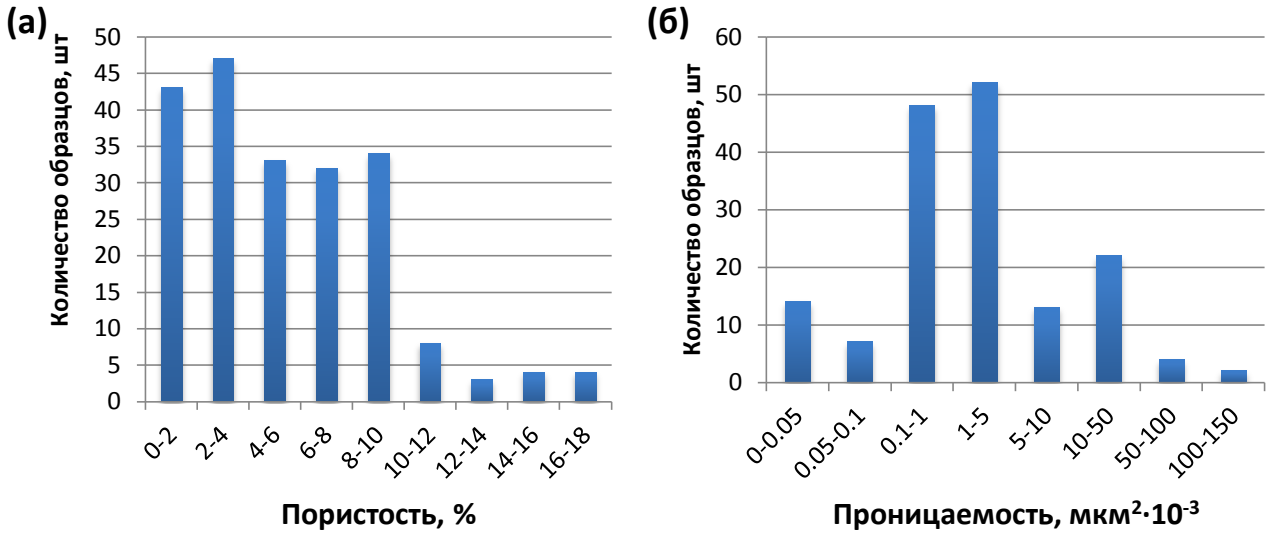


Рисунок 2.17 – Распределение пористости (а) и проницаемости (б) для исследованных отложений

В отобранных для РТ-исследований образцах пористость изменяется в диапазоне 2.5 – 18 %, проницаемость: 0.1 - 100·10^{-3} мкм^2 (рис.2.18) и остаточная водонасыщенность от 2 до 18 % (рис.2.19).

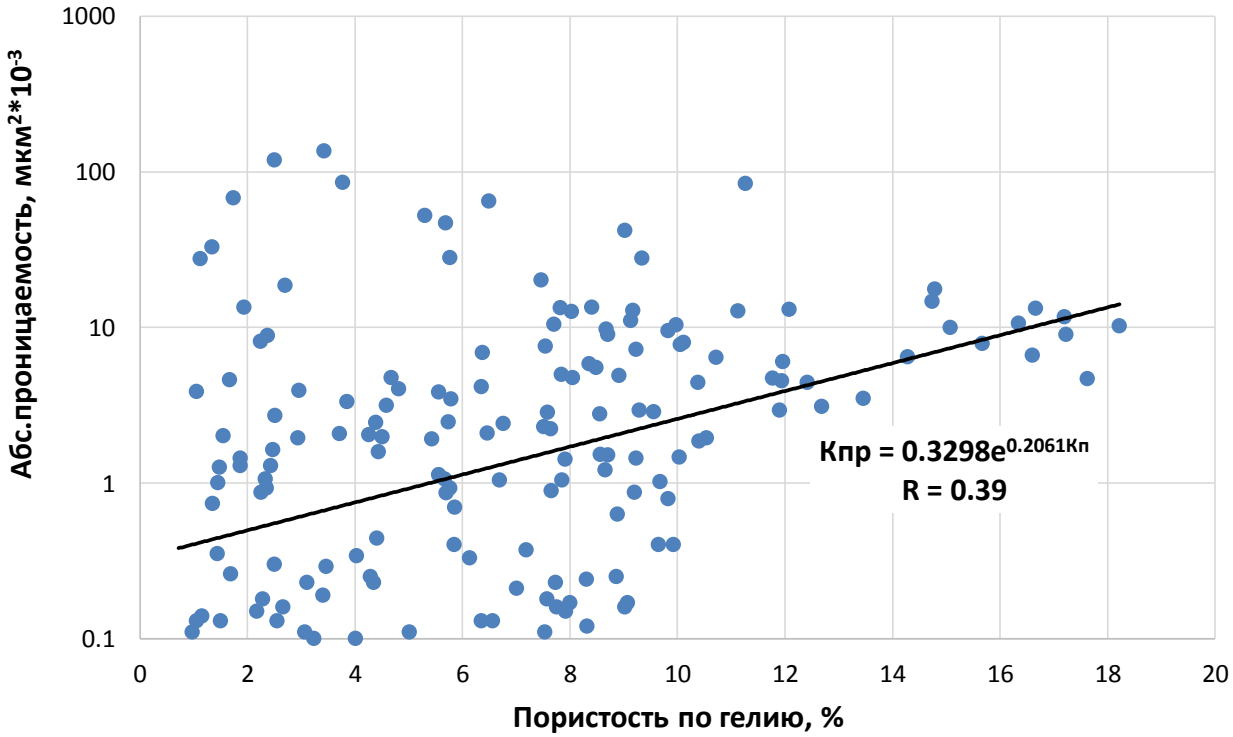


Рисунок 2.18 – Зависимость абсолютной проницаемости от пористости для фаменских отложений

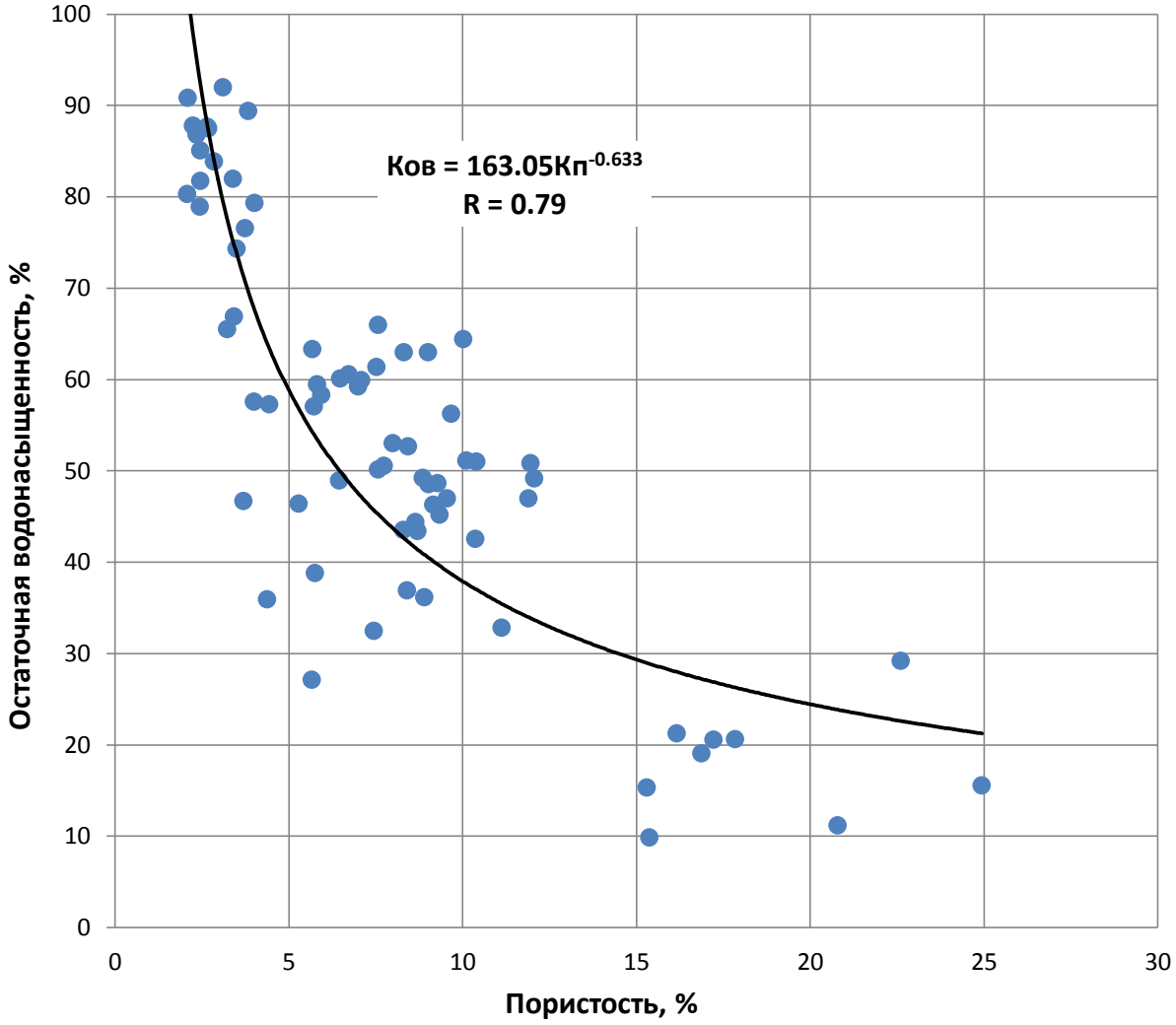


Рисунок 2.19 – Зависимость остаточной водонасыщенности от пористости для фаменских отложений

Отобранная коллекция образцов для РТ-исследований представлена известняком микрозернистым, неравномерно обогащенным органическим детритом, с глинистыми прослоями, неравномерно доломитизированным, трещиноватым.

Видимые органические остатки представлены единичными раковинами размером до 1.2 см, выполнены кальцитом. Участками отмечается присутствие сгустково-комковатого материала. В некоторых случаях наблюдается неравномерная, пятнистая доломитизация породы (рис.2.20б).

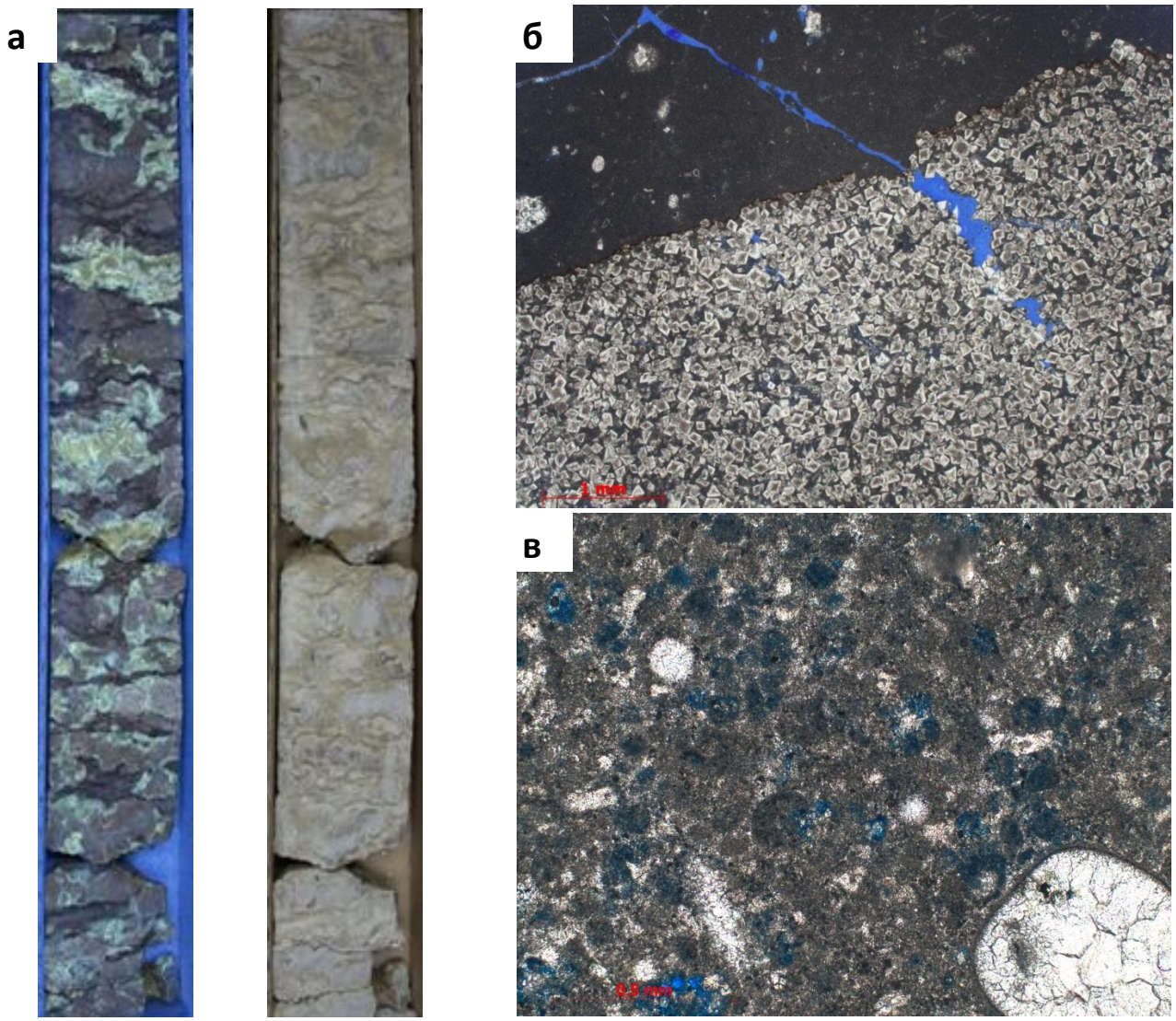


Рисунок 2.20 – Фото керна в ультрафиолетовом и дневном свете (а);
доломитовая и известковая части, трещины, каверны и межкристаллические поры доломитизированной части в известняке (б),
микропористость, приуроченная к комковатой части в известняке (в)

По структуре порода неоднородна: тонкозернистая, микро-тонкозернистая, микросгустковая, микрокомковатая (0.03-0.10 мм) и комковатая (до 0.67 мм), водорослевая, органогенно-детритовая. Органогенный детрит, представлен: раковинами и обломками раковин остракод (0.25-0.85 мм), тентакулитов (0.17-2.00 мм), птерапод (0.05 мм), обломками криноидей (0.20-0.95 мм), строматопор (0.50 мм), встречаются единичные обломки раковин брахиопод (0.65-4.20 мм).

Пустотное пространство представлено межкристаллической, вместоформенной пористостью, микропористостью (приурочена к водорослевым

комкам – рис.2.20в). Присутствующие трещины в породе слабоволнистые, разветвляющиеся, частично полые, частично заполненные кальцитом (рис.2.20б).

Изучаемые образцы Возейского месторождения можно характеризовать как преимущественно низкопористые и проницаемые и их можно отнести к коллекторам трещинно-каверно-порового типа.

2.2 Основные принципы работы рентгеновского томографа

Исследование образцов керна в работе проводилось с помощью рентгеновского томографа SkyScan 1172 (рис.2.21), бельгийского производства.

Рисунок 2.21 - Рентгеновский томограф SkyScan 1172

Процесс получения информации с использованием вышеупомянутого прибора можно разделить на 3 основных этапа: сканирование исследуемого образца керна в камере томографа, его компьютерная реконструкция и обработка данных (рис.2.22).

На первом этапе осуществляется сканирование образца непосредственно в камере томографа. Образец любой формы, без какой-либо специальной подготовки помещается на предметный столик и закрепляется в камере томографа на специальном держателе. После этого проводится калибровка и выбора

параметров сканирования (разрешение съёмки, фильтр, угол поворота образца и т.д.), среди которых наиболее важным является разрешающая способность.

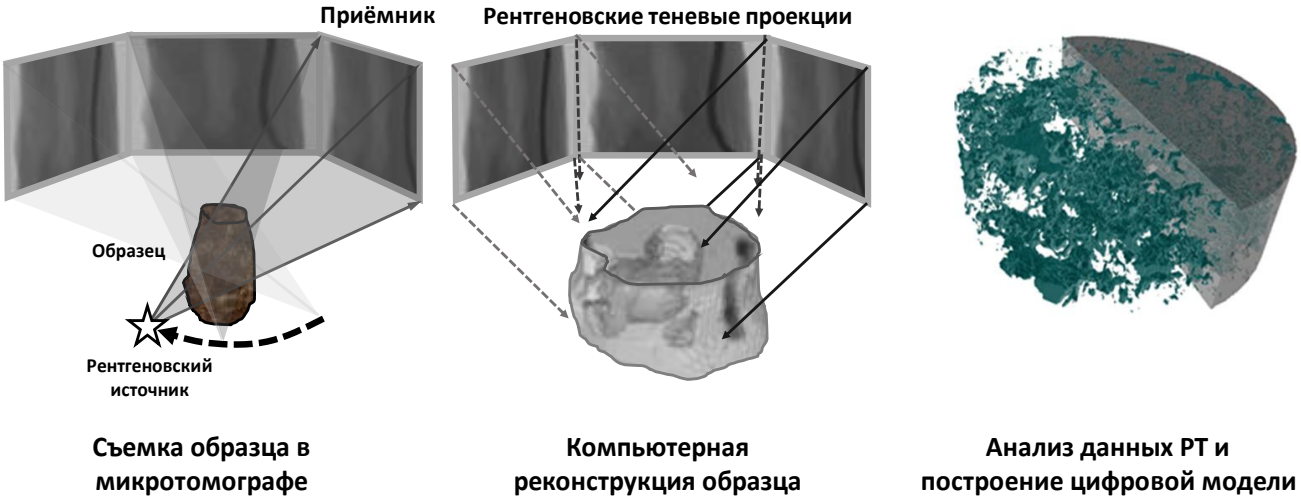


Рисунок 2.22 - Процесс получения информации на рентгеновском томографе

Задав параметры съёмки, запускается процесс сканирования образца. В данной модели томографа источник излучения и детектор находятся в неподвижном положении, а образец вращается вокруг своей оси.

Результатами данного этапа является получение двумерных боковых проекций образца. Проекция представляет собой единичный рентгеновский снимок, где интенсивность окрашивания каждого пикселя зависит от поглощения рентгена образцом. На следующем этапе полученный массив теневых проекций после сканирования подвергается математической обработке (реконструкции) с использованием специализированного программного обеспечения на компьютере. Результатом данного этапа обработки данных является распределение коэффициента ослабления в виде набора изображений в градациях серого (от черного к белому) или горизонтальных срезов образца.

Полученные данные возможно представить как в двумерном варианте в трёх проекциях, так и в виде трёхмерной модели исследуемого образца, в которой будет отображаться весь объём данных, но на качественном уровне (рис.2.23).

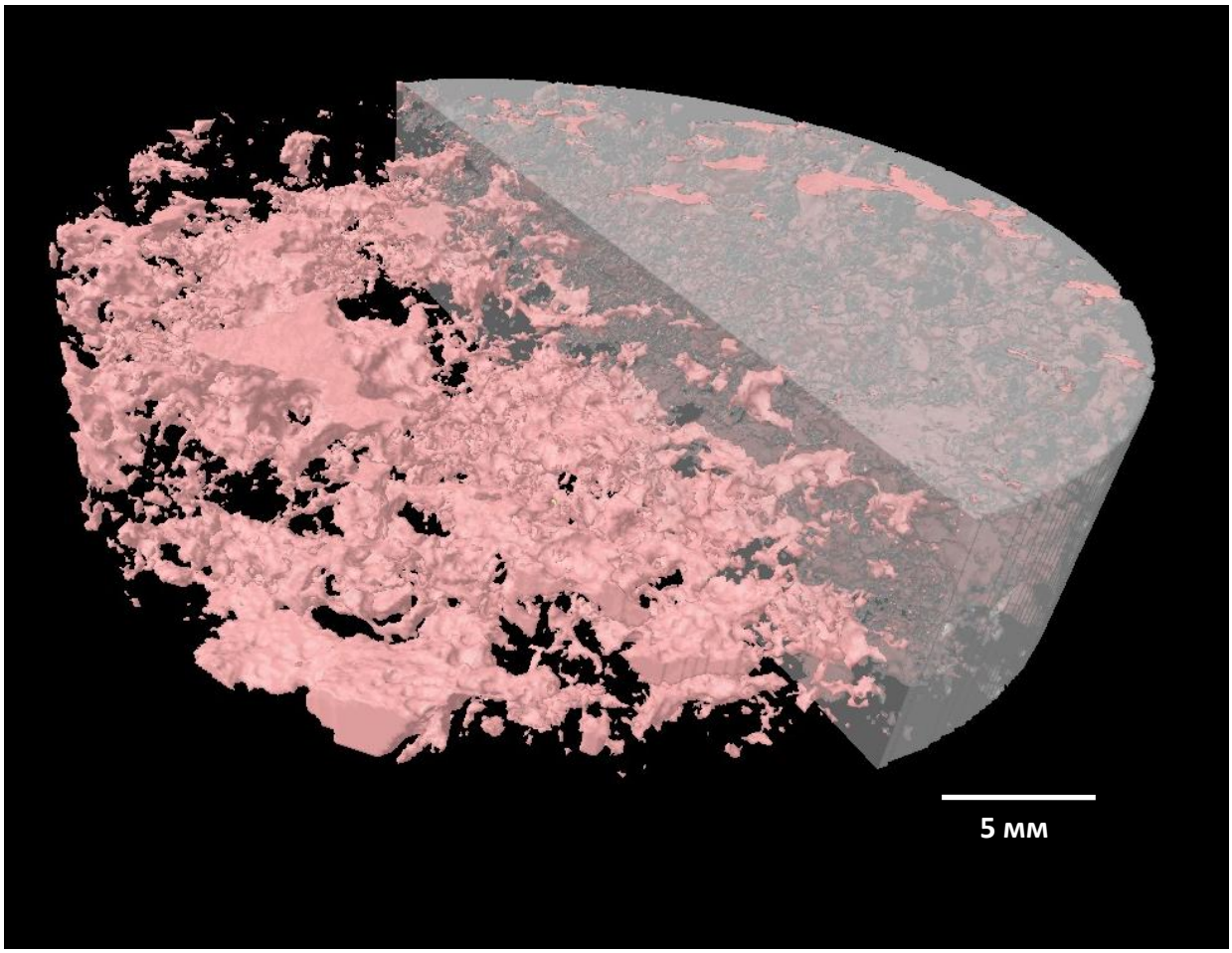


Рисунок 2.23 - Визуализация трёхмерной модели образца (красным показано пустотное пространство, серым – матрица породы)

Обработка результатов РТ-съёмки является наиболее трудоёмким этапом. Полученный после реконструкции набор данных загружается в программу анализатор, где возможно разделить объекты внутри образца (поры, каверны, скелет, плотные включения и т.д.), а также произвести количественный анализ интересующего объекта (определяются размеры, ориентация, количество объектов, строятся гистограммы распределения по различным параметрам и др.).

Таким образом, на этом этапе возможно отдельно анализировать пустотное пространство образца, его минеральную компоненту, интересующие включения, получать количественные оценки и визуализировать полученные результаты.

2.3 Метод решёточных уравнений Больцмана для моделирования однофазной фильтрации в масштабе пор

Метод решёточных уравнений Больцмана (РУБ) является одним из универсальных методов вычислительной физики, который используется для моделирования различных процессов: динамики разреженных газов [17], теплопроводности [64], моделирования анизотропной диффузии [93], однокомпонентного течения [55], развития стеноза артерий [53], а также течения жидкости в пустотном пространстве [57] и поведения двухфазных систем [70].

Основным плюсом РУБ является возможность распараллеливания алгоритма и как следствие высокая скорость вычислений. В методе среда, в которой производится моделирование, разбивается на кубические пространственные ячейки, которые могут быть проницаемыми или непроницаемыми. Метод РУБ, в отличие от стандартных методов расчёта течения флюида путём решения уравнений Навье-Стокса, рассматривает течение как движение квазичастиц, перемещение которых происходит между проницаемыми ячейками согласно заданному шаблону скоростей. В настоящей работе был использован шаблон D3Q19 – трёхмерный случай с 19 направлениями скоростей (рис.2.24).

