

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Индаков Глеб Сергеевич

**Термостимулированная акустическая эмиссия
в горных породах и ее связь с микроструктурой**

1.6.9 Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре физики Земли физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: *Смирнов Владимир Борисович,*
доктор физико-математических наук, доцент

Казначеев Павел Александрович,
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: *Шебалин Петр Николаевич*
доктор физико-математических наук, член-
корреспондент РАН, ФГБУН Институт теории
прогноза землетрясений и математической геофизики
РАН, директор

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

Вознесенский Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», Горный институт, профессор
кафедры физических процессов горного производства и
геоконтроля

Защита диссертации состоится «11» декабря 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, физический факультет, ЮФА.

E-mail: versan@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3566>.

Автореферат разослан «_____» 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

С.В. Колесов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию особенностей развития термически стимулированного разрушения в образцах горных пород на основе анализа акусто-эмиссионных данных и сопоставления их с данными по микроструктуре.

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Одним из важнейших фундаментальных направлений исследований в науках о Земле является изучение разрушения горных пород. Горные породы в земной коре подвергаются воздействию разнообразных давлений и температур. Для пород, слагающих глубинные зоны земной коры и вулканические постройки, характерно воздействие высоких температур, что приводит к термически стимулированному разрушению, а также изменению прочностных свойств. Получение как можно более широкого спектра информации о физических свойствах горных пород в лабораторных и полевых исследованиях актуально для обнаружения новых закономерностей в процессах разрушения, связанных с вулканическими землетрясениями, процессами их подготовки и метаморфизмом горных пород, возможностью выявления различий между термическим разрушением и разрушением при механическом воздействии, характерном для сейсмического процесса, а также возможностью получения информации о физико-механических условиях залегания и преобразования вещества в земных недрах. В прикладном аспекте актуальность развития темы диссертационного исследования связана с перспективой создания новых методов петрофизического анализа, прогнозирования и предупреждения горных ударов, разрушения сооружений при воздействии высоких температур, повышения надежности и эффективности термических методов разработки месторождений углеводородного сырья.

В настоящее время активно развивается направление механических испытаний образцов горных пород, предварительно подвергнутых высокотемпературному воздействию [1–3]. Тем не менее, в исследованиях научных групп, ведущих исследования по этой тематике и близким тематикам, как правило, практически отсутствуют данные о характере развития термически стимулированного разрушения.

Группа канадских исследователей *Nasseri M.H.B., Schubnel A., Yong R.P.* проводила анализ параметров микроструктуры и термического разрушения по аналогии с разрушением при механическом нагружении; в частности, анализ оптической плотности трещин после воздействия разных температур позволил соотнести её с интегральной степенью разрушенности породы и изменением скоростей упругих волн, предела прочности и др.

В отечественных работах *Шкуратника В.Л., Вознесенского А.С.*,

Набатова В.В., Винникова В.А., Новикова Е.А. и др. была создана теория термически стимулированных разрушений на основе концентраторов напряжений в однородной матрице, что позволило объяснить эффект памяти – низкий уровень акустической эмиссии до достижения температуры предыдущего нагрева (термический аналог эффекта Кайзера); также группой был разработан способ идентификации породы по характерному паттерну термоакустикоэмиссионной активности.

Исследования британской группы *Browning J., Meredith P., Gudmundsson A.* сосредоточены главным образом на охлаждении нагретых пород в лаборатории и анализе аналогичных процессов в естественных условиях (например, при остывании пород после воздействия геотермальных или лавовых потоков).

Группа китайских коллег *Peng J., Rong G. и др.* активно исследует различные породы и применяет методики, распространенные в сейсмологии – в частности, пытается оценивать наклон графика повторяемости в процессе механического нагружения после предварительного термического воздействия и выявлять закономерности между типом породы, механическими параметрами и температурой нагрева.

Большое число публикаций и активных исследований по теме термического разрушения горных пород свидетельствуют о важности изучения данной темы для развития экспериментальной геофизики. Вопрос о существовании взаимосвязей между особенностями разрушения, микроструктурными параметрами и петрофизическими характеристиками горных пород в данный момент остается открытым. Ответ на него важен для получения более детальной информации о свойствах горных пород и прогнозирования развития разрушения горных пород при воздействии высоких температур.

Цель и задачи

Цель работы состоит в выявлении возможной взаимосвязи между особенностями термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) в образцах горных пород и параметрами их микроструктуры.

Задачи:

- Изучение современного состояния исследований термически стимулированного разрушения горных пород и сопутствующих изменений их петрофизических свойств, включая изменения на уровне микроструктуры.
- Создание представительного набора статистических данных и обработка экспериментального материала по ТАЭ для ряда образцов горных пород различного типа и происхождения.
- Разработка методики и получение данных на основе оптической микроскопии о статистических параметрах микроструктуры метатерригенных горных

пород (метапесчаников), образовавшихся в процессе метаморфизма из близких по составу пород, но при разных p - T условиях,

- Верификация микроструктурных параметров горных пород, оцененных по данным оптической микроскопии, вспомогательными методами (электронная микроскопия, акустическая спектроскопия) и получение дополнительных данных о петрофизических свойствах исследуемых метатерригенных горных пород и модельных материалов
- Создание искусственных образцов из модельной горной породы с использованием фракций песка, различающихся размерами зерен, и цементирующего материала (гипс). Проведение экспериментов по термическому воздействию на них.
- Сравнительный анализ различных параметров ТАЭ, а также микроструктурных параметров для исследованных образцов.

Научная новизна

В отношении анализа данных по термическому воздействию на породы одной из ключевых малоразработанных проблем, связанных с АЭ, является анализ взаимосвязей между физически различными статистическими параметрами микроструктуры породы и параметрами процессов, происходящих при термическом воздействии на породу. В научных публикациях среди сведений об исследуемых образцах горных пород часто приводятся данные о средних характерных размерах зерен (например, [4]), но редко встречаются данные об их распределении по размерам. Отдельными исследователями проводился анализ микроструктуры породы, но уже после высокотемпературного воздействия, в частности, для оценки характерных параметров возникших микротрещин [1; 5; 6].

Данная работа направлена на получение новых знаний о физических свойствах природных материалов – горных пород, о взаимосвязях микроструктуры пород и характера разрушения при воздействии высоких температур. Исследованы вопросы устойчивости оценки микроструктурных параметров пород различными методами, представительности статистических параметров ТАЭ для описания процесса разрушения и корреляции между указанными величинами.

Впервые показано, что для некоторых пород (базальты и граниты) есть сильная корреляция между активностью ТАЭ и наклоном графика повторяемости (b -value), для других (метапесчаники и модельная порода) корреляция слабая. Впервые показано, что активность ТАЭ и величина b -value для метапесчаников не коррелируют со средним размером зерен при том, что он коррелирует с оценками p - T условий метаморфизма. Впервые показано, что величина b -value

для модельной горной породы коррелирует с размером зерна. Впервые показано, что при термическом разрушении заранее сформированные крупные трещины в образцах формируют группы импульсов ТАЭ, которые схожи по волновым формам и параметрам, в то время как в образцах без трещин таких групп не наблюдается.

Объект и предмет исследования

В настоящей работе **объектом исследования при изучении термического разрушения** является **акустическая эмиссия**, характеризующая процесс разрушения; в этом случае предметом исследования являются статистические параметры потока акустической эмиссии (прежде всего, активность и наклон графика повторяемости). **Объектом исследования при изучении микроструктуры** является **зернистая структура горной породы** как совокупность зерен, характерные величины каждого из которых измеримы, что позволяет оценить статистические параметры распределения этих величин. Вместе **указанные статистические параметры** для различных образцов разных пород являются **основным предметом исследования** и определяют методы исследования, направленного на расширение представлений о закономерностях развития разрушения в горных породах с ростом температуры.

