

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Индакова Глеба Сергеевича
на тему: «Термостимулированная акустическая эмиссия в горных
породах и ее связь с микроструктурой»
по специальности 1.6.9. Геофизика**

Диссертация Глеба Сергеевича Индакова посвящена изучению особенностей разрушения горных пород под действием высоких температур. Основным направлением исследований является анализ и сопоставление данных регистрации акустической эмиссии, излучаемой в процессе деформирования и термостимулированного разрушения образцов горной породы в лаборатории, с результатами изучения микроструктуры геоматериала.

Цель работы автор формулирует как «выявление возможной взаимосвязи между особенностями термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) в образцах горных пород и параметрами их микроструктуры».

Несмотря на то, что термическому разрушению геоматериалов посвящено довольно много работ (достаточно упомянуть крупный цикл работ, выполненных в МИСИСе (ранее МГГУ) под руководством В.Л. Шкуратника) вопросы взаимосвязи параметров процесса разрушения, акустической эмиссии и микроструктуры материала остались практически вне внимания исследователей. Между тем, этот вопрос является важным для ряда направлений геофизики и механики горных пород, например при построении моделей механического поведения горных пород на сейсмогенных глубинах, в основаниях вулканических систем, в зонах температурных аномалий. В прикладном плане тема является важной для ряда направлений инжиниринга: построения систем мониторинга подземных инженерных сооружений, подверженных действию высоких температур, например, захоронений радиоактивных отходов; оптимизация технологий термического воздействия на пласт при разработке месторождений вязких

нефть и т.д. Вышесказанное определяет **актуальность** выбранной темы ее **теоретическую и практическую значимость**.

Для достижения поставленной цели, в диссертации сформулирован ряд задач, которые последовательно решались в ходе исследования и описаны в тексте диссертации. Основными задачами являлись:

- Разработка методики и получение данных о статистических параметрах микроструктуры горных пород образовавшихся в процессе метаморфизма при разных р-Т условиях из близких по составу пород. Их верификация дополнительными методами.
- Получение в лабораторном эксперименте и обработка набора статистически представительного материала по ТАЭ для образцов из модельного материала и из горных пород различного типа и генезиса.
- Сравнительный анализ различных параметров ТАЭ, а также микроструктурных параметров для исследованных образцов. Выявление закономерных связей параметров и их объяснение.

Работа основывается на обширном материале, полученном в лабораторных экспериментах, его анализе с привлечением различных современных методик, включающих традиционные статистические подходы сейсмологии, использование алгоритмов машинного обучения, обработку изображений и т.д.

Решение поставленных задач позволило развить оригинальную комплексную методологию совместного анализа данных акустической эмиссии и сведений о микроструктуре материала и достичь поставленной цели – исследовать связь характеристик ТАЭ в образцах горных пород и параметров микроструктуры материала.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 152 страницы, в том числе 13 таблиц и

32 рисунка. Список использованных источников включает 169 наименований.

Работа построена по классической схеме: литературный обзор, описание методических вопросов проведения лабораторных экспериментов, методов и подходов к обработке и анализу получаемых данных, изложение результатов и их обсуждение, заключение.

Во **Введении** описываются актуальность избранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, объект и предмет исследования, теоретическая и практическая значимость, используемые подходы и методы, приводится перечень публикаций автора по теме исследования и список положений, выносимых на защиту.

Сформулированные **защищаемые положения** корректны, обладают необходимой новизной и научной значимостью.

Первая глава содержит подробный аналитический обзор научных публикаций, посвящённых лабораторному изучению механизмов разрушения горных пород и свойств. Основные акценты в обзоре сделаны на методах акустической эмиссии и оптической микроскопии. Рассмотрены основные особенности использования акусто-эмиссионного метода в лабораторных экспериментах по термическому и механическому воздействию на образцы горных пород. Приведено детальное описание подходов к анализу распределения по размерам элементов микроструктуры геоматериалов. Этот раздел демонстрирует вовлеченность автора в тематику работы и позволяет составить представление о современном состоянии исследований по теме диссертации.