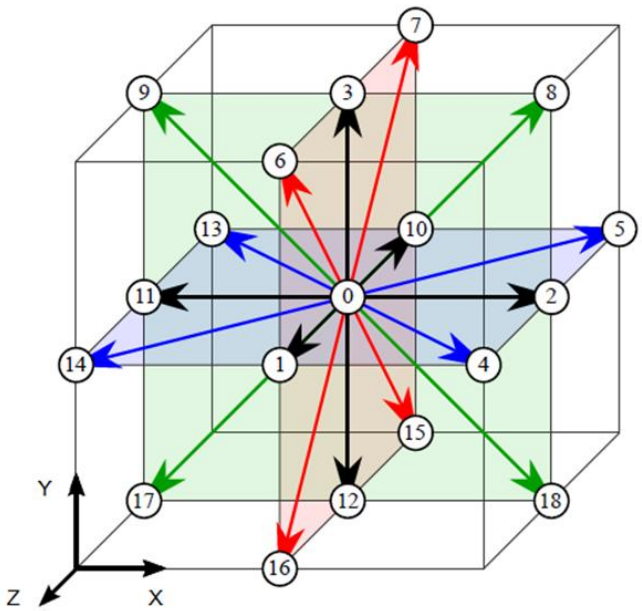


Рисунок - 2.24 Решётка направлений D3Q19

Выбран следующий порядок направлений в шаблоне D3Q19: (направлениям i =1,…, 9 соответствуют противоположные направления (i+9) для i ϵ [1; 9]) (1).

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}^T \quad (2.1)$$

Для описания ансамбля квазичастиц в РУБ используются значения функции распределения f_i, где i — номер соответствующего направления скорости в шаблоне. Эволюция f_i задаётся решёточным уравнением Больцмана (2.2):

$$|f(r + e\delta t, t + \delta t)\rangle = |f(r,t)\rangle + \Omega(f|(r,t)\rangle) \quad (2.2)$$

Где $|f(r + e\delta t, t + \delta t)\rangle = (f_0(r + e_0\delta t, t + \delta t), \dots, f_{\mathrm{q}-1}(\mathrm{r} + e_{q-1}\delta t, t + \delta t))^T$ – вектор значений функции распределения после шага распространения, $|f(r,t)\rangle = (f_0(r,t), \dots, f_{q-1}(r,t))^T$ - вектор значений функции распределения до шага столкновения, векторы e_i задаются в выбранном шаблоне скоростей, $\Omega(f|(r,t)\rangle)$ - интеграл столкновений в общем виде.

В качестве приближения интеграла столкновений $\Omega(f|(r,t)\rangle)$ было выбрано классическое его приближение в форме БГК [48], где для каждой функции распределения он записывается как:

$$\Omega(f_i) = \frac{f_i^{eq} - f_i}{\tau_f} \quad (2.3)$$

Где f_i^{eq} — равновесные значения функции распределения. Они аппроксимируются [67] уравнением (2.4) и характеризуют равновесное состояние, к которому со временем стремятся частицы внутри каждой ячейки.

$$f_i^{eq}(\rho, u) = \omega_i \rho \left[1 + \frac{(e_i u)}{c_s^2} + \frac{(e_i u)^2}{2c_s^4} - \frac{(u,u)}{2c_s^2}\right] \quad (2.4)$$

Где c_s — решеточная скорость звука, ω_i — весовые коэффициенты, зависящие от выбранного шаблона скоростей. В данном случае весовые коэффициенты для шаблона D3Q19:

$$w = \left[\frac{12}{36} \quad \frac{2}{36} \quad \frac{2}{36} \quad \frac{2}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{2}{36} \quad \frac{2}{36} \quad \frac{2}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36} \quad \frac{1}{36}\right]^T \quad (2.5)$$

Параметр релаксации τ связан [67] с кинематической вязкостью (2.6):

$$\vartheta = c_s^2\,(\tau - 0.5) \quad (2.6)$$

Шаг столкновения полностью локален и выполняется независимо в каждой ячейке пространства. На шаге распространения для расчётов требуются значения функции распределения в соседних ячейках, количество которых зависит от выбора решётки направлений. Локальные плотность ρ и скорость u среды рассчитываются на основе значений функции распределения в данной ячейке (2.7, 2.8).

$$\rho = \sum_{i=0}^{q-1} f_i \tag{2.7}$$

$$u = \frac{\sum_{i=0}^{q-1} e_i f_i}{\rho} \tag{2.8}$$

В данной модели РУБ на плоскостях, параллельных оси OX, используется заданное давление, пересчитывающееся через плотность как $p = c_s^2 \rho$, а на плоскостях, перпендикулярных оси OX ставятся граничные условия в виде непроницаемых областей.

Традиционно проницаемость определяется исходя из закона Дарси (2.9):

$$Q = \frac{k_{\text{пр}} F}{\mu} \frac{\Delta p}{L} \tag{2.9}$$

Где $Q = F k_{\text{п}} \overline{u_z}$, где F – площадь поперечного сечения, $k_{\text{п}}$ – коэффициент пористости, $\overline{u_z}$ – модуль средней скорости течения вдоль оси Z по всем протекаемым ячейкам, $\mu = \rho c_s^2 (\tau - 0.5)$, откуда проницаемость (2.10) используя метод РУБ пересчитывается как:

$$k_{\text{пр}} = \frac{k_{\text{п}} \overline{u_z} \rho c_s^2 (\tau - 0.5) L}{\Delta p} \tag{2.10}$$

Для проверки правильности работы используемого вычислительного алгоритма проведем его верификацию для двух различных случаев: течения Пуазейля и расчёта проницаемости трубы.

В случае течения Пуазейля модуль скорости среды в поперечном сечении в зависимости от расстояния до центра трубы образует параболический профиль:

$$v(r) = \frac{\Delta p}{4 \eta L} (R^2 - r^2) \tag{2.11}$$

Где η – динамическая вязкость, которая связана с кинематической вязкостью соотношением η = ρυ, Δp – градиент давления.

Расчётная в данном тесте область имеет размер 128×128×128 пикселей, в которой проводился расчёт течения в трубах с различным радиусом *(R)* в 5, 10, 15, 30, 40 пикселей и длиной для всех *(L)* 128 пикселей. Параметр релаксации (τ) принимался равным 1. На гранях, перпендикулярных оси трубы Z, устанавливается фиксированный перепад давления. Полученные значения скоростей были домножены на 1000 для удобства восприятия (рис.2.25).

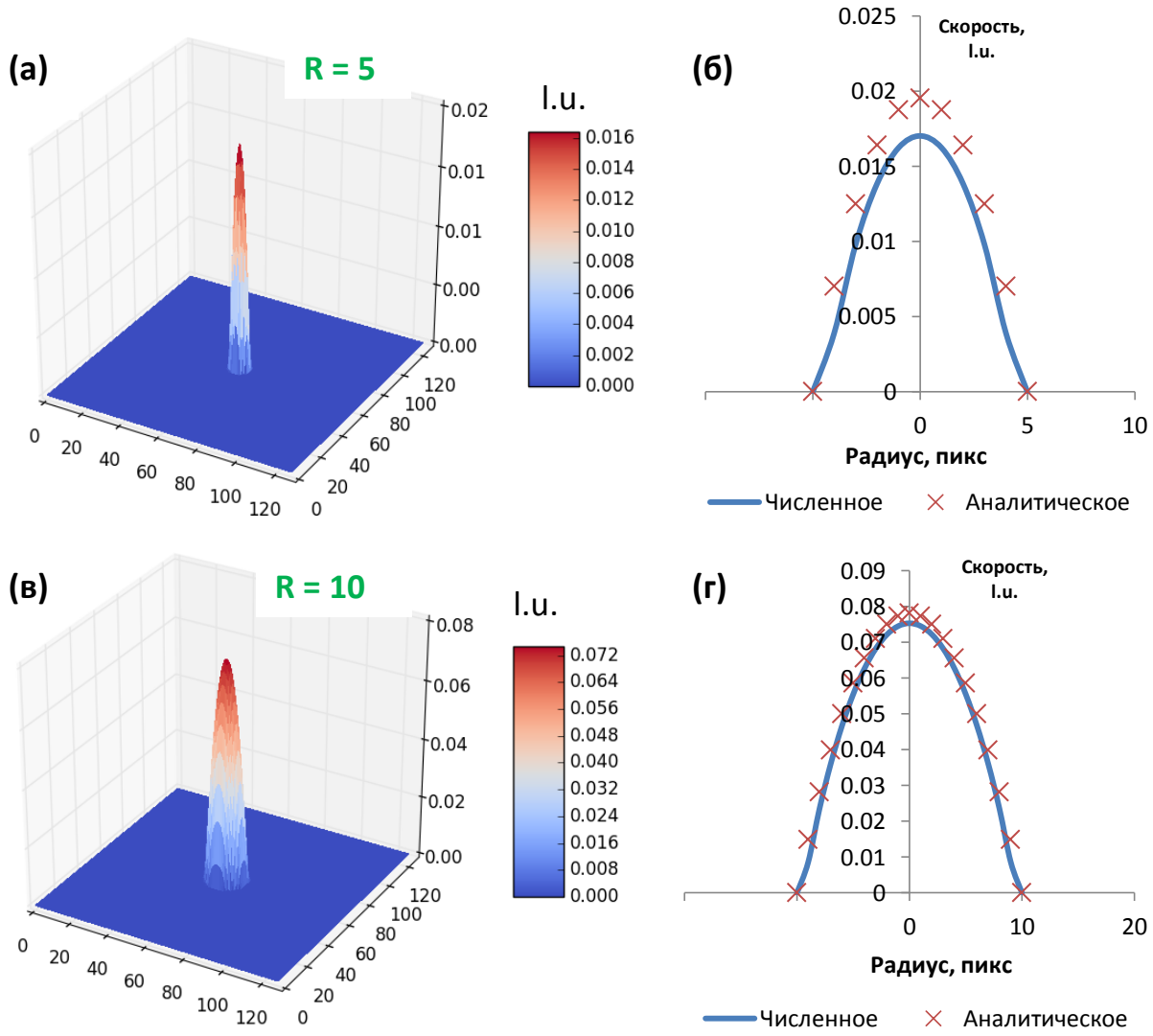
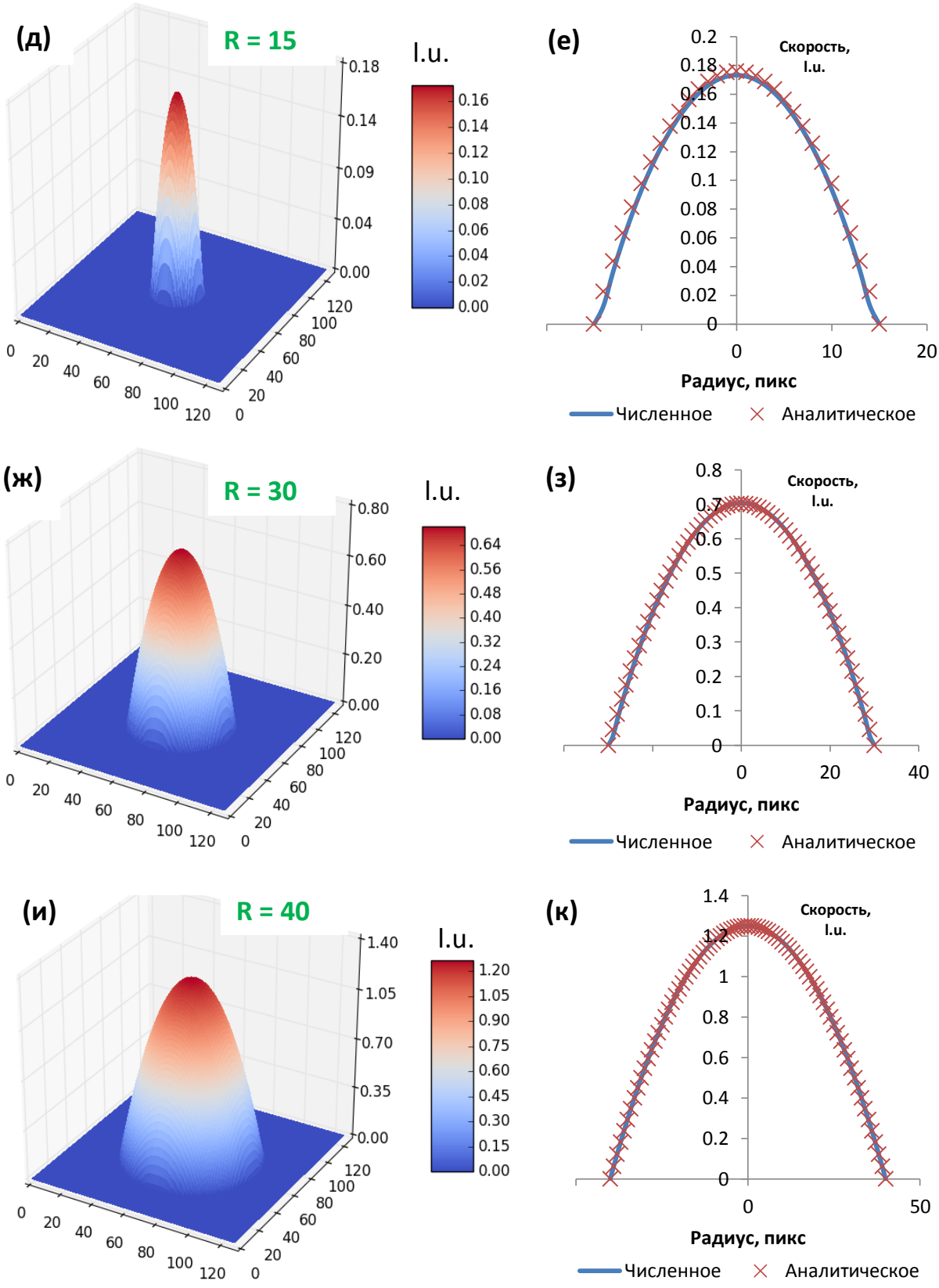


Рисунок 2.25 - Полученные в ходе численного моделирования профили скоростей течения в трубах с различным радиусом (а,в,д,ж,и); сравнение численных и аналитических результатов расчёта профилей скорости (б,г,е,з,к)



Продолжение рисунка 2.25

Полученный в численном эксперименте профиль скорости демонстрирует высокую сходимость с аналитическим решением.

Для тестирования однофазного течения по определению проницаемости использованы те же объекты и граничные условия, что и в предыдущем тесте Пуазейля. Согласно закону Пуазейля, расход (Q) через трубу с радиусом (R) будет равен:

$$Q = \frac{\Delta p}{L}\frac{\pi R^4}{8\mu} \tag{2.12}$$

Из уравнений (2.09) и (2.12) следует, что проницаемость трубы будет равна:

$$k_{\text{пр}} = \frac{\pi R^4}{8A} \tag{2.13}$$

В численном эксперименте были посчитаны проницаемости для 5 различных радиусов труб и результаты сопоставления представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Результаты сравнения численного и аналитического решений по определению проницаемости труб

Радиус	**Проницаемость (аналитическое решение), мД**	**Проницаемость (численное решение), мД**	**Ошибка РУБ (%)**
5	14.98	11.47	23.43
10	239.68	222.18	7.30
15	1 213.40	1171.31	3.47
30	19 414.44	19221.22	1.00
40	61 359.23	61745	0.63

По результатам верификационных тестов можно сделать вывод, что численные решения демонстрируют хорошее соответствие аналитическим решениям.

2.4 Выводы из главы

1. Приведена последовательность выполнения работ на рентгеновском томографе.

2. В качестве объектов исследования были отобраны образцы различных по литотипу и типу пустотного пространства с четырёх месторождений Российской Федерации.

3. Отобранная коллекция характеризуется широким диапазоном ФЕС: пористость от 6 до 30%, проницаемость от $5 \cdot 10^{-3}$ мкм^2 до $2600 \cdot 10^{-3}$ мкм^2.

4. Для моделирования однофазной фильтрации в масштабе пор представлен вычислительный алгоритм, в основе которого лежит метод решёточных уравнений Больцмана.

5. Проведена серия экспериментов по верификации используемого алгоритма РУБ, показана хорошая сходимость результатов аналитического и численного решений.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1 Концепция выделения нескольких фрагментов пористой среды из данных рентгенотомографической съёмки

В настоящее время исследователи, занимающиеся численным моделированием, сталкиваются с проблемами нехватки вычислительных ресурсов и высоких временных затрат при проведении расчётов. Моделирование фильтрационных процессов по данным рентгеновской томографии не исключение. В целом требования для расчётов зависят от алгоритма гидродинамики, его возможностей экономить ресурсы вычислительной техники, а также параметров РТ-съёмки.

В настоящей работе был использован рентгеновский томограф с максимальной разрешающей способностью 0.7 мкм. Съёмка образцов проводилась на разрешениях от 10 до 2 мкм, чего иногда не хватает для получения связной модели пустостного пространства. Выходом из этой ситуации будет применение математического алгоритма для обеспечения протекания в ней флюида.

Несмотря на недостаточность разрешения РТ-съёмки, определение коэффициента пористости возможно с достаточной степенью надёжности без адаптации на лабораторные данные. В настоящей работе были сопоставлены экспериментальные и расчётные значения пористости, полученные из РТ-съёмки стандартных цилиндров 30×30 мм с грубым разрешением 10 мкм. Из рис.3.1 можно увидеть, что данные хорошо согласуются в широком диапазоне. Расчётные значения были получены «вслепую», т.е. калибровка на лабораторные данные не проводилась.

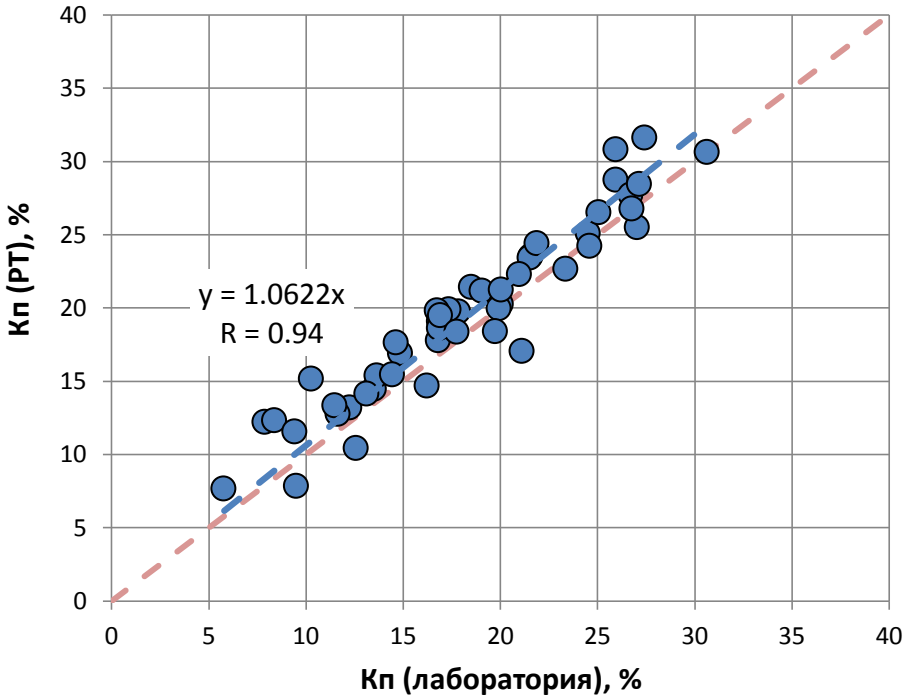


Рисунок 3.1 - Сопоставление расчётных и измеренных в лаборатории коэффициентов пористости

С другой стороны, из-за выбранного алгоритма решёточных уравнений Больцмана, который явно учитывает морфологию пустотного пространства в расчётах, возникает проблема ограничения по вычислительным ресурсам, из-за чего становится невозможным посчитать представительный объём образца. Оценка требований использованного в настоящей работе алгоритма показана на рис.3.2. Представленная зависимость является частным случаем, однако она позволяет оценить общие закономерности и порядок чисел. Так, требования к производительности компьютера возрастают с увеличением размеров области расчёта гидродинамических свойств. Например, для расчёта гидродинамики всего стандартного петрофизического цилиндра вычислительная станция должна обладать около 1000 Гб памяти. Для этого необходимо применять суперкомпьютеры, которых, например, в России насчитывается единицы.

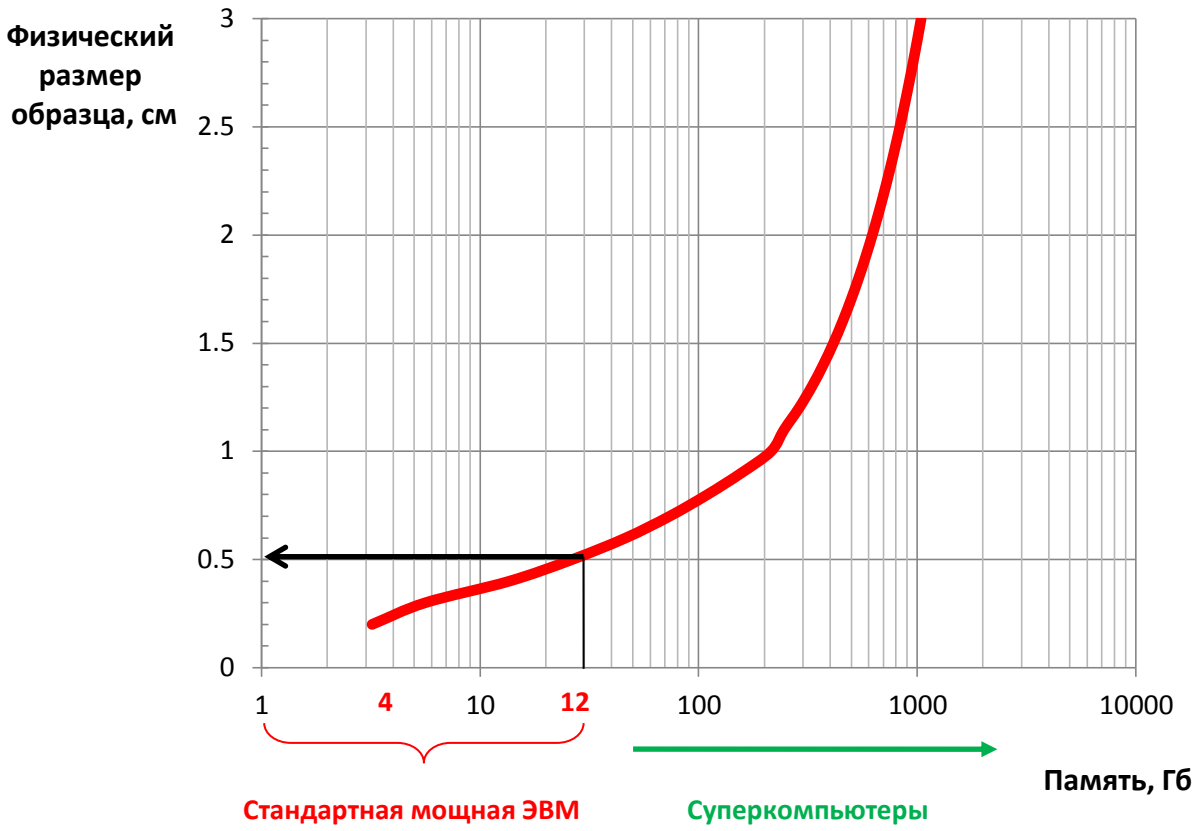


Рисунок 3.2 - Количественная оценка памяти, необходимой для выполнения расчёта виртуального куба заданного физического размера

Исследователи пытаются обойти данную проблему, и наиболее частым решением является использование «представительного вычислительного объёма». Однако и этот подход считается очень требовательным, поскольку здесь возникает необходимость использования пусть не суперкомпьютера, но кластера с очень высокими системными требованиями. Полученные расчётные значения пористости и проницаемости зачастую близки к экспериментальным, однако на расчёт одного представительного объёма может уходить в среднем до суток счётного времени, а с учётом съёмки образца – до нескольких дней. Таким образом, получение одного значения пористости и проницаемости, высокие требования к вычислительной технике и большие временные затраты являются одной из основных проблем в области цифровой петрофизики.

Для решения проблемы недостаточности вычислительных ресурсов предлагается новый подход с выделением сравнительно небольших фрагментов,

микро-образцов (виртуальных кубов) из разных областей цифровой модели керна. Другими словами, виртуальный куб - фрагмент образца в виде выборки кубической формы из общего массива данных томографии с заданным размером ребра, измеряемым в пикселях (рис.3.3).