Основным экспериментальным материалом являлись образцы метаморфизованных песчаников Северного Приладожья, обладающие сходным метаморфическим генезисом, но сформировавшиеся при различных р-Т условиях. Вспомогательным экспериментальным материалом были образцы базальтов, гранитов, песчаников и модельных горных пород (гипс с примесью кварцевого песка).

Теоретическая и практическая значимость

В теоретическом аспекте значимость работы связана с расширением представлений о развитии разрушения и поведении материалов при воздействии высоких температур. Показано, что индивидуальные особенности развития разрушения различных горных пород при термическом воздействии связаны с поведением статистических параметров ТАЭ, таких, как активность и b-value. Для образцов гранитов и базальтов величина наклона графика повторяемости (b-value) уменьшается с увеличением средней активности, что может быть объяснено в рамках модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, адаптированной для термического воздействия. Для образцов метапесчаников и искусственных образцов подобной зависимости не наблюдается. Разрушение образцов метапесчаников, характеризующихся одинаковыми р-Т условиями метаморфизма, может демонстрировать увеличение b-value с ростом активности. Получена оценка параметров распределения по размерам зерен метапесчаников. Средний размер зерен для образцов метапесчаников не показывает существенной корреляции с параметрами ТАЭ, но обнаруживает взаимосвязь с р-Т условиями

метаморфизма. Разрушение искусственных образцов демонстрирует корреляцию между b -value и средним размером зерна.

В прикладном аспекте значимость работы связана с адаптацией методов анализа сейсмологических данных для данных лабораторных экспериментов по термическому воздействию и развитием методов микроструктурного анализа горных пород на основе оптических микрофотографий шлифов. Для этого были разработаны специализированные методики и программное обеспечение, зарегистрированное в установленном порядке. Разработанные методики и программы могут быть использованы для анализа данных других экспериментов по термическому воздействию и для оценки параметров микроструктуры пород.

Методология и методы исследования

Состав и описание образцов составлены на основе экспертного геолого-минералогического анализа с привлечением оптической и электронной микроскопии.

Данные о термическом разрушении получены акустико-эмиссионным методом с использованием нагревательной установки с контролем параметров воздействия (прежде всего – температуры) и сертифицированной системы регистрации импульсов. Для обработки временных сигналов, включающей амплитудный, спектральный, корреляционный, статистический анализ, использовано как стороннее сертифицированное программное обеспечение, так и программное обеспечение собственной разработки, на которое получены свидетельства о регистрации. Для обработки параметров импульсов ТАЭ, наряду со стандартными подходами метода акустической эмиссии, использованы статистические подходы сейсмологии, адаптированные для анализа данных лабораторных экспериментов. Обработка многопараметрических данных проведена методами машинного обучения, включающими классификационные подходы, поиск аномалий и кластеризацию.

Анализ микроструктуры проведен на основе обработки изображений, полученных на сертифицированном оптическом микроскопе. Обработка изображений производилась с использованием программного обеспечения собственной разработки, созданного на основе стандартизованных методик. Верификация полученных величин проведена методом акустической спектроскопии с учетом данных сканирующей электронной микроскопии.

Положения, выносимые на защиту

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.

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 метаморфических преобразований, такая зависимость есть: наклон графика повторяемости уменьшается с ростом размера частиц.
3. При отсутствии крупных дефектов в образце горной породы основной вклад в термически стимулированную акустическую эмиссию вносят распределенные источники.

Личный вклад автора

Исходные данные экспериментов по термическому разрушению образцов горных пород обработаны лично соискателем. Часть экспериментов проведена при непосредственном участии соискателя, искусственные образцы изготовлены соискателем совместно с научными руководителями. Соискателем подбраны алгоритмы машинного обучения и реализован программный код для исследования вопросов, связанных с группированием акустических сигналов. Соискателем разработана и реализована методика оценки статистических параметров импульсов термически стимулированной эмиссии, разработана и реализована методика оценки параметров распределения зерен горных пород по размерам на основе микрофотографии шлифа, получены свидетельства о регистрации прав на соответствующее программное обеспечение.

Задачи исследования, подбор методов, их теоретическое обоснование, выводы и их интерпретация сформулированы соискателем самостоятельно и вместе с научными руководителями на основе обширного литературного анализа. Публикации по теме диссертационной работы были подготовлены соискателем лично и в соавторстве.

Степень достоверности и аprobация результатов

Достоверность результатов исследования обеспечивается комплексным применением современных экспериментальных методик, верификацией результатов независимыми методами и согласуемостью с данными других исследователей. Исследование проведено на 33 образцах горных пород различного происхождения (граниты, базальты, метапесчаники, песчаники, искусственные образцы), отобранных из разных локаций и характеризующихся различными физико-механическими свойствами, что обеспечивает репрезентативность исследовательского материала.

Основные идеи и положения 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 работы были представлены на 19 международных и всероссийских конференциях:

1. International Symposium on Earthquake Forecasting to Commemorate the 50th Anniversary of the 1975 Haicheng M7.3 Earthquake (г. Шэньян, Китай, 8–11 июля 2025),
2. XXVIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (г. Санкт-Петербург, Россия, 28–30 мая 2025),
3. XVII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, Россия, 3–4 апреля 2025),
4. Геологический международный студенческий саммит (GISS) 2025 (г. Санкт-Петербург, Россия, 27–30 марта 2025),
5. XXVI Уральская молодежная научная школа по геофизике (г. Пермь, Россия, 17–21 марта 2025),
6. II Международная молодежная научная конференция «Технологии ИИ в науке и образовании» (г. Москва, Россия, 16–17 декабря 2024),
7. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 2024 (г. Москва, Россия, 6–8 ноября 2024),
8. Двадцать пятая международная конференция, посвященная 300-летию Российской академии наук. Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле (г. Москва, ГЕОХИ РАН, п. Борок, Россия, 30 сентября – 4 октября 2024),
9. 7-я Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (г. Долгопрудный, Россия, 2–5 июля 2024),
10. Ломоносовские чтения – 2024. Секция Физика (г. Москва, Россия, 28 марта – 3 апреля 2024),
11. The 13th International Statistical Seismology workshop. StatSei13 (г. Шэньчжэнь, Китай, 16–20 марта 2024),
12. Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2024» (г. Москва, Россия, 30 января – 2 февраля 2024),
13. Конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (г. Москва, Россия, 8–9 ноября 2023),
14. III Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» (г. Москва, Россия, 25–26 октября 2023),
15. Девятая Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» (г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 24–30 сентября 2023),
16. XXIV международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (п. Борок, Россия, 25 сентября – 1 октября 2023),
17. VI Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах»

- (г. Москва, Россия, 21–24 июня 2022),
18. XXIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2022» (г. Москва, Россия, 11–22 апреля 2022),
 19. XXVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2020», (г. Москва, Россия, 10–27 ноября 2020).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены сведения о степени разработанности темы исследования, объекте и предмете, а также методах исследования, обозначены научная новизна и значимость, приведены сведения об апробации работы, личном вкладе соискателя, о структуре и объеме диссертации.

Глава 1. Обзор современного состояния исследований процессов разрушения горных пород

Эта глава дает общее представление о поставленной проблеме и существующих направлениях исследований по теме термически стимулированного разрушения горных пород. Изучение процессов трещинообразования в горных породах проводится различными методами, которые можно условно разделить на два класса: «статические» и «динамические». Первые позволяют исследовать минеральный состав, структуру и распределение трещин до и после воздействия, но не дают возможности мониторинга разрушения в реальном времени. К такой группе принадлежат методы микроскопии. Вторая группа включает методы неразрушающего контроля: акустическую эмиссию, ультразвуковые методы, оценку фильтрационно-ёмкостных свойств и др. Такие методы позволяют эффективно отслеживать происходящие в образце изменения с течением времени и потому широко применяются в комплексных исследованиях.

