

**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**

Актуальность диссертационной работы определяется важностью исследования мало изученных вопросов геофизики, связанных с развитием термического разрушения. Ответы на них важны с теоретической и практической точек зрения, так как развитие фундаментальных представлений о поведении горных пород при высокотемпературном воздействии сопряжено с улучшением понимания процессов подготовки вулканических землетрясений, развитием методов добычи углеводородов, строительства пожаростойких сооружений и др. Работа посвящена активно разрабатываемой на сегодняшний день теме о взаимосвязи между различными параметрами развития разрушения в горных породах и параметрами, характеризующими свойства породы. Кроме того, особенно важным представляется развитие методов анализа лабораторных данных в экспериментах по нагреву комплексным подходом, сочетающим методы сейсмологии для анализа статистики импульсов акустической эмиссии и микроскопии для анализа микроструктуры.

Целью работы является выявление возможной взаимосвязи между особенностями термически стимулированной акустической эмиссии в образцах горных пород и параметрами их микроструктуры. Для выполнения этой цели автором были сформулированы **задачи исследования**, включающие:

1. Отбор лабораторных данных для анализа, включающий рассмотрение горных пород разных типов и изготовление модельных пород из гипса с примесью песка для проверки основной гипотезы исследования о связи между размером зерна и параметрами разрушения.

2. Подбор наиболее подходящих методов, их адаптация к исследованию проблематики термически стимулированного разрушения горных пород и сопутствующих изменений их петрофизических свойств, верификация результатов.

3. Расчет выбранных параметров, сравнение и интерпретация результатов.

Сформулированные задачи представляются значимыми и актуальными.

Содержание работы. Диссертация Г.С. Индакова изложена на 152 страницах печатного текста, включает 13 таблиц и 32 рисунка, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, в котором содержится 169 источников.

Во введении обосновывается актуальность темы, приводятся цели и задачи исследования, научная новизна, описываются объект и предмет исследования, его теоретическая и практическая значимость, приводятся сведения о методологии, публикациях, личном вкладе автора и формулируются защищаемые положения.

Глава 1 посвящена обзору литературы по теме лабораторного изучения процессов разрушения горных пород и их свойств с акцентом на методах исследования, применимых в данной работе. Автором рассмотрены методы исследования трещиноватости горных пород, включающие методы определения минерального состава и структурных свойств образцов, акустико-эмиссионный метод, ультразвуковые методы и др. Приведен обзор экспериментальных подходов к механическому и термическому воздействию на образцы горных пород, обсуждены способы интерпретации изменений скоростей упругих волн и результатов дифракционных методов для оценки развивающихся сетей трещин. В обзоре также рассмотрены типовые стадии термического трещинообразования, вклад различных источников в термически стимулированную акустическую эмиссию и проанализированы работы, в которых исследуется кластеризуемость событий акустической

эмиссии, что позволяет делать выводы о развитии крупного нарушения в материале.

Сделанный в диссертации обзор производит самое благоприятное впечатление. Автор диссертации детально изучил литературу по теме диссертации и в сжатой, но весьма информативной форме изложил главные результаты, полученные ранее, сославшись на большое количество литературных источников.

В главе 2 приводится описание экспериментального материала и методики проведения экспериментов. Подробно описаны данные по образцам горных пород различных типов: гранитам, базальтам, метапесчаникам (метатерригенным горным породам Северного Приладожья, характеризующимся различными глубинами и температурами метаморфизма), песчаникам и гипсово-песчаным образцам, которые были подготовлены автором для исследования вопроса о наличии взаимосвязи между статистическими параметрами разрушения и микроструктурными особенностями породы. Для образцов метапесчаников, для которых выполнено многопараметрическое исследование с привлечением данных о микроструктуре и p - T условиях метаморфизма, приведены подробные сведения о составе и месте отбора образцов, что обуславливает высокую степень достоверности используемых в работе данных. Для термического воздействия на образцы горных пород использовалась экспериментальная установка с единственным датчиком акустической эмиссии, из-за чего в работе не анализировалось распределение источников импульсов напрямую. Исследование микроструктуры образцов метапесчаников выполнено с использованием методов оптической микроскопии, электронной микроскопии и акустической спектроскопии. Для анализа, главным образом, использованы оптические снимки микроструктуры, в то время как остальные методы использованы для проверки результатов.