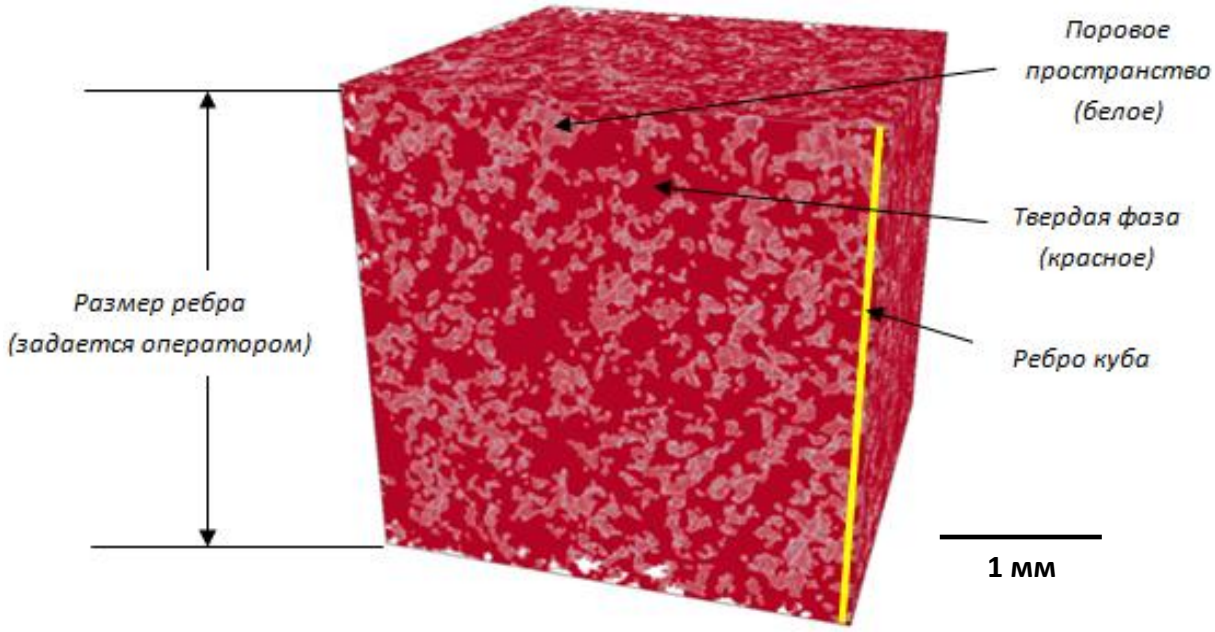


Рисунок 3.3 - Пример виртуального куба песчаника мелкозернистого

Все горные породы на микроуровне неоднородны, поэтому из данных каждой РТ-съёмки при таком подходе можно рассчитать сразу несколько парных значений пористости и проницаемости и построить по ним корреляционную связь. Чем больше неоднородность образца – тем шире будет область расчётных значений ФЕС. Основное преимущество подхода – его доступность по отношению к оборудованию для съёмки и дальнейшей работы с данными, возможность экономить ресурс томографа, изучать небольшие коллекции кернового материала или основные литотипы пород, получая из ограниченного числа снимков большее число данных.

Размер виртуального куба назначается в зависимости от технической оснащённости компьютера. Современный графический процессор среднего уровня, который можно установить в обычный ПК, имеет размер памяти 4 Гб. На таком процессоре, при использовании разработанного алгоритма максимальный размер ребра куба составляет около 300 пикселей. Физический размер куба

зависит от разрешения РТ-съёмки. Применительно к данным настоящей работы: если разрешение съёмки составляет 10 мкм, то размер ребра виртуального куба - 3 мм; если разрешение съёмки составляет 2 мкм, то размер ребра составит 0.6 мм (рис.3.4).

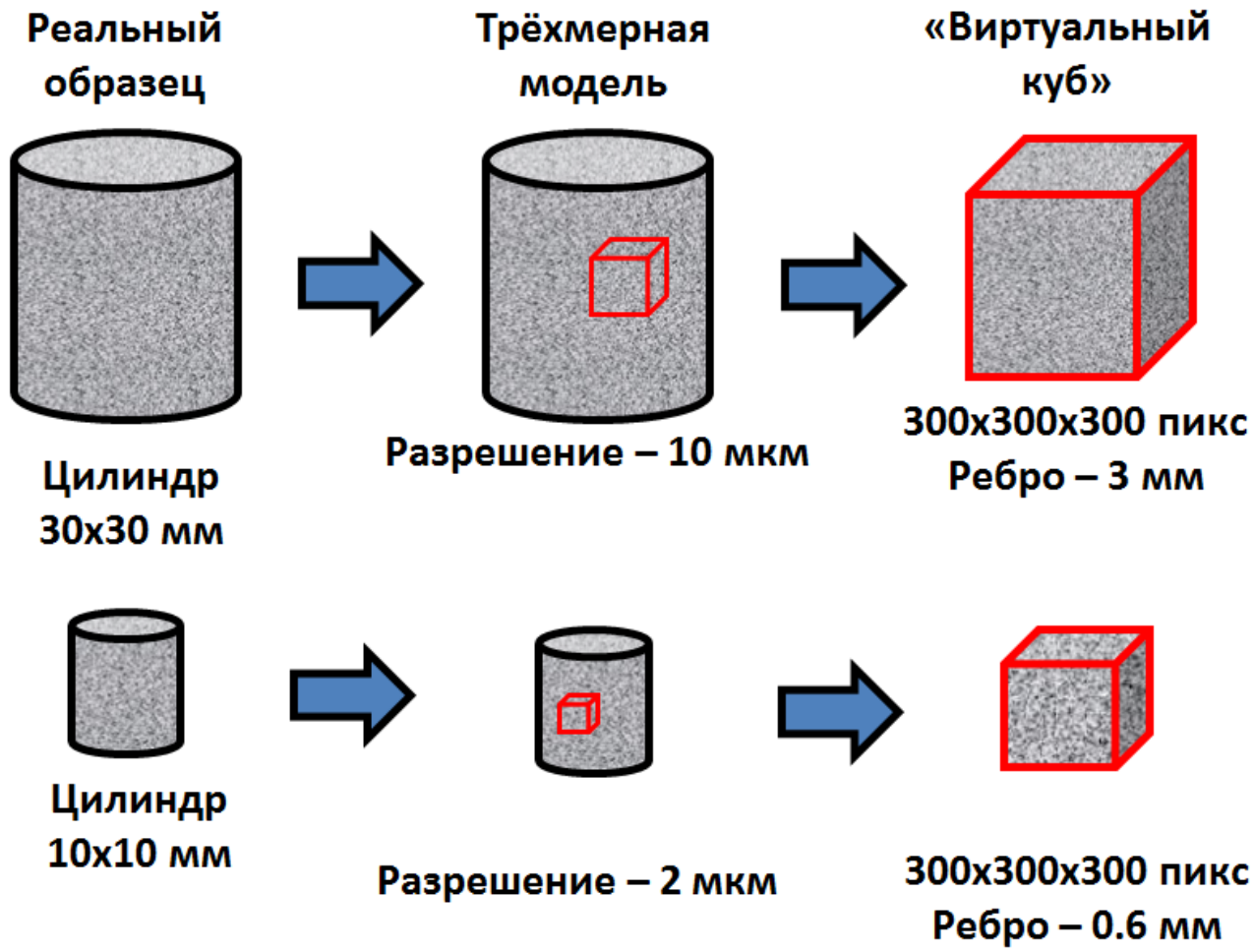


Рисунок 3.4 - Соотношение физического размера образца и размера виртуального куба

Из представленного выше примера видно, что, несмотря на то, что размер виртуального куба в 300×300×300 пикселей сохраняется в обоих случаях расчёта проницаемости, изменяется его физический размер, который зависит от разрешения томографии. Разрешение томографии подбирают таким образом, чтобы она обеспечивала связанность каналов и пор, участвующих в фильтрации. Чем детальнее будет построена модель пустотного пространства, тем корректней

будет работа алгоритма расчёта флюидодинамики. Понятно, что чем меньше значение проницаемости объекта исследования, тем выше должно быть разрешение съёмки и тем меньше получится физический или реальный объём виртуального куба, т.е. для обсчёта одного и того же физического размера образца в случае низкопроницаемой породы необходимо задействовать больший объём вычислительной памяти.

В случае образцов, относящихся к коллекторам порового типа, отснятых на разрешении от 2 до 10 мкм, в выделенных виртуальных кубах размером 300×300×300 пикселей на входную площадку попадает достаточно большое количество пустот: от 200 до 600 штук. В этой ситуации пустоты имеют размер (диаметр) значительно меньший, чем размер грани куба. В карбонатных образцах, где могут присутствовать каверны, сопоставимые с размером виртуального куба, например, 2-3 мм, необходимо производить увеличение физического размера виртуального куба. Если в работе задействована стандартная ЭВМ, ограниченная по вычислительным ресурсам, то с увеличением физического размера виртуального куба производится загрубление расчётной сетки, чтобы размер расчётной области оставался неизменным, и при этом сохранялась связанность модели. Если же нет ограничения по ресурсам, то размер виртуального куба можно увеличивать без загрубления расчётной сетки, но с учётом строения породы, расстояния между кавернами и т.д. Данный подход требует дополнительного изучения с применением суперкомпьютеров.

Также для расчёта ФЕС карбонатных коллекторов с каверновой пористостью можно рекомендовать использовать алгоритмы менее требовательные к вычислительным ресурсам, например, pore-network. Однако в настоящей работе такой случай рассмотрен не был из-за того, что алгоритм преобразует структуру пустотного пространства в набор сфер и трубок, а предложенный метод РУБ использует её морфологию без изменения, что необходимо для определения остаточной водонасыщенности, которое будет рассмотрено далее в работе.

Отдельной задачей является выбор мест выделения виртуальных кубов и их количества. На первом этапе проводится изучение твердой фазы отснятого образца в рентгеновском излучении. На этом шаге можно наметить отдельные места вырезки виртуальных кубов исходя из структурно-текстурных характеристик минеральной компоненты. Например, в образце, показанном на рис.3.5, можно выделить три различных участка: уплотнённый прослой, участок с повышенной пористостью (видно появление относительно больших тёмных пятен – пустот), а также участки с промежуточным или средним значением пористости.

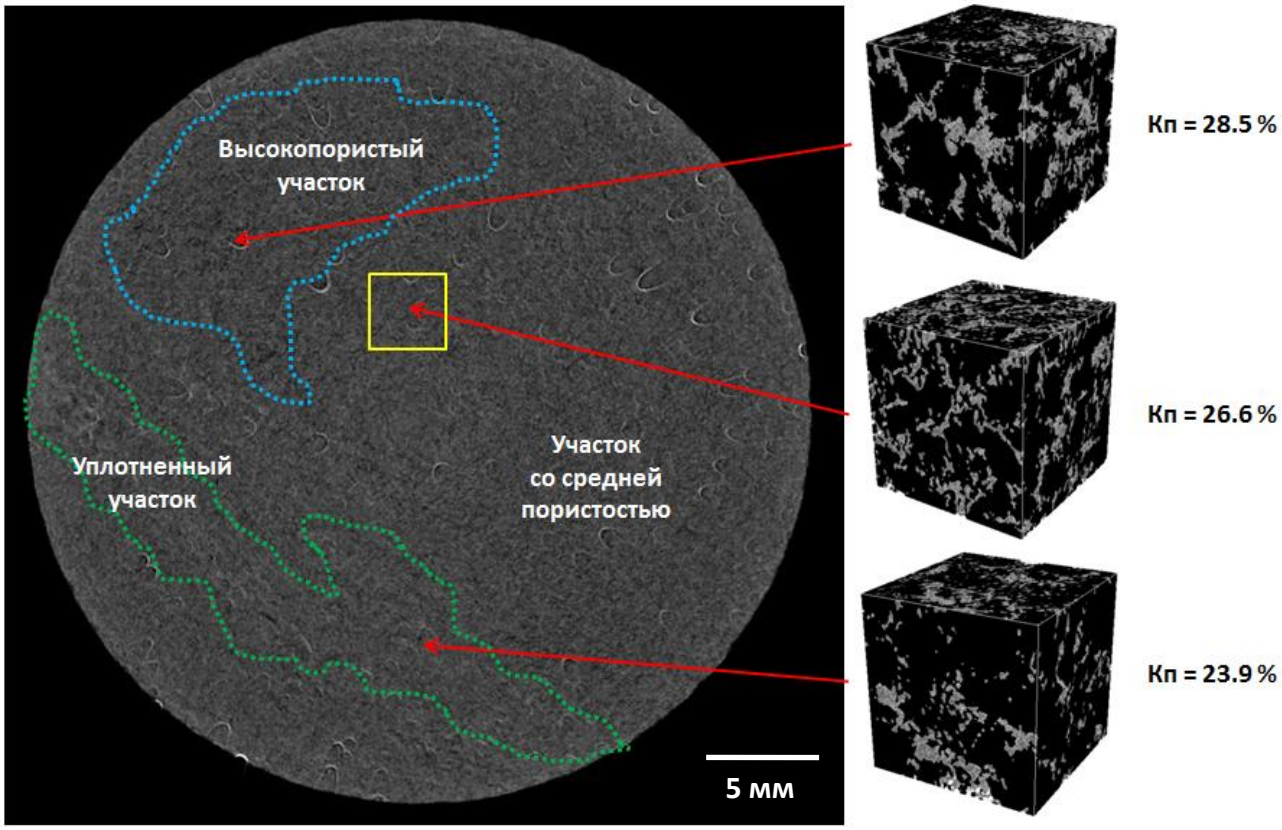


Рисунок 3.5 – Пример выделения мест виртуальных кубов в образце песчаника

Из отмеченных трёх областей будет формироваться массив виртуальных кубов. Чем больше неоднородность строения горной породы, тем шире будет разброс расчётных значений на конечной петрофизической связи. Из каждой области обязательно формируются виртуальные кубы с минимальным и максимальным значением коэффициента пористости, затем – с её промежуточными значениями. На рис.3.5 показаны виртуальные кубы, вырезанные из трёх различных областей, где белым обозначены пустоты, черным

– минеральная компонента. Таким образом, относительно однородный образец мелкозернистого песчаника с пористостью 27.02 %, определённой по стандартному петрофизическому цилиндру, характеризуется разбросом значений пористости от 23.9 % до 28.5 %.

Давать единую рекомендацию о количестве кубов, формируемых из одной цифровой модели горной породы, нецелесообразно, это значение индивидуально для разных коллекций керна. В настоящей работе из каждой РТ-съёмки, в среднем, было выделено по 10 виртуальных кубов. Для улучшения статистики свойств горной породы можно выделять и большее количество, но в этом случае возникает вопрос временных затрат на вырезание фрагментов, расчёт и обработку информации.

3.2 Методика создания гидродинамически связанной модели пустотного пространства в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии

Следующим шагом после получения набора виртуальных кубов является гидродинамическое моделирование течения флюида в масштабе пор. Основной проблемой, возникающей на этом этапе, является отсутствие в модели пустотного пространства пор и каналов, размеры которых меньше разрешающей способности РТ. В настоящей работе был разработан алгоритм, обеспечивающий гидродинамическую связанность пустотного пространства, базирующийся на её математическом восстановлении.

На первом этапе производится РТ-съёмка стандартного петрофизического образца размером 30×30 мм. После этого из полученного массива данных РТ выделяются наиболее интересующие области для проведения гидродинамического моделирования, которые проверяются на предмет перколяции или протекания.

Если же пустотное пространство является несвязным, то переходят ко второму шагу, заключающемуся в увеличении разрешающей способности

рентгеновской томографии. Расходящаяся форма пучка излучения (рис.3.6) позволяет улучшать разрешение РТ-съёмки только за счёт уменьшения физического размера образца. Например, заявленное производителем томографа SkyScan 1172 разрешение составляет 0.7 мкм, однако съёмка стандартного цилиндра горной породы 30×30 мм составляет лишь 10 мкм. Добиться заявленного разрешения в 0.7 мкм можно для образца с линейным размером 2 мм. В некоторых случаях использование данного разрешения позволяет получить связанное пустотное пространство образца, но при этом в разы увеличится время РТ-съёмки и реконструкции. Также, если учесть, что из образца со стороной в 2 мм необходимо производить вырезку виртуальных кубов, их размеры уже будут непредставительными для определения петрофизических свойств.

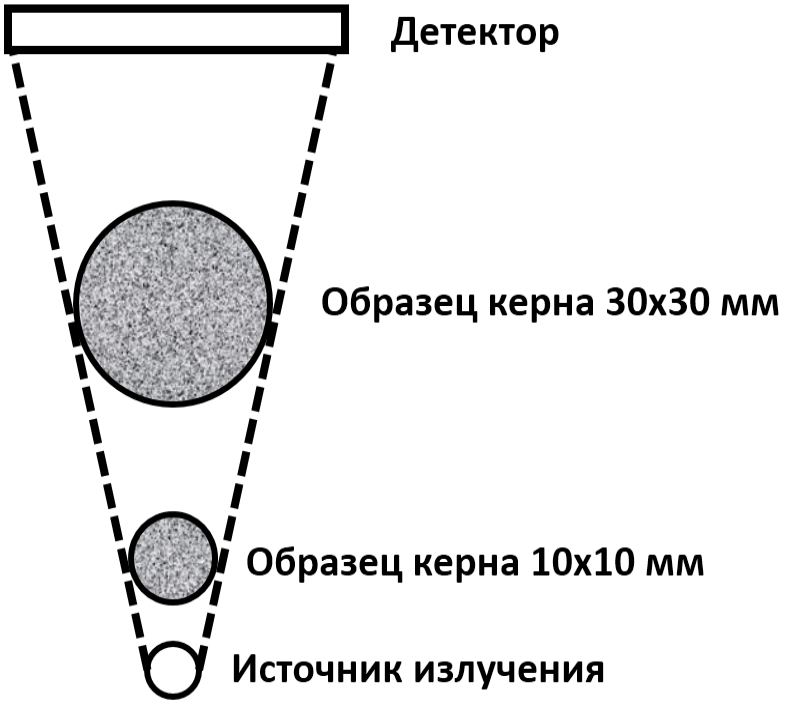


Рисунок 3.6 - Увеличение разрешающей способности РТ-съёмки при уменьшении физического размера образца

Таким образом, производится вырезка цилиндрического образца меньшего размера 10×10 мм, для которого проводится РТ-съёмка с более высоким разрешением. В данном случае она составила 2 мкм против разрешения 10 мкм для цилиндров 30×30 мм. Построенная модель пустотного пространства вновь

проверяется на наличие протекания и, если это условие не выполняется, производится следующий шаг, заключающийся в математическом восстановлении модели пустотного пространства.

Разработанный алгоритм позволяет создать связанное пустотное пространство за счёт его геометрической модификации. Применение данного алгоритма приводит к искусственному увеличению томографической пористости виртуальных кубов, но даёт возможность получить расчётное значение проницаемости.

На первом шаге каждая ячейка сегментированной томографии, соответствующая матрице породы и имеющая в окрестности 1 ячейку пустотного пространства, заменяется на пустотное пространство. На следующем шаге каждая ячейка пустотного пространства, граничащая непосредственно с ячейками породы (содержащая в окрестности 1 ячейку вдоль любой из осей координат ячейку породы), помечается как матрица. Подобный алгоритм позволяет обеспечить гидродинамически связанную модель пустотного пространства. Упрощённый наглядный пример работы алгоритма приведен на рис.3.7.

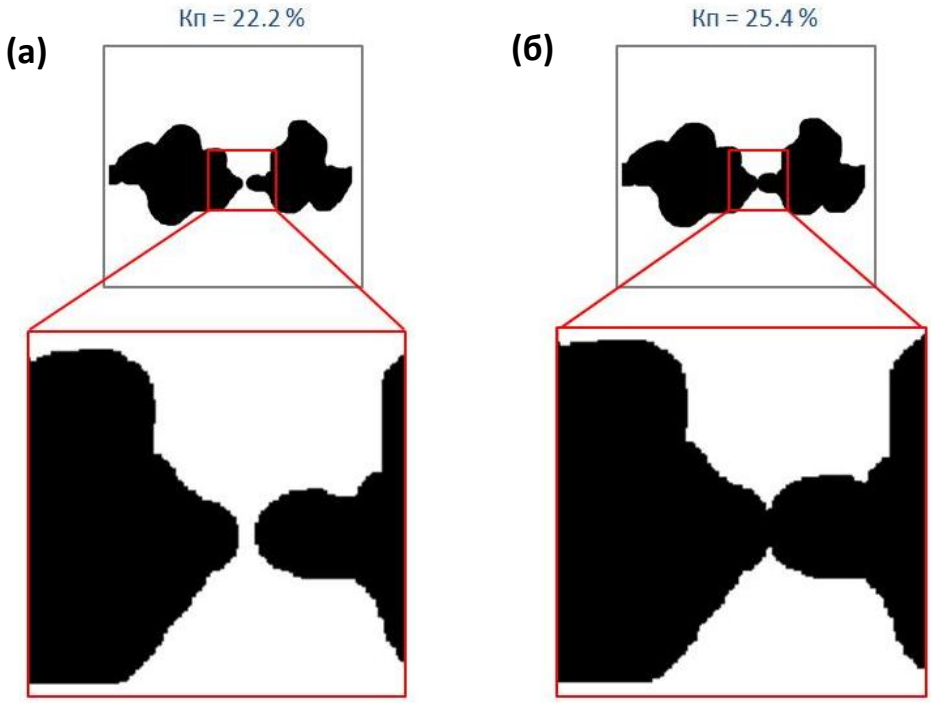


Рисунок 3.7 - Срезы томографии (черное – поры): а – срез до применения алгоритма, б – после

После этого, полученные значения модифицированных пористости и проницаемости преобразуются в немодифицированные путём экстраполяции на величину исходной томографической пористости до применения алгоритма. На рис. 3.8 представлено тестирование работы алгоритма на примере образца песчаника с пористостью 16.8 % и проницаемостью $213 \cdot 10^{-3}$ мкм^2.