Вторая глава диссертации посвящена методическим вопросам. В разделе приведено описание образцов горных пород - гранитов, базальтов, метапесчаников, песчаников - и модельных материалов, использованных в экспериментах. Предполагается, что образцы метапесчаников, изначально имевшие схожий состав, претерпели тектоно-термальные преобразования

при различных Р-Т условиях. (Согласно [Великославинский, 1971] диапазон температур 350°C - 750°C при изменении глубины – от 4 до 13 км). Кратко описана методика проведения экспериментов по термическому воздействию – экспериментальная установка, методика регистрации и первичной обработки сигналов АЭ и другие, методики, используемые для обработки первичных данных - оценки размеров зерен образцов породы, оптическая и электронная микроскопия, широкополосная акустическая спектроскопия.

В третьей главе детально рассмотрены методики расчета параметров акустической эмиссии, анализируемые в рамках диссертационного исследования. Описана физическая интерпретация параметров импульса АЭ. По аналогии с сейсмологией, где используется закон повторяемости как по магнитудам, так и по энергиям событий, в диссертации описан переход от распределения по амплитудам импульсов, к распределению по энергиям и обратно. Описана методика оценки параметра b для лабораторных данных разными методами, основным из которых является метод максимального правдоподобия для цензурированной выборки. В разделе 3.4 описаны подходы, описывающие применение нескольких стандартных, имеющихся в открытом доступе, методов машинного обучения для анализа кластеризации импульсов термостимулированной акустической эмиссии по характеристикам их сигналов. В числе прочего, эти методы использованы для проверки результатов взаимнокорреляционного анализа волновых форм и уточнения распределения источников в объеме образца. Вопрос группирования источников с одинаковыми волновыми формами представляет большой интерес как в механике разрушения геоматериалов, так и в «большой» сейсмологии, где рассмотрение, так называемых, «повторных» землетрясений приобретает все большее значение при описании процессов в очаговых областях землетрясений.

Раздел 4 также носит методический характер. В нем описаны методы определения микроструктурных параметров метапесчаников на основе микрофотографий шлифов. Рассмотрены и сопоставлены несколько методов

оценки распределения размеров зерен, основным из которых являлся метод пересечения опорных линий. Для применения метода к анализу изображений горных пород автором было разработано специализированное программное обеспечение. Описаны процедуры предобработки изображений и вычисления статистических характеристик распределений. Результаты оценок размеров зерен по оптическим изображениям сопоставлены с данными метода широкополосной акустической спектроскопии и электронно-микроскопическими снимками, что позволило подтвердить корректность используемого подхода.

В заключительном **пятом разделе** диссертации приведены результаты применения для анализа полученных экспериментальных данных, методов обработки описанных и развитых в разделах 2-4 диссертации.

Проведенный анализ результатов показал, что для гранитов и базальтов наблюдается тенденция уменьшения наклона графика повторяемости с ростом активности. Предложена интерпретация этого результата в рамках модели ЛНТ. Параметры ТАЭ для образцов метапесчаников и искусственных образцов не показывают зависимости от типа активности. Автор интерпретирует этот результат в рамках предположения о диффузном характере разрушения, без локализации процессов разрушения. Этот результат, который обладает несомненной новизной, обосновывает **первое защищаемое положение**, в котором содержится утверждение о различии особенностей термически стимулированной акустической эмиссии при нагреве для различных типов пород.

В разделе 5.3 рассмотрено тестирование ML моделей в задачах классификации, поиска аномалий, кластеризации. К сожалению, результаты свелись к простой констатации факта применения без детального анализа и подробного обоснования преимуществ и недостатков того или иного метода.

В разделе 5.4 диссертант приводит краткое обсуждение полученных результатов и соотносит их с представлениями механики разрушения.

Показано, что для метапесчаников связь между размером зерна и наклоном графика повторяемости отсутствует, тогда как для модельной горной породы увеличение среднего размера зерна сопровождается снижением *b*-value. В работе впервые сопоставлены статистические параметры разрушения со средним размером зерна, как характеристикой микроструктуры. В диссертации выявленные различия между метапесчаниками и искусственными образцами связываются с микроструктурой геоматериала. Полученные данные обосновывают **второе защищаемое положение**.

Проведенный в заключительном разделе анализ взаимной корреляции волновых форм импульсов акустической эмиссии, позволяет автору заключить, что при отсутствии в образце крупных дефектов в нем не происходит формирования преимущественных зон локализации деформации, а основной вклад в термически стимулированную акустическую эмиссию вносят распределенные источники. Этот результат обосновывает **третье защищаемое положение**.

Достоверность результатов исследования не вызывает сомнений. В работе использовались современные методы проведения лабораторного эксперимента, высококачественная система регистрации импульсов АЭ, многократно апробированные методы оптической и электронной микроскопии. Для обработки данных использовалось как сертифицированное программное обеспечение, так и программы собственной разработки.

Полученные результаты обладают необходимой новизной, теоретической и практической значимостью. Установленные закономерные связи статистических параметров ТАЭ с особенностями развития разрушения различных горных пород при термическом воздействии могут быть использованы при построении теоретических моделей деформирования и

разрушения горных пород в условиях высоких температур. В практическом плане полученные знания могут быть полезны при создании систем мониторинга в целом ряде областей техники.

В целом работа заслуживает высокой оценки. Однако, как и любая другая, диссертация не лишена недостатков.

1. По нашему мнению раздел 1 (литературный обзор) занимает неоправданно значительную часть рукописи с 15 по 48 страницы, что составляет более 30% содержательной части диссертации. При этом, автор упустил из виду целый ряд работ хорошо ему известных российских авторов. Например, в части исследования связи структуры и акустической эмиссии: Дамаскинская и др., ФТТ;2022. Т. 64. № 4. С. 455-461. ФТТ 2021 Т.63. №1, С.103-109; 2018. Т. 60. № 7. С. 1353-1357; Пантелеев и др. Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 4. С. 64-73. Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 4. С. 56-63.

В части физической интерпретации параметров импульса АЭ – цикл работ К.Г. Морозовой и А.А. Остапчука (Scientific Reports. 2020. Т. 10. № 1. С. 7245; Acta Acustica united with Acustica. 2019. Т. 105. № 5. С. 759-765 Scientific Reports. 2020. Т. 10. № 1. С. 7245 и др.).

Кроме того, анализ работ предшественников обычно проводится с целью формулировки задач собственного исследования. Эта цель несколько «утонула» в ходе обсуждения деталей существующих подходов

2. В тексте не всегда четко указано, что сделано лично диссидентом. Так, например, из текста неясно участвовал ли автор в работах по отбору и анализу образцов или только использовал их в экспериментах.

3. Ряд тривиальных выкладок можно было бы опустить, например алгебраические преобразования на стр.65.

4. Описание метода максимального правдоподобия для цензурированной выборки приведено в довольно давней работе руководителя (Потанина, Смирнов, Бернар, ФЗ., 2011). Все выкладки в разделе 3.2.4 дословно

затемствованы, хотя и корректно, с приведением ссылки, в этой работе. На наш взгляд, переписывать все эти соотношения не имело смысла.

Такие ограхи как п.п.3 и 4 мешают сконцентрироваться на содержании при внимательном прочтении текста.

5. В работе представлено и использовано значительное число алгоритмов и критериев. Автор не обосновывает использование выбранных алгоритмов и не отмечает их методического различия. Выбор любого алгоритма, особенно это касается методов машинного обучения, должен быть обоснован с учетом имеющихся, пусть не полных, сведений о физике процесса. Несомненно, можно использовать широкий набор алгоритмов без обоснования выбора, но тогда целеполаганием должен стать поиск наиболее эффективного алгоритма. Однако результаты использования разных алгоритмов свелись в диссертации к констатации факта применения с минимальным анализом эффективности.

Указанные в отзыве замечания не снижают положительного впечатления от работы. Диссертация написана хорошим литературным языком и содержит минимальное количество опечаток.

По теме диссертационного исследования опубликовано 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук. Основные результаты и положения исследования были апробированы в докладах на 19 международных и всероссийских

Заключение.

Диссертация Г.С. Индакова отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации полностью соответствует специальности 1.6.9 Геофизика (физико-математические науки) в части п.п.13 и 14 паспорта специальности, а также критериям, определенным пп.

2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено 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».

Автор диссертации, соискатель Индаков Глеб Сергеевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 Геофизика.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории деформационных процессов в земной коре ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН
доктор физико-математических наук, профессор
КОЧАРЯН Геворг Грантович

27.11.2025

Контактные данные:

тел.: +7(495) 939-79-34, e-mail: kocharyan.gg@idg.ras.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
зашита диссертация:
01.04.12 Геофизика

Адрес места работы:

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 38, корпус 1,
ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН
тел.: +7(499) 137-66-11, e-mail: geospheres@idg.ras.ru

Подпись сотрудника ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика
М.А. Садовского РАН
Геворга Грантovichа Кочаряна удостоверяю:

Ученый секретарь ИДГ РАН
кандидат физ.-мат. наук

Д.Н. Локтев
27.11.2025