

## **ОТЗЫВ**

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

Представленная работа изложена на 152 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 169 источников, содержит 32 рисунка и 13 таблиц.

### **1. Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа Индакова Г.С. посвящена актуальной теме исследования возможности существования взаимосвязи между особенностями микроструктуры горных пород и акустической эмиссией, вызванной их разрушениями при термическом воздействии. В настоящее время вопрос о существовании такой связи остается недостаточно изученным, что обуславливает интерес к данной теме со стороны научного сообщества. Разрушение горных пород при термическом воздействии происходит при воздействии магмы на вулканические образования, воздействии огня на конструкции, построенные из природных материалов, а также при некоторых способах добычи полезных ископаемых. Это показывает, что диссертационное исследование отвечает актуальным запросам фундаментальной и прикладной геофизики, расширяет научные представления о свойствах горных пород и возможности прогноза устойчивости твердых тел под воздействием высоких температур, развивает методологию многопараметрического анализа процессов разрушения пород и микроструктуры.

### **2. Анализ содержания работы**

Работа имеет четкую структуру, отражающую логику изложения материалов. Разделение на главы логично и обусловлено особенностями разнопланового исследования. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.6.9. Геофизика.

В первой главе приведен подробный анализ источников, лежащих в основе современных представлений о развитии разрушений в горных породах, подходах к изучению данного процесса, а также о сопровождающей разрушения пород акустической эмиссии (АЭ). Обоснована необходимость комплексного подхода к анализу таких данных. Отмечены отличия процессов развития разрушения при термическом и механическом воздействиях на образцы горных пород. Подчеркнуты особенности проведения экспериментов по термическому воздействию на образцы горных пород с измерением параметров акустических сигналов. Приведен подробный разбор методов оценки микроструктурных параметров поликристаллических материалов и их применимости к анализу горных пород. Рассмотрены

литературные данные о группируемости акустических импульсов по схожести волновых форм и параметров сигналов АЭ в лабораторных исследованиях.

Во второй главе подробно описан экспериментальный материал, на котором базируется диссертационное исследование. В работе рассматривались эксперименты с образцами гранитов, базальтов, песчаников, метаморфизированных песчаников (метапесчаников) и модельной гипсово-песчаной породы, изготовленной из фракций песка разного размера с целью проверки выдвигаемой гипотезы о взаимосвязи статистических параметров разрушения и микроструктуры. Основным материалом были данные по образцам метапесчаника, образовавшегося в процессе метаморфизма из близких по составу пород, но при разных р-Т условиях. Для основного материала – образцов метапесчаников – привлечены данные геоморфологических исследований, для гипсово-песчаных образцов дополнительно привлечены данные гранулометрии. Таким образом, исследуются группы пород различного состава и происхождения, отличающиеся как по степени разрушенности, так и по микроструктуре, что позволяет исследовать зависимость развития разрушения от типа породы, взаимосвязь между разрушением и характерными размерами зерен, а также выявить другие особенности термически стимулированного разрушения.

Вторая часть главы посвящена описанию лабораторного оборудования и методов, используемых в работе. Для нагрева образцов использовалась экспериментальная установка, позволяющая осуществлять равномерный нагрев образца с заданной скоростью и регистрировать сигналы АЭ. Отмечено, что при термическом воздействии локация источников АЭ весьма затруднена и приходится использовать один датчик. Для анализа параметров микроструктуры привлечено несколько методов, дополняющих результаты друг друга: оптическая и электронная микроскопия, а также акустическая спектроскопия.

В третьей главе приведены методики определения параметров разрушения, оцениваемых на основе данных АЭ. Автор рассматривает активность АЭ, наклон графика повторяемости, а также параметры волновых форм сигнала, связанные с типом развивающихся трещин (угол нарастания сигнала и средняя частота). Особое внимание уделено подходам к оценке параметра наклона графика повторяемости и его пересчету к величине, оцениваемой по энергиям импульсов, так как в этом случае он может быть сопоставлен с сейсмологическими данными. Отмечено, что наиболее точным для оценки параметра оказывается метод максимального правдоподобия для цензурированной выборки. Набор параметров, определяемых по волновой форме акустических импульсов, используется для проверки предположения о группируемости схожих импульсов. Рассмотрены подходящие для анализа группируемости методы машинного обучения, включая методы

дисперсионного анализа, кластеризации и классификации. Предварительный анализ подтверждает различимость групп сигналов АЭ и целесообразность применения методов машинного обучения.

Четвертая глава диссертации содержит результаты анализа оптических изображений микроструктуры для образцов метапесчаников для оценки распределения размеров зерен разными методами. Все методы адаптированы для анализа изображений микроструктуры горных пород. Для основного метода пересечения опорных линий сделана программная реализация с частичной автоматизацией работы оператора. Получены оценки распределений для исследованных образцов метапесчаников. Отдельно проведена верификация полученных оптическими методами оценок среднего размера зерна путем сравнения с оценкой методом широкополосной акустической спектроскопии.

В пятой главе приведены сводные результаты проведенных экспериментов и микроструктурного анализа, их анализ и обсуждение. Важным результатом работы является вывод о различии взаимных зависимостей статистических параметров процесса разрушения для различных пород при термическом воздействии, что контрастирует с сейсмологическими наблюдениями. Этот вывод подтверждает первое защищаемое положение, отражающее не отмеченные ранее свойства процесса разрушения. А именно, определено, что 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.