В главе 3 обсуждаются параметры термически стимулированной акустической эмиссии, такие как активность акустической эмиссии и наклон

графика повторяемости. Автор подробно описывает методику оценки наклона графика повторяемости применительно к данным лабораторного эксперимента, для расчета используется три метода: линейной регрессии, метод максимального правдоподобия с оценкой представительной магнитуды по максимальной кривизне и для цензурированной выборки. Кроме этого, в работе рассматриваются вторичные параметры акустического сигнала, основными из которых выступают средняя частота и угол нарастания, которые часто используются для классификации трещин по типу происхождения (сдвиг/растяжение). Интересной особенностью работы является исследование группируемости импульсов методами машинного обучения, которое используется для валидации результатов взаимнокорреляционного анализа волновых форм сигналов акустической эмиссии.

Глава 4 содержит информацию об оценке параметров микроструктуры метапесчаников на основе анализа оптических микрофотографий в поляризованном и неполяризованном свете. Рассмотрены методы ручной оценки, пересечения опорных линий и случайного бросания точек с построением из них ориентированных опорных отрезков. В качестве основного метода для обработки всего массива имеющегося материала выбран метод пересечения опорных линий, для использования которого применительно к данным по горным породам автором было разработано специализированное ПО. Проведено сравнение методов для данных нескольких образцов, результаты сопоставлены с оценкой среднего размера зерна по методу широкополосной акустической спектроскопии.

Результаты применения методов к данным по горным породам и рассчитанные значения для всех описанных в первых четырех главах параметров приведены в **главе 5**.

Положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованы и касаются особенностей термически стимулированного разрушения, выявленных на основе разнопланового анализа экспериментального материала. **Первое защищаемое положение** «для гранитов и базальтов средняя активность

акустической эмиссии и наклон графика повторяемости взаимосвязаны, для метапесчаников и искусственной породы эти параметры не связаны друг с другом» находит подтверждение в различном поведении параметров наклона графика повторяемости и активности акустической эмиссии для горных пород разных типов, что может являться существенным результатом с точки зрения сопоставления с натурными данными и данными других лабораторных экспериментов. Полученные результаты дают важную информацию для развития представлений о термостимулированном разрушении.

Второе защищаемое положение касается центрального вопроса диссертационного исследования, ответ на который оказывается различным для разных пород. Результаты показывают, что в то время, как для метапесчаников не наблюдается взаимосвязи между размером частиц и параметром наклона графика повторяемости, для искусственной породы наблюдается уменьшение наклона графика повторяемости при увеличении среднего размера зерна. Непосредственное сопоставление статистических параметров разрушения и среднего размера зерна характеризуется научной новизной. Методические рекомендации автора по теме оценки размера зерен горных пород представляются важными с точки зрения практического использования в научных лабораториях.

Третье защищаемое положение дает общую характеристику процессу термически стимулированного разрушения, которая заключается в том, что развитие трещин происходит преимущественно равномерно во всем объеме породы, области локализации процесса разрушения при отсутствии крупных дефектов отсутствуют. Для подтверждения этого положения использован подход, основанный на взаимной корреляции волновых форм импульсов с последующей проверкой результата методами машинного обучения. Выводы автора подтверждают современные представления о развитии разрушения породы при воздействии высоких температур, а использованные методы развивают акустико-эмиссионный подход к анализу процессов разрушения в геофизике.

