

**ОТЗЫВ**  
**на автореферат диссертации Индакова Глеба Сергеевича**  
**«Термостимулированная акустическая эмиссия в горных породах и ее связь с**  
**микроструктурой»,**  
**на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**  
**по специальности 1.6.9 Геофизика**

**Актуальность темы исследования.**

Изучение процессов термического разрушения горных пород критически важно для понимания геодинамических процессов в земной коре, особенно в глубинных зонах и вулканических областях, где породы подвергаются воздействию высоких температур. Существует потребность в выявлении закономерностей и различий между разрушением, вызванным чисто термическим воздействием, и разрушением при механическом нагружении (характерным для сейсмического процесса). Это важно для интерпретации данных мониторинга и понимания природы событий. Однако в настоящее время остаётся открытым вопрос о взаимосвязях между особенностями разрушения, микроструктурными параметрами и петрофизическими характеристиками пород. Работа направлена на заполнение этого пробела.

**Степень обоснованности положений, выносимых на защиту.**

***В работе сформулированы три защищаемых положения***

*Положение 1: Особенности термически стимулированной акустической эмиссии при нагреве различны для разных типов горных пород: 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.*

Положение основано на сравнительном анализе данных, полученных для 33 образцов четырех принципиально разных групп: граниты (6), базальты (5), метапесчаники (15) и искусственные образцы (5). Это обеспечивает репрезентативность выборки. Для всех образцов были рассчитаны единообразные статистические параметры: активность термоакустической эмиссии (ТАЭ) и наклон графика повторяемости (b-value) с использованием верифицированного на практике метода максимального правдоподобия. Для гранитов и базальтов выявлена устойчивая закономерность: снижение b-value с ростом активности. Этот результат интерпретируется в рамках физической модели лавинно-неустойчивого трещинообразования. Для метапесчаников и искусственных образцов подобная устойчивая зависимость отсутствует. Для метапесчаников даже показана возможность противоположного тренда (рост b-value с активностью в некоторых зонах). Таким образом, разница в поведении параметров ТАЭ для разных петрографических типов пород установлена эмпирически, статистически подтверждена и имеет физическое объяснение, что делает первое положение хорошо обоснованным.

*Положение 2: Для метапесчаников, претерпевших метаморфические преобразования при различных р-Т условиях, наклон графика повторяемости импульсов термически стимулированной акустической эмиссии не зависит от размера зерна, в то время как для искусственной породы, не претерпевшей метаморфизма, такая зависимость есть: наклон графика повторяемости уменьшается с ростом размера частиц.*

Положение построено на сопоставлении природных метаморфизованных пород сложного строения и простой искусственной модели. Для метапесчаников размер зерна был точно измерен с помощью разработанной методики на основе использования оптической микроскопии, результаты которой были верифицированы независимым методом акустической спектроскопии. Это исключает ошибки в исходных данных. Для

метапесчаников построена корреляционная матрица, которая показала отсутствие существенной связи между  $b$ -value и средним размером зерна (при этом выявлена сильная корреляция размера зерна с  $p$ -T условиями метаморфизма, что подтверждает качество образцов). Для искусственных образцов четко показана обратная корреляция: увеличение размера частиц песка приводит к снижению  $b$ -value. Автор дает объяснение этому наблюденному эффекту: в метаморфизованных породах сложная форма и взаимное расположение зерен (наследие тектоно-термальных преобразований) важнее их среднего размера, тогда как в простой гипсо-песчаной матрице размер изолированной частицы определяет масштаб зарождающейся трещины. Это объяснение делает положение не просто констатацией факта, а научным выводом.

*Положение 3: При отсутствии крупных дефектов в образце горной породы основной вклад в термически стимулированную акустическую эмиссию вносят распределенные источники.*

Для проверки этого положения была поставлена специальная серия опытов с контролируемым введением дефекта. Один образец песчаника был предварительно нагружен до появления макротрещин, второй (контрольный) остался интактным. Использованы современные методы машинного обучения (кластеризация, поиск аномалий) для анализа группируемости импульсов ТАЭ по их волновым формам и параметрам. В предварительно поврежденном образце алгоритмы выявили четкие кластеры (группы) схожих импульсов, которые были связаны с активацией и ростом существующей макротрещины. В интактных образцах (как песчаника, так и других пород) подобные кластеры отсутствовали, что свидетельствует о хаотичном, пространственно-распределенном характере генерации микротрещин. Таким образом, Положение подтверждено прямым экспериментом с контролем условий, а его доказательством служат не субъективные наблюдения, а объективные результаты, полученные с помощью алгоритмов машинного обучения.

**Достоверность и новизна полученных результатов обосновываются следующим:**

Ключевые параметры пород оценивались независимыми способами. Например, размер зерна метапесчаников определялся оптической микроскопией, а затем результаты успешно верифицировались методом широкополосной акустической спектроскопии. Это исключает систематические ошибки одного метода. Для анализа ТАЭ применялись не только стандартные методы акустической эмиссии, НО и статистические подходы, адаптированные из сейсмологии (расчет  $b$ -value методом максимального правдоподобия), что повышает надежность оценок. Использовалось собственное зарегистрированное программное обеспечение для обработки изображений и анализа данных, что гарантирует контроль над алгоритмами и воспроизводимость результатов. Особо ценно наличие специально изготовленных искусственных образцов с варьируемым размером частиц, что позволило в "чистом" эксперименте выявить влияние отдельного микроструктурного параметра (размера зерна), изолируя его от других факторов. Выводы сделаны не на единичных наблюдениях, а на основе статистического анализа (построение корреляционных матриц, гистограмм, динамики параметров в окнах). Применение алгоритмов машинного обучения для анализа группируемости импульсов ТАЭ позволило значительно повысить достоверность полученных результатов.

**Новизна результатов обосновывается тем, что**

Впервые экспериментально доказано качественное различие во взаимосвязи термоакустикоэмиссионной активности и  $b$ -value между магматическими породами

(сильная отрицательная корреляция) и метаморфическими/искусственными породами (корреляция слабая или положительная).

Впервые установлено, что влияние размера зерна на параметр b-value кардинально различно для природных метаморфизованных пород и простой модели. Для метапесчаников такой связи нет, а для искусственной гипсо-песчаной смеси – есть (b-value падает с ростом размера частиц). Это важный вывод о роли не просто размера, а сложности микроструктуры.

В рамках исследования впервые для данного типа пород показана сильная корреляция ( $r=0.87$ ) среднего размера зерна метапесчаников Северного Приладожья с оценочными зонами р-Т условий их метаморфизма, что само по себе является ценным петрофизическим результатом.

Диссертационное исследование представляет собой завершенную научно-квалификационную работу и полностью отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а соискатель, Индаков Г.С., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 Геофизика.

Я, Баюк Ирина Олеговна, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Баюк Ирина Олеговна  
Доктор физико-математических наук

Название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Должность: главный научный сотрудник лаборатории № 202 - «Лаборатория фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга»

Почтовый адрес: 123242 г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.

e-mail: [ibayuk@ifz.ru](mailto:ibayuk@ifz.ru)

Телефон: +7499 254 9042

01.02.2025г.