

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Лаврухина Ефима Валерьевича

**«Математические методы обработки изображений пористых сред при  
отсутствии размеченных данных»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук

по специальности

1.2.2, «математическое моделирование, численные методы и комплексы  
программ»

Актуальность работы. Развитие методов рентгеновской томографии исследования внутренней структуры пористых материалов (горных пород, почв, искусственных материалов) в последние десять-пятнадцать лет позволило перейти на принципиально новый уровень исследования физических свойств таких материалов. В частности, в приложении к петрофизике это направление получило название «цифровой керн». Эта технология включает несколько этапов. Во-первых, непосредственно подготовка образцов породы и проведение съемки с получением микротомографических изображений. Во-вторых, обработка изображений и построение цифровой модели порового пространства и матрицы породы. В-третьих, численное моделирование различных физических процессов на масштабе пор с последующей оценкой «эффективных» петрофизических параметров, таких как проницаемость, удельное электрическое сопротивление, упругие модули и пр. При этом обработка изображений, их сегментация и построение структурных моделей существенно влияет на точность получаемых оценок эффективных параметров. Более того,

применение методов цифрового апскейлинга невозможно проводить без предварительной оценки репрезентативности и статистической однородности рассматриваемого образца, в противном случае получаемый результат будет лишь одним из частных случаев без возможности обобщения. На решение именно этих двух задач: оценка статистических свойств изображений и проведение их сегментации для построения структурных моделей, направлена диссертационная работа Лаврухина Е.В.

Следует подчеркнуть высокую научную и практическую значимость предлагаемых автором алгоритмов, которые являются частью разрабатываемого при поддержке ПАО «НК «Роснефть» программного комплекса.

Новизна работы подчёркивается проработкой целого ряда ранее не решенных задач. В первую очередь это анализ неоднородности структуры по изображениям. Здесь автором на основе анализа изображений, полученных с помощью статистически однородного стохастического процесса, предложен новый эмпирический критерий однородности.

Анализ структуры диссертации. Работа состоит из введения, шести глав и заключения.

Первая глава является вводной, в ней приводятся основные понятия.

Вторая глава посвящена построению корреляционных функций, которые бы с достаточной точностью описывали внутреннюю структуру пористой среды, рассматриваемой как случайное поле. Автору удалось показать, что для описания порового пространства типичных осадочных горных пород достаточно использования не более 100 дескрипторов, при

размерности исходного изображения  $10^9$  вокселей. С одной стороны, предложенный подход позволяет сократить размерность пространства моделей, с другой стороны, проводить количественный анализ схожести моделей.

Третья глава – применение корреляционных функций для выделения статистически однородных подобластей в микротомографическом изображении.

В четвертой главе приводится алгоритм сегментирования микротомографических изображений, основанный на методах машинного обучения. Важным и оригинальным аспектом алгоритма является то, что при нейросетевом моделировании используются введенные ранее автором метрики в пространстве дескрипторов, что позволило существенно повысить качество сегментации изображений горных пород и почв.

Пятая глава посвящена разработке алгоритма численного моделирования микротомографических изображений по сегментированным изображениям. Алгоритм достаточно прост и производителен, что позволяет применять его для верификации получаемых сегментированных изображений.

Краткое описание программных реализаций описанных алгоритмов приводится в шестой главе.

Достоверность результатов подтверждается приведенными в работе результатами серий численных экспериментов на реальных и модельных микротомографических изображениях горной породы.

Основные результаты опубликованы в четырех статьях – все из базы WoS, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности 1.2.2. Также автором зарегистрированы права на две программы для ЭВМ.

Автореферат диссертации включает в себя основные аспекты работы и достаточно точно и полно отражает ее содержание.

К сожалению, у работы есть ряд недостатков:

1. Подробное деление работы на главы выглядит избыточным. Фактически, в работе решаются две задачи: статистический анализ изображений и его применение для классификации и кластеризации изображений (главы 2 и 3) и сегментация изображений (главы 4 и 5). При этом программная реализация может быть отнесена к конкретному алгоритму, не обязательно выделять для этого отдельную главу. Также глава 1 может быть частью главы 2.
2. Автор местами неаккуратно оперирует терминами:
  - а. Глава 1, стр. 12. В первом абзаце дается определение пористой среды, как материала со значительным поровым пространством. Но поровое пространство, в свою очередь, не определяется.
  - б. Страница 19. Свойство «изотропность», сформулированное автором, на самом деле является статистической однородностью, а не изотропией, для изотропии необходима инвариантность относительно ортогонального преобразования, а не сдвига. При этом для расчета двухточечных статистик, вводимых ниже, изотропность важна, поскольку предполагается, что корреляционная функция зависит только от расстояния между точками и не зависит от направления.
  - с. Автор использует термины «матрицы» и «тензоры» для обозначения изображений. Тензоры – это вполне определённые объекты со своими свойствами, которые для изображений не определены. Авторы имеют дело с сеточными функциями.
3. Формулы 3.4 – 3.6. В формулах выбраны неудачные обозначения, которые могут ввести в заблуждение, так как они меняются от формулы

к формуле: сначала используются заглавные буквы  $V$ , потом строчные  $v$ , а позднее появляются  $a$  и  $b$ .

4. Глава 3, стр. 60. Утверждение, что при кластеризации используется метрика на основе нормы  $L_2$ , «которое является, фактически, расстоянием  $L_1$ », мне не понятно. Более того, возникают вопросы к кластеризации. В классической постановке, K-means требует определения «центра масс» кластера, то есть построения объекта, который был бы средним в кластере в выбранной метрике. При этом метрика может быть любая. Про построение среднего элемента в работе не говорится. K-means можно модифицировать, используя только существующие элементы, но тогда сходимость не гарантирована. Однако в этом случае можно использовать заранее рассчитанную матрицу расстояний, и вновь, абсолютно не важно в какой метрике работать.

Замечания относятся, в основном, к форме подачи материала, которая не влияет на высокую научную значимость результатов, полученных автором.

Диссертация соответствует требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова. Содержание диссертации соответствует паспорту 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, на соискание ученой степени доктора 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:

Доктор физико-математических наук,

Заведующий лабораторией Вычислительной физики горных пород

Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

Лисица Вадим Викторович

14.06.2024



Контактные данные:

Тел.: +7 383 330 1337, email: [lisitsavv@ipgg.sbras.ru](mailto:lisitsavv@ipgg.sbras.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:  
05.13.18 - «математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Адрес места работы:

630090, Новосибирск, пр. Коптюга д. 3, ИНГТ СО РАН

Тел.: +7 383 330 1337, email: [lisitsavv@ipgg.sbras.ru](mailto:lisitsavv@ipgg.sbras.ru)

Подпись зав. лаб. Вычислительной физики горных пород ИНГТ СО РАН

Лисицы Вадима Викторовича заверяю

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ  
Зав. канцелярии  
14.06.2024

