

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Индаков Глеб Сергеевич

**ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ
В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ЕЕ СВЯЗЬ С МИКРОСТРУКТУРОЙ**

1.6.9 Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., доцент
Смирнов В.Б.

Научный руководитель:
к.т.н.
Казначеев П.А.

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Обзор современного состояния исследований процессов разрушения горных пород	15
1.1 Исследование трещиноватости горных пород	15
1.1.1 Методы неразрушающего контроля при испытаниях	15
1.1.2 Микроскопия	25
1.1.3 Микроструктурные особенности горных пород как поликристаллических материалов	28
1.1.4 Методы определения размеров зерен горных пород на основе микроструктурных снимков	31
1.2 Эксперименты по разрушению горных пород	38
1.2.1 Механическое и термическое воздействие	38
1.2.2 Развитие разрушения в горных породах при термическом воздействии	39
1.2.3 Группируемость событий акустической эмиссии	44
Глава 2. Экспериментальный материал и методика проведения экспериментов	49
2.1 Экспериментальный материал	49
2.1.1 Образцы гранитов и базальтов	49
2.1.2 Образцы метапесчаников	50
2.1.3 Образцы песчаника	53
2.1.4 Искусственные образцы	54
2.2 Эксперименты по термическому воздействию	55
2.2.1 Экспериментальная установка	55
2.2.2 Методика регистрации и первичной обработки сигналов акустической эмиссии	55
2.3 Оптическая и электронная микроскопия	56
2.4 Широкополосная акустическая спектроскопия	58
Глава 3. Параметры термически стимулированной акустической эмиссии . .	63
3.1 Активность акустической эмиссии	63
3.2 Наклон графика повторяемости (b-value)	64
3.2.1 Расчет b-value, эквивалентного оценке по энергиям событий	64
3.2.2 Оценка методом линейной регрессии	68

3.2.3	Оценка максимального правдоподобия по максимальной кривизне	69
3.2.4	Оценка максимального правдоподобия для цензурированной выборки	70
3.3	Вторичные параметры импульсов ТАЭ	72
3.4	Кластеризация импульсов ТАЭ	74
3.4.1	Входные данные для кластеризации импульсов ТАЭ	74
3.4.2	Методы машинного обучения, примененные в работе	79
Глава 4.	Параметры микроструктуры исследованных горных пород	84
4.1	Оценка размеров зерен горных пород по микрофотографии	84
4.1.1	Ручное измерение	84
4.1.2	Метод пересечения опорных линий	85
4.1.3	Квазипланиметрические методы	87
4.1.4	Сравнение методов	89
4.2	Верификация полученных оценок размеров зерен	92
Глава 5.	Результаты и обсуждение	98
5.1	Активность акустической эмиссии и наклон графика повторяемости (b-value)	98
5.1.1	Граниты и базальты	98
5.1.2	Метапесчаники	101
5.1.3	Искусственные образцы	104
5.2	Сопоставление параметров акустической эмиссии и микроструктуры	104
5.3	Группирование импульсов акустической эмиссии	107
5.3.1	Задача классификации	108
5.3.2	Задача поиска аномалий	110
5.3.3	Задача кластеризации	112
5.4	Выводы и обсуждение	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ		126
ПРИЛОЖЕНИЕ		146

ВВЕДЕНИЕ

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

Актуальность темы

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 Nasserі M.H.B., Schubnel A., Yong R.P. [1; 4–6] 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. [7—11] 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. [12–14] 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. [15–19] 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.

Таким образом, 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 малоработанных 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, [20]), 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; 21; 22].

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 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 р-Т 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 метаморфизированных песчаников Северного Приладожья, обладающие сходным метаморфическим генезисом, но сформировавшиеся при различных p - T 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 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 p-T 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 p-T 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.

Достоверность результатов исследования, методология

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 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 оптическом микроскопе. Обработка изображений производилась с использованием программного обеспечения собственной разработки, созданного на основе стандартизированных 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 p - T 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 подобраны 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. Соискателем лично и в соавторстве были подготовлены научно-исследовательские отчеты и публикации по теме диссертационной работы.

Апробация результатов и публикации автора

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.

Список публикаций в журналах, удовлетворяющих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова:

1. *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., JCI = 0.25, вклад автора: анализ публикаций, расчет параметров микроструктуры, сравнение описанных методов, интерпретация результатов, подготовка текста статьи по всем разделам).

2. **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., SJR = 0.228, 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).
3. **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: CSQBXH (2.08 п.л., SJR = 0.435, вклад автора: анализ современного состояния баз данных, типизация структуры данных в экспериментах с горными породами, описание особенностей данных в случаях термического воздействия на породу).
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., ИФ РИНЦ = 1.678, 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.

Список конференций, на которых были представлены доклады по теме диссертационного исследования:

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).

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, посвященных обзору литературы (глава 1), описанию экспериментального материала (глава 2), методов и особенностей их приложения к рассматриваемой задаче (главы 3–4), результатов исследования (глава 5), а также заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Работа изложена на 152 страницах, содержит 32 рисунка и 13 таблиц. В списке литературы приведено 169 источников.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1. Исследование трещиноватости горных пород

Методы, используемые для изучения процессов трещинообразования в горных породах, на сегодняшний день можно условно разделить на два класса: «статические» и «динамические». К первому классу относятся те методы, с помощью которых невозможно или крайне затруднительно производить оценку трещиноватости непосредственно во время термического или механического воздействия на породу и осуществлять мониторинг её состояния в реальном времени. Они используются для определения минерального состава и структурных свойств образцов, а также для исследования распределения сети трещин и их характеристик. К их числу принадлежат методы микроскопии. Ко второму классу можно отнести методы неразрушающего контроля, такие как акустико-эмиссионный (метод акустической эмиссии – АЭ), ультразвуковые методы получения данных о скоростях упругих волн и их затухании и методы оценки фильтрационно-емкостных свойств. Указанные методы являются самыми распространенными, но, кроме них, используются и другие (например, метод компьютерной томографии – КТ, или нейтронный дифракционно-временной метод – TOFD, [23; 24]. Для полноценного анализа развития разрушения в породе методы различных типов комбинируют между собой.