В разделе 1.1 обсуждаются вопросы мониторинга развития разрушений в материалах и оценки их микроструктурных характеристик. Наиболее удобным и эффективным способом мониторинга разрушения горных пород в лабораторных условиях в экспериментах по термическому воздействию является регистрация акустической эмиссии. **Акустической эмиссией (АЭ)** называется излучение упругих волн твёрдым телом, в котором под влиянием внешних и внутренних факторов различной природы происходят изменения структуры материала [7]. АЭ в породе обычно инициируется возникновением и развитием микротрещин, связанных с дислокациями, концентрирующимися вдоль границ зерен, а также слиянием межзерновых трещин. Параметры АЭ, такие как число импульсов АЭ или энергия события АЭ, используются для выявления корреляции

между процессом деформации под напряжением и трещинообразованием. Некоторые параметры волновой формы, связанные с событием АЭ, такие как частота, пиковая амплитуда, время нарастания и продолжительность события, также представляют полезную информацию для выяснения механизмов развития микротрещиноватости, связанных с макроскопической деформацией и разрушением [8].

Метод АЭ может применяться при термическом воздействии, для чего необходимо вывести сигнал АЭ с помощью акустического волновода из зоны нагрева. Термостимулированная акустическая эмиссия (ТАЭ) вызывается ростом и закрытием трещин, развивающихся из-за действия термомеханических напряжений, трением между берегами трещин, фазовыми переходами, испарением влаги, взрывами газово-жидких включений и проч. [7]. Часто при изучении разрушения проводятся измерения скоростей упругих волн и других физических параметров породы [A.1]. Однако в процессе высокотемпературного термического воздействия применение методов оценки фильтрационно-емкостных свойств оказывается неосуществимым, а применение методов оценки скоростей сильно затрудняется большим затуханием [9].

Методы **микроскопии** позволяют непосредственно обнаружить сформировавшиеся трещины, но применяются только после воздействия. Наиболее распространенными вариантами методов микроскопии являются оптическая, электронная и рентгеновская и др.

При изучении твердых тел, для которых характерно наличие структурных отдельностей, размеры этих отдельностей могут определять макроскопические свойства твердого тела. Особенностью горных пород как твердых тел является наличие отдельностей – зерен, которые могут быть отдельными кристаллами или включениями аморфных веществ. В силу сложного строения горные породы чаще определяют не как поликристаллические тела, а как устойчивые агрегаты (конгломераты) минералов [10; 11].

Информация о размерах зерен широко используется при оценке металлов и их сплавов как поликристаллических материалов промышленного значения [12]. Наиболее важным параметром микроструктуры является средний размер зерна, для оценки которого в металлографии существует множество методов. В предположении об определенном характере распределения зерен по размерам, распределение сечений зерен может быть однозначно связано с характерными размерами самих зерен. Часто в задачах по определению гранулометрического состава используется предположение об одномодальном логнормальном распределении частиц по размерам [13].

Однако существующие методы оценки размеров зерен имеют определенные сложности при попытке применения к горным породам, что связано с прозрачностью многих минералов и низкой контрастностью границ зерен.

По этой причине задача оценки размеров горных пород является актуальной и требует адаптации существующих методов и разработки новых подходов для анализа микроструктурных данных горных пород [A.2].

Раздел 1.2 посвящен описанию **особенностей термостимулированного разрушения** по данным экспериментов с образцами горных пород. Термическое разрушение горных пород связано, прежде всего, с анизотропным расширением слагающих породу минералов и температурным градиентом, обуславливающим нарастание термомеханических напряжений, что приводит к развитию трещин. С этим связано существенное влияние скорости нагрева на регистрируемую ТАЭ. С ростом температуры в образцах горных пород отмечается снижение хрупкости, повышение пластичности [3], различное поведение наклона графика повторяемости (*b*-value) для разных типов пород [14; 15]. К особенностям термического разрушения относится термический аналог эффекта Кайзера – снижение активности АЭ для образца в области температур, до которых образец нагревался ранее [16; 17].

Особый интерес представляет исследование вариаций АЭ при совместном (не обязательно одновременном) механическом нагружении и высокотемпературном нагреве [7], поскольку характер развития разрушений при этих воздействиях может различаться. Современные концепции развития разрушений основываются на представлении о масштабно-иерархическом характере структуры горных пород и присутствующих в них нарушений (микротрещин и т.д.). При определенных условиях развитие разрушения в горных породах может быть связано с перераспределением интенсивности разрушения как с более мелких нарушений на более крупные (рост трещин за счет их взаимодействия, например, слияния), так и наоборот [18].

Важным направлением исследований развития процессов разрушения является анализ **группируемости** импульсов АЭ [A.3]. Предполагается, что импульсы схожих источников имеют схожую форму сигнала. Анализ кластеризуемости/группируемости таких событий проводится как для самих волновых форм импульсов [19; 20], так и на основе параметров волновых форм [21; 22]. Наличие групп схожих импульсов АЭ позволяет предположить развитие крупного нарушения в материале. В свою очередь, отсутствие группируемости импульсов АЭ может свидетельствовать о равномерном развитии микротрещиноватости в объеме, когда АЭ обусловлена в основном редко активизирующими распределенными дефектами-микротрещинами.

Глава 2. Экспериментальный материал и методика проведения экспериментов

Вторая глава посвящена описанию исследуемых образцов горных пород, методики проведения экспериментов по термическому воздействию и методики оценки размеров зерен исследуемых образцов.

В разделе 2.1 приведены сведения обо всех образцах, рассмотренных в работе. Были обработаны данные экспериментов с образцами гранитов (6 образцов), базальтов (5 образцов), метапесчаников (15 образцов), песчаников (2 образца) и модельных горных пород (5 образцов). Образцы представляют собой прямые цилиндры с диаметром основания около 3 см и высотой от 3 до 6 см.

Петрофизические характеристики рассмотренных образцов гранитов и базальтов внутри каждой из групп были схожими: плотность (граниты – 2.55-2.70 г/см³, базальты – 2.80-2.95 г/см³), пористость (граниты – 0.15-0.45%, базальты – 1.5-3.5%), скорости продольных (граниты – 5.7-5.9 км/с, базальты – 5.8-5.9 км/с) и поперечных (граниты – 3.6-3.9 км/с, базальты – 3.4-3.5 км/с) упругих волн.

Образцы метапесчаников получены из кернов флишоидной серии пород со средней плотностью 2.77 ± 0.07 г/см³, взятых в пяти разных зонах отбора в районе озера Янисъярви (Карелия, Россия). Предполагается, что для зон отбора имели место различные условия метаморфизма пород: исходные осадочные породы схожего состава и происхождения (кварц-полевошпат-слюдистые породы) претерпели разные тектоно-термальные преобразования на различных глубинах и температурах [A.4]. Сводная информация по зонам отбора метапесчаников приведена в таблице 1.

Таблица 1. Сводная информация о зонах отбора.

		Параметры метаморфизма (по [23])	
Номер зоны отбора	Количество образцов	Значения p , кбар	Значения T , °C
1	3	1.5 – 4	400 – 500
2	6	2 – 5	450 – 600
3	1	2.5 – 6	500 – 650
4	2	3 – 6.5	600 – 750
5	2	3 – 7	650 – 800
6	1	–	–

Анализ экспериментов с двумя образцами мелкозернистого песчаника производился для анализа группируемости событий при термическом воздействии и при наличии крупных нарушений (трещин). Один образец (основной) предварительно подвергался одноосному нагружению до нагрузки, близкой к разрушающей, с видимыми проявлениями трещин на поверхности. Второй образец (контрольный) не подвергался механическому нагружению [24].

Помимо образцов горных пород были исследованы модельные образцы, изготовленные из гипса с добавлением кварцевого карьерного песка. Песок был разделен на фракции разного размера путем просеивания через сита. Смешение с водой и песком осуществлялось в массовом соотношении 4 (гипс) : 4 (вода) : 3

(песок). Информация о гипсовых образцах приведена в таблице 2. Медиана размера зерна в таблице рассчитана по данным гранулометрии, выполненной в Лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН.

Таблица 2. Сводная информация об искусственных (гипсовых) образцах с добавлением песка разного размера. Для размера фракций указаны размеры ячеек использованных сит.

Название образца	Номер фракции	Размер фракции (сита), мкм	Медиана размера зерна, мкм	Масса до нагрева, г	Масса после нагрева, г
GS0430C0-1	0	- (без примеси)	- (без примеси)	19.3	15.1
GS0430C1-1	1	$d < 200$	198	24.3	20.8
GS0430C2-1	2	$200 < d < 315$	256	24.1	20.1
GS0430C3-1	3	$315 < d < 400$	376	28.0	24.1
GS0430C4-1	4	$400 < d < 630$	626	21.4	18.5

В разделе 2.2 приведено описание экспериментальной установки и методики регистрации импульсов ТАЭ. Установка состоит из устройства нагрева образцов горных пород, акустического волновода, датчика АЭ и датчика контроля помех (Panametric V103), системы регистрации АЭ (ALine-32D), термопары и блока регистрации температуры [25]. Первичная обработка импульсов АЭ включает удаление помех и расчет параметров импульсов по данным волновых форм.

Материал для исследования микроструктурных характеристик метапесчаников описан в разделе 2.3. Основным материалом являются изображения шлифов, полученные на оптическом микроскопе Olympus BX35 в ЦКП ИФЗ РАН [26]. Кроме того, для некоторых образцов были сделаны снимки на электронном микроскопе Tescan Mira 4 LMS [27]. Для них же была сделана оценка размеров зерен методом широкополосной акустической спектроскопии [27]. Общее описание данного метода приведено в разделе 2.4.

Глава 3. Параметры термически стимулированной акустической эмиссии

В данной главе рассмотрены параметры ТАЭ, рассчитанные на основе данных экспериментов. Эксперимент был разделен на этапы: нагрев от 200°C до максимальной температуры и охлаждение от максимальной температуры до 200°C. На этих этапах все полезные импульсы ТАЭ связаны с развитием микротрещин в результате термического воздействия.

В разделе 3.1 описан параметр активности акустической эмиссии I . Расчет производился в непересекающихся окнах в 200 событий по формуле:

$$I = \frac{N}{\Delta t}, \quad (1)$$

где N – число событий в окне, Δt – промежуток времени между первым и последним событиями в окне (в секундах).

Раздел 3.2 посвящен оценке наклона графика повторяемости – b -value. По аналогии с законом Гутенберга-Рихтера [28] зависимость логарифма числа импульсов АЭ N от амплитуды импульсов A в дБ имеет линейный вид:

$$\lg N = a - b \cdot A \quad (2)$$

где a и b – некоторые коэффициенты. Показано, что для сопоставления с натурными данными параметр b , полученный при анализе данных лабораторных экспериментов, может быть пересчитан к b -value, оцениваемому по энергиям событий. Для оценки b -value рассмотрены три метода: метод линейной регрессии, метод максимального правдоподобия с оценкой представительной амплитуды импульса по максимальной кривизне и метод максимального правдоподобия для цензурированной выборки [29]. Так как оценка максимального правдоподобия (ОМП) для цензурированной выборки дает наиболее надежную оценку b -value, данный метод был использован для анализа данных всех экспериментов, в то время как оценка методами линейной регрессии и ОМП по максимальной кривизне производилась только для экспериментов с образцами гранитов и базальтов. Расчет b -value выполнялся как целиком для эксперимента, так и в динамике в непересекающихся временных окнах в 200 событий.

Часть параметров импульсов ТАЭ (первичные параметры) оценивается непосредственно по волновой форме. Например, максимальная амплитуда, длительность. Другие параметры (вторичные) измеряются более сложными способами или вычисляются по первичным параметрам: скорость нарастания, средняя частота и др. Обзор некоторых вторичных параметров дан в разделе 3.3. Особое внимание удалено величинам RA («Rise Time To Amplitude») и AF («Average Frequency»), которые выражаются через первичные параметры как:

$$RA = \frac{T_{\text{rise}}}{A} \quad (3.1)$$

$$AF = \frac{T_{\text{dur}}}{H_{\text{counts}}} \quad (3.2)$$

где T_{rise} – время нарастания импульса до максимальной амплитуды, T_{dur} – его длительность, A – максимальная амплитуда, H_{counts} – количество пересечений порога регистрации. Эти параметры часто используются для определения типа образующихся микротрещин. Сдвиговые трещины характеризуются в целом более низкочастотным сигналом (низкая средняя частота AF) и длительным временем нарастания (большое значение RA), в то время как трещины растяжения, напротив, характеризуются высокими средними частотами

AF и малыми RA [30].

Раздел 3.4 посвящен применению методов машинного обучения к анализу данных экспериментов по нагреву образцов песчаников с целью оценки группируемости импульсов ТАЭ и её валидации. Описаны входные данные для обучения моделей, статистические критерии различимости классов импульсов ТАЭ, предварительно размеченных методом взаимной корреляции волновых форм, и алгоритмы машинного обучения. Для задачи классификации импульсов ТАЭ по параметрам использовались модели адаптивного бустинга (AdaBoost) [A.3], случайного леса (Random forest), экстремального градиентного бустинга (XGBoost) и категориального бустинга (CatBoost). В задаче выделения редких событий, выбивающихся из числа шумовых импульсов (задача поиска аномалий), использовались модели изолирующего леса (Isolation Forest), локального уровня выброса (LOF) и одноклассовый метод опорных векторов (One-Class SVM). Для кластеризации полученных значений в задаче поиска аномалий с целью разбиения по исходным классам применены алгоритмы k -средних и DBSCAN.

Глава 4. Параметры микроструктуры исследованных горных пород

Четвертая глава посвящена оценке параметров распределения зерен горных пород по размерам. В разделе 4.1 на примере одного из образцов метапесчаников (ЛВ1356) продемонстрированы три метода построения распределений зерен по размерам на основе оптических снимков породы разного масштаба (100 и 200 мкм) [A.2]: ручной метод, метод пересечений опорных линий [31] и метод случайного бросания точек с построением из них ориентированных опорных отрезков, который позволяет получить косвенную оценку площади зерен [32].

В предположении о форме зерна, близкой к сферической, средний диаметр зерна $\langle D \rangle_{\text{Opt}}$ может быть найден по медиане $q_{50\%}$ распределения линейных размеров зерен, определенных по сечениям [12]:

$$\langle D \rangle_{\text{Opt}} = 1.45 \cdot q_{50\%} \quad (4)$$

По формуле 4 получен средний размер зерна для оценки по каждому из методов. Метод пересечений опорных линий легче всего автоматизировать, и он даёт наиболее представительную оценку среднего размера зерна. Данный метод был использован для оценки распределения зерен по размерам для остальных образцов метапесчаников, разработано необходимое программное обеспечение.

Сопоставление полученных результатов с оценкой среднего размера зерна для нескольких образцов метапесчаников, сделанной независимым методом широкополосной акустической спектроскопии с оптико-акустическим (лазерным) источником ультразвука [33], описано в разделе 4.2. В основе метода лежит рассеяние ультразвука в поликристаллических материалах. В

области рэлеевского рассеяния (длина зондирующей ультразвуковой волны частоты f существенно больше среднего линейного размера зерен, коэффициент затухания $\alpha(f) \sim f^4$) оценивается максимальный размер зерен D_{\max} , в области стохастического рассеяния (длина волны сравнима со средним линейным размером зерен, $\alpha(f) \sim f^2$) оценивается средний размер зерен $\langle D \rangle_{\text{acoust}}$:

$$D_{\max} \approx \frac{C(f_R)}{2\pi f_R} \quad (5.1)$$

$$\langle D \rangle_{\text{acoust}} \approx \frac{C(f_s)}{2\pi f_s} \quad (5.2)$$

где $C(f_R)$ – значение фазовой скорости волны на максимальной частоте спектральной области рэлеевского рассеяния продольных ультразвуковых волн f_R , $C(f_s)$ – значение фазовой скорости волны на частоте середины спектральной области стохастического рассеяния продольных ультразвуковых волн f_s .

Акустическая спектроскопия для образцов ЛВ1356 и ЛВ1312 дает:

$$\begin{aligned} \langle D \rangle_{\text{ЛВ1356}} &\approx 50 \pm 14 \text{ мкм} \\ \langle D \rangle_{\text{ЛВ1312}} &\approx 83 \pm 21 \text{ мкм} \end{aligned}$$

Соответствующие величины по данным оптической микроскопии:

$$\begin{aligned} \langle D \rangle_{\text{опт-ЛВ1356}} &\approx 55 \pm 13 \text{ мкм} \\ \langle D \rangle_{\text{опт-ЛВ1312}} &\approx 81 \pm 17 \text{ мкм} \end{aligned}$$

Таким образом, оценки для среднего размера зерна, полученные методами оптической микроскопии и акустической спектроскопии, оказываются близкими [A.4], что позволяет считать результаты применения метода пересечений опорных линий для прочих образцов достоверными.

Глава 5. Результаты и обсуждение

В последней главе представлены основные результаты работы и их обсуждение. Раздел 5.1 содержит результаты расчета статистических параметров потока импульсов ТАЭ для всех типов образцов. Пример временных вариаций активности и *b*-value для эксперимента по нагреву приведен на рисунке 1. Для образцов горных пород всех типов не выявлено закономерностей в динамике.

Для образцов гранитов и базальтов была выявлена закономерность уменьшения среднего на этапе нагрева *b*-value с изменением типа активности в последовательности средняя–сильная–критическая, что укладывается в представление о развитии разрушения по модели лавинно-неустойчивого

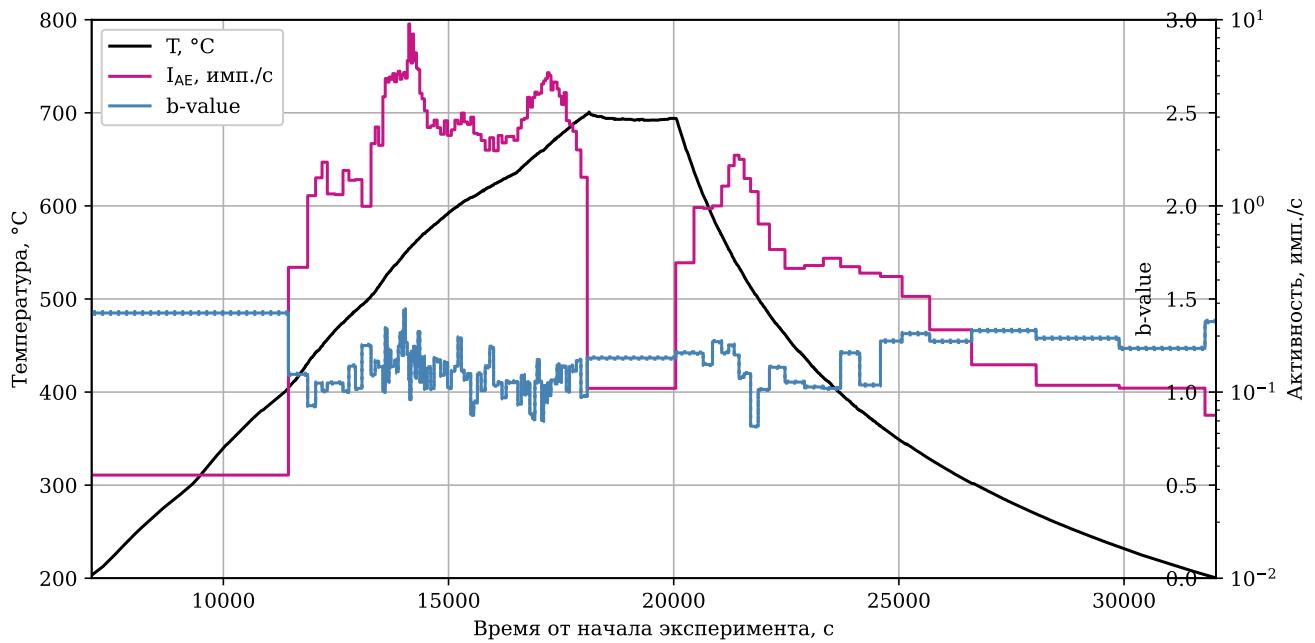


Рисунок 1 – Графики изменения температуры, активности ТАЭ и наклона графика повторяемости (b-value) для образца базальта LAT0411 на этапах нагрева и охлаждения.

трещинообразования (ЛНТ) [34]. Гистограммы средних за этап значений b-value для обоих типов пород в зависимости от типа активности приведены на рисунке 2.

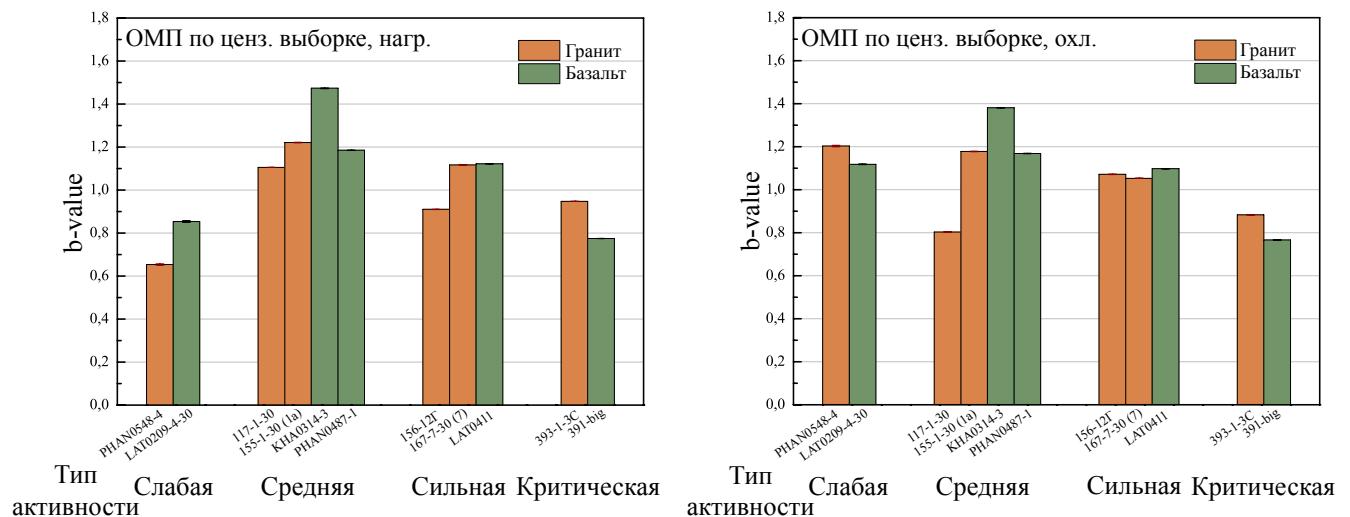


Рисунок 2 – Гистограммы среднего за этапы нагрева (*слева*) и охлаждения (*справа*) наклона графика повторяемости (b-value), рассчитанного методом максимального правдоподобия для цензурированной выборке, для всех экспериментов с группировкой по типу активности.

Результаты обработки экспериментов с образцами метапесчаников для этапа нагрева приведены на рисунке 3. Для метапесчаников не наблюдается явного тренда, выявленного для гранитов и базальтов. Для отдельных зон

отбора, таких как 1 или 4, заметен слабый тренд на увеличение b -value с ростом активности. Для зоны 2 он выражен сильнее. Предполагается, что для случая, когда накопление трещинноватости происходит во всем объеме, перехода к лавинообразному сценарию не происходит. В таком случае растет количество слабо зависимых мелкоамплитудных событий, что приводит к одновременному изменению активности и b -value. Также для образцов метапесчаников были рассчитаны параметры AF и RA . Для всех образцов их средние значения лежат в области правее линии $AF = RA$, что может указывать на преобладание трещин сдвигового типа.

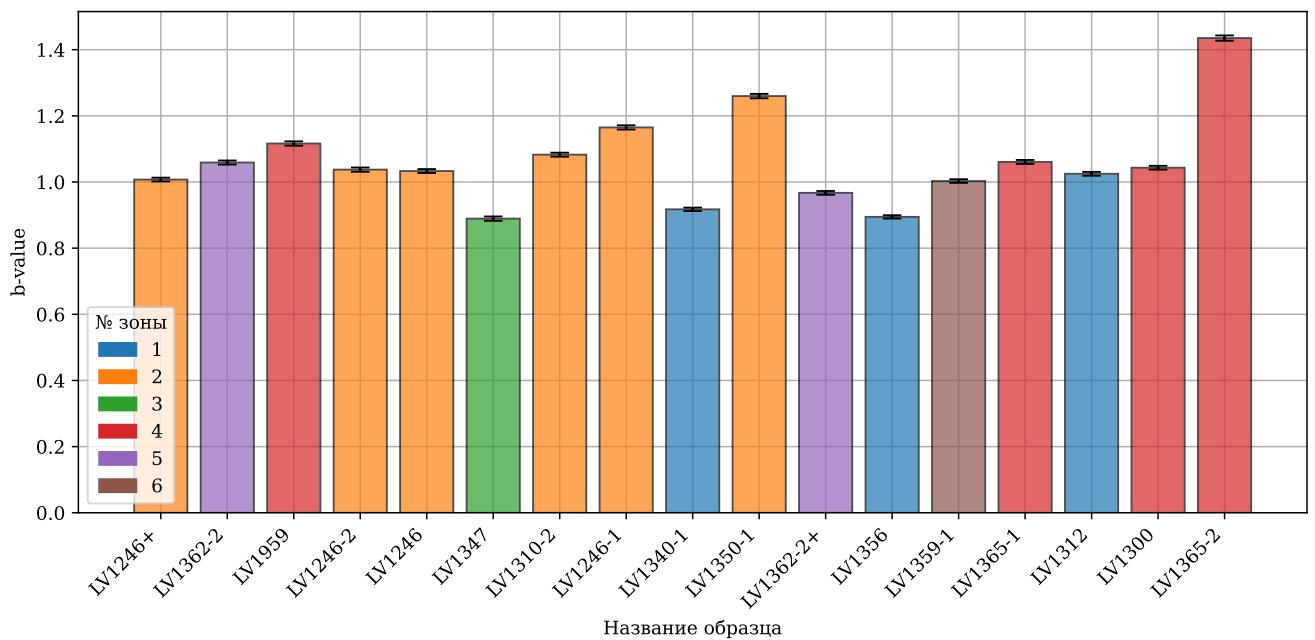


Рисунок 3 – Гистограммы среднего за этапы нагрева b -value для образцов метапесчаника, упорядоченные по возрастанию средней активности (слева направо) с указанием зон отбора.

Для искусственных образцов в целом наблюдалось меньше событий за эксперимент по сравнению с образцами горных пород. Средние значения b -value и активности ТАЭ не коррелировали между собой.

Сопоставление статистических параметров ТАЭ с параметрами микроструктуры проведено в разделе 5.2. Корреляционная матрица (коэффициент Пирсона) оцененных параметров метапесчаников (активность ТАЭ, b -value, параметр D , связанный с AF и RA , средний размер зерна и номер зоны отбора) показывает, что все параметры в совокупности не коррелируют друг с другом. Тем не менее, между наклоном графика повторяемости (b -value) и активностью ТАЭ есть положительная корреляция ($r = 0.66$), а номер зоны отбора существенно коррелирует с размером зерна ($r = 0.87$). Наглядно корреляция зоны отбора и размера зерна показана на рисунке 4.

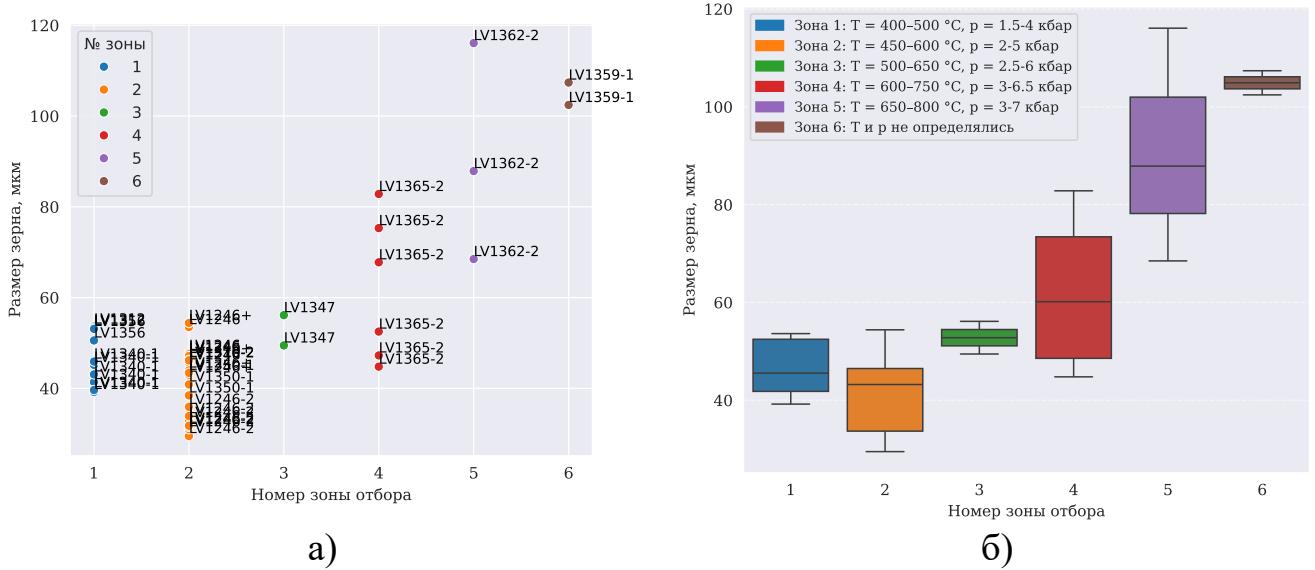


Рисунок 4 – Зависимость размера зерна от зоны отбора для каждой микрофотографии масштаба 200 мкм образцов метапесчаников: отдельные значения (слева) и диаграммы размаха (справа).