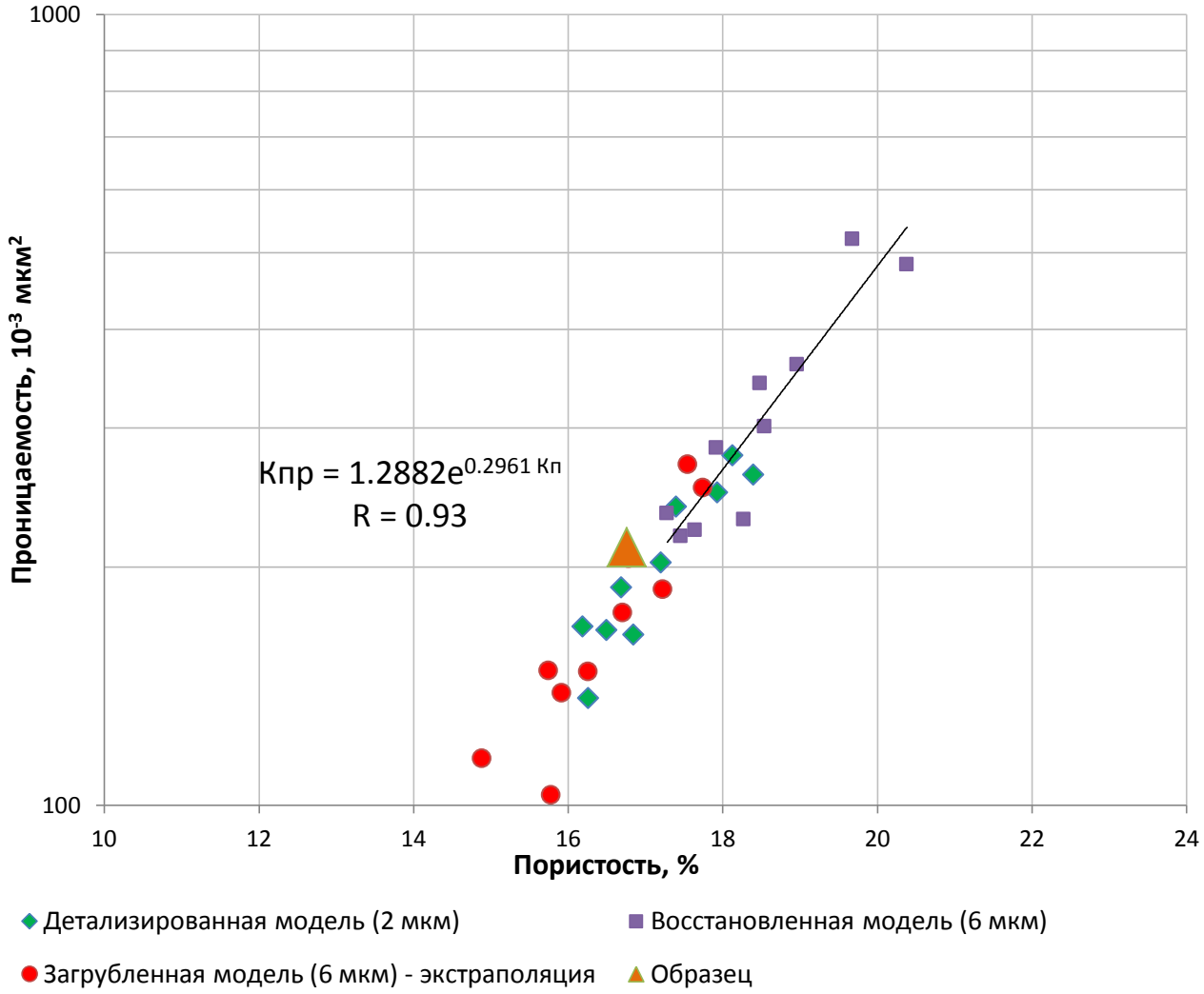


Рисунок 3.8 – Тестирование работы алгоритма на примере образца песчаника

Образец был отсканирован на детальном разрешении 2 мкм, после чего из его общей модели был сформирован массив из 10 виртуальных кубов, по которым были рассчитаны значения пористости и проницаемости (зеленые точки). После этого разрешение 10 виртуальных кубов было загрублено до 6 мкм, из-за чего пропала связанность их пустотного пространства. Пористость для этих виртуальных кубов была рассчитана, в то время как проницаемость оценить не

удалось. Применение алгоритма к загрубленным кубам приводит к появлению гидродинамической связности их пустотного пространства с одновременным увеличением пористости. В данном случае проницаемость удаётся рассчитать, но она оказывается завышенной (фиолетовые точки). Используя полученное по данным точкам уравнение, значения пористости и проницаемости экстраполируются в сторону исходных пористостей до применения алгоритма (красные точки).

Как видно, расчётные экстраполированные значения ФЕС по восстановленной модели перекрывают основную часть облака детализированной модели и включают лабораторное значение пористости и проницаемости, полученное по образцу 30×30 мм. Таким образом, данный подход позволяет использовать данные РТ для расчёта ФЕС в условиях недостаточной разрешающей способности без привлечения сторонних методов исследования и быстро получить результат.

Одним из достоинств разработанного алгоритма является то, что восстановление модели пустотного пространства производится не в произвольном направлении, а направлении, в котором каналы или пережимы стремятся друг к другу, но не соединяются вследствие недостатка разрешения РТ-съёмки. Данный факт будет положительно сказываться при расчёте анизотропии проницаемости. Ниже рассматриваются примеры расчёта анизотропии проницаемости с применением разработанного алгоритма для нескольких образцов.

Так, образец песчаника среднезернистого Харьягинского месторождения имеет значения пористости 16.8 % и проницаемости $213 \cdot 10^{-3}$ мкм^2. На рис.3.9а показана детализированная модель пустотного пространства одного из выделенных виртуальных кубов, полученная с использованием разрешающей способности 2 мкм и являющаяся гидродинамически связанной. На рис.3.9б та же модель, но полученная с использованием более грубого разрешения - 6 мкм. Как видно, указанной разрешающей способности не хватает для построения связанного пустотного пространства и, соответственно, проведение расчётов по оценке проницаемости и её анизотропии невозможно. Применение алгоритма

восстанавливает загрубленную модель – рис.3.9в, после чего она становится гидродинамически связанной, и представляется возможным выполнить расчёт проницаемости в трёх взаимно перпендикулярных направлениях – X, Y, Z.

Анизотропия проницаемости находилась как отношение значения проницаемости в одном направлении к значению проницаемости в другом.

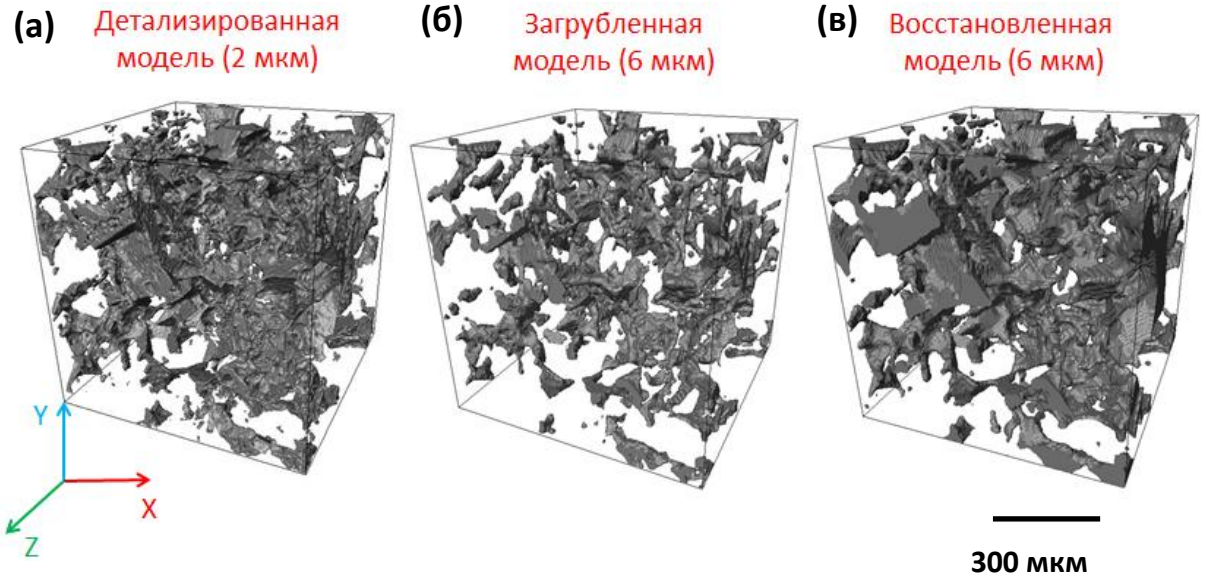


Рисунок 3.9 – Результат применения алгоритма на примере модели пустотного пространства образца песчаника Харьягинского месторождения

Полученные значения анизотропии проницаемости с использованием детализированной и восстановленной модели пустотного пространства одного из образцов Харьягинского месторождения представлен в табл. 3.1. Средняя ошибка определения анизотропии проницаемости составляет 3.9 $\%_{отн}$.

Таблица 3.1 – Сравнение значений анизотропии проницаемости на детализированной и восстановленной моделях пустотного пространства образца Харьягинского месторождения

Направления	**Коэффициент анизотропии проницаемости детализированной модели**	**Коэффициент анизотропии проницаемости восстановленной модели**
X-Z	0.70	0.74
Y-Z	0.77	0.79
X-Y	0.91	0.93

Алгоритм был также апробирован на образце песчаника среднезернистого Красноленинского месторождения, имеющего значения пористости 26.8 % и проницаемости 126 $\cdot 10^{-3}$ мкм^2. Сканирование образца проводилось на высоком разрешении (2 мкм), которого было достаточно для построения связанной модели пустотного пространства одного из выделенных из образца виртуальных кубов (рис.3.10а). На рис.3.10б изображена та же модель, но полученная с использованием более низкого разрешения (6 мкм) и являющаяся несвязанной. Результат восстановления загрубленной модели показан на рис.3.10в.

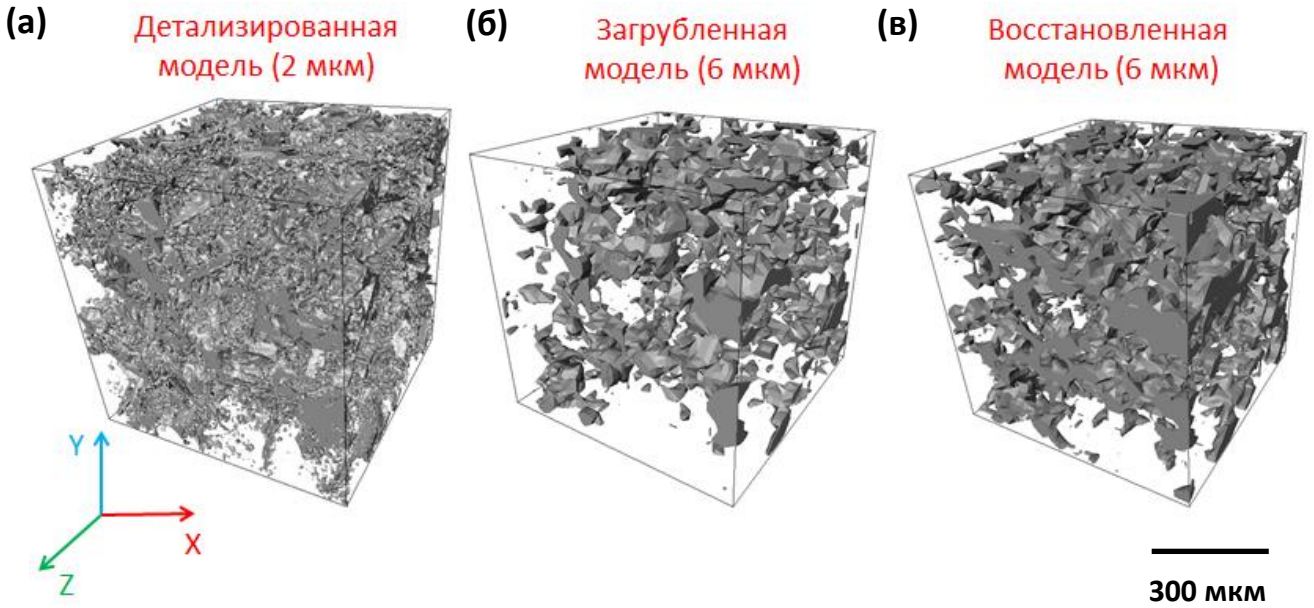


Рисунок 3.10 – Результат применения алгоритма на примере модели пустотного пространства образца песчаника Красноленинского месторождения

Полученные значения анизотропии проницаемости с использованием восстановленной и детализированной моделей представлены в табл. 3.2. Средняя ошибка определения анизотропии проницаемости для данного образца составила 4.1 %$_{отн}$.

Таблица 3.2 – Сравнение значений анизотропии проницаемости на детализированной и восстановленной моделях пустотного пространства образца Краснoленинского месторождения

Направления	**Коэффициент анизотропии проницаемости детализированной модели**	**Коэффициент анизотропии проницаемости восстановленной модели**
X-Z	0.41	0.43
Y-Z	0.40	0.43
X-Y	0.99	0.99

Результаты расчёта (табл. 3.1, 3.2) говорят о хорошей сходимости значений анизотропии проницаемости, полученных на детализированной и восстановленной моделях. Также данный факт может служить ещё одним доказательством корректности применения алгоритма для обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства.

3.3 Построение петрофизических связей $К_{пр}=f(К_{п})$ по данным рентгеновской томографии и численного моделирования

Получение совпадающих расчётных и измеренных в петрофизической лаборатории фильтрационно-емкостных свойств является более актуальной, т.к. включает в себя не только получение совпадающих значений между лабораторной и томографической пористостью или лабораторной и томографической проницаемостью, но и связей $К_{пр}=f(К_{п})$ по лабораторным и томографическим данным. Обычно удаётся согласовать либо один, либо другой параметр. Кроме того, при демонстрации связей обычно не указывают, получены ли они на одних и тех же образцах и исключены ли из рассмотрения результаты несовпадающие по одному из параметров. Поэтому к подобным иллюстрациям необходимо относиться с осторожностью.

В настоящей работе моделирование однофазной фильтрации при расчёте проницаемости виртуальных кубов проводилось с помощью разработанного

программного модуля гидродинамики на основе метода РУБ. Полученные расчётные корреляционные связи сравнивали с такими же связями, полученными стандартными методами в лаборатории.

На рис.3.11 представлены примеры петрофизических связей, полученных в пределах одного образца с различных объектов РФ по сформированному массиву виртуальных кубов.

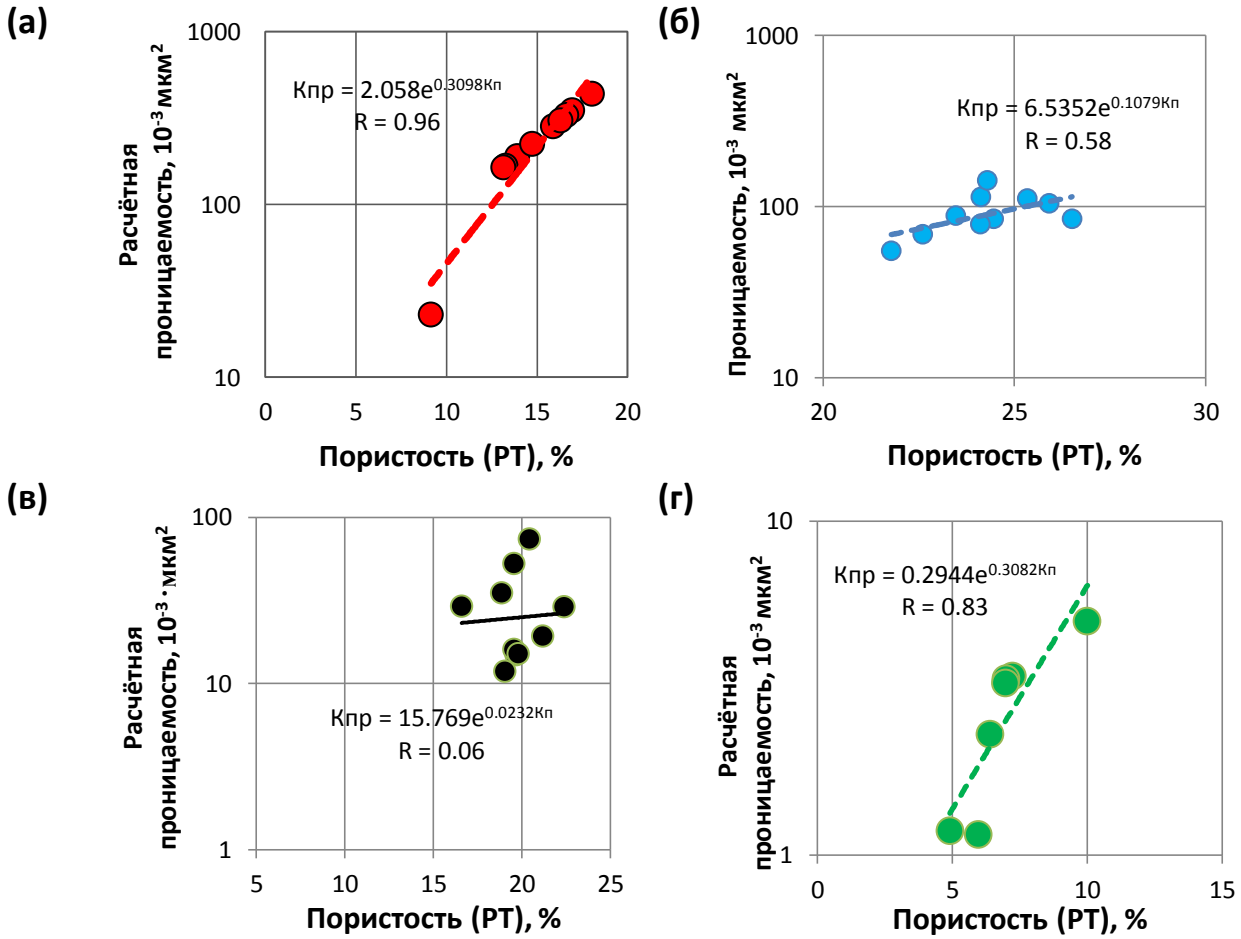


Рисунок 3.11 – Петрофизические связи, построенные по виртуальным кубам, выделенных из РТ-съёмки образцов различных месторождений:

а - Харьягинское м-е, $К_п$ = 14.86 %, $К_{пр}$ = $435 \cdot 10^{-3}$ мкм^2

б - Красноленинское м-е, $К_п$ = 23.37 %, $К_{пр}$ = $62 \cdot 10^{-3}$ мкм^2

в - Возейское м-е, $К_п$ = 16.86 %, $К_{пр}$ = $9 \cdot 10^{-3}$ мкм^2

г - Москудьинское м-е, $К_п$ = 7.9 %, $К_{пр}$ = $5 \cdot 10^{-3}$ мкм^2

Коэффициенты корреляции пористости и проницаемости, полученные по 10 виртуальным кубам для образцов с различных месторождений, варьируют от 0.06

до 0.96 д.ед. Для простого порового типа коллектора (рис.3.11а) получена практически линейная зависимость. Коллектор трещинно-каверно-порового типа, напротив, за счет сложной структуры пустотного пространства имеет низкий коэффициент корреляции (рис.3.11в), однако и в традиционных лабораторных исследованиях для данного коллектора наблюдается облако в зависимости $К_{пр}=f(К_{п})$ (рис.2.18). Ниже на рис. 3.12, 3.13, 3.14 и 3.15 приводится сопоставление расчётных и экспериментальных значений пористости и проницаемости для образцов четырёх месторождений РФ.

Для наглядности и проверки работы методики первоначально было решено её апробировать на простом поровом типе коллектора Харьягинского месторождения. На рис.3.12 приводится пример расчёта пористости и проницаемости по 20 виртуальным кубам, полученных из двух РТ-съёмок.

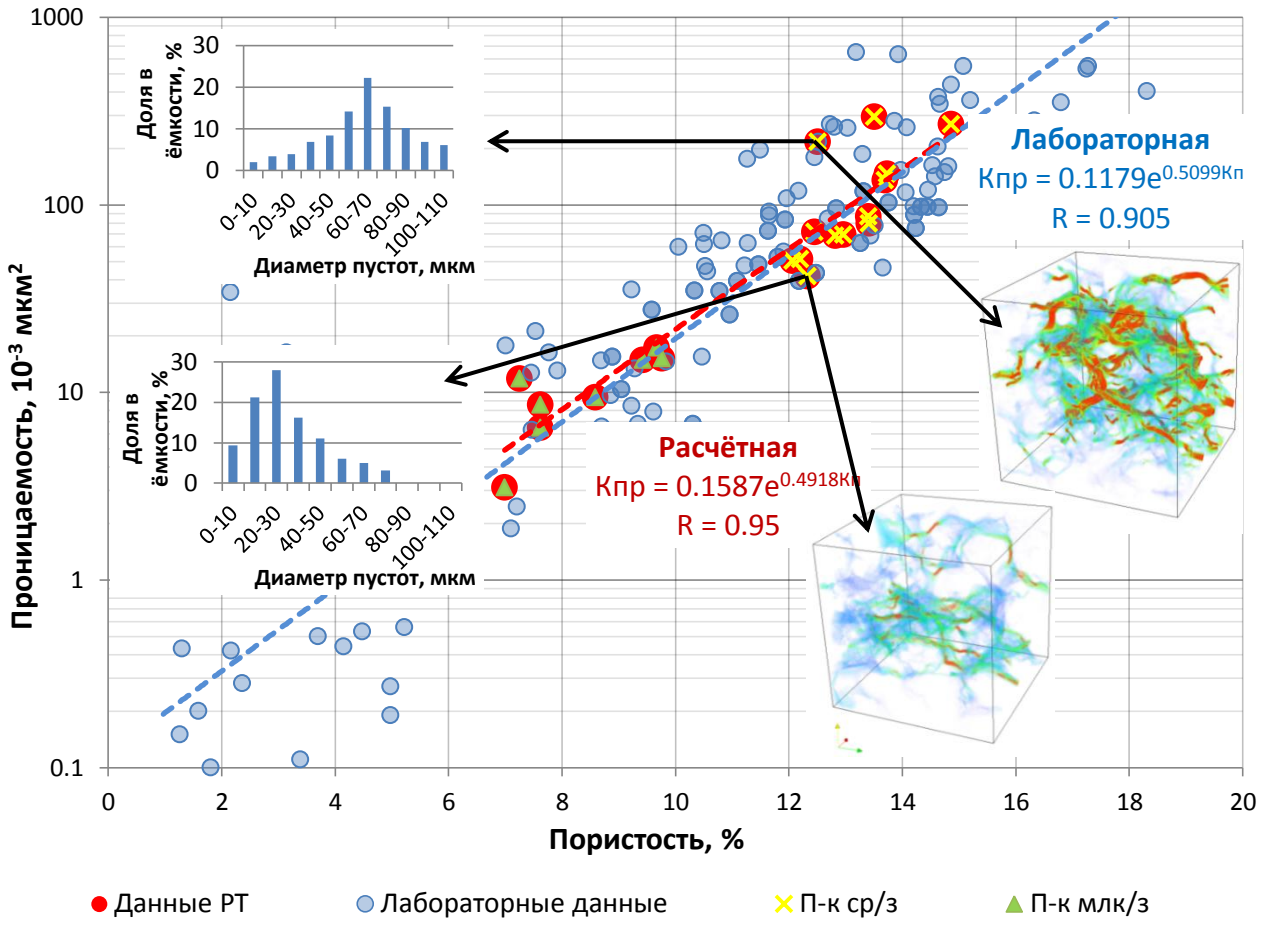


Рисунок 3.12 - Сопоставление расчётных (РТ-съёмка двух образцов) и лабораторных данных по пористости и газопроницаемости для коллектора порового типа Харьягинского месторождения

Видно, что расчётная зависимость хорошо совпадает с лабораторной, полученной по всем образцам месторождения. Также на графике можно увидеть достаточно большое количество точек выше основной зависимости. Для того, чтобы понять, с чем это связано, приводится пример сравнения образцов, имеющих одинаковый размер зерна и пористость (12.5 %), но различную проницаемость ($51 \cdot 10^{-3}$ мкм^2 и $216 \cdot 10^{-3}$ мкм^2). Так, в образце с меньшей проницаемостью преобладающей ёмкостью пользуются пустоты размером 20-30 мкм, в то время как для образца с более высокой проницаемостью это значение приходится на 60-70 мкм. Для наглядности приводятся объёмные модели путей фильтрации на которых видно, что в образце с высокой проницаемостью присутствует больше путей с высокой скоростью течения (красный цвет) и их размер больше, чем в образце с низкой проницаемостью.

В коллекторах, обладающих сложной структурой пустотного пространства, встречаются ситуации, когда одному значению пористости соответствует диапазон значений коэффициента проницаемости. Поэтому прогноз проницаемости коллекторов по данным геофизических исследований скважин сопряжен с большими неопределенностями. Среди петрофизиков и интерпретаторов существуют различные способы проведения классификации коллекторов в поле графика $К_{пр}=f(К_п)$. Довольно часто исследователи прибегают к разделению пород на литотипы с использованием минералогических, гранулометрических исследований [10], описания керна и шлифов [18, 11] и т.д. В некоторых случаях данной информации становится недостаточно и специалисты прибегают к фациальному анализу [41]. Также в практике довольно часто можно встретить разделение пород по петрофизическому критерию – индексу плотности гидравлического потока или FZI (англ.) [26, 38]. Разработанную методику по определению ФЕС горных пород с формированием массива виртуальных кубов предлагается также использовать для расшифровки широкого разброса значений пористости и проницаемости с привлечением дополнительной информации по ним, например, распределения пустот по размерам, путей фильтрации флюида.

На рис.3.13 приводится пример апробации методики для порового типа коллектора Красноленинского месторождения. Расчётные значения пористости и проницаемости получены по виртуальным кубам, сформированных из основных литотипов: песчаника среднезернистого, мелкозернистого, алевролита. Однако расчётная зависимость $К_{пр}=f(К_{п})$, как и лабораторная, демонстрирует два облака точек, виден широкий диапазон свойств пород по проницаемости. В подобных ситуациях у интерпретаторов данных ГИС возникает задача обоснования петрофизической модели коллектора.