1.1.1. Методы неразрушающего контроля при испытаниях

Методы оценки скоростей упругих волн и фильтрационно-емкостных свойств

Методы неразрушающего контроля позволяют эффективно отслеживать происходящие в образце изменения с течением времени. Одним из них является ультразвуковой метод измерения скоростей упругих волн. Информация об изменении значений скоростей волн на различных этапах эксперимента

позволяет судить о характере накопления трещин в образцах и делать оценки относительно их числа. Часто измерения упругих волн проводятся наряду с регистрацией АЭ и измерением других физических параметров породы для дополнительной проверки результатов.

В работе [20] изучалось влияние термического повреждения на некоторые физические свойства образцов гранита, такие как пористость, проницаемость и распространение ультразвуковых волн в породе. Рассматривались 15 образцов гранита, нагревавшихся под внешним давлением на скорости 1 град./мин до температур 200, 300, 400, 500 и 600 °С и охлажденных на той же скорости. Измерение открытой пористости показало её значительное увеличение (от 0.64–0.77% до 2.85%) на этапе нагрева от 500 до 600 °С. Это объясняется соединением сетей трещин, созданных на предыдущем этапе, и увеличением количества раскрывающихся трещин, что обусловлено сильным влиянием анизотропного расширения кварца, претерпевающего полиморфный α – β переход при температуре 573 °С. Проницаемость в обсуждаемой работе измерялась в условиях внешнего давления 0.8 МПа путем прокачки через образцы при разности давлений 0.5 МПа инертного газа, более чувствительного к связности сети трещин, чем жидкости. Использование газа для измерений связано также с тем, что просачивающаяся жидкость может вступать в реакцию с породой (изменение смачиваемости жидкости, набухание глины и других минералов и химическое взаимодействие между породой и жидкостью), что также влияет на проницаемость. Кроме того, на проницаемость породы могут влиять такие характеристики, как пористость, геометрия поровых пустот, извилистость и связность пор.

Коэффициент проницаемости рассчитывался по закону Хагена–Пуазёйля для ламинарного течения вязкой сжимаемой жидкости. До 500 °С проницаемость увеличивалась плавно, а от 500 до 600 °С испытала резкий рост, что авторы объясняют скачком пористости. Скорости продольных упругих волн измерялись системой, включавшей генератор импульсов, обеспечивающий испускание, прием, усиление и фильтрацию сигналов, и два широкополосных пьезоэлектрических преобразователя с резонансной частотой 500 кГц. Для обеспечения плотного контакта с датчиками образец находился под давлением,

создаваемым постоянной массой. Скорость р-волн измерялась при максимальной температуре в эксперименте. До 300 °С падение скорости невелико – 12%, при нагреве до 500 °С – 32%. После достижения температуры 500 °С скорость упала на 63%. Также до 500 °С максимальная амплитуда сигнала постепенно снижалась, а при 600 °С затухание достигло максимума – для некоторых образцов скорость р-волн невозможно было измерить. Также было замечено затухание высоких частот при повышении температуры, что характеризует взаимодействие волн высоких частот с микротрещинами, имеющими размер больше длины волны. Это позволяет судить о размере трещин и/или заключить, что их ориентация неблагоприятна для распространения р-волн в исследуемых образцах. Эти результаты согласуются с данными о пористости и проницаемости.

В работе [25], посвященной исследованию течения флюида через пористую среду (песчаники Castlegate), данные об изменении проницаемости отличаются от полученных в [20], что может быть обусловлено рассмотрением породы иного типа. Было обнаружено, что в проведенных экспериментах механическое и тепловое воздействие приводят к существенной и необратимой потере проницаемости ($> 50\%$). Для изучения микроструктуры использовалась рентгеновская компьютерная томография с разрешением 56 и 3.5 мкм на воксел. Поддерживалось внешнее давление 3 МПа, поровое – 1 МПа. Возможными причинами снижения проницаемости при нагреве могут являться тепловое расширение зёрен, повышение сжимаемости, растворение/осаждение минералов, изменение эффективной пористости из-за изменения толщины двойного электрического слоя и др. Целью обсуждаемой работы являлось установить, как температура сама по себе влияет на снижение проницаемости. Нагрев производился от комнатной температуры до 105–107 °С. Для одного из образцов при нагреве до максимальной температуры проницаемость упала на 250 мД. При охлаждении до 85 °С она резко снизилась, после чего восстановилась до уровня, который был при максимальной температуре нагрева. Для других образцов наблюдалась похожая картина. Скорости р-волн с ростом температуры падали, также зафиксировано резкое падение скоростей на этапе охлаждения (образцы остывали естественным образом), что свидетельствует об активном протекании процессов трещинообразования. Результаты компьютерной томографии для образцов после термической и механической нагрузки позволяют заключить,

что наблюдение согласуется со сценарием «закрытия» или закупоривания части распределенных каналов во время деформации, чему способствует неоднородность и анизотропия свойств расширения среди компонентов. Это приводит к снижению проницаемости за счет увеличения общей извилистости поровых каналов. В случае трехосного сжатия (внешнее ограничение на увеличение объема при нагреве) термическое расширение приводит к уменьшению порового пространства и, как следствие, проницаемости, что происходит даже в условиях активного трещинообразования.

Анализ данных о скоростях волн, полученных методом интерферометрии кодовых волн (Coda Wave Interferometry – CWI), был проведен в работе [26]. Он заключается в отслеживании изменений скорости волны на основе оценок относительных задержек в многократно рассеянных волнах путем использования взаимных корреляций сигналов с высоким разрешением. Ожидается, что кода содержит поверхностные и многократно отраженные волны. Для случая, когда энергии р- и s-волн из-за многократных отражений пришли в равновесие, можно рассчитать общее изменение скорости в методе CWI. При этом порода полагается изотропной, гомогенной, без термических деформаций. Скорость s-волн измерялась при комнатной температуре и пересчитывалась к температуре нагрева с учетом полученной задержки CWI и данных о скоростях р-волн. Рассчитанная таким образом скорость – псевдо v_s . Отношение скорости v_p к псевдо v_s после нагрева уменьшилось с 1.84 до 1.34. Авторы отмечают, что коэффициент Пуассона в этом случае отрицателен, что возможно, но маловероятно для изотропных материалов. Тем не менее, такое уменьшение согласуется с теоретическими соображениями о росте существующих микротрещин, которые полагаются сухими и эллиптическими, в результате чего растет плотность трещин.