Отдельно в работе показаны результаты экспериментальной проверки гипотезы о взаимосвязи между параметрами разрушения и микроструктурой: метапесчаники не показывают такой зависимости, в то время как для модельной гипсово-песчаной породы наклон графика повторяемости отрицательно коррелирует с размером зерна. Эти результаты легли в основу второго защищаемого положения.

Другим важным выводом диссертационного исследования и основой третьего защищаемого положения является подтверждение представлений о характере разрушения при термическом воздействии: основной вклад в разрушение вносят источники, распределенные в объеме, без локализации процессов разрушения. Это позволяет проводить более корректные аналогии между процессами разрушения при механическом и термическом воздействиях.

### **3. Новизна, обоснованность и достоверность результатов**

Установление закономерностей связи размеров зерен горных пород с параметрами акустической эмиссии при нагревании определяет научную

новизну работы и является ее сильной стороной. Это позволяет наметить перспективы фундаментальных исследований в области лабораторных испытаний образцов горных пород, а в практическом отношении развить методы определения параметров микроструктуры.

Широкая методическая и экспериментальная база позволяет считать положения исследования обоснованными. Выводы диссертации опираются на комплексную обработку большого массива данных, включающую статистические подходы, заимствованные из сейсмологии, и современные методы машинного обучения (классификация, поиск аномалий, кластеризация). Автор разграничивает закономерности, характерные для разных типов пород, и ясно формулирует выявленные особенности. Научные рекомендации, касающиеся применения акустико-эмиссионных методов для отслеживания развития разрушения при отсутствии локации источников, являются практически значимыми и научно обоснованными. Достоверность результатов исследования обеспечивается воспроизводимостью экспериментов, использованием независимых методов контроля, базирующихся на отраслевых стандартах, многопараметрическим анализом, перекрестным сравнением и верификацией результатов, получаемых различными методами.

#### **4. Апробация результатов 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. Результаты прошли широкую апробацию и были представлены в докладах на 19 международных и всероссийских конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

#### **5. Замечания**

1. Несколько неожиданно название первой главы, где речь идет о процессах разрушения горных пород, в то время как название диссертации касается связи термостимулированной акустической эмиссии в горных породах с микроструктурой, где разрушение в явном виде отсутствует.

2. На стр. 42 неясно, что автор подразумевает под «интенсивностью АЭ»? Такой термин отсутствует в ГОСТ Р ИСО 12716-2009.

3. На рисунке 5 (стр. 57), где представлена схема экспериментальной установки, ни в подписи, ни в сопроводительном тексте не приведено описание позиции 14. В то же время это важно, поскольку сигналы АЭ от испытываемого образца через элементы 14 и основание, на котором размещена экспериментальная установка, могут проходить к преобразователю 13 и ошибочно быть приняты за помехи.

4. На стр. 103 непосредственно в тексте рядом с формулой (37) не расшифрованы фигурирующие в ней параметры  $D$ ,  $\langle RA \rangle$ ,  $\langle AF \rangle$ .

5. На стр. 108 из подписи к рисунку 25 не ясно, какие диаграммы относятся к зависимости средних значений b-value, а какие – к активности? Что означает фраза «за два этапа вместе?»

6. Из рисунка 26 на стр. 109 следует, что выборка разделялась на три класса с номерами от 1 до 3. Однако в тексте в таблице 12 фигурирует еще один класс с номером 0, который в ближайшем к таблице тексте не описан. Упоминается он только лишь на страницах 111 и 113, что затрудняет чтение. Следовало бы пояснение привести перед таблицей 12.

7. Имеются незначительные опечатки, без которых работа выглядела бы, несомненно, лучше. На стр. 101 читаем: «Для образцов со слабой активностью общее число зарегистрированных импульсов невелико, вследствие чего полученные оценки b-value не являются статистически непредставительными и не учитывались при анализе». Второе отрицание нужно убрать. На стр. 108: «При решении задачи кластеризации по параметрами импульсов...».

Указанные замечания не снижают значимости полученных научных положений, выводов, рекомендаций, изложенных в диссертации. Работа выполнена на высоком уровне, экспериментальные результаты метрологически достоверны, математический аппарат использован корректно с привлечением как классических статистических методов, так и методов машинного обучения, интерпретация результатов основана на современных представлениях и не противоречит общим законам физики.

## **6. Заключение**

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача выявления возможной взаимосвязи между особенностями термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) в образцах горных пород и параметрами их микроструктуры, что имеет значение для развития методов современной геофизики.

Диссертация 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.

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

Официальный оппонент:

профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, доктор технических наук, профессор

---

Вознесенский Александр Сергеевич  
«27» ноября 2025 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 230-25-70, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 05.15.11 – Физические процессы горного производства (технические науки), 1997 г.

Адрес места работы:

119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, тел.: +7 (499) 230-25-70, e-mail: asvoznesenskii@misis.ru

Подпись сотрудника ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, Вознесенского Александра Сергеевича удостоверяю:

Проректор по науке и инновациям НИТУ МИСИС

---

М. Р. Филонов

«27» ноября 2025 г.