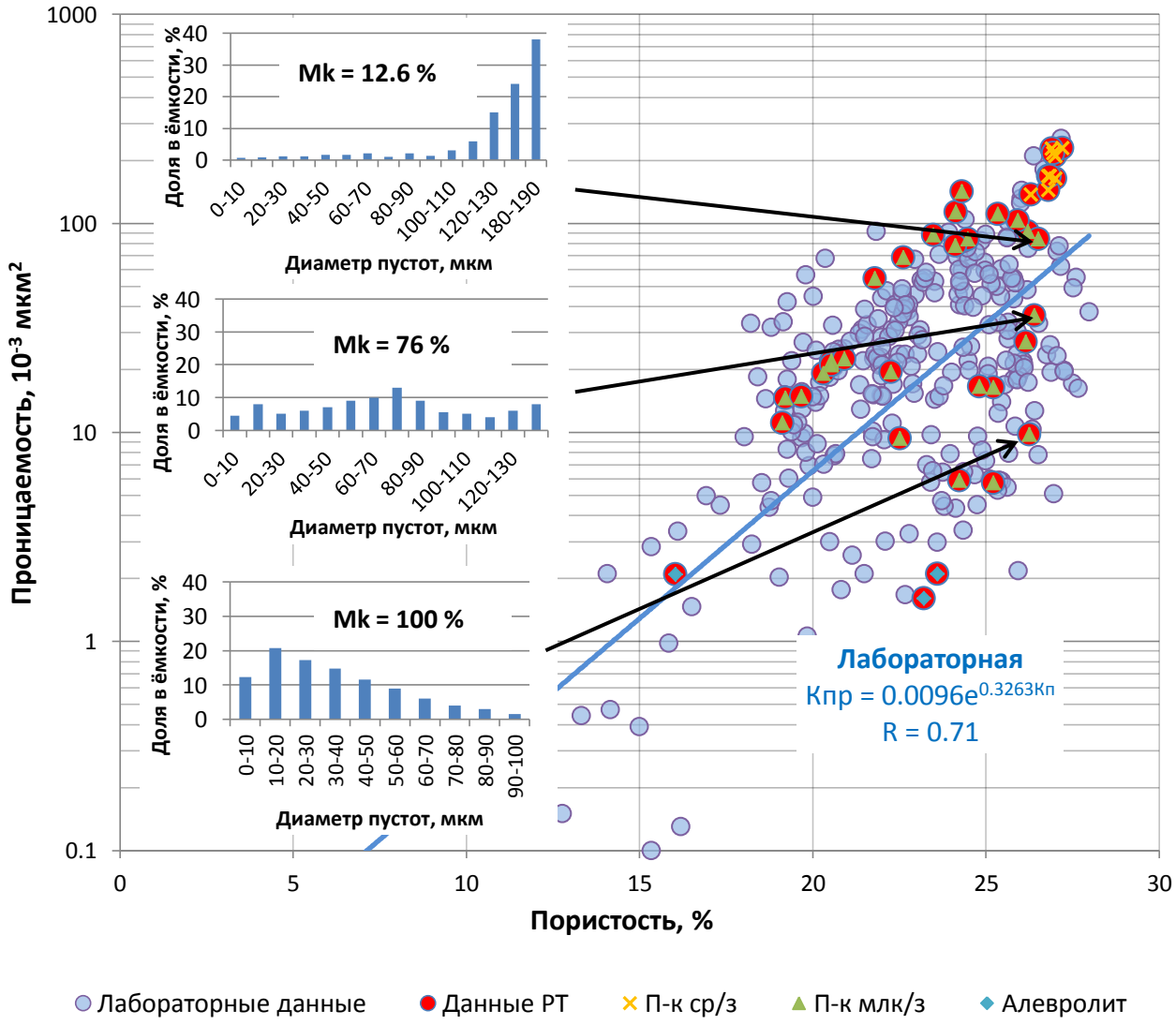


Рисунок 3.13 - Сопоставление расчётных (РТ-съёмка четырёх образцов) и лабораторных данных по пористости и газопроницаемости для коллектора порового типа Красноленинского месторождения

Чтобы объяснить причину разброса, были выбраны виртуальные кубы песчаника мелкозернистого с одинаковой пористостью (26 %), но имеющие различную проницаемость – 9, 36 и 91 $\cdot 10^{-3}$ мкм^2. По выбранным кубам были построены распределения пустот по размерам, на которых видно, что в их ёмкости преобладают пустоты размером, соответственно, 10-20 мкм, 70-80 мкм и 180-190 мкм, а доля капилляров составляет 100 %, 76 % и 12.6 %. Таким образом, увеличение доли капилляров в песчаниках и понижение их коллекторских свойств можно связать с повышением суммарного содержания мелкоалевритовой и глинистой фракций, что отмечается по результатам литологических исследований.

Проблема классификации коллекторов является ещё более актуальной для карбонатных пород, характеризующихся сложной структурой пустотного пространства. Предложенная методика с формированием виртуальных кубов была апробирована на сложном каверно-поровом типе коллектора (рис.3.14).

По результатам литологических исследований были выделены основные литотипы коллекторов: известняки органогенно-детритовые, фораминиверо-водорослевые и водорослевые. Приведённые модели путей фильтрации показывают характер течения флюида в пустотном пространстве каждого из литотипов, помогая объяснить широкий диапазон значений, например, при одной и той же проницаемости, но разной пористости. Так, органогенно-детритовый известняк хоть и характеризуется значительно меньшим значением пористости (8.5 %) по сравнению с известняком фораминиферо-водорослевым (19.04 %), но имеет такую же проницаемость за счёт присутствующих в нём сообщающихся каверн.

Расчётные зависимости, полученные для каждого литотипа, занимают определённое место в облаке лабораторной зависимости и имеют несколько другой наклон, нежели итоговая лабораторная, что необходимо учитывать при последующем геолого-гидродинамическом моделировании.

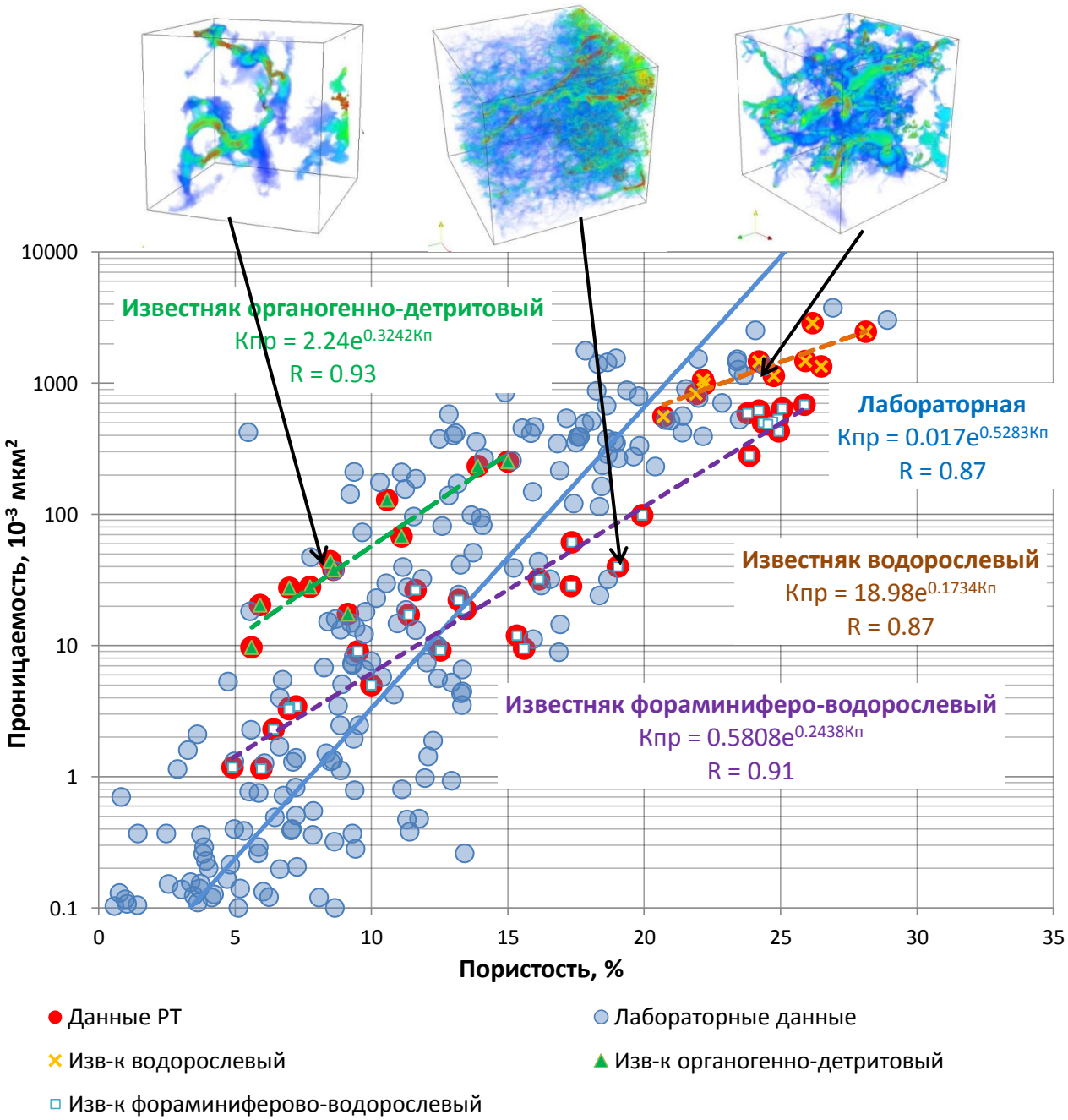


Рисунок 3.14 - Сопоставление расчётных (РТ-съёмка пяти образцов) и лабораторных данных по пористости и газопроницаемости для коллектора каверно-порового типа Москудьинского месторождения

На рис.3.15 показано сопоставление расчётных и лабораторных данных для образцов Возейского месторождения, имеющих сложную структуру пустотного пространства. Коэффициент корреляции экспериментальных данных составляет 0.39 д.ед., что не позволяет говорить о надёжности тренда значений. Изученные карбонатные отложения относятся к коллекторам трещинно-каверно-порового

типа, поэтому такой результат предсказуем. Следует, однако, отметить, что облако расчётных точек, основная масса которых находится в пределах от 1 до $30 \cdot 10^{-3}$ мкм^2, перекрывает облако лабораторных, что является хорошим результатом для работ в области РТ.

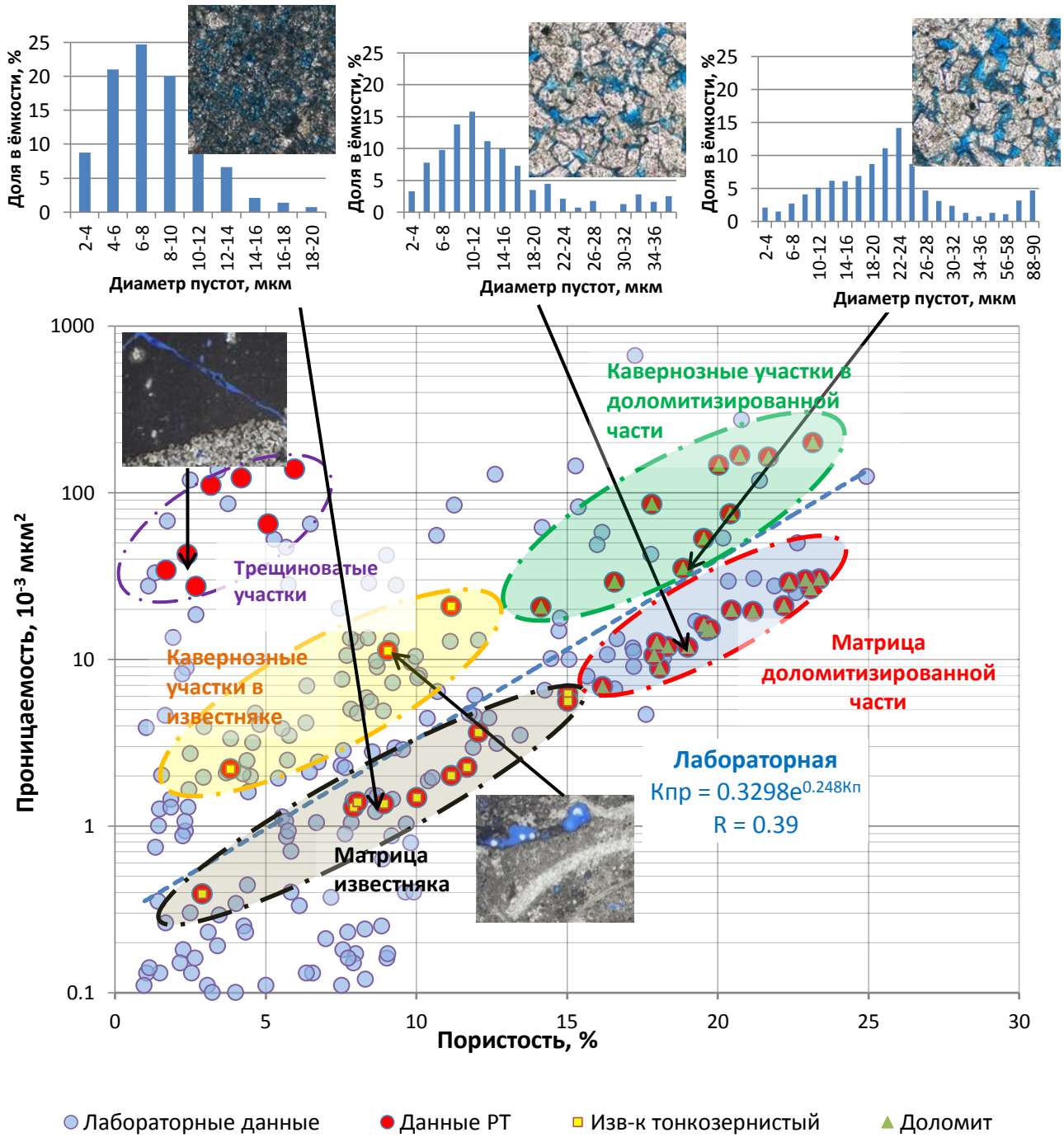


Рисунок 3.15 - Сопоставление расчётных (РТ-съёмка трёх образцов) и лабораторных данных по пористости и газопроницаемости для коллектора трещинно-каверно-порового типа Возейского месторождения

Особенностью исследуемых образцов известняка доломитизированного является наличие в каждом сразу двух литотипов с несколькими типами пустотного пространства, в связи с чем для сформированного массива виртуальных кубов наблюдается столь широкий диапазон значений по пористости (от 2.5 до 23 %) и проницаемости (от 0.4 до $162 \cdot 10^{-3}$ мкм^2). В целом, в известняке значения ФЕС ниже, чем в его доломитизированной части.

Если рассматривать матрицы этих двух частей, то преобладающий размер пустот в одном из виртуальных кубов, выделенных из известняка, приходится на 6-8 мкм, в то время как в кубе, вырезанном из матрицы доломитизированной части, этот размер больше – 10-12 мкм (рис.3.15). Как видно из расчётных данных, для каждого литотипа отмечается разброс значений ФЕС. Для доломитизированной части приводится пример, когда по виртуальным кубам были получены различные значения проницаемости (11 и $37 \cdot 10^{-3}$ мкм^2) при одинаковой пористости – 18 %. Использование данных РТ показало, что повышение проницаемости в данном случае обуславливается увеличением в 2 раза преобладающего размера пустот, а также появлением каверн. В известняке также присутствуют участки с выщелачиванием, повышающие фильтрационно-емкостные свойства за счёт сообщаемости каверн. В исследованных образцах прослеживаются трещиноватые области, из которых также было проведено формирование массива виртуальных кубов. Последующее моделирование однофазной фильтрации в них позволило определить фильтрационно-емкостные свойства трещиноватых участков, а также их положение в облаке зависимости.

Таким образом, предложенная методика с использованием данных РТ позволила более обоснованно подойти к расшифровке облака зависимости $К_{пр}=f(К_{п})$ для сложного трещинно-каверно-порового типа коллектора с низким коэффициентом корреляции в условиях, когда внутри образца присутствует сразу несколько литологических разностей.

3.4 Выводы из главы

1. Разработан алгоритм обеспечения гидродинамической связности модели пустотного пространства, позволяющий определять значения проницаемости и её анизотропии в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии.

2. Предложена и апробирована на различных месторождениях РФ новая методика расчёта фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным РТ и численного моделирования путём формирования массива микро-образцов (виртуальных кубов) из данных каждой РТ-съёмки.

3. Предложенный подход не требует использования больших вычислительных мощностей, позволяет экономить ресурс рентгеновской трубки микротомографа и время вычислений.

4. Используя данную методику, вместо одной пары значений пористости и проницаемости можно получить массив парных значений, что может повысить достоверность петрофизических связей в условиях малого выноса керна.

5. Показано, что использование данной методики позволяет по нескольким РТ-съёмкам получить расчётную связь $К_{пр}=f(К_{п})$ близкую к лабораторной связи для пород различных литотипов всего геологического объекта. Данный факт позволяет рекомендовать данный подход для использования на объектах, где проведение традиционных фильтрационных исследований невозможно.

6. В отличие от традиционных исследований керна, где сильная неоднородность кернового материала обычно расценивается негативно, в предлагаемом подходе сильная неоднородность расценивается положительно – диапазон расчётных значений, которые можно получить из ограниченного числа РТ-съёмок, становится шире.

7. Показано, что методика определения ФЕС с формированием виртуальных кубов позволяет строить зависимости для отдельных литотипов, и это помогает более обоснованно подойти к расшифровке широкого диапазона

ФЕС в петрофизических зависимостях $К_{пр}=f(К_{п})$, что является актуальной задачей в области петрофизики.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Определение остаточной водонасыщенности путём анализа интегральных интенсивностей спектров поглощения рентгеновского излучения

В основу данной методики положена регистрация интегральных интенсивностей спектров поглощения рентгеновского излучения. Для её реализации требуется съёмка образца в трёх состояниях – сухом, полностью насыщенном и насыщенном остаточной водой. РТ-съёмка образца в различных состояниях осуществляется на одинаковых технологических режимах: ток и напряжение на рентгеновской трубке, шаг поворота сканирования, разрешающая способность. В данном случае ток и напряжение составили 80 мА и 100 кВ, шаг поворота – 0.2 градуса, разрешающая способность – 10 мкм.

Результатом РТ-съёмки и последующей реконструкции является набор срезов и объёмная модель образца керна. Полученная трёхмерная модель состоит из массива ячеек (вокселей), каждая из которых характеризуется своим коэффициентом поглощения. В данном случае коэффициент поглощения измеряется в индексах яркости – от 0 до 255. Чем выше плотность вещества, тем больший индекс имеет коэффициент поглощения рентгеновского излучения. Существует возможность построения распределения коэффициента поглощения рентгеновского излучения или спектра поглощения рентгеновского излучения в исследуемом образце (рис.4.1). Интегральная интенсивность поглощения представляет собой площадь под спектром или же равна сумме коэффициентов поглощения всеми ячейками модели. В общем случае она запишется как:

$$\mathrm{I}_{\text{обр}} = 1 \cdot N_{\text{ячеек}} + 2 \cdot N_{\text{ячеек}} + \ \ldots + 255 \cdot N_{\text{ячеек}} \qquad (4.1)$$

Где 1, 2, … 255 – это индексы поглощения рентгеновского излучения, а $\mathrm{N}_{\text{ячеек}}$ – количество ячеек с заданным индексом яркости.

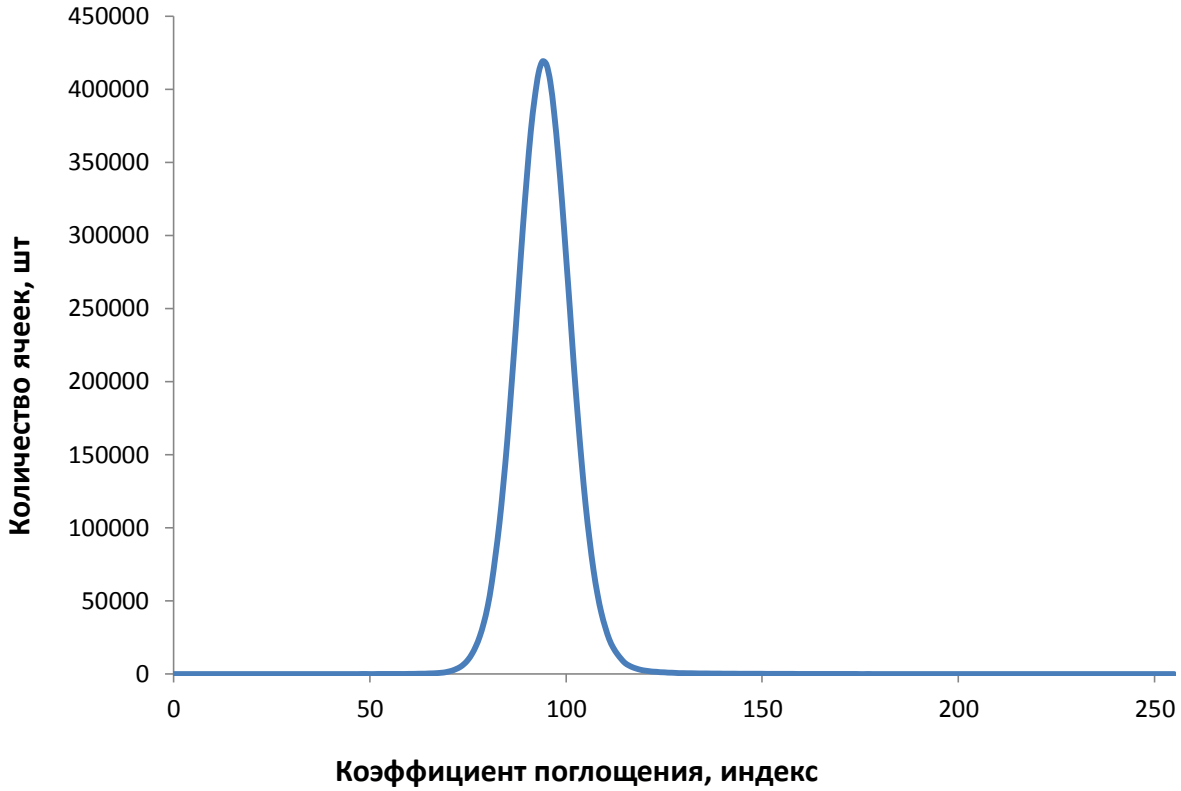


Рисунок 4.1 – Спектр поглощения рентгеновского излучения стандартного петрофизического образца песчаника

Подобным образом рассчитывается интегральная интенсивность спектров поглощения рентгеновского излучения сухого образца, водонасыщенного и с остаточной водонасыщенностью. За счёт заполнения пустотного пространства сухого образца водой, значение интегральной интенсивности будет значительно выше, а с остаточной водой – выше чем, в сухом состоянии, но ниже, чем в полностью водонасыщенном.

Таким образом, зная интегральную интенсивность спектров поглощения рентгеновского излучения сухим образцом, водонасыщенным и с остаточной водонасыщенностью, можно рассчитать остаточную водонасыщенность керна по формуле:

$$K_{ов} = \frac{I_{ов} - I_{сух}}{I_{в} - I_{сух}} \quad (4.2)$$

Для понимания работы предложенной методики предлагается рассмотреть пример на границе разделов фаз. Исходя из того, что более плотное вещество

имеет большее значение коэффициента поглощения рентгеновского излучения, введем его для каждой фазы:

«0» – воздух;

«1» - вода;

«2» - скелет породы.

На рис.4.2 показан случай РТ-съёмки образца в сухом состоянии. Поглощающие ячейки скелета породы обозначены цифрой «2», а так как образец считается сухим, то к ним прилегает воздух, с коэффициентом поглощения «0». Суммарное поглощение скелетом породы составляет «6», воздухом – «0» и образцом в целом - «6».

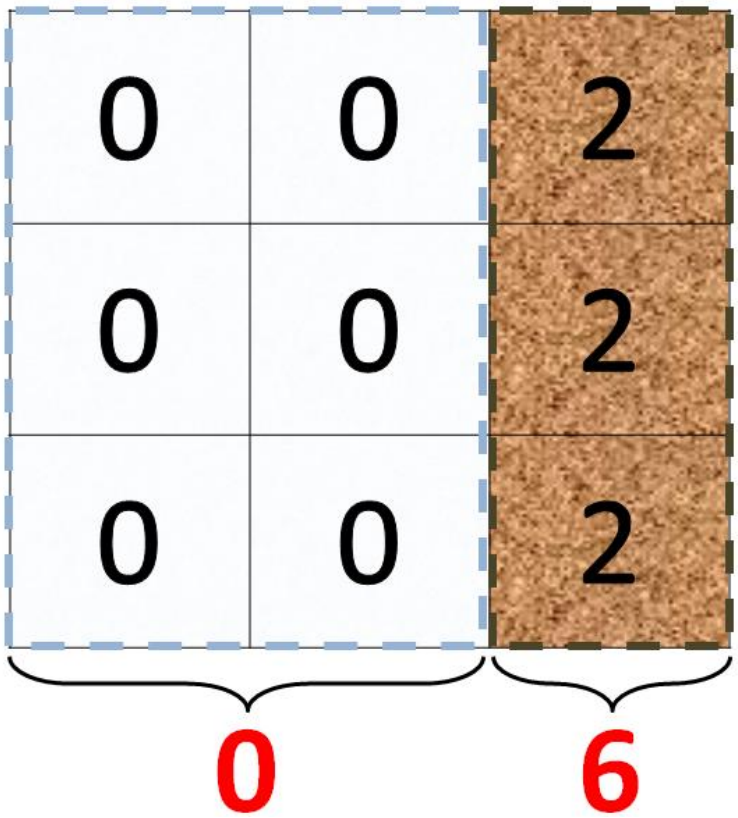


Рисунок 4.2 – Схема поглощения рентгеновского излучения в случае сухого образца

На рис.4.3 рассматривается случай съёмки образца в полностью водонасыщенном состоянии. Поглощающие ячейки скелета породы обозначены цифрой «2». Образец считается полностью водонасыщенным, поэтому ячейки, прилегающие к породе, заняты водой с коэффициентом поглощения «1».

Суммарное поглощение скелетом породы в этом случае составляет «6», водой – «0» и образцом в целом - «12».

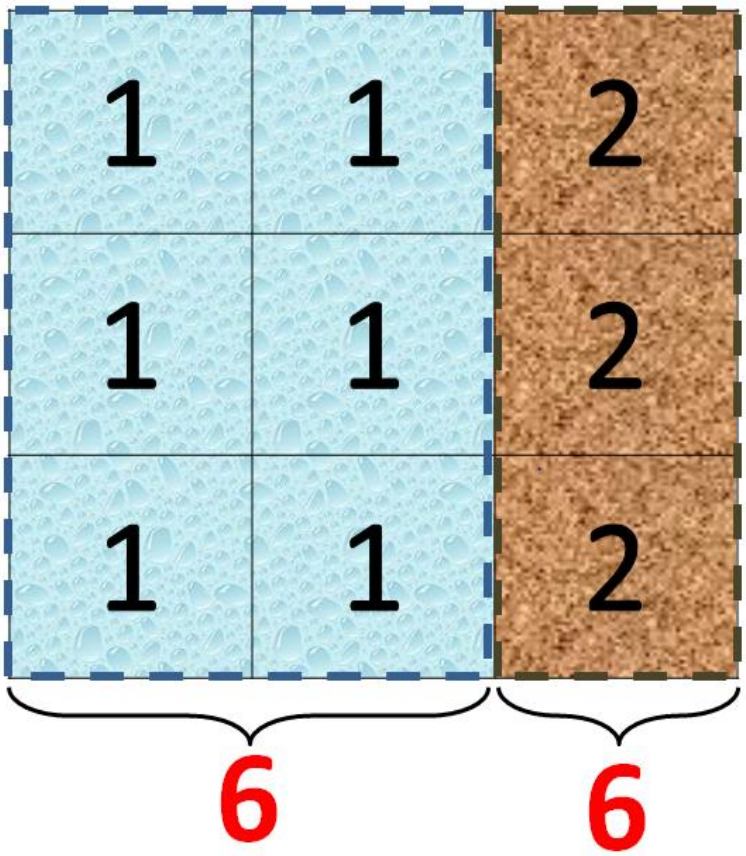


Рисунок 4.3 – Схема поглощения рентгеновского излучения в случае водонасыщенного образца

На рис.4.4 представлен случай съёмки образца с остаточной водой. Поглощающие ячейки скелета породы обозначены цифрой «2», к которой прилегает условно плёнка остаточной воды, ячейки которой равны «1». Оставшаяся фаза заполнена воздухом с ячейками, поглощение которых равно «0». Видно, что объём воды занимает 3 ячейки из 6, т.е. составляет 50%. Суммарное поглощение скелетом породы составляет «6», водой – «3», воздухом – «0» и образцом в целом - «9».

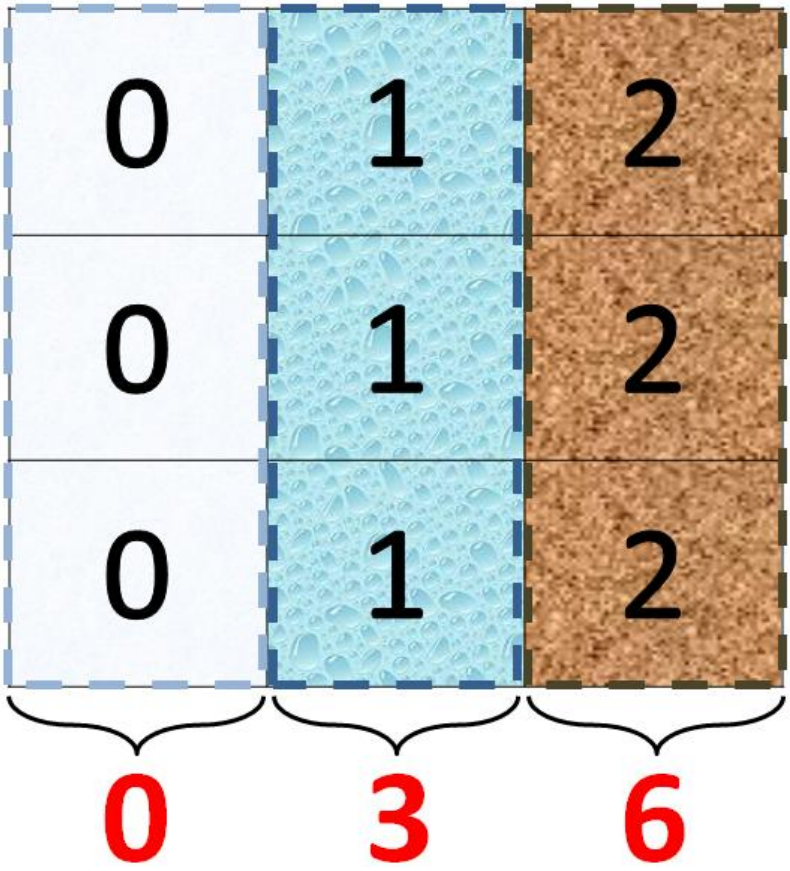


Рисунок 4.4 – Схема поглощения рентгеновского излучения в случае образца с остаточной водой

Суммарное поглощение образцами в рассмотренных случаях составляет: $I_{сух} = 6$, $I_{в} = 12$ и $I_{ов} = 9$. Применяя формулу расчёта (4.2) получаем значение $К_{ов} = 50\%$. Таким образом, расчётное значение коэффициента остаточной водонасыщенности совпадает с реальным заданным, поэтому по аналогии данная методика была использована на реальных рентгеновских снимках образцов.

Методика была апробирована на примере образцов песчаника Красноленинского месторождения и известняка Москудьинского месторождения. Физический размер образцов для съёмки составил 30×30 мм, разрешение съёмки – 10 мкм. Сперва были проведены эксперименты с использованием пластовой воды. На рис.4.5 и 4.6 представлены томографические срезы образцов в трёх состояниях, на которых черный цвет соответствует порам, серый – скелету породы. Можно проследить, как в образцах с остаточной водой остается меньше пор по сравнению с сухими.

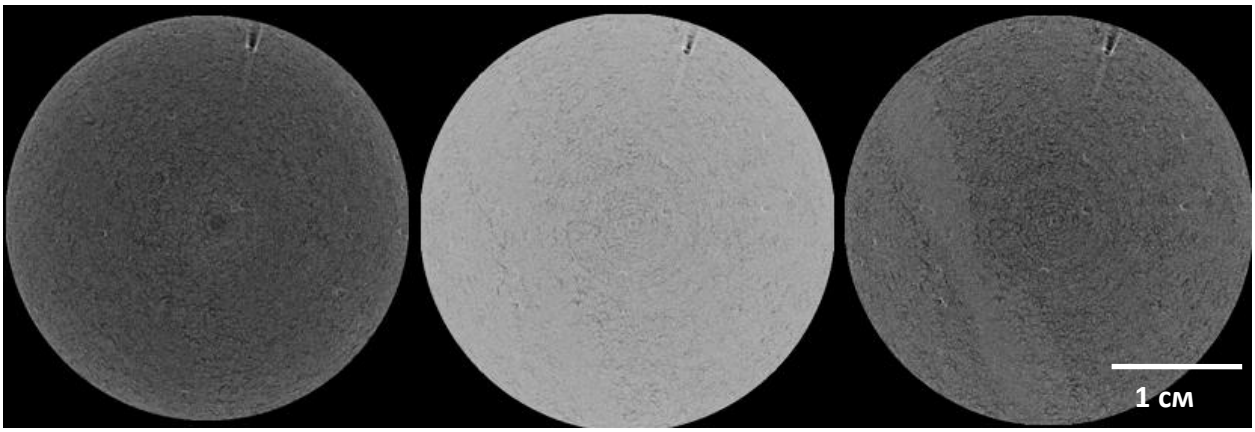


Рисунок 4.5 - Срезы образца №1 терригенных отложений в трёх различных состояниях (слева направо: сухой, водонасыщенный и с остаточной водой)

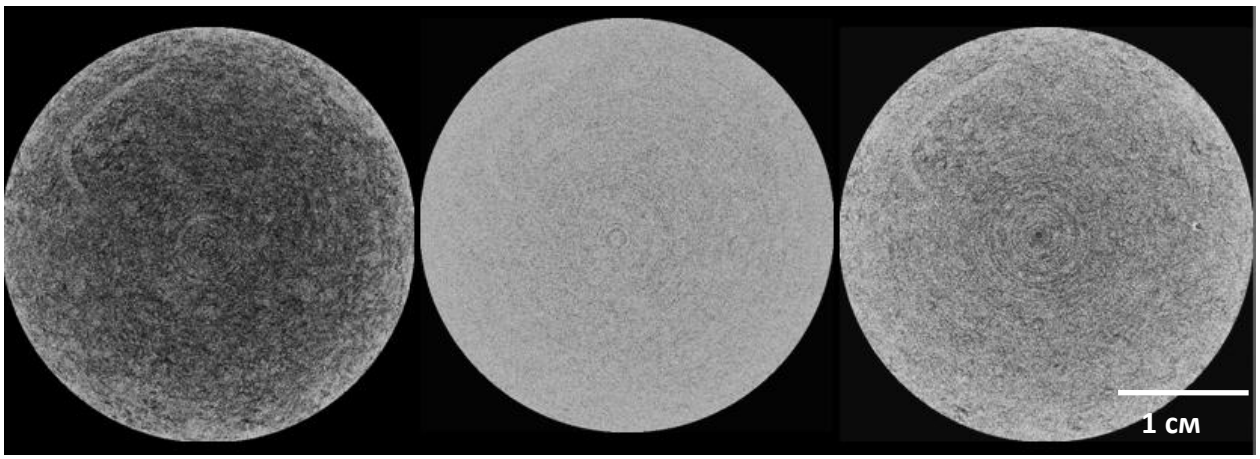


Рисунок 4.6 - Срезы образца №2 карбонатных отложений в трёх различных состояниях (слева направо: сухой, водонасыщенный и с остаточной водой)

Результаты расчёта с использованием предложенной методики и лабораторного измерения остаточной водонасыщенности для данных образцов представлены в табл.4.1. Оцененное таким способом количество остаточной воды в пустотном пространстве близко к фактическому содержанию. Ошибка определения коэффициента остаточной водонасыщенности в случае терригенного образца составила 6.5 %отн., а карбонатного – 4.8 %отн.

Таблица 4.1 – Оценка остаточной водонасыщенности путём анализа спектров поглощения рентгеновского излучения и данным лабораторного исследования с использованием пластовой воды

Образец	$\mathbf{I_{сух}}$	$\mathbf{I_{в}}$	$\mathbf{I_{ов}}$	**Ков (РТ), %**	**Ков (лаб), %**
№1(терригенный)	74642590428	78514124844	76138793875	38.6	41.3
№2 (карбонатный)	85829079667	89396132186	88355416118	70.8	74.4

Один из вариантов выделения спектра воды – добавление в неё рентгеноконтраста. Приём был опробован на тех же образцах. На рис.4.7 отчетливо видно, как меняется количество пор (черное) в зависимости от насыщения. Если терригенный образец №1/2 с остаточной водой с добавкой KI (15% масс.) пригоден для дальнейшего обсчёта, то в карбонатном образце №2/2 возникло большое количество круговых артефактов (рис.4.8), изображение стало расплывчатым, из-за чего стало невозможным определение остаточной воды с использованием рентгеноконтраста. Предположительно, данный эффект связан с высокой концентрацией раствора.

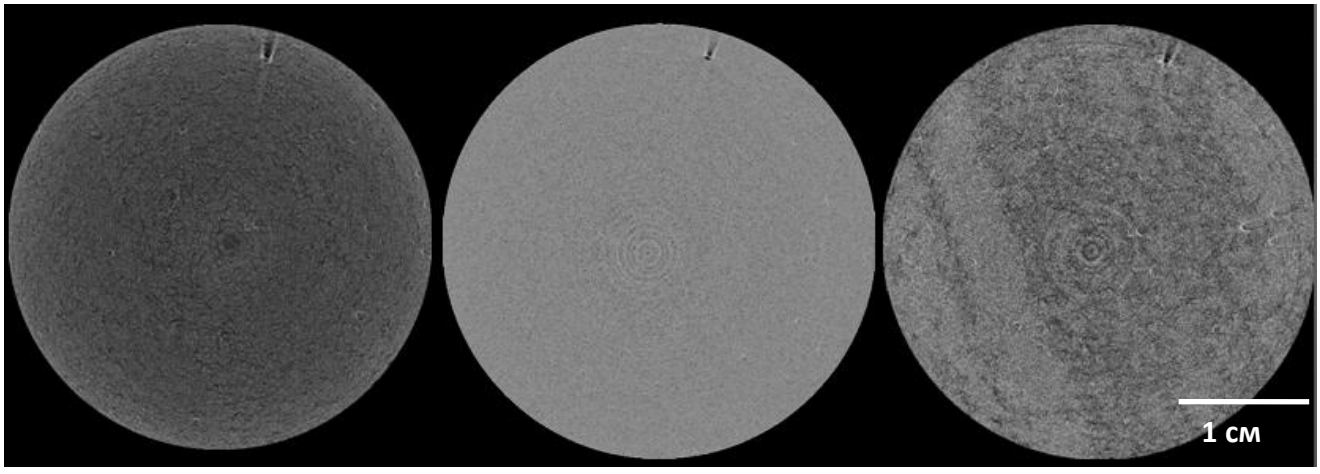


Рисунок 4.7 - Срезы образца №1 терригенных отложений в различных состояниях (сухой, KI-водонасыщенный и с остаточной водой с KI)

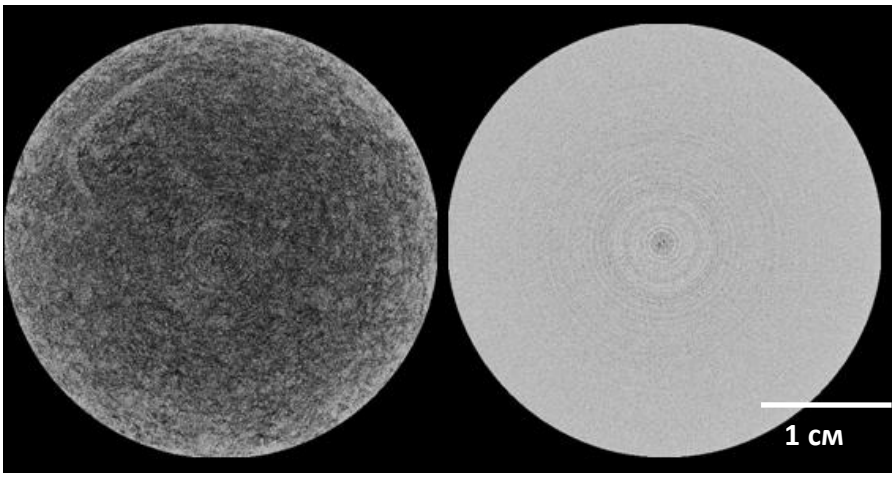


Рисунок 4.8 - Срезы образца №2 карбонатных отложений в различных состояниях (сухой, KI-водонасыщенный)

В табл.4.2 приводится результат расчёта остаточной водонасыщенности с использованием рентгеноконтраста путём анализа спектров поглощения рентгеновского излучения, где видно, что для терригенного образца ошибка определения остаточной водонасыщенности с добавлением рентгеноконтраста составила 2.3 %отн., т.е. меньше, чем при использовании пластовой воды.

Таблица 4.2 – Оценка остаточной водонасыщенности с использованием пластовой воды с добавлением рентгеноконтраста путём анализа спектров поглощения рентгеновского излучения и данным лабораторного исследования

Образец	**$I_{сух}$**	**$I_{в}$**	**$I_{ов}$**	**Ков (РТ), %**	**Ков (лаб), %**
№1/2 (терригенный) с KI	74642590428	78923446284	76368292884	40.3	41.3
№2/2 (карбонатный) с KI	85829079667	89635733932	-	-	-

Таким образом, использование пластовой воды с добавкой рентгеноконтраста позволяет получать более достоверные результаты для терригенных пород, но его использование для карбонатных пород неоднозначно. Решение данной проблемы видится в подборе концентрации

рентгеноконтрастирующего вещества, однако метод РТ является довольно трудоёмким, и для того, чтобы добиться получения рентгеновских снимков пригодных для дальнейшей обработки, может понадобиться большое количество съёмок и, соответственно, времени. В данном случае использование пластовой воды без добавления рентгеноконтраста будет более предпочтителен, поскольку позволит сразу получить результат.

4.2 Определение остаточной водонасыщенности с использованием поля скоростей однофазной фильтрации

Учитывая ограничения РТ (по крайней мере, сегодня) для непосредственной визуализации жидких фаз, в рамках настоящей работы предлагается новая методика расчёта остаточной водонасыщенности с использованием поля скоростей однофазной фильтрации. Для реализации методики из трёхмерной модели горной породы выделяют группу (массив) фрагментов – виртуальных кубов, для каждого из которых моделируют однофазную фильтрацию с применением метода решёточных уравнений Больцмана. При численном моделировании определяют скорости течения жидкости в каждой точке или ячейке пустотного пространства (рис.4.9).

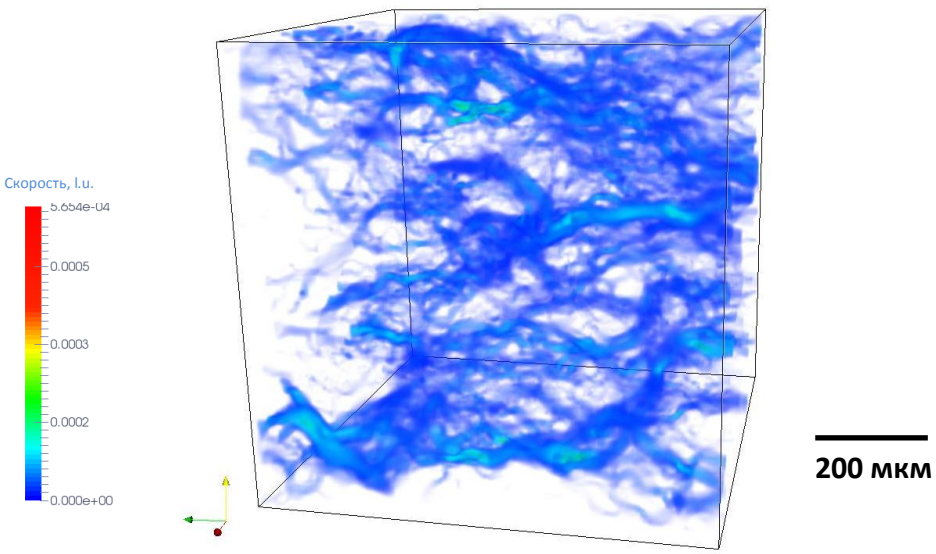


Рисунок 4.9 - Поле скоростей однофазной фильтрации в виртуальном кубе образца песчаника: пористость – 27,2%, проницаемость – 250 мД

В соответствии с новой методикой предполагается, что остаточная вода скапливается в местах с наименьшими скоростями течения. Вводится пороговое значение скорости, выделяющее остаточную воду. Области пустотного пространства, характеризующиеся скоростью движения жидкости ниже порогового, считаются заполненными остаточной водой. Чтобы определить точное пороговое значение скорости, необходимо произвести калибровку на лабораторные данные.

Калибровку производят следующим образом. Вначале выбирают виртуальный куб, пористость которого максимально близка к пористости исходного петрофизического образца с известным коэффициентом остаточной водонасыщенности, определенной в соответствии с требованиями ОСТ 39-204-86 [26]. Каждая ячейка пустотного пространства виртуального куба характеризуется своей скоростью течения и занимает определенный объём. Строят гистограмму скоростей течения и принимают её площадь равной 100%. Далее подбирают пороговое значение скорости таким образом, чтобы доля ячеек со скоростью ниже этого значения была равна коэффициенту остаточной водонасыщенности, т.е. отсекала от гистограммы часть площади, численно равную коэффициенту остаточной водонасыщенности (рис.4.10).

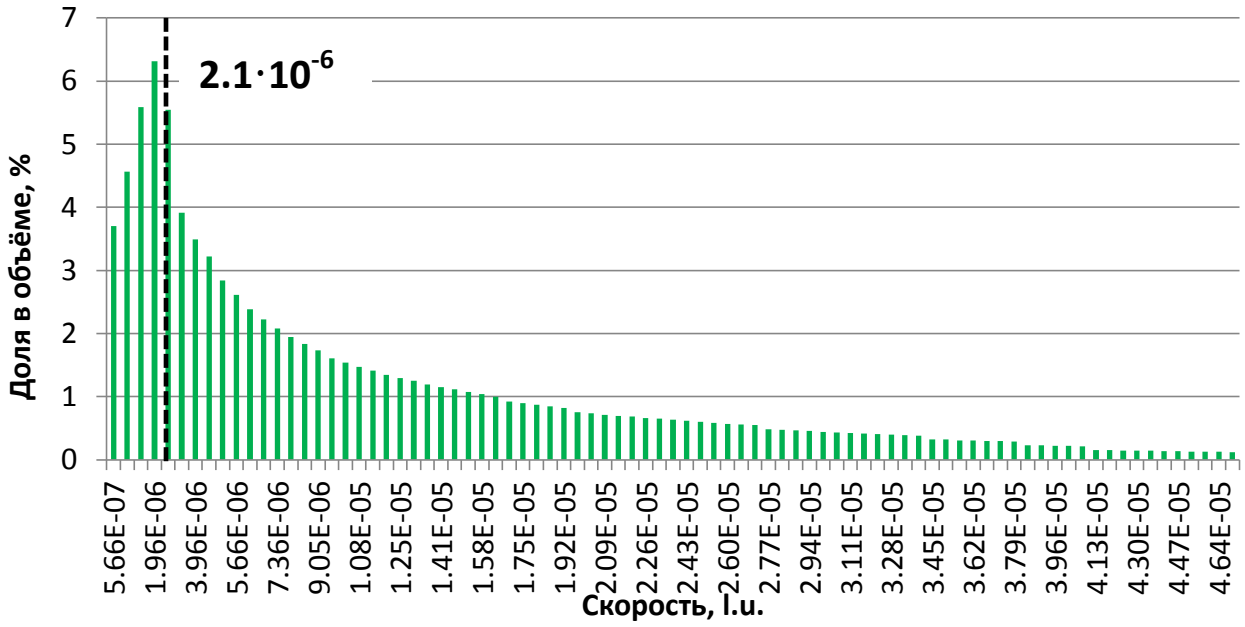


Рисунок 4.10 – Выбор порогового значения скорости течения на примере виртуального куба образца песчаника Красноленинского месторождения

В представленном примере калибровка проводилась на образец с остаточной водонасыщенностью 25 %, а пороговое значение скорости составило $2.1 \cdot 10^{-6}$ l.u. Далее это значение распространяется на другие виртуальные кубы для пород того же литотипа. Проведя отсечку порогового значения скорости течения возможно визуализировать полученный результат (рис.4.11).