В [27] на основе измерений скоростей упругих волн в образцах удалось подтвердить вывод об изотропности характера трещинообразования в случае термического воздействия. Скорость р-волн измерялась вдоль главной и двух ортогональных осей, из последних двух рассчитывалась средняя радиальная скорость. Фактор анизотропии рассчитывался как $\Gamma = (V_{ax} - V_{rad})/V_{ax}$. Было обнаружено, что скорости волн снизились после воздействия на образцы. Для

необработанных образцов $\Gamma < 5\%$, для тех, что подверглись механическому воздействию $21\% < \Gamma < 45\%$, для образцов, подвергнутых термическому воздействию, – $\Gamma < 5\%$. Это, по мнению авторов, связано с тем, что трещины в трехосном механическом испытании имеют предпочтительную ориентацию, параллельную направлению максимального нормального напряжения. Термическое воздействие, в котором отсутствует выделенное направление глобального поля напряжений, таким образом, не влияет на анизотропию материала, создавая изотропные сети трещин, так как распределение минералов в граните относительно изотропно, что подтверждает результаты, полученные авторами с помощью микроскопии. Заметное снижение скоростей волн в образцах, подвергнутых термообработке, без существенного изменения изотропности в их распространении отмечается также в других работах (например, [12]).

Авторами [1] была осуществлена попытка проанализировать плотность трещин по данным о скоростях р-волн. После охлаждения образцов в них были измерены скорости р-волн вдоль оси Z. В предположении, что изменения динамических упругих свойств коррелируют с количеством повреждений в породе, и используя модель эффективной среды (ЕМТ), авторы преобразовали поле скоростей упругих волн в безразмерную плотность трещин. Такой метод оценки плотности трещин переоценивает её величину, задавая верхнюю границу оценки. Авторы связали между собой упругие модули (через скорости) и коэффициент интенсивности напряжений (КИН), пренебрегая изменениями поверхностной энергии материала и считая её внутренним свойством материала, не зависящим от числа трещин в нем. Тогда по данным о скоростях р-волн можно предсказать изменение КИН первой моды деформаций.

Применение методов оценки фильтрационно-емкостных свойств практически невозможно в процессе высокотемпературного термического воздействия, а применение методов оценки скоростей крайне затруднено из-за большого затухания [28].

Метод акустической эмиссии

Одним из самых удобных и эффективных способов мониторинга разрушения горных пород в лабораторных условиях 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 [10]. Акустико-эмиссионный метод регистрации образования и роста микротрещин в горных породах уже более полувека используется в исследованиях развития трещиноватости при внешнем нагружении. События АЭ распределены, в основном, по закону Гутенберга-Рихтера, что позволяет проводить аналогии между результатами лабораторных экспериментов с образцами горных пород и процессами в земной коре [29]. АЭ в породе обычно инициируется возникновением и развитием микротрещин, связанных с дислокациями, концентрирующимися вдоль границ зерен, а также слиянием межзерновых трещин. Сигнал АЭ, зарегистрированный датчиком, сначала усиливается в предварительном усилителе, а затем передается в регистрирующую систему на компьютер для анализа. Записанные данные АЭ обычно ограничены пороговым значением амплитуды сигнала, что делается для фильтрации фоновых шумов. 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 [16].

Для изучения процессов терморазрушения горных пород особый интерес представляет термически стимулированная акустическая эмиссия – ТАЭ. В естественных условиях нагрев горных пород происходит в результате выделения энергии при распаде радиоактивных элементов, контакта с магмой или с геотермальными системами. Термостимулированная акустическая эмиссия 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. Вклады каждого из источников в результирующую ТАЭ существенно различаются и зависят, в частности, от режимов нагрева, исходных характеристик, минерального состава, упругих, прочностных свойств материала, энергии генерируемых импульсов [10].

Анализ ТАЭ был проведен в работе [12]. Во время охлаждения зафиксировано гораздо больше событий АЭ (на 98%) по сравнению с этапами нагрева. Низкая АЭ, возникающая при нагреве, по мнению авторов, связана с преобладанием сжимающих напряжений и с небольшими приращениями ранее существовавших трещин по границам зерен и ростом относительно небольшого количества новых внутризерновых микротрещин. Напротив, очень высокая АЭ, возникающая во время охлаждения, по мнению авторов, связана с преобладанием растягивающих напряжений и с образованием значительного количества полноразмерных трещин по границам зерен, а также со значительными приращениями внутризерновых трещин (особенно при самых высоких значениях температуры). Полученные результаты позволяют заключить, что активность ТАЭ при охлаждении больше, чем при нагреве, как по числу событий в единицу времени, так и по выделяющейся энергии, из-за того, что прочность пород меньше на растяжение, чем на сжатие, и, таким образом, интенсивность развития микротрещин выше при растяжении, т.е. охлаждении образца. Тем не менее, в работе [26] при обсуждении результатов делается акцент на том, что хотя в проведенных экспериментах АЭ при охлаждении была несколько выше, чем при нагреве, её нельзя полностью связывать с трещинообразованием, так как значение скорости p -волн сначала падало при нагреве и затем слегка восстанавливалось при охлаждении. По мнению авторов, АЭ при охлаждении вызвана также трением берегов трещин при сжатии кристалла, а не только трещинообразованием. Авторы отмечают, что для разных пород процесс термического трещинообразования может отличаться, например, для гранитов, базальтов и дацитов.

Авторы [30] отмечают, что методы обработки сигналов АЭ можно разделить на 2 типа: анализ параметров сигнала и анализ волновых форм. Статистические параметры позволяют описать напряженное состояние среды

при разрушении. Анализ волновых форм может быть основан на методе Фурье, когда сигнал из временного представления преобразуется в частотное. Сигналы различаются между собой по преобладающей частоте, причем высокочастотные сигналы АЭ соответствуют мелкомасштабной трещине, а низкочастотные – крупномасштабной. Также частота АЭ связана с прочностью породы: чем выше интенсивность напряжений, тем шире распределение основной частоты сигнала. Изменение волновых форм сигналов АЭ связано со многими факторами, такими как: (1) способ нагружения, (2) физические свойства самого материала, такие как модуль упругости, распределение внутренних дефектов, неоднородность материала, пористость, содержание влаги и др. В [30] после высокотемпературного воздействия физико-механические свойства песчаника изменялись с повышением температуры, амплитуда АЭ увеличивалась. Амплитуда низкочастотных сигналов была больше амплитуды высокочастотных на всех этапах эксперимента.