Для экспериментов с искусственными образцами наблюдается корреляция между размером частиц фракций песка и *b*-value для обоих циклов нагрева. С ростом размера частиц *b*-value уменьшается. Активность при этом не показывает значимой корреляции с размером частиц примеси.

В разделе 5.3 приведены основные результаты работы моделей машинного обучения, описанных в методологии (раздел 3.4) и примененных к анализу группируемости импульсов АЭ. Для образца, предварительно нагружавшегося и имеющего видимые проявления трещин, выявлено три кластера импульсов ТАЭ. Подробный анализ результатов позволяет предположить, что импульсы из третьего кластера с наибольшей вероятностью связаны с трещиной, которая активируется при температуре около 600°C и при дальнейшем нагреве начинает активно расти с увеличением энергии импульсов более чем в 2 раза (максимальная амплитуда больше первоначальной на 9 дБмкВ) [A.3]. Импульсы из третьего кластера не наблюдаются на этапе охлаждения, что говорит об отсутствии условий роста для трещины. Отсутствие кластеров импульсов для ненагружавшихся образцов песчаника и других горных пород с большой вероятностью говорит о различии механизмов термического разрушения без предварительного механического нагружения и после него.

Развернутая интерпретация всех полученных результатов диссертационного исследования приведена в разделе 5.4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, отметим ключевые результаты и выводы проделанной работы.

Сравнение временной и температурной динамики наклона графика повторяемости (b -value) и активности термоакустической эмиссии (ТАЭ) не выявил значимых различий между породами и образцами. Для гранитов и базальтов установлено уверенное снижение b -value с ростом активности ТАЭ, что соответствует модели лавинно-неустойчивого трещинообразования, применимой при термическом разрушении на масштабах зерен и кластеров зерен. Метапесчаники и искусственные образцы не показали подобной зависимости. Для некоторых групп метапесчаников, отобранных внутри одних и тех же зон отбора и характеризующихся схожими микроструктурными особенностями, наблюдается рост b -value с увеличением активности, что может объясняться накоплением изолированной микротрещиноватости без перехода к лавинообразному разрушению.

Подобный характер взаимных зависимостей параметров ТАЭ, отличных для разных типов пород, представляет интерес в сейсмологическом плане. Статистические параметры сейсмического процесса не показывают значимой разницы для областей с преобладанием различных типов горных пород. В отличие от сейсмологических данных, в данной работе, посвященной анализу экспериментального материала в условиях термического воздействия, наблюдаются различия между взаимным поведением активности ТАЭ и b -value в зависимости от типа пород, что обуславливает научное значение **первого защищаемого положения**.

Средний размер зерен метапесчаников сильно коррелирует с зоной отбора (коэффициент корреляции 0.87). С увеличением температуры и давления метаморфизма увеличивается средний размер зерен породы, что может быть обусловлено увеличением области, затронутой их частичным плавлением и перекристаллизацией в ходе метаморфизма. При этом корреляция параметров ТАЭ (b -value, активность, параметр D , связанный со средней частотой и скоростью нарастания сигнала) с размером зерна оказывается слабой или отсутствующей, что может объясняться фрактальным характером разрушения. Для искусственных гипсово-песчаных образцов обнаружено уменьшение b -value с ростом размера частиц песка, что может быть связано с особым механизмом разрушения вокруг изолированных вкраплений-песчинок в гипсовой матрице, когда размер частицы обуславливает масштаб развивающейся трещины.

Полученные результаты о различии зависимостей b -value от среднего размера зерна для метапесчаников и модельной породы позволяют заключить, что взаимное расположение частиц в структуре материала может оказывать существенное влияние на развитие разрушения при термическом воздействии.

Тектоно-термальные преобразования в ходе метаморфизма обуславливают сложность конфигурации и форм отдельных зерен (микрокристаллов) и в целом микроструктуры метапесчаников, которую необходимо учитывать наряду со средним размером зерна – характеристикой размера отдельных частиц микроструктуры. Этот результат подтверждает **второе защищаемое положение**.

Анализ группируемости импульсов ТАЭ показывает, что термическое разрушение развивается преимущественно за счет распределенных источников. Методы машинного обучения подтверждают наличие небольших кластеров событий в предварительно нагруженном образце с видимыми макротрещинами. В образцах, не подвергавшихся предварительному механическому воздействию, группы импульсов отсутствуют. Это подтверждает представление о том, что в случае термостимулированного разрушения при отсутствии крупных трещин источники импульсов ТАЭ распределены во всем объеме разрушающей области горной породы без выраженной локализации, что подтверждает **третье защищаемое положение**.

Основная проблема при анализе данных экспериментов по термическому разрушению горных пород заключается в том, что событий мало и одни и те же породы могут давать различную статистику. Перспективы исследований в данной области связаны с: 1) накоплением обширной базы акустико-эмиссионных данных для различных типов пород; 2) развитием методик микроструктурного анализа и оценки статистических параметров ТАЭ; 3) применением современных методов анализа, включая машинное обучение и нейронные сети, для выявления сложных взаимосвязей между разнородными параметрами.

Список опубликованных работ по теме диссертации

- A.1 *Краюшкин Д.В., Казначеев П.А., Белобородов Д.Е., Пономарев А.В., Индаков Г.С.* Обзор подходов к построению баз данных по лабораторным испытаниям горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 4. – С. 152–169. – EDN: CSQBХН (2.08 п.л., импакт-фактор 0.435 (SJR), вклад автора: анализ современного состояния баз данных, типизация структуры данных в экспериментах с горными породами, описание особенностей данных в случаях термического воздействия на породу).
- A.2 *Kaznacheev P.A., Indakov G.S., Podymova N.B., Ponomarev A.V., Matveev M.A., Maibuk Z.-Yu. Ya., Krayushkin D.V.* The Methods for Estimation of Rock Grain Size: Review and Comparison // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2025. – Vol. 61, No. 1. – P. 68–80. – EDN: RAQSQM (1.50 п.л., импакт-фактор 0.25 (JCI), вклад автора: анализ публикаций, расчет параметров микроструктуры, сравнение

описанных методов, интерпретация результатов, подготовка текста статьи по всем разделам).

- А.3 *Индаков Г.С., Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Подымова Н.Б., Краюшкин Д.В.* Отслеживание развития разрушения с помощью кластеризации импульсов термически стимулированной акустической эмиссии при отсутствии локации // Геофизические исследования. – 2025. – Т. 26, № 2. – С. 99–124. – EDN: GRSPPR (3.00 п.л., импакт-фактор 0.228 (SJR), вклад автора: анализ публикаций, реализация моделей машинного обучения средствами языка Python, подготовка данных для анализа, подбор гиперпараметров моделей, интерпретация данных, подготовка текста статьи по всем разделам).
- А.4 *Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Казначеев П.А., Багдасарян Т.Э., Матвеев М.А., Индаков Г.С.* Количественная оценка характерных размеров зерен лабораторных образцов горных пород методом широкополосной оптико-акустической спектроскопии // Физика Земли. – 2024. – № 6. – С. 93–111. – EDN: RGKEOK (2.19 п.л., импакт-фактор 1.678 (РИНЦ), вклад автора: анализ публикаций, обработка изображений, расчет микроструктурных параметров, сопоставление данных, полученных различными методами, и их интерпретация, подготовка разделов "введение", "результаты и обсуждение").

Переводная версия:

Podymova N.B., Ponomarev A.V., Kaznacheev P.A., Baghdasaryan T.E., Matveev M.A., Indakov G.S. Quantitative Estimation of the Characteristic Grain Sizes of Laboratory Rock Samples by the Broadband Optoacoustic Spectroscopy Method // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2024. – Vol. 60, No. 6. – P. 1039–1054. – EDN: PWVIJA (1.85 п.л., импакт-фактор 0.25 (JCI).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Nasseri M.H.B., Schubnel A., Young R.P.* Coupled evolutions of fracture toughness and elastic wave velocities at high crack density in thermally treated Westerly granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. – Vol. 44, no. 4. – P. 601–616. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.008.
2. *Faoro I., Vinciguerra S., Marone C., Elsworth D., Schubnel A.* Linking permeability to crack density evolution in thermally stressed rocks under cyclic loading // Geophysical Research Letters. – 2013. – Vol. 40, no. 11. – P. 2590–2595. – DOI: 10.1002/grl.50436.
3. *Xu X.L., Zhang Z.-Z.* Acoustic Emission and Damage Characteristics of Granite Subjected to High Temperature // Advances in Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–12. – DOI: 10.1155/2018/8149870.

4. *Chaki S., Takarli M., Agbodjan W.P.* Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions // Construction and Building Materials. — 2008. — Vol. 22, no. 7. — P. 1456–1461. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.04.002.
5. *Fredrich J.T., Wong T.-f.* Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 1986. — Vol. 91, B12. — P. 12743–12764. — DOI: 10.1029/JB091iB12p12743.
6. *Géraud Y.* Variations of connected porosity and inferred permeability in a thermally cracked granite // Geophysical Research Letters. — 1994. — Vol. 21, no. 11. — P. 979–982. — DOI: 10.1029/94GL00642.
7. *Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Вознесенский А.С., Винников В.А.* Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. — М. : Горная книга, 2015. — 241 с.
8. *Peng J., Rong G., Yao M., Ngai L., Wong Y., Tang Z.* Acoustic emission characteristics of a fine-grained marble with different thermal damages and specimen sizes // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2018. — Vol. 78, no. 17. — P. 4479–4491.
9. *Васин Р.Н., Никитин А.Н., Локачек Т., Рудаев В.* Акустическая эмиссия квазизотропных образцов горных пород, инициированная температурными градиентами // Физика Земли. — 2006. — № 10. — С. 26–35.
10. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород: Учебное пособие. — 5-е. — Москва : URSS, 2010. — С. 359.
11. *Schön J.H.* Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. — 2nd ed. — Amsterdam : Elsevier, 2015. — P. 512.
12. *Papadakis E.P.* From Micrograph to Grain-Size Distribution with Ultrasonic Applications // Journal of Applied Physics. — 1964. — May. — Vol. 35, no. 5. — P. 1586–1594. — DOI: 10.1063/1.1713671.
13. *Eberl D.D., Drits V.A., Srodon J.* Deducing growth mechanisms for minerals from the shapes of crystal size distributions // American Journal of Science. — 1998. — June. — Vol. 298, no. 6. — P. 499–533. — DOI: 10.2475/ajs.298.6.499.
14. *Peng J., Rong G., Yao M., Wong L.N.Y., Tang Z.* Acoustic emission characteristics of a fine-grained marble with different thermal damages and specimen sizes // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2019. — No. 78. — P. 4479–4491. — DOI: 10.1007/s10064-018-1375-6.
15. *Chmel A., Shcherbakov I.* Temperature dependence of acoustic emission from impact fractured granites // Tectonophysics. — 2014. — Vol. 632. — P. 218–223. — DOI: 10.1016/j.tecto.2014.06.015.
16. *Griffiths L., Lengliné O., Heap M.J., Baud P., Schmittbuhl J.* Thermal Cracking in Westerly Granite Monitored Using Direct Wave Velocity, Coda Wave Interferometry, and Acoustic Emissions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. — 2018. — Vol. 123, no. 3. — P. 2246–2261. — DOI: 10.1002/2017JB015191.
17. *Ржевский В.В., Ямчиков В.С., Шкуратник В.Л., Фараонов В.М., Лыков К.Г.* Термоэмиссионные эффекты памяти в горных породах // Докл. АН СССР. — 1985. — Т. 283, № 4. — С. 843–845.
18. *Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В.* Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурного моделирования // Физика Земли. — 2010. — № 2. — С. 17–49.
19. *Septyana T., Nugraha A.D., Widjiantoro S., Supriyono.* Multi-channel waveform clustering: a first look at microseismic multiplets from coalbed methane stimulation // Geoscience Letters. — 2019. — Vol. 6:7. — DOI: 10.1186/s40562-019-0137-z.

20. Адушикин В.В., Китов И.О., Санина И.А. Снижение порога обнаружения сигналов методом кросскорреляции волновых форм за счет использования сейсмической группы трехкомпонентных датчиков // Геофизические исследования. — 2016. — Т. 17, № 1. — С. 5—28.
21. Zhou Z., Wang H., Cai X., Chen L., E Y., Cheng R. Damage Evolution and Failure Behavior of Post-Mainshock Damaged Rocks under Aftershock Effects // Energies. — 2019. — Vol. 12, 23:4429. — DOI: 10.3390/en12234429.
22. Das A.K., Suthar D., Leung C.K.Y. Machine learning based crack mode classification from unlabeled acoustic emission waveform features // Cement and Concrete Research. — 2019. — Vol. 121. — P. 42—57. — DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.03.001.
23. Великославинский Д.С. Метаморфические зоны в Северном Приладожье и оценка температур метаморфизма кианитового и андалузитового типов регионального метаморфизма // Метаморфические пояса СССР. — Ленинград : Наука, 1971. — С. 61—70.
24. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б. Лабораторное исследование термостимулированных разрушений горных пород // Триггерные эффекты в геосистемах: мат. IV Всеросс. конф. ГЕОС. — М., 2017. — С. 163—171.
25. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В. Оборудование и методика исследования термоакустоэмиссионных эффектов памяти в горных породах // Сейсмические приборы. — 2019. — Т. 55, № 1. — С. 29—45. — DOI: 10.21455/si2019.1-2.
26. Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарёв А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” // Геодинамика и тектонофизика. — 2022. — Т. 13, № 2. — С. 0579. — DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0579.
27. Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Казначеев П.А., Багдасарян Т.Э., Матвеев М.А., Индаков Г.С. Количественная оценка характерных размеров зерен лабораторных образцов горных пород методом широкополосной оптико-акустической спектроскопии // Физика земли. — 2024. — № 6. — С. 93—111. — DOI: 10.31857/S0002333724060063.
28. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1944. — Oct. — Vol. 34, no. 4. — P. 185—188. — DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>.
29. Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П. Особенности развития сейсмической роевой активности в коринфском рифте в 2000–2005 гг. // Физика Земли. — 2011. — № 7. — С. 54—66.
30. Sun J., Liu D., He P., Guo L., Cao B., Zhang L., Li Z. Experimental investigation on acoustic emission precursor of rockburst based on unsupervised machine learning method // Rock Mechanics Bulletin. — 2024. — Vol. 3, no. 2. — P. 100099. — DOI: 10.1016/j.rockmb.2023.100099.
31. ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. — ASTM, 2021. — 11 p.
32. Lehto P., Remes H., Saukkonen T., Hänninen H., Romanoff J. Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel // Materials Science and Engineering: A. — 2014. — Vol. 592. — P. 28—39. — DOI: 10.1016/j.msea.2013.10.094.
33. Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Морозов Ю.А., Матвеев М.А., Смирнов В.Б., Шарычев И.В. Исследование структуры метапесчаников методом широкополосной акустической спектроскопии с лазерным источником ультразвука // Геофизические процессы и биосфера. — 2023. — Т. 22, № 4. — С. 13—24. — DOI: 10.21455/GPB2023.4-2.
34. Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. — 2019. — № 1. — С. 166—179. — DOI: 10.31857/S0002-333720191166-179.