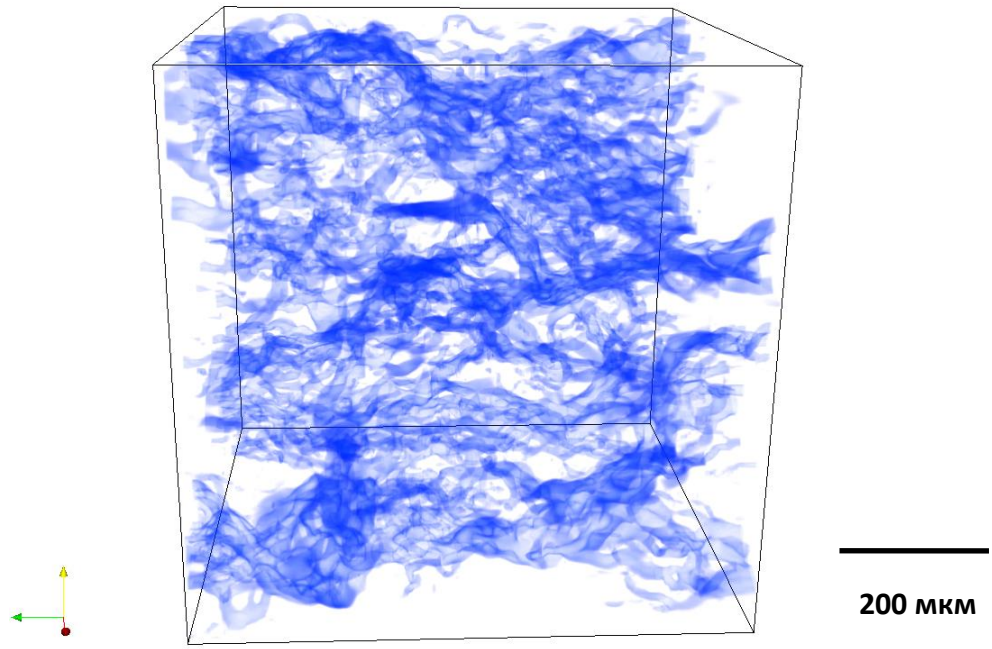


Рисунок 4.11 – Распределение остаточной водонасыщенности в виртуальном кубе образца песчаника Красноленинского месторождения

Преимуществом использования предложенного расчётного метода является возможность калибровки на лабораторные данные. Подход с выделением нескольких виртуальных кубов позволяет получить большее количество расчётных значений из каждой трёхмерной модели, полученной при РТ-съёмке, что позволяет экономить ресурс томографа и время получения результата.

Ниже приведено сопоставление лабораторных и расчётных значений остаточной водонасыщенности для пород двух месторождений РФ.

На рис.4.12 приводятся результаты расчёта остаточной водонасыщенности для пород Харьягинского месторождения. Расчётные значения хорошо согласуются с лабораторными, однако, как и в лабораторной зависимости, в ней существуют точки, отклоняющиеся от основной зависимости. В данном случае

показано, как при одной той же пористости в 12.5% остаточная водонасыщенность разная – 3 и 9 %. Такое различие объясняется тем, что в виртуальном кубе с меньшей остаточной водонасыщенностью преобладающий размер пустот больше.

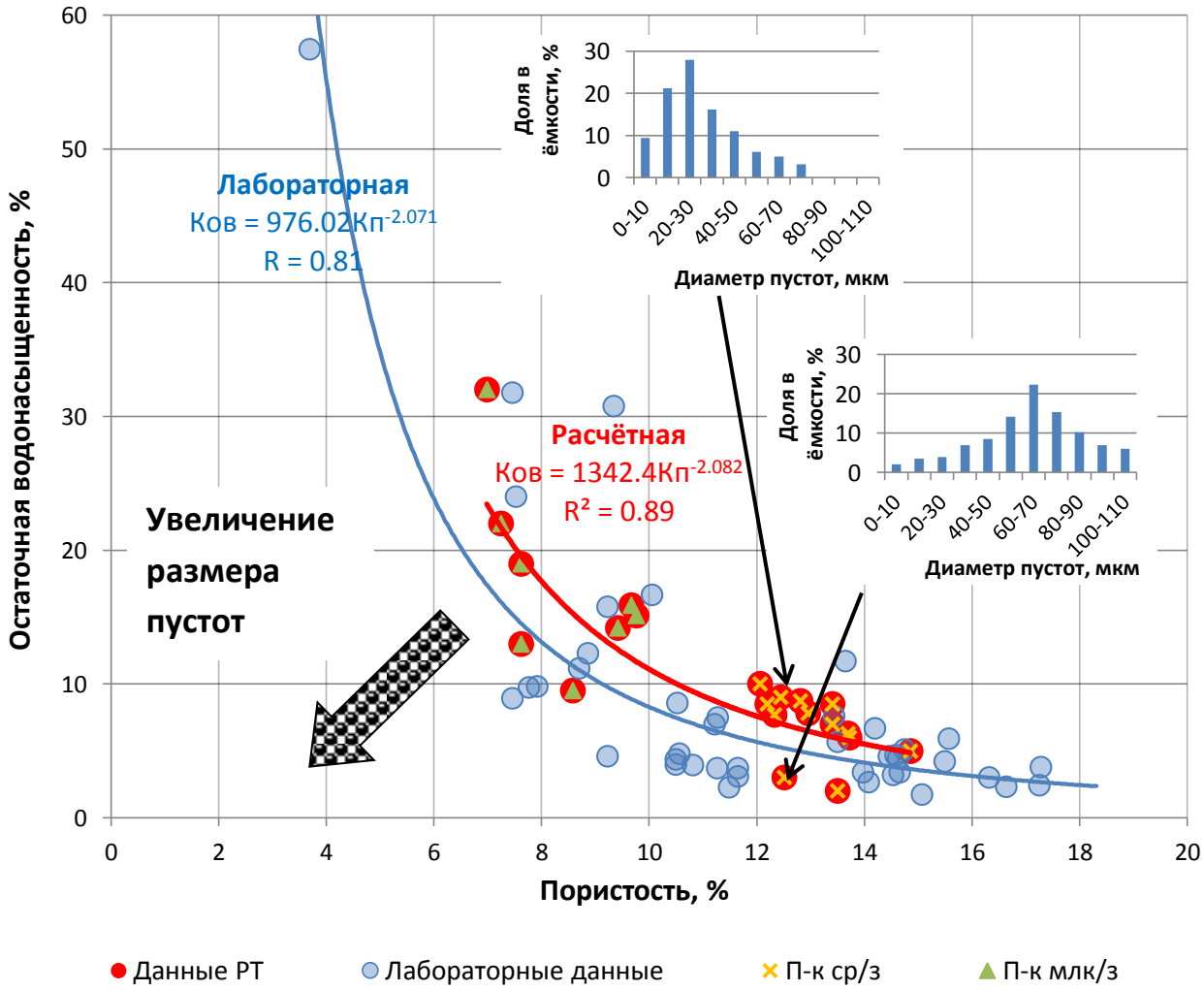


Рисунок 4.12 – Сопоставление расчётных (РТ-съёмка двух образцов) и лабораторных данных по пористости и остаточной водонасыщенности для образцов Харьягинского месторождения

На рис.4.13 приводятся результаты расчёта остаточной водонасыщенности для пород Красноленинского месторождения. В зависимостях можно наблюдать широкий разброс значений пористости и остаточной водонасыщенности. Рассматривается пример, когда для песчаника мелкозернистого для одного и того же значения пористости (26%) могут быть разные значения остаточной

водонасыщенности – 28, 35 и 43 %. По результатам литологических исследований было выявлено, что цементом является глина (каолинит) в основном порового типа, содержащего в себе часть общей пористости (микропористость). На рис.4.13 показано, что с увеличением содержания остаточной воды увеличивается доля в ёмкости относительно мелких пор (до 50 мкм) в расчётных виртуальных кубах, что может свидетельствовать о повышении суммарного содержания мелкоалевритовой и глинистой фракций.

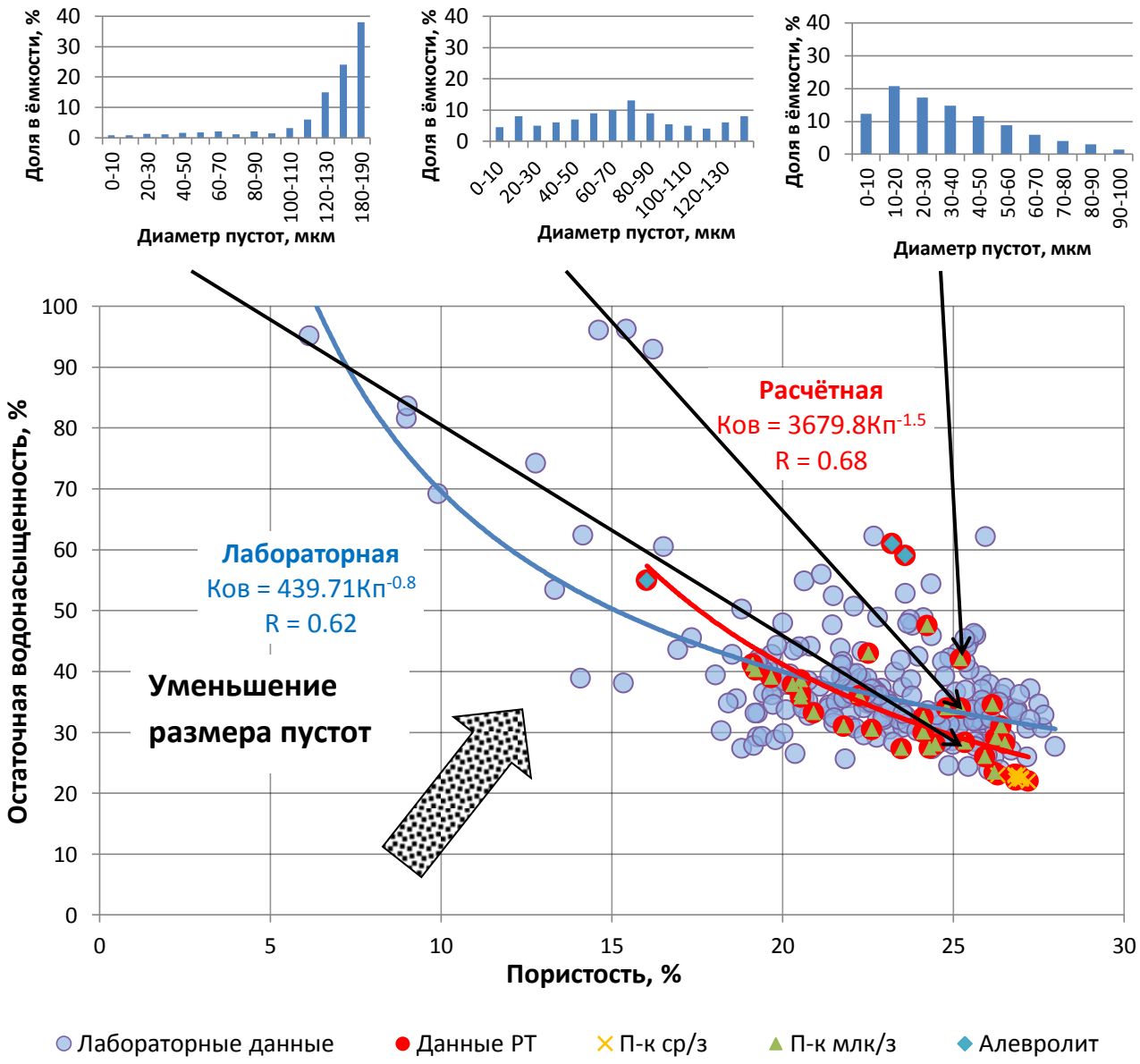


Рисунок 4.13 – Сопоставление расчётных (РТ-съёмка четырёх образцов) и лабораторных данных по пористости и остаточной водонасыщенности для образцов Красноленинского месторождения

На рис.4.14 представлено сопоставление расчётной и лабораторной зависимостей для сложного типа карбонатного коллектора, где наблюдается их хорошее согласование. Для отдельных литотипов были построены зависимости $К_{ов}=f(К_{п})$, каждая из которых занимает определенное место в широком разбросе значений пористости и остаточной водонасыщенности. Используя полученные пути фильтрации для различных литотипов (рис.3.14), можно сделать вывод, что в виртуальных кубах с большим содержанием мелких путей (соответствует известняку фораминиферово-водорослевому) остаточной воды больше, нежели в кубах, где пути фильтрации более крупные (известняк органогенно-детритовый) за счёт преобладания в ёмкости связанных каверн.

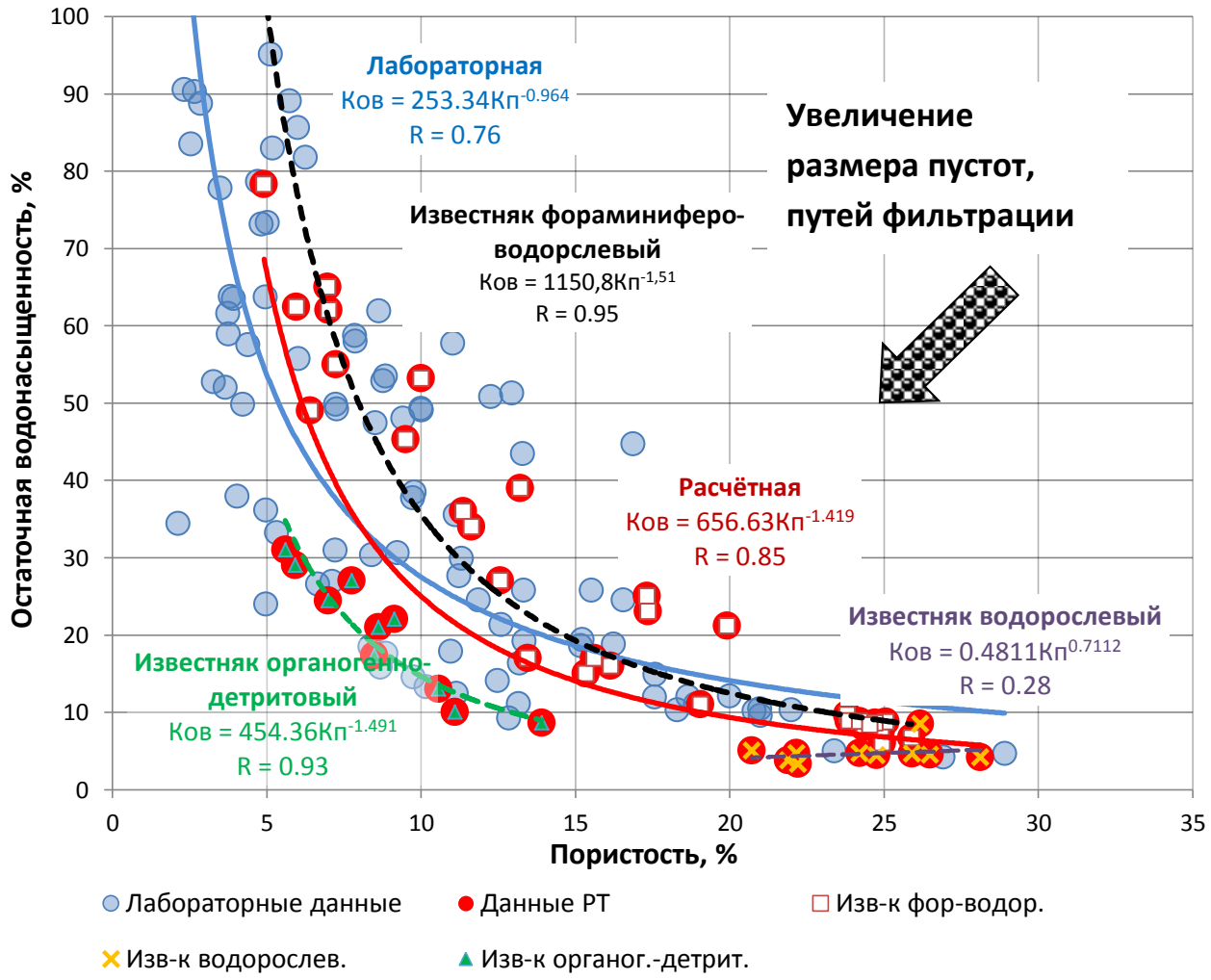


Рисунок 4.14 – Сопоставление расчётных (РТ-съёмка пяти образцов) и лабораторных данных по пористости и остаточной водонасыщенности для образцов Москудьинского месторождения

На рис.4.15 приводятся результаты расчёта остаточной водонасыщенности для пород Возейского месторождения. В общей зависимости $К_{ов}=f(К_{п})$, были выделены местоположения отдельных литотипов с использованием подхода с виртуальными кубами. Показано, что причиной разброса точек при одном и том же значении пористости является увеличение размеров пустот или появлении каверн выщелачивания.

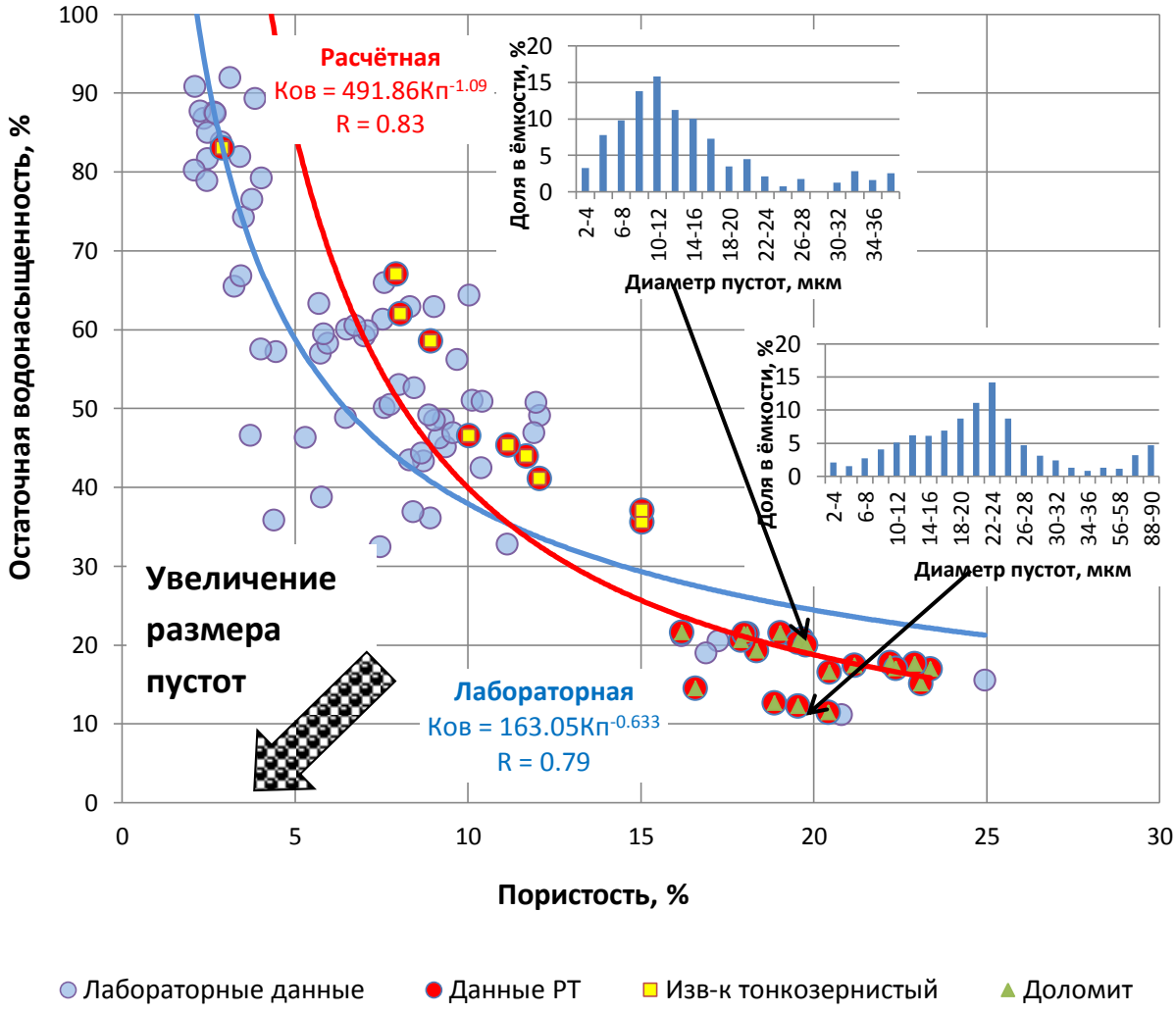


Рисунок 4.15 – Сопоставление расчётных (РТ-съёмка трёх образцов) и лабораторных данных по пористости и остаточной водонасыщенности для образцов Возейского месторождения

На представленных выше зависимостях можно увидеть хорошее совпадение расчётных и лабораторных зависимостей $К_{ов}=f(К_{п})$. Низкое значение

коэффициента аппроксимации для карбонатного коллектора является стандартной ситуацией для рассматриваемых петрофизических зависимостей.

4.3 Выводы из главы

1. Предложена методика по определению остаточной водонасыщенности с использованием интегральных интенсивностей спектров рентгеновского поглощения, которая подразумевает РТ-съёмку стандартного (30×30 мм) образца горной породы при различных насыщенностях и подходящую для количественной оценки остаточной водонасыщенности в условиях недостаточности разрешающей способности РТ. Данная методика может быть использована для изучения распределения остаточной водонасыщенности в образце.

2. Предложена методика количественной оценки остаточной водонасыщенности, которая подразумевает расчёт поля скоростей однофазной фильтрации по сформированным из цифровой модели керна виртуальным кубам и выделение в нём зон с пониженной скоростью течения. Предложенная методика позволяет строить петрофизические связи между остаточной водонасыщенностью и пористостью и показывает высокую сходимость с лабораторными данными.

3. Использование расчётной методики показало, что уменьшение размера пустот при одной и той же пористости приводит к росту остаточного водонасыщения.

4. Методика оценки остаточной водонасыщенности с формированием виртуальных кубов позволяет строить зависимости для отдельных литотипов, а также использоваться в случаях малого выноса керна или его слабой консолидации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных научных исследований получены следующие основные результаты:

1. Разработан алгоритм восстановления гидродинамической связности модели пустотного пространства в условиях недостатка разрешающей способности рентгеновской томографии. Данный подход позволяет проводить гидродинамическое моделирование для геологических объектов в масштабе пор, определять значение проницаемости и её анизотропии для случаев, когда фильтрующий радиус меньше разрешающей способности рентгеновского томографа.

2. Разработана и апробирована новая методика определения фильтрационно-емкостных свойств горных пород по данным рентгеновской томографии и численного моделирования, основанная на искусственном формировании массива виртуальных кубов из разных частей образца. В рамках методики показано, что расчётные значения пористости и проницаемости по виртуальным кубам формируют связь близкую к фактической лабораторной для всего объекта (пласта) для нескольких месторождений РФ.

3. Разработана и апробирована методика определения остаточной водонасыщенности горных пород, основанная на анализе интегральной интенсивности спектров поглощения рентгеновского излучения в условиях недостаточности разрешающей способности рентгеновской томографии. Данный подход позволяет напрямую определять коэффициент остаточной водонасыщенности без использования контрастирующего вещества и в дальнейшем рекомендуется для изучения распределения остаточной воды в образцах.

4. Разработана и апробирована методика расчёта остаточной водонасыщенности на основе расчётных данных поля скоростей однофазной фильтрации.

5. Предложенные методики с использованием массива виртуальных кубов позволят повысить достоверность петрофизических данных в условиях малого отбора керна или слабой его консолидации, а также устанавливать связи для отдельных литотипов, более обоснованно проводить расшифровку петрофизических зависимостей с низким коэффициентом корреляции.

6. Методики расчёта фильтрационно-емкостных свойств и остаточной водонасыщенности с использованием массива виртуальных кубов не требуют высоких вычислительных мощностей, позволяют экономить время работы рентгеновской трубки и время машинного счёта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов, А.А. Изучение нетрадиционных источников углеводородов с использованием рентгеновской томографии / А.А. Абросимов, В.В. Стрельченко // Geopetrol 2016: материалы 10-ой Междунар. науч.-техн. конф., 19-22 сент. 2016 г., г. Закопане – Zakopane, 2016. – С.751-755.

2. Абросимов, А.А. Применение рентгенотомографии для изучения фильтрационно-емкостных систем коллекторов нефти и газа / А.А. Абросимов // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. - №4/281. – С.5-15.

3. Абросимов, А.А. Фильтрационно-емкостные системы горных пород / А.А. Абросимов, Ю.Г. Пименов // Эволюция осадочных процессов в истории Земли: материалы 8-го Всерос. литологического совещания, 27-30 окт. 2015 г., г. Москва. – Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. – Т.2 – С.315-317.

4. Абросимов, А.А. Изучение фильтрационно-емкостных систем нефтематеринских пород (на примере глин хадумской свиты) / А.А. Абросимов // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика): тез. 11-ой Всерос. конф. молодых ученых, специалистов и студентов, 20-23 окт. 2015г., г. Москва. – Москва, 2015. – С.4.

5. Абросимов, А.А.. Изучение коллекторов, содержащих трудноизвлекаемые запасы [Электронный ресурс] – электронное издание на 1 CD-R диске / А.А. Абросимов, Ю.Г. Пименов // Трудноизвлекаемые запасы и нетрадиционные источники углеводородного сырья. Проблемы, перспективы, прогнозы: материалы Междунар. конф., 6-10 июля 2015г., г. Санкт-Петербург – СПб.: ФГУП «ВНИГРИ», 2015.

6. Абросимов, А.А. Выделение различных физико-химических фаз в фильтрационно-емкостном пространстве горных пород / А.А. Абросимов // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: тез. докладов 10-ой Всерос. науч.-техн. конф., 10-12 февраля 2014 г., г. Москва. – Москва, 2014. - С.29.

7. Арсеньев-Образцов, С.С. Определение тензора коэффициентов проницаемости численным моделированием течения флюида на цифровой модели пористой среды / С.С. Арсеньев-Образцов // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2015. - №4/281. – С.64-77.

8. Беляков, М.А. Влияние вторичной доломитизации на формирование коллекторских свойств продуктивных пород месторождений нефти и газа / М.А. Беляков, И.В. Язынина, А.А. Абросимов // Нефтяное хозяйство. – 2015. - № 6. – С. 24-27.

9. Вайсберг, Л.А.. Исследование деформации гранита при одноосном сжатии / Л.А. Вайсберг, Е.Е. Каменева, Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов // Горный журнал. – 2015. - №4. – С.50-54.

10. Влияние структуры пустотного пространства на емкостные свойства доломитов / С.Ю. Штунь С.Ю., Н.Н. Богданович, А.А. Еремеев и др. // Геомодель-2009: сборник докладов XI междунар. науч.-практич. конф. 7-10 сент. 2009 г., г. Геленджик. М.: EAGE, 2009. - 584 с.

11. Влияние фациальных условий осадконакопления на формирование ФЕС карбонатных коллекторов Мусюршорского месторождения / Т.Ф. Дьяконова, Т.Г. Исакова, Е.В. Гаврилова и др. // Геофизика. – 2007. - №4. – С. 181-185.

12. Герке, К.М. Моделирование в масштабе пор по данным рентгеновской микротомографии / К.М. Герке, Р.В. Васильев, Д.В. Корост, М.В. Карсанина // Практическая микротомография: сборник тез. Всерос. конф., 2-4 окт. 2013г., г. Москва – Москва, 2013. – С.23-27.

13. Гилязетдинова, Д. Р. Трансформация пустотного пространства при моделировании генерации углеводородных флюидов на примере доманикового горизонта Южно-Татарского свода / Д.Р. Гилязетдинова, Д.В. Корост // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. - 2015. - № 5. - С. 78–85.

14. ГОСТ 26450.2-85 Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 17 с.

15. Дзюбло А.Д. Возможности и результаты применения технологии рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях пород-коллекторов и флюидоупоров / А.Д. Дзюбло, Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов // Нефть и газ Сахалина 2015: материалы 19-ой Междунар. конф. и выставки, 28 сент.-1 окт. 2015 г., г. Южно-Сахалинск. - Южно-Сахалинск, 2015.

16. Динариев, О.Ю. Моделирование динамической (частотно-зависимой) проницаемости и электропроводности в пористых материалах на основе концепции ансамбля пор / О.Ю. Динариев, Д.Н. Михайлов // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. - Том 52, Вып.1. - С.101-118.

17. Додулад, О.И. Система программных модулей для вычисления интеграла столкновений Больцмана / О.И. Додулад, Ю.Ю. Клосс, В.В. Рябченков, Ф.Г. Черемисин // Вычислительные методы и программирование. - 2011. - Т. 12, № 1. - С. 40-47.

18. Еникеев, Б.Н. Опыт изучения петрофизических зависимостей по керну для карбонатных коллекторов со вторичной пористостью / Б.Н. Еникеев, А.Б. Охрименко, О.А. Смирнов // Геомодель-2009: сборник докладов XI междунар. науч.-практич. конф. 7-10 сент. 2009 г., г. Геленджик. М.: EAGE, 2009. - 584 с.

19. Еременко, Н.М. Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин [Электронный ресурс] / Н.М. Еременко Н.М., Ю.А. Муравьева // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – Т. 7, № 3. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/2/35_2012.pdf (22.09.2016).

20. Закиров, Т.Р. Анализ «представительного элемента объёма» для песчаников Ашальчинского месторождения с использованием метода рентгеновской компьютерной томографии / Т.Р. Закиров, А.А. Галеев, А.А. Коновалов, Е.О. Стаценко // Нефтяное хозяйство. 2010. 10, С. 54-57.

21. Календер, В. Компьютерная томография основы, техника, качество изображений и области клинического использования / В. Календер: пер. с англ. А.В. Кирюшина, А.Е. Соловченко: под ред. В.Е. Синицына - М.: Техносфера. 2006. - 344 с.

22. Кривовичев, Г.В. Модифицированный вариант метода решеточных уравнений Больцмана для расчёта течений вязкой несжимаемой жидкости / Г.В. Кривовичев // Компьютерные исследования и моделирование. - 2014. - Т. 6, № 3. - С. 364-381.

23. Кривовичев, Г. В. О расчёте течений вязкой жидкости методом решеточных уравнений Больцмана / Г.В. Кривовичев // Компьютерные исследования и моделирование. - 2013. - Т. 5, № 2. - С. 165-178.

24. Муминов, А.С. Рентгенотомография в приложение к изучению карбонатных коллекторов месторождения Парсанкуль / А.С. Муминов, Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов, Н.Е. Лазуткина // Актуальные вопросы нефтегазогеологической науки, техники и исследований скважин: тез. Республиканской науч.-практ. конф., 20-21 нояб. 2014 г., г. Ташкент. – Ташкент, 2014. – С.41-43.

25. Надеев, А.Н. Изучение изменений в структуре слабосцементированных горных пород методом рентгеновской микротомографии / А.Н. Надеев, А.В. Казак, И.А. Варфоломеев, Д.А. Коротеев, Д.А. Коробков, Е.А. Болычев, С.В. Лебедев // Нефть. Газ. Новации. - 2013. - №4. – С.23-26.

26. Никифорова, О.Г. Изучение цеолитсодержащих песчано-алевритовых коллекторов севера Западной Сибири / О.Г. Никифорова // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015: сборник статей. - М.: ООО ЕАГЕ Геомодель, 2015. - С. 160-168.

27. ОСТ 39-204-86 Нефть. Метод лабораторного определения остаточной водонасыщенности коллекторов нефти и газа по зависимости насыщения от капиллярного давления. – М.: Миннефтепром, 1986. – 26 с.

28. Пименов, Ю.Г. Структура порового пространства различных видов пористости коллекторов талахского горизонта / Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов, В.С. Жуков, В.В. Моторыгин // Газовая промышленность. – 2016. - №6. – С. 56-59.

29. Пименов, Ю.Г. Влияние пластовых условий на структуру порового пространства (на примере коллекторов талахского горизонта) / Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов, В.С. Жуков, В.В. Моторыгин // Фундаментальный базис и

инновационные технологии поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа: тез. 21-х Губкинских чтений, 24-25 марта 2016г., г. Москва – Москва, 2016. – Т.2. – С.42-44.

30. Пименов, Ю.Г. Фильтрационно-емкостные системы нефтематеринских пород (на примере нижней части майкопской серии) / Ю.Г. Пименов, А.А. Абросимов // НТВ «Каротажник». - 2016. – Вып. 4 (262). – С.36-45.

31. Прошляков, Б.К. Коллекторские свойства осадочных пород на больших глубинах. / Б.К. Прошляков, Т.И. Гальянова, Ю.Г. Пименов. - М.:Недра, 1987. – 200 с.

32. Рыжиков, Н.И. Метод расчёта профилей распределения пористости и объёмных долей материалов в пористой среде с помощью анализа данных рентгеновской микротомографии / Н.И. Рыжиков, Д.Н. Михайлов, В.В. Шако // Труды МФТИ. – 2013. – Т. 5. – № 4(20). – С. 161-169.

33. Симонов, Е.Н. Физика визуализации изображений в рентгеновской компьютерной томографии / Е.Н. Симонов. - Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. - 479 с.

34. Способ рентгенографического исследования структуры пустотного пространства материалов: а.с. № 3638097 СССР / И.С. Амосов, Л.С. Борисова, Ю.Г. Пименов, Б.К. Прошляков, Т.И. Гальянова; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт медицинской радиологии АМН СССР и Московский институт нефтехимической и газовой промышленности; заявл. 29.08.1983; опубл. 07.11.1984, Бюл. № 41. – 5 с.

35. Способ исследования фильтрационно-емкостных свойств горных пород: заявка на пат. Рос. Федерация № 2016128482 / Язынина И.В., Шеляго Е.В., Абросимов А.А., Бикулов Д.А., Грачев Н.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина». - № 1027739073845; заявл. 13.07.2016.

36. Стрельченко, В.В. Информативность разноуровневого изучения процесса развития трещиноватости в коллекторах нефти и газа / В.В. Стрельченко, А.А. Абросимов, Д.А. Мельничук // Газовая промышленность. – 2015. - №1. – С. 42-45.

37. Стрельченко, В.В. Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны и её фильтрационно-емкостных свойств при бурении / В.В. Стрельченко, Д.А. Мельничук, А.А. Абросимов // Вестник Ассоциации Буровых Подрядчиков. – 2014. - №1. – С.60-62.

38. Тиаб, Д. Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов / Д. Тиаб, Э.Ч. Доналдсон. - 2-е доп. изд., Пер. с англ. - М.: Премиум Инжиниринг, 2009. - 868 с.

39. Хозяинов, М.С. Вычислительная микротомография – новая информационная технология неразрушающего исследования внутренней микроструктуры образцов геологических пород / М.С. Хозяинов, Э.И. Вайнберг // Геоинформатика. – 1992. – № 1. – С. 42–50.

40. Чугунов, С.С. Комплексирование методов рентгеновской микротомографии и трёхмерной электронной микроскопии при исследовании пород баженовской свиты Западной Сибири / С.С. Чугунов, А.В. Казак, А.Н. Черемисин // Нефтяное хозяйство. – 2015. - №10. - С. 44-49.

41. Эволюция петрофизической модели полигенетических отложений викуловской свиты Каменного месторождения / А.Ю. Лопатин, А.Л. Медведев, Ю.В. Масалкин и др. // Геомодель-2007: тез. докладов IX-ой науч.-практич. конф. – М.: изд. «EAGE-Геомодель», 2007. - С. 48.

42. Язынина, И.В. Расчёт малых значений проницаемости горных пород по данным рентгеновской томографии / И.В. Язынина, Е.В. Шеляго, А.А. Абросимов // Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям: материалы V междунар. конф., 22-23 ноября 2016 г., г. Москва. – Москва, 2016. - С.179-183.

43. Abrosimov, A.A. Reservoir systems research of oil source rocks/ A.A. Abrosimov // Oil and Gas Horizons VII: Abstract Book The Seventh International Youth Scientific and Practical Congress, 24-26 November 2015, Moscow. – Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2015. - p.10.

44. Algive, L. Pore-Network Modeling Dedicated to the Determination of the Petrophysical-Property Changes in the Presence of Reactive Fluid / L. Algive, S. Bekri, O. Vizika //SPE Journal. 2010. V. 15, № 3, p. 618–633.

45. Al-Kharusi, A.S. Multiphase flow predictions from carbonate pore space images using extracted network models / A.S. Al-Kharusi, M.J. Blunt // Water Resources Research - 2008. - №44. - W06S01.

46. Al-Raoush, R. A pore-scale investigation of a multiphase porous media system / R. Al-Raoush, C. Willson // J Contam Hydrol. - 2005. - №77(1–2). - p. 67–89.

47. Andrew, M. Pore-scale contact angle measurements at reservoir conditions using X-ray microtomography / M. Andrew, B. Bijeljic, M.J. Blunt // Advances in Water Resources. - № 68.- 2014. - p. 24-31.

48. Bhatnagar, P. L. A model for collision processes in gases. I.Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems / P.L. Bhatnagar, E.P. Gross, M. Krook // Phys. Rev. - 1954. - Т. 94, № 3. - p. 511.

49. Blunt, M. J. Flow in porous media — pore-network models and multiphase flow / M.J. Blunt //Current Opinion in Colloid & Interface Science. - 2001. - V.6, №3. - p. 197–207.

50. Boyd, J. Application of the lattice Boltzmann model to simulated stenosis growth in a two-dimensional carotid artery / J. Boyd, J. Buick, J.A. Cosgrove, P. Stansell // Phys. Med. Biol. - 2005. - Т. 50, № 20. - p. 4783 - 4796.

51. Coles, M.E. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography / M.E. Coles, R.D. Hazlett, P. Spanne, W.E. Soll, E.L. Muegge // Journal of Petroleum Science and Engineering. - 1998. – №19(1–2). - p. 55–63.

52. Cormack, A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications / A.M. Cormack // Journal Appl. Phys.1963. V.34. p.1722-1727.

53. Culligan, K.A. Interfacial area measurements for unsaturated flow through a porous medium / K.A. Culligan, D. Wildenschild, B.S.B. Christensen, W.G. Gray, M.L. Rivers, A.F.B. Tompson // Water resources research. - 2004. – №40 (12) - W12413.

54. Dodd, N. Pore-Scale Imaging of Oil and Wettability in Native-State, Mixed-Wet Reservoir Carbonates [Электронный ресурс] / Dodd N., Marathe R., Middleton J., Fogden A., Carnerup A., Knackstedt M., Mogensen K., Marquez X., Frank S., Bounoua N. // International Petroleum Technology Conference, 19-22 January, Doha, Qatar, 2014. - URL: https://www.researchgate.net/publication/267457976_Pore-Scale_Imaging_of_Oil_and_Wettability_in_Native-State_Mixed-Wet_Reservoir_Carbonates (22.09.2016).

55. d'Humieres, D. Multiple-relaxationtime lattice Boltzmann models in three dimensions / D. d'Humieres, I. Ginzburg, M. Krafczyk, P. Lallemand, L.-S. Luo // Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci. - 2002. - T. 360, № 1792. - pp. 437 - 451.

56. Fernandes, J.S. Determination of the Representative Elementary Volume for the Study of Sandstones and Siltstones by X-Ray Microtomography / J.S. Fernandes, C.R. Appoloni, C.P. Fernandes // Materials Research, 15(4), 2012: p. 662-670.

57. Ferreol, B. Lattice-Boltzmann simulations of flow through Fontainebleau sandstone / B. Ferreol, D. Rothmann // Transp.Porous Media. -1995. – №20. - p. 3–20.

58. Garboczi, E.J. Multi-scale analytical/numerical theory of the diffusivity of concrete / E.J. Garboczi, D.P. Bentz // Journal Adv. Cement-Based. Mater. – 1998. - v.8. - p.77-88.

59. Garcia, X. Numerical study of the effects of particle shape and polydispersity on permeability [Электронный ресурс] / X. Garcia, L.T. Akanji, M.J. Blunt, S.K. Matthai, J.P. Latham // Physical Review E. - 2009. - №80: 021304. – URL: http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.80.021304 (22.09.2016).

60. Grader, A.S. Computations of porosity and permeability of sparic carbonate using multi-scale CT images [Электронный ресурс] / A.S. Grader, A.B.S. Clark, T. Al-Dayyani, A. Nur / International Symposium of the Society of Core Analysts // The Netherlands, 27-30 September, 2009. – URL:

http://www.ingrainrocks.com/media/files/user/2009_03_10_SCA_PAPER_FINAL_DOCX.pdf (22.09.2016).

61. Hainsworth, J. The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content / J. Hainsworth, L. Aylmore // Australian Journal of Soil Research. - 1983. - №21. - p. 435-443.

62. Hounsfield, G.N. Computerized transverse axial scanning tomography: Part 1, description of the system / G.N. Hounsfield // Br. Journal Radiology 1973. - V.46. - p. 1016-1022.

63. Iglauer, S. Residual CO_2 imaged with X-ray micro-tomograph / S. Iglauer, A. Paluszny, C.H. Pentland, M.J. Blunt // Geophysical research letters. - 2011. - Vol. 38. - L21403.

64. Ikeda, M. A thermal multicomponent lattice Boltzmann model / M. Ikeda, P. Rao, L. Schaefer // Computers & Fluids. - 2014. - T. 101. - p. 250-262.

65. Khozyainov, M.S. X-ray Computed Tomography of Natural and Technogenious Geomaterial / M.S. Khozyainov, O.A. Yakushina // 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts, Part 2. - Ghent, 2013. - p.239-243.

66. Kumar, M. Imaging of pore scale distribution of fluids and wettability / M. Kumar, T.J. Senden, M.A. Knackstedt, A.P.S Val // Petrophysics. – 2009. – №34. - p. 311 – 321.

67. Kun, X. Lattice Boltzmann method and gas-kinetic BGK scheme in the low-Mach number viscous flow simulations / X. Kun, H. Xiaoyi // Journal of Computational Physics. – 2003. - №190. – p. 100–117.

68. Kunz, P. Study of Multi-phase Flow in Porous Media: Comparison of SPH Simulations with Micro-model Experiments / P. Kunz, I. Zarikos, N. Karadimitriou, M. Huber, U. Nieken, S. Hassanizadeh // Transport in Porous Media. – 2016 - №114. - p. 1–20.

69. Landry, C.J. Pore-scale analysis of trapped immiscible fluid structures and fluid interfacial areas in oil-wet and water-wet bead packs / C.J. Landry, Z.T. Karpyn, M. Piri // Geofluids. –2011. - №11(2). - p. 209–227.

70. Leclaire, S. Isotropic color gradient for simulating very high-density ratios with a two-phase flow lattice Boltzmann model / S. Leclaire, M. Reggio, J.-Y. Trépanier // Computers & Fluids.- 2011. - T. 48, № 1. - p. 98—112.

71. Li, L. Upscaling geochemical reaction rates using pore-scale network modeling / L. Li, C.A. Peters, M.A. Celia //Advances in Water Resources. 2006. V. 29, № 9, p. 1351–1370.

72. Lopez, X. Predictive network modeling of single-phase non-Newtonian flow in porous media / X. Lopez, P.H. Valvatne, M.J. Blunt // Journal of Colloid and Interface Science. 2003. V. 264, № 1, p. 256–265.

73. Lu, C. A Pore-Network Model of In-Situ Combustion in Porous Media / C. Lu, Y. Yortsos // SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Porlamar, Margarita Island, Venezuela. - 2001. – paper number 69705.

74. Marco, D.M. Fast microtomography using high energy synchrotron radiation [Электронный ресурс] / D.M. Marco, J.M. Merino, D. Fernandez-Carreiras, T. Buslaps, V. Honkimäki, P. Falus, T. Martins, O. Svensson // Review of Scientific Instruments.-2005.–№76. – URL: http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/ 76/4/10.1063/ 1.1884194 (22.09.2016).

75. Mees, F. Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences / F. Mees, R. Swennen, M. Van Geet, P. Jacobs : The Geological Society, London, 2003. – 250 p.

76. Niu, B., Yan W., Shapiro A.A., Stenby E.H. Phase identification and saturation determination in carbon dioxide flooding of water flooded chalk using X-ray computed tomography / Niu B., Yan W., Shapiro A.A., Stenby E.H. // International Symposium of the Society of Core Analysts held in Noordwijk, The Netherlands. - 2009. - p. 640-652.

77. Oldendorf, W.H. Isolated flying-spot detection of radiodensity discontinuities; displaying the internal structural pattern of a complex object / W.H. Oldendorf // IRE Trans. Bio-Med. Electron. - 1961. - V.BME-8. - p.68-72.

78. Øren, P.E. Extending predictive capabilities to network models / P.E. Øren, S. Bakke, O.J. Arntzen // SPE Journal. - 1998. - V.3, №4. - p. 324–336.

79. Patzek, T. W. Verification of a complete pore network simulator of drainage and imbibition / T.W. Patzek //SPE Journal. - 2001. - № 2, V.6. - p. 144–156.

80. Petrovic, A.M. Soil bulk-density analysis in 3 dimensions by computed tomographic scanning / A.M. Petrovic, J.E. Siebert, P.E. Rieke // Soil Science Society of America Journal, 1982. - № 46(3). - p. 445–450.

81. Porter, M.L. Measurement and prediction of the relationship between capillary pressure, saturation, and interfacial area in a NAPL-water-glass bead system / M.L. Porter, D. Wildenschild, G. Grant, J.I. Gerhard // Water Resources Research. - 2010. - Vol. 46(8). - W08512.

82. Radon, J. Uber die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten / J. Radon // Berichte Sachsische Akademie der Wissenschaften, Leipzig, Math.-Phys. - 1917. - Vol.69. - p.262-267.

83. Silin, D. Microtomography and Pore-Scale Modeling of Two-Phase Fluid Distribution / D. Silin, L. Tomutsa, S.M. Benson, T.W. Padzek // Transport in Porous Media.86 (2). – p. 495 - 515.

84. Sok, R.M. Pore scale characterization of carbonates at multiple scales: integration of micro-CT, BSEM and FIBSEM. / R.M. Sok, T. Varslot, A. Ghous, S. Latham, A.P. Sheppard, M.A. Knackstedt // Petrophysics. – 2010. - №51 (6). – p. 379-387.

85. Succi, S. The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond / S. Succi – UK: Oxford University Press, 2001. – 288 p.

86. Tartakovsky, A.M. Smoothed particle hydrodynamics and its applications for multiphase flow and reactive transport in porous media / A.M. Tartakovsky, N. Trask, K. Pan, B. Jones, W. Pan, J. R. Williams // Computational Geosciences. - 2015. - p. 1–28.

87. Talon, L. Assessment of the two relaxation time Lattice-Boltzmann scheme to simulate Stokes flow in porous media / L. Talon, D. Bauer, N. Gland, S. Youssef, H. Auradou, I. Ginzburg // Water Resources Research. – 2012. - №48. - W04526.

88. Turner, M. Three-dimensional imaging of multiphase flow in porous media. / M. Turner // Physica A. - 2004. - 339(1–2). - p. 166–72.

89. Wellington, S.L. X-ray computerized tomography / S.L. Wellington, H.J. Vinegar // Journal of Petroleum Technology. – 1987. - V. 39. - p. 885-898.

90. Wildenschild, D. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations / D. Wildenschild, J.W. Hopmansc, C.M.P. Vazd, M.L. Riverse, D. Rikardf, B.S.B. Christensena // Journal of Hydrology. - 2002. - № 267. - p. 285–297.

91. Wildenschild, D. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems / D. Wildenschild, A.P. Sheppard // Advances in Water Resources. - 2013. – №51. – p. 217 - 246.

92. Withjack, E.M. Computed tomography for rock-property determination and fluid-flow visualization / E.M. Withjack // SPE Format Eval – 1988 - №3(4). - p. 696–704.

93. Yoshida, H. Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann model for the convection and anisotropic diffusion equation / H. Yoshida, M. Nagaoka // Journal of Computational Physics. − 2010. − Oct. - T. 229, № 20. − p. 7774 - 7795.