В работе [31], в которой исследовались образцы песчаников (Jiangsu Province, China), на основе зарегистрированной ТАЭ удалось разбить процесс трещинообразования на этапы. Авторы отмечают, что при достижении определенных температур наблюдаются всплески активности АЭ, что они связывают с характером роста трещин. Трещины начинают расширяться, как только поле внутренних напряжений достигает нового баланса напряжений. С повышением температуры изначально имеющиеся трещины в горных породах постепенно увеличиваются, но температура еще не достигает порога начала роста крупных трещин, так как для этого необходимы большие внутренние напряжения. Поэтому, когда достигается определенная температура, наблюдается внезапное «мутационное» изменение сигнала АЭ. Авторы выделили 5 стадий развития разрушения в породе:

1. 0–70 °C. Начальная стадия (стадия развития микродефектов). Отсутствует значимая АЭ.
2. 70–90 °C. Пороговая стадия. Развитие имеющихся микротрещин и образование новых в результате испарения воды. Трещины малых размеров.
3. 90–125 °C. Стадия «мутирующей» АЭ. Достижение порога начала роста

больших трещин, большое количество событий АЭ.

4. 125–150 °С. Стационарная стадия развития трещин. Термическое расширение образца в целом, снижение активности АЭ.
5. 150–300 °С. Мультистадийное развитие трещин. Образование сетей трещин, трещины группируются, в основном, вдоль границ зерен минералов, развитое термическое растрескивание породы. Содержащаяся в породе вода начинает испаряться после достижения 100 °С. При 200 °С связанная вода выходит из соединений с минералами и заполняет часть трещин, она испаряется при 300–500 °С. Это может обуславливать аномальную АЭ при этих температурах.

Таким образом, метод АЭ может успешно применяться при термическом воздействии, для чего необходимо вывести сигнал АЭ с помощью акустического волновода из зоны нагрева [10].

Примеры других методов

Для исследования микроструктуры можно применять и другие методы. В работе [23] наряду с АЭ используется нейтронный дифракционно-временной метод (TOFD) для исследования развития термической деформации в породе. Нейтронный метод необходим для мониторинга изменений в параметрах решетки в выделенном объеме (ограниченном размерами одного зерна), которые можно выразить как температурно зависимую упругую деформацию для последующего сравнения с ненапряженным состоянием и вычисления влияния соседних зерен на выбранный объем.

Напряжения при термическом воздействии обусловлены температурным градиентом, различием в коэффициентах температурного расширения минералов и по-разному ориентированных зерен. Чтобы исключить первые две возможности, в обсуждаемых экспериментах использовалась мономинеральная порода (кварцит) и осуществлялся нагрев на малой скорости. Для исследования состояния кварцита без влияния соседних зерен (не в составе породы) минерал был измельчен на кристаллы размером 20 мкм. Параллельно производился нагрев минерала, содержащего множество зерен, и измельченного порошка.

Разрешение нейтронного дифрактометра, использовавшегося для измерений, составляло $\Delta d/d = 5 \times 10^{-4}$ ($0.3 \text{ \AA} < d < 0.6 \text{ \AA}$). Образцы были помещены под давлением в 30 мБар в гелиевую атмосферу и нагревались от 30 до 270 °С со скоростью 2 град./мин. Диффракционные снимки производились каждые 18 минут нагрева, АЭ записывалась непрерывно.

У кристалла кварца есть две оси – a и c . Обнаружено [23], что свободный кристалл расширяется по оси a сильнее, а по оси c слабее. Это связано с тем, что в породе влияние соседних зерен препятствует полному расширению кристалла по сильно расширяющейся оси a , что приводит к общему растяжению вдоль слабо расширяющейся оси c . Активность АЭ максимальна при 180 °С, хотя в прочих экспериментах, где исследуются гетероминеральные породы, пик активности на фоне стабильного сигнала наблюдается раньше (около 100 °С), что связано с влиянием различия в расширении минералов с ростом температуры.

На основе значений деформаций кристаллов по осям a и c в порошке и в породе были рассчитаны напряжения, которые действуют на отдельное зерно кварца в породе при температуре максимальной активности АЭ (180 °С). Сжимающие напряжения (вдоль a) – 25.1 МПа, растягивающие (вдоль c) – 0.85 МПа. Поэтому предполагаемый авторами механизм разрушения – расщепление отдельных зерен кварца из-за сжимающего напряжения, возникающего вдоль их осей, чему способствует небольшое растягивающее напряжение, возникающее вдоль их осей. Прочность на растяжение для исследуемых образцов составляла 22 ± 3 МПа. В связи с этим авторы полагают, что термические напряжения, инициирующие развитие разрушения, должны достигать величины прочности на растяжение, что наблюдалось в экспериментах при достижении температуры 180 °С [23].

Полевые исследования развития трещиноватости часто проводятся с массивными частями горных пород, что обуславливает их специфику. В работе [32] исследовалось комплексное влияние многих факторов на термическую деформацию породы, способную привести к обвалу (камнепаду). Авторы проанализировали данные за 3.5 года о температуре, интенсивности света, влажности и размерах межлистовой трещины, собранные для частично отделившегося от основной части породы в результате десквамации

гранодиоритового пласта (Yosemite Valley, California, USA). Деформации измерялись с помощью лидара и специально разработанного трещинометра. По мнению авторов, температура играла решающую роль в развитии трещины. Наибольшая выпуклая деформация наблюдалась в часы, когда температура породы максимальна (около 13–16 часов), обратная деформация – когда температура низкая (около 7–9 часов). То же справедливо для сезонов и времен года. Тем не менее, наибольшее влияние остается за дневными перепадами температур, поэтому ожидать камнепадов стоит в периоды, когда перепады температур максимальны (март-апрель, октябрь-ноябрь).