Следует выделить главные, по мнению оппонента, элементы **новизны исследования**. В диссертации впервые показано, что при термическом разрушении заранее сформированные крупные трещины в образцах формируют группы импульсов термически стимулированной акустической эмиссии, которые схожи по волновым формам и параметрам, в то время как в образцах без трещин таких групп не наблюдается. Также впервые показано, что активность акустической эмиссии и величина b -value для метапесчаников не коррелируют со средним размером зерен.

Практическая значимость работы состоит в адаптации методов анализа сейсмологических данных для данных лабораторных экспериментов по термическому воздействию, а также развитии методов микроструктурного анализа горных пород на основе оптических микрофотографий шлифов.

Достоверность научных выводов в работе обеспечена применяемыми методами исследований. В частности, данные о термическом разрушении получены акустико-эмиссионным методом с использованием нагревательной установки с контролем параметров воздействия и системы регистрации импульсов. Для обработки временных сигналов применялся амплитудный, спектральный, корреляционный анализ. Обработка многопараметрических данных проведена методами машинного обучения, включающими классификационные подходы, поиск аномалий и кластеризацию. Анализ микроструктуры проведен на основе обработки изображений на оптическом микроскопе с помощью разработанного автором программного обеспечения. Верификация полученных величин была проведена методом акустической спектроскопии с учетом данных сканирующей электронной микроскопии.

В целом работа оставляет самое благоприятное впечатление. Вместе с тем, по работе имеется несколько **вопросов и замечаний**:

1. В работе целый раздел 3.2.2 посвящен оценке параметра b закона Гутенберга-Рихтера методом линейной регрессии. Совершенно не понятно, зачем этот раздел приведен и почему вообще этот метод оценки приведен для части экспериментов, когда для другой части экспериментов используется, как

утверждает автор, метод максимального правдоподобия. Метод линейной регрессии не применим для оценки параметра b , поскольку ошибки сравниваемых величин сильно зависят от значений этих величин.

2. Раздел 3.2.3 ошибочно назван «Оценка максимального правдоподобия по максимальной кривизне». В разделе описан модифицированный метод Аки для оценки параметра b и метод максимальной кривизны для оценки представительной магнитуды. При этом оценка методом Аки лишь при некоторых условиях совпадает с оценкой методом максимального правдоподобия, и ее нельзя назвать оценкой максимального правдоподобия. Оппоненту не ясно, зачем вообще описаны два метода, когда основным в использовании и правильным был метод, описанный в разделе 3.2.4.

3. В начале раздела 3.2.4 содержится, по-видимому, опечатка. Утверждается, что оценка b -value методами линейной регрессии и по модифицированной формуле Аки производится в оптимальном диапазоне, и что события с амплитудой, большей максимальной в этом диапазоне, не учитываются, что приводит к занижению оценки b -value. Поэтому оценка b -value по цензурированной выборке для данных ТАЭ может интерпретироваться как оценка «снизу». По-видимому, имелось в виду, что оценками снизу могут являться оценки по линейной регрессии и по Аки. Замечу также, что для цензурированных выборок, о которых здесь шла речь, формула Аки вообще не применима.

4. Возможно, термин «датасет» в очень специальной русскоязычной литературе допустим, но в данной диссертации легко заменим на «выборка» или «набор данных».

Указанные замечания носят частный характер и не влияют на общую весьма положительную оценку работы Г.С. Индакова. Диссертационная работа хорошо структурирована, содержание отличается новизной, достоверностью и полностью раскрывает тему исследования. Основные результаты диссертационной работы изложены в 4 статьях в рецензируемых

научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук. Отдельно стоит отметить широкую апробацию результатов: доклады по теме диссертационного исследования были представлены на 19 международных и всероссийских конференциях.

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), 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.

Таким образом, что соискатель Индаков Глеб Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 Геофизика.

Официальный оппонент:

директор ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук
ШЕБАЛИН Петр Николаевич

25.11.2025

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 333-45-13, e-mail: shebalin@mitp.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики

тел.: +7 (495) 333-45-13, e-mail: shebalin@mitp.ru

Подпись сотрудника ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики

Петра Николаевича Шебалина удостоверяю: