

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Лаврухина Ефима Валерьевича
на тему: «Математические методы обработки изображений
пористых сред при отсутствии размеченных данных»
по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ»**

Диссертационная работа Лаврухина Е.В. посвящена исследованию и разработке методов обработки изображений пористых сред. В ней рассматриваются методы, применимые в случаях, когда невозможно воспользоваться стандартными подходами машинного обучения из-за отсутствия размеченных данных.

В современном исследовании свойств пористых сред широко используются неинвазивные методы получения информации, такие как компьютерная томография. В результате применения этих методов, как правило, получаются изображения пористой среды в градациях серого. Обработка таких изображений включает множество рутинных задач, включая сегментацию и категоризацию, что в конечном итоге приводит к созданию воксельной модели пористой среды. Качество этой воксельной модели критически важно для любых последующих моделирований. Таким образом, выбранная тема диссертационного исследования является актуальной, так как предложенные в данной работе методы позволяют эффективно решать вышеупомянутые задачи обработки изображений пористых сред.

Работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 169 страниц. Список литературы содержит 187 наименований. Во **введении** формулируются цели диссертационной работы, обосновывается актуальность работы, кратко рассматриваются задачи и полученные результаты.

Первая глава является вводной, в ней даются основные определения и вводятся формулы для работы с корреляционными функциями, которые будут использоваться в следующих главах.

Вторая глава посвящена задаче сжатия представления изображения пористой среды. Предлагаемый автором подход основан на использовании в качестве исходного признакового представления набора корреляционных функций, рассчитанных по ортогональным направлениям. Данное представление затем аппроксимируется с помощью выпуклой комбинации небольшого набора настраиваемых базисных функций. В качестве итогового дескриптора предлагается использовать вектор из коэффициентов выпуклой комбинации и параметров базисных функций. Значения компонентов дескриптора получаются с помощью численного решения задачи минимизации суммы квадратов отклонений между исходной корреляционной функцией и ее аппроксимацией. В главе приведено исследование разработанного метода на реальных изображениях почв и показано, что предложенный способ аппроксимации достаточно точно приближает значения исходных корреляционных функций, и при этом дескрипторы, соответствующие образцам почвы с похожей структурой, находятся на меньшем расстоянии друг от друга, чем дескрипторы образцов с отличающейся структурой.

В третьей главе рассматривается задача выделения однородных областей на сегментированном изображении пористой среды. Для решения данной задачи автор предлагает метод, основанный на кластеризации дескрипторов отдельных пикселей изображения. Дескрипторы пикселя строятся по фрагменту изображения фиксированного размера, для которого рассматриваемый пиксель является центральным, и представляют из себя конкатенацию рассчитанных векторов некоторого набора корреляционных функций. Существенность полученной кластеризации определяется с помощью двух предложенных эмпирических критериев, основанных на расстоянии в пространстве дескрипторов между центрами получившихся кластеров и между отдельными фрагментами изображения и изображением целиком. Далее в тексте приведено исследование описанного метода на различных типах данных: синтетических изображениях, полученных с

помощью использования различных геометрических примитивов, и широкому набору реальных изображений пористых сред.

В **четвертой** главе исследуется проблема сегментации КТ-изображений пористых сред. Дан краткий обзор существующих методов сегментации, которые не используют обучающие данные, описан подход с использованием сверточных нейронных сетей. Описаны классические метрики оценки качества сегментации и метрика на основе результатов моделирования проницаемости, предложена метрика качества на основе разницы в значениях корреляционных функций. Далее в главе предлагается метод сегментации, который заключается в обучении модели сверточной нейронной сети на искусственной разметке. Данная разметка получается в результате применения методов, не требующих обучающих данных. Таким образом предлагается уйти от необходимости полностью ручной разметки оператором. В заключительной части главы проводится подробный анализ качества предложенного метода сегментации с использованием классических и доменных метрик, показывается согласованность различных типов метрик качества между собой, производится интерпретация причин ошибок сегментации при помощи отличий в корреляционных функциях между обучающим и тестовым образцами.

Пятая глава посвящена задаче построения искусственного изображения КТ пористой среды по некоторой упрощенной модели структуры образца пористой среды. Автор описывает разработанную модификацию физико-математической модели поглощения тела пористой среды, которая позволяет учитывать различие в поглощении материалов фаз, и численный метод получения результирующего снимка КТ. Описываются варианты постобработки построенного искусственного КТ снимка. Приводится сравнение предложенного метода с ранее опубликованными аналогами. Далее автор использует предложенный метод синтетической томографии для проведения исследования о зависимости качества сегментации с помощью наперед обученной нейросетевой модели от морфологических свойств

тестовых данных. В заключительной части главы автор приводит описание универсального процесса обучения модели сегментации с использованием предложенного метода синтетической томографии.

В **шестой** главе описывается программный комплекс, в котором реализованы методы, описанные в предыдущих главах работы: методы сегментации изображения пористых сред, метод выделения однородных областей изображения пористых сред в градациях серого, метод построения синтетической томографии по изображению с пространственным распределением фаз и информации о физических свойствах фаз. Данный комплекс позволяет проводить первичного анализа КТ ядра в следующей последовательности: сначала выделяются репрезентативные участки ядра для исследования на других масштабах, затем с помощью модуля синтетической томографии производится настройка параметров метода сегментации и далее производится сегментация КТ области интереса с использованием оптимальных значений параметров. В тексте описаны нюансы алгоритмической и программной реализации методов на языке Python с использованием отдельных вычислительных библиотек и библиотек машинного обучения.

В **заключении** формулируются основные результаты работы.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов обеспечена согласованностью построенных моделей и используемых данных, подробным изложением серий проведенных вычислительных экспериментов для искусственных и реальных образцов пористых сред различной природы, согласованностью результатов экспериментов с итоговыми выводами.

Новизна данной работы заключается в разработке новых методов обработки изображений пористых сред с использованием корреляционных функций в качестве дескрипторов изображения. Результаты исследований зависимости качества сегментации с помощью наперед обученных моделей от морфологического строения порового пространства входных изображений,

которые были проведены с помощью реализованных в работе методов, также являются новыми.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что предложенные в рамках работы методы и подходы могут быть использованы для решения актуальных задач анализа изображений пористых сред, при этом данные методы имеют допустимую вычислительную сложность для того, чтобы стать основой применимой на практике технологии.

Основные результаты опубликованы в 9 публикациях, из них 4 – в изданиях WoS, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности 1.2.2, 5 работ опубликованы в прочих изданиях. По результатам работы зарегистрировано две программы для ЭВМ.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

В качестве замечаний к содержанию и оформлению данной работы можно отметить следующее:

1. В третьей главе описан метод выделения однородных областей на сегментированном изображении пористой среды, опирающийся на кластеризацию дескрипторов пикселей; однако данный метод может быть чувствителен к шуму и зависеть от выбора корреляционных функций. Было бы полезно более детально обсудить выбор этих функций и меры для повышения устойчивости метода к шумам и вариациям. Также следует представить дополнительные метрики валидации для подтверждения устойчивости и точности кластеризации на изображениях с различными уровнями шума и геометрической сложностью.

2. В четвертой главе предлагаемый метод сегментации основан на обучении моделей сверточных нейронных сетей на искусственной разметке. Была бы полезна более подробная оценка и сравнение модели Attention U-Net, которая сочетает в себе успешную архитектуру U-Net с механизмами

внимания для улучшения точности сегментации. Исследование этой модели могло бы предоставить дополнительные инсайты и повысить качество предложенного метода за счёт более точного выделения ключевых регионов на изображениях пористых сред.

3. В пятой главе представлен численный алгоритм построения синтетической томографии и сравнение различных методов создания таких изображений. Однако, было бы полезно дополнительно обсудить генеративные нейросетевые подходы, такие как генеративно-сопоставительные сети (GAN), которые могут улучшить качество синтетических данных. Их включение могло бы повысить реалистичность и надёжность синтетических КТ-изображений и моделей сегментации.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Лаврухин Ефим Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
Старший научный сотрудник
Сколковского института науки и технологий

ЖИЛЯЕВ Петр Александрович

17.06.2024

Контактные данные:

тел.: 7(926)108-56-88, e-mail: p.zhilyaev@skoltech.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

121205, г.Москва, Большой бульвар, д.30, стр.1
Сколковский институт науки и технологий
Тел.: 7(926)108-56-88; e-mail: p.zhilyaev@skoltech.ru

Подпись Жилыева П.А. - шефсервис
Руководитель отдела
Кадрового администрирования
Гук О.С.