Нагрев пласта приводит к двум типам деформации: изгиб из-за температурного градиента и расширение в результате общего нагрева породы [32]. Продольные деформации в обоих случаях можно рассчитать. Они оказываются в несколько раз больше реальных. Таким образом, лишь часть термической энергии идёт на деформацию, остальная запасается в виде напряжений на концах трещины в листе (4600–5700 кПа). Сжимающие напряжения, действующие параллельно искривленной поверхности, создают растягивающие напряжения, перпендикулярные ей, которые оказываются порядка 2–4 кПа. Для трещины нормального отрыва (КИН I) с заданной разностью растягивающих напряжений и с учетом параметров листа можно сделать оценку КИН: $(0.01–0.02) \times \sqrt{m}$ МПа, где m – параметр, зависящий от полудлины трещины отрыва. Для развития трещины (и начала обвала) необходимо превышение КИН значения $K_{IC} = (0.04–0.70) \times \sqrt{m}$ МПа (оценено для подобных гранодиоритовых пластовых образований). Хотя термические напряжения могут быть вблизи нижней границы предела статической вязкости, циклическое воздействие температуры может приводить к субкритическому росту трещин, в результате превышения ими предела коррозии под напряжением. Этот предел составляет около 10% от K_{IC} , поэтому термическое воздействие может обуславливать камнепады.

1.1.2. Микроскопия

Наиболее распространенными вариантами методов микроскопии являются оптическая, электронная и рентгеновская. Также применяются другие, более

редкие виды микроскопии, такие как конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия и проч. Все методы широко освещены в литературе. Часто в таких методах оказывается необходимым приготовление тонкого среза породы. В [27] описаны эксперименты по термическому и механическому воздействию на образцы мелкозернистого гранита La Peyratte с целью выявления отличий в особенностях структуры трещин, образующейся в каждом из случаев. Для микроструктурного анализа использовалась конфокальная лазерная сканирующая микроскопия. Образцы были заполнены маловязкой эпоксидной смолой с флуоресцентным красителем. Из-за низкой проницаемости гранита ($< 10^{-18} \text{ м}^2$), смола закачивалась под давлением 10 МПа. Из образцов под произвольным углом были вырезаны пластины толщиной 200–300 мкм. В 2D анализе исследовались отдельные плоскостные срезы пластины, делалось 25 снимков разрешением 512×512 пикселей, для каждого из которых исследовалась ориентация трещин, из чего делался вывод о степени анизотропии в их распределении. Большее число трещин в образцах, подвергшихся механической нагрузке, ориентировано вдоль плоскости разрушения (или плоскости максимальных касательных напряжений для неразрушившихся образцов). Для образцов, подвергшихся термической обработке, явных пиков в распределении не выявлено. Для 3D анализа был выбран объем образца $320 \times 320 \times 200$ мкм, снимки делались с шагом по глубине 2 мкм, всего 30 снимков разрешением 256×256 пикселей. Это позволило обнаружить, что большинство трещин находятся на границах между минералами. Многие из трещин, ориентированных преимущественно вдоль максимального сжимающего напряжения, проходят сквозь зерна различных минералов, не только вдоль их границ.

Изучение распределения трещин с помощью электронного микроскопа было осуществлено в работе [12], в которой описано общее исследование развития трещин при нагревании и охлаждении вулканических пород мелкозернистого базальта (SW Iceland, Seljadalur) и дацита с высоким содержанием кремнезема (Nea Kameni, Santorini). Анализировались изображения образцов до и после термической обработки. Для образцов базальта было обнаружено, что термическое воздействие существенно увеличило общее количество трещин, но не привело к значительному увеличению их средней длины. Трещины

были в основном изотропно ориентированы и равномерно распределены по всему периметру. Общее количество трещин увеличилось примерно на 42% после термообработки, в то время как в образцах дацита это увеличение было меньше и составило около 20%. По мнению авторов, из-за того, что снимки не дают трехмерной картины, зарегистрированное увеличение представляет собой минимально возможное изменение, т.е. является нижней границей оценки. Также авторы отмечают, что одним из минусов такого анализа они считают невозможность различить трещины, образовавшиеся в ходе нагрева и охлаждения.

В другой работе [1] исследовалась трещиноватость гранитов Westerly и её связь с коэффициентом интенсивности напряжений (КИН). В проведенных экспериментах 4 образца подвергались нагреву до температур 250, 450, 650 и 850 °C на скорости 1–2 град./мин, ещё 4 оставались при комнатной температуре. Трещины отмечались на оптических микроскопических снимках 4.5×3.4 мм (88 изображения для покрытия всей интересующей области) по методу Hadley: трещина на протяжении всей длины не должна отклоняться более чем на 20° от направляющей линии. Длина межзерновых трещин составляла от 0.03 до 0.8 мм. Для трещин вдоль границ зерен при нагреве длина варьировалась от 0.07 до 3.6 мм. Так как 1 пиксель составляет 1.5 мкм, был выбран минимальный разрешающий размер трещины в 0.05 мм. Для оценки ширины трещин использовался сканирующий электронный микроскоп. Также проводился анализ оптических изображений для определения оптической плотности трещин и типов контактов минералов в породе вдоль исследуемой трещины. Отмечается, что оптический метод недооценивает плотность трещин, когда количество трещин становится слишком большим, чтобы их можно было подсчитать. Типы минеральных контактов определялись как процент площади контакта на основе цветных кодов минералов. Оптические плотности микротрещин определяли путем сканирования изображения по наборам параллельных линий, последовательно ориентированных вплоть до 180°, и подсчета границ, пересекаемых этими линиями. Общее количество пересечений было преобразовано в длину трещины, а затем в оптическую плотность трещины, выраженную в мм/мм² и соответствующую накопленной длине трещин в выбранной области, из которой рассчитывалась трещиноватая пористость.

Трещины при этом рассматривались как цилиндры или как эллипсы. Модель цилиндрической трещины обычно предпочтительнее для оценки морфологии границ зерен или межкристаллитных трещин, тогда как модель эллиптической трещины лучше подходит для внутризерновых или внутрикристаллических трещин.

Методы микроскопии позволяют непосредственно обнаружить трещины, сформировавшиеся после воздействия, но применяются только после воздействия. Существуют методики и оборудование для механического нагружения миниатюрных образцов непосредственно в камере электронного микроскопа для наблюдения в реальном времени, но для термического высокотемпературного воздействия такая методика неприменима.

1.1.3. Микроструктурные особенности горных пород как поликристаллических материалов

При изучении твердых тел, для которых характерно наличие структурных отдельностей, размеры этих отдельностей могут определять макроскопические свойства твердого тела. Наиболее распространенный тип таких твердых тел – это поликристаллические тела, состоящие из множества отдельных кристаллов. Особенностью горных пород как твердых тел является наличие отдельностей – зерен, которые могут быть отдельными кристаллами (называемыми также микрокристаллами или кристаллитами) самых различных минералов, агрегатами кристаллов (например, ооидами) или включениями аморфных веществ. Также в составе горной породы могут содержаться цемент в виде заполнителя пространства между зернами, жидкие и газообразные вещества (флюиды) в виде заполнителя пустотного пространства. Для горных пород характерен существенный разброс зерен по размерам. В силу сложного строения горные породы чаще определяют не как поликристаллические тела, а как устойчивые агрегаты (конгломераты) минералов [33; 34].

Одним из наглядных классических примеров, когда характеристики отдельностей определяют макроскопические свойства вещества, является феномен магнетизма горных пород. Магнитные характеристики горных

пород (магнитная проницаемость, остаточная намагниченность и пр.), их анизотропия, температурная зависимость определяются не только магнитными характеристиками зерен ферромагнитных минералов в составе породы, но и размерами этих зерен. Например, удельная магнитная восприимчивость растет, а коэрцитивная сила падает с ростом размера зерен, причем нелинейным образом [35].

В физике твердых поликристаллических тел (в основном металлов и сплавов) известно соотношение Холла – Петча, заключающееся в уменьшении прочности с ростом размера зерен [36–38]:

$$\sigma_{\text{str}} \sim kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где σ_{str} может определяться как предел текучести или как сопротивление сдвигу; k – некоторая константа; d – средний размер (диаметр) зерна. Это соотношение наиболее изучено для конструкционных материалов и продолжает активно изучаться с целью уточнения его параметров и применимости при различном вещественном составе, различных структурных особенностях материалов, разном рассматриваемом масштабе воздействий и т.д. (например, [39–43]).

В физике разрушения горных пород наибольший интерес представляет информация, которая позволяет прогнозировать прочностные свойства. В отличие от металлов и сплавов, по экспериментальным данным для разных типов горных пород не удастся получить зависимость, строго подобную (1), но в то же время прослеживается общая тенденция увеличения прочности с уменьшением размера зерна [44; 45]. На модельных горных породах – искусственно созданных минеральных агрегатах, моделирующих реальную породу, прежде всего по минеральному составу, – удастся получить прямое соответствие соотношению (1) [46]. Усилия исследователей сосредоточены на оценке влияния температуры на предел текучести в форме, подобной (1) (например, [46]), на построении численных моделей горных пород для прогноза прочности [47; 48], на оценке влияния распределения зерен по размерам на прочностные характеристики [45; 49; 50], на определении роли размеров зерен при воздействии флюида [51; 52] и т.п.

В работе [53] подчеркивается необходимость знания распределения зерен по размерам в горных породах для корректного численного геомеханического моделирования, подобного выполненному в работе [54], причем данные могут и должны быть получены разными аналитическими методами, прежде всего – оптической микроскопией, электронной микроскопией и рентгеновской томографией. В экспериментальных геомеханических исследованиях целенаправленно исследуется разрушение при разнообразных условиях механического нагружения и разных соотношениях размеров образца горной породы и зерен минералов [44; 55; 56]. Также исследуется влияние размеров зерен на распространение трещин при гидроразрыве породы [57; 58].

Деформация и разрушение горных пород в естественных условиях может происходить при давлениях, температурах и флюидных режимах, труднодостижимых при экспериментальном лабораторном моделировании, однако характерных для очагов землетрясений и разломных зон. Глубины очагов землетрясений могут достигать первых сотен километров и определять высокие давление и температуру, а тектонические напряжения в масштабах литосферных плит определяют высокие горизонтальные напряжения, действующие на объемы горных пород. В таких условиях возможны изменения минерального и фазового состава и перестройка структуры вещества. Исследования термомеханостимулированных минералогических и структурных изменений в разломных зонах концентрируются на выявлении новообразованных минералов, изменении размеров зерен, плавлении вещества [59; 60].

Вопрос о влиянии размеров зерен остается слабоизученным, но при этом актуальным для понимания фундаментальных аспектов реологии литосферы и астеносферы [61–64]. При глобальных геологических процессах происходит погружение значительных объемов пород в зоны повышенных давлений и температур, где горные породы подвергаются метаморфизму и претерпевают существенные изменения в минерально-фазовом составе и структуре. Выяснение различий в структуре может помочь выявить особенности и историю метаморфизма. Исследователи привлекают информацию о размерах зерен, когда пытаются получить данные об испытанных давлении и температуре по минеральным пьезометрам (геобарометрам), геотермометрам и

геотермобарометрам [65–69].

Таким образом, для широкого круга как фундаментальных, так и прикладных приложений в науках о Земле оценка размеров зерен, слагающих горные породы, представляет собой актуальную задачу. Общей тенденцией современных исследований является повышение детальности информации о размерах зерен: авторы публикаций переходят от простого указания среднего размера зерен к указанию других характерных количественных параметров, вплоть до построения полного распределения зерен по размерам [57; 68; 70; 71]. Появляется возможность сравнения горных пород в работах разных исследователей не только по происхождению и минеральному составу, но и по структурным характеристикам. Такой подход особенно активно развивается в прикладных геомеханических исследованиях в связи с развитием возможностей инструментальной базы и обработки данных, с одной стороны, и с увеличением требований к представительности лабораторных испытаний – с другой. Также это важно для более тесного сопряжения данных о структуре и данных об эволюции разрушения, получаемых другими методами, например, методом акустической эмиссии.

1.1.4. Методы определения размеров зерен горных пород на основе микроструктурных снимков

Методы металлографии

Информация о размерах зерен давно и успешно используется для металлов и их сплавов как поликристаллических материалов промышленного значения [72]. В металлографии она необходима не только для оценки прочности по отношению Холла-Петча (1), но и в целом для структурного анализа металлов и сплавов – оценки распределения фаз, отслеживания микроструктурных изменений при мартенситных превращениях, обнаружения дефектов и др. (см., например, [73–75]).

Основным объектом микроструктурного исследования в металлографии является микроизображение поверхности образца. Изначально для

исследователей были доступны только оптические микроскопические изображения в отраженном свете. Сейчас привлекаются данные по оптическим изображениям в разнополяризованном свете, используются изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе, в отраженных электронах, с помощью атомно-силовой микроскопии и др. Для повышения контрастности зерен исследуемая поверхность металлических образцов предварительно подготавливается, в том числе методами полировки и травления [76—79]. Полученное изображение поверхности является сечением объемной структуры материала и, соответственно, представляет собой набор сечений зерен.

Наиболее важным для металлографов параметром микроструктуры является средний размер зерна. 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 [80].

Для оценки размеров зерен разработан перечень методов, базирующихся на разных принципах [81]. Методы различаются по своим требованиям к исходным данным, процессу пересчета измеряемых величин к размерным параметрам зерен, возможностью автоматизации и воспроизводимостью. У всех методов присутствуют три этапа анализа:

- выделение (идентификация) зерен, в частности – определение их границ;
- определение размерных параметров, характеризующих зерна (точнее, характеризующих сечения зерен);
- приведение полученного распределения параметров к требуемым характерным размерам зерен (средний размер, максимальный размер и т.п.).

Конкретные практические реализации методов оценки размеров зерен регламентируются различными стандартами [76–79; 82—90], в том числе – для

определения характерных размеров зерен, отличных от среднего размера [83], для распределений зерен по размерам, отличным от одномодального [84].

По конкретной реализации вышеуказанных этапов, методы можно условно разделить на следующие, иногда пересекающиеся группы [91–93]:

а) Методы прямого определения характерных размеров сечений зерен в выборке.

В данных методах экспертом вручную производится идентификация зерен, выделение границ, оценка характерных размеров сечений зерна (например, максимального и минимального) [91–93].

Прямые методы, с одной стороны, позволяют учесть все зерна на изображении на основе квалификации эксперта и построить распределение сечений всех зерен по размерам. По такому распределению можно получить медианное значение размера сечения d_{SectMed} и с некоторыми допущениями оценить средний размер зерна $d_{\text{GrainAver}}$ по [72]:

$$d_{\text{GrainAver}} = 1.45 \cdot d_{\text{SectMed}}$$

Также по распределению можно определить максимальный размер сечений зерен и оценить размер наибольшего зерна. Важно, что прямые методы позволяют анализировать вещества с нестандартным, например, полимодальным распределением зерен по размерам.

С другой стороны, прямые методы при ручной реализации обладают рядом недостатков – они чрезвычайно затратны по времени, трудоемки и подвержены ошибкам эксперта. Автоматизация прямых методов (например, на основе машинного обучения) приводит к появлению новых, уже косвенных методов оценки размеров зерен, поскольку требует наличия обучающих выборок и зависит от алгоритмов и процесса обучения. По сравнению с прямыми методами, остальные нижеприведенные методы являются косвенными методами и базируются на закономерностях и взаимосвязях между измеримыми параметрами и размерами зерен.

б) Методы, основанные на пересечении опорных линий (методы Хейна,

Хиллиарда, Абрамса и др.).

Методы основаны на определении числа пересечений опорных линий границами зерен [76; 78; 86; 90]. В качестве опорной линии может выступать прямая (отрезок от края до края изображения), несколько параллельных прямых, произвольно ориентированные хорды (отрезки, расположенные внутри изображения), круги, прямоугольники и т.п. Определяется количество пересечений опорными линиями границ зерен, распределение длин отсекаемых отрезков и оцениваются параметры распределения зерен.

Достоинствами методов является меньшая трудоемкость по сравнению с прямыми методами и наличие промышленных стандартов. Недостатки заключаются в возможных ошибках эксперта, поскольку ему необходимо идентифицировать границы зерен и выделять места их пересечений с опорными линиями, и в чувствительности оценки к ориентации неизометричных зерен.

Методы изначально были также ручными, но в настоящее время могут быть частично или полностью автоматизированы. При частичной автоматизации эксперт только выделяет пересечения, а расчет длин отрезков и построение распределений производятся автоматически. Основные задачи для полной автоматизации метода в настоящее время – идентификация пересечений границ зерен с помощью методов обработки изображений и машинного обучения.

в) Планиметрические методы (методы Джеффри, Снайдер-Графа, Салтыкова и др.).

Методы основаны на оценке числа зерен, попадающих внутрь замкнутой линии [76; 78; 86; 90]. Линия образует ограничивающую фигуру, при известной площади которой можно определить среднее значение площади сечения зерна. Часть методов основана на категоризации зерен по площадям и возможности построения распределения зерен по категориям. Более совершенные планиметрические методы учитывают зерна, пересекающие ограничивающую кривую, или используют кривую, проходящую по границам зерен.

Достоинствами являются меньшая трудоемкость и меньшая чувствительность к ошибкам выделения границ по сравнению с методами а)–б). Теоретически

возможен учет всех зерен (для определения только среднего размера зерна или в целом распределения сечений зерен по площадям). Недостаток метода заключается в том, что по-прежнему требуется работа эксперта для идентификации зерен.

г) Методы наложения группы опорных точек.

В методах на изображение накладывается группа точек и оценивается количество точек, попадающих внутрь сечения отдельных зерен [82; 84]. Группы точек могут представлять собой геометрически определенную комбинацию (например, узлы прямоугольной сетки) или генерироваться случайным образом.

Достоинствами является наибольшая достижимая точность при наименьшей трудоемкости (при удачно выбранном шаблоне генерации точек), а также возможность эффективной оценки содержания фазы (конкретного вещества) в материале. Недостатками – необходимость экспертной оценки идентификации принадлежности точки конкретному зерну и следующая из этого возможность ошибки.

д) Методы прямой оценки площадей сечений зерен.

С развитием автоматизации проведения измерений и обработки изображений, появилась возможность оценивать площадь отдельно взятого зерна [85; 86]. Для этого на основе исходного изображения строится маска, содержащая фактически только границы между зернами. Далее выполняется перебор сечений зерен и оценка площади каждого из них, что может быть сделано различными алгоритмами (заполнение, наложение шаблона или случайное бросание точек и т.п.). На основе этого строится распределение сечений зерен по площадям, по которым могут быть определены характерные объемно-взвешенные размеры зерен.

Достоинства: методы могут быть полностью автоматизированы, возможен учет всех зерен на изображении, малая трудоемкость работы исследователя. Недостатки: обязательное требование сплошности границ в маске и, следовательно, требование к высокому контрасту границ зерен, высокому качеству обработки изображений. Процесс обработки изображения должен отрабатываться и проверяться экспертом. Вычислительная сложность методов

достаточно высока и зависит от алгоритма оценки площади.

Еще преимуществом группы методов является увеличение точности при комбинировании с дополнительной информацией о вещественном составе материала (например, два изображения в свете с различной поляризацией, фазовый состав по изображениям в отраженных электронах со сканирующего электронного микроскопа и пр.).

е) Методы сравнения с шаблоном (метод сравнения со шкалой микроструктур, метод корреляции с шаблонами и др.).

Методы основаны на ручном (визуальном) или автоматическом сравнении отдельных зерен с шаблоном зерна (как правило, определенной простой геометрической фигурой, например, эллипсом), или сравнении всей микроструктуры с шаблонами микроструктур с известным распределением зерен по размерам [87; 91–93].

Исходное развитие методы сравнения с шаблоном зерна получили из оценки размеров наборов частиц (дробленая порода, дисперсные грунты и пр.), когда зерна разделены значительными промежутками и имеют округлые выпуклые формы, поэтому методы плохо подходят для оценки сплошных поликристаллических сред.

Методы сравнения всей микроструктуры с шаблонами микроструктур хорошо работают только для определенных классов материалов (в основном – конструкционных), для которых такие шаблоны были разработаны, и плохо работают в нетиповых случаях.

Все вышеописанные методы [81] базируются на основополагающем принципе, что объемная доля (объем, в среднем занимаемый зерном, в доле от объема всей выборки), площадная доля (площадь, занимаемая сечением зерна, в доле от площади выборки), линейная доля (длина отрезков секущих линий, приходящаяся на зерно, в доле от длины всей линии) и доля точек (попадающих на сечение зерна в зависимости от суммарного числа точек, приходящихся на выборку), равны между собой [93]. Из этого принципа следуют основные стереометрические соотношения, позволяющие связать оценки разной размерности между собой [91].

Особенности применения методов оценки размеров зерен к горным породам

Перечисленные методы оценки размеров зерен [81] имеют определенные весьма существенные сложности при попытке применения к горным породам. Основные сложности при анализе микроизображения горных пород возникают из-за прозрачности многих минералов и низкой контрастности границ зерен, что справедливо как для шлифа, так и для аншлифа. Поэтому стандарты, предназначенные для металлов и сплавов, не применяются в явном виде для горных пород, а применяются (адаптируются) только сами методы оценки размеров зерен (например, [65; 68; 69; 94; 95]).

Собственные стандарты для горных пород отсутствуют. В современных программных средствах для автоматизации анализа микроскопических изображений горных пород существуют возможности автоматической (полуавтоматической) оценки размеров зерен, но техники и методики идентификации зерен и выделения их границ являются предметом ноу-хау разработчиков.

Существующие стандартизированные методы определения размеров частиц горных пород относятся к неконсолидированным породам, могут быть ограничено применимы к консолидированным цементированным горным породам с большой долей цемента [96–98], но плохо применимы к горным породам с существенно поликристаллическим характером. Поэтому многие исследователи пробуют разрабатывать методы оценки размеров зерен и фрагментов горных пород на основе методов компьютерного зрения, например, сегментации с помощью машинного обучения на основе анализа признаков [99; 100], в том числе с использованием свёрточных искусственных нейронных сетей [101; 102], на основе совместного анализа изображений из разных оптических каналов [103], корреляционных алгоритмов [104], морфологического анализа [105–107], а также их комбинаций [108].

1.2. Эксперименты по разрушению горных пород

Исследование разрушения материалов проводится как в лабораторных условиях при определении их механических характеристик, так и в натурных условиях при контроле напряженно-деформированного состояния. Регистрация акустической эмиссии (АЭ), о которой говорилось ранее, является способом контроля развития микро- и макроразрушений в материале.

Задача отслеживания эволюции разрушений важна при исследовании природных материалов – горных пород как в фундаментальном (вулканология, физика землетрясений, метаморфизм), так и в прикладном аспекте (исследование устойчивости природно-технических комплексов). 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 [109]. Особый интерес представляет исследование вариаций АЭ при совместном (не обязательно одновременном) механическом нагружении и высокотемпературном нагреве [10], поскольку характер развития разрушений при этих воздействиях может различаться [110].

1.2.1. Механическое и термическое воздействие

Часто исследователей интересует комбинированное влияние термического воздействия и механического нагружения на развитие разрушения. Подобные условия наблюдаются в земной коре, когда термическое воздействие приводит к увеличению интегральной разрушенности и изменению физических свойств пород, что изменяет их поведение при действии механических напряжений в сравнении с ненарушенными породами. Изучение одновременного термического и механического воздействия представляет собой сложную задачу [111] и встречается в единичных исследованиях (например, [112; 113]). Значительно чаще исследуется совокупное, но разделенное во времени влияние двух типов

воздействия (например, [70; 71; 114; 115]).

Комплексное изучение термомеханического воздействия обсуждается в [115]. В этой работе с целью обоснования выбора породы для использования в качестве резервуара для захоронения радиоактивных отходов описаны эксперименты по трехосному сжатию образцов гранита при давлении вплоть до 40 МПа, после термического воздействия на них в виде нагрева вплоть до 750°C и охлаждения до комнатной температуры. Измерялись проницаемость, теплопроводность, упругие модули, скорости продольных волн, активность ТАЭ и др. Было обнаружено, что масса, теплопроводность и скорость продольных волн уменьшались монотонно с повышением температуры. В то же время проницаемость резко возрастала у образцов с температурой нагрева от 500°C и выше. Пиковая прочность и порог активного развития трещин с повышением температуры уменьшаются с выходом на плато в диапазоне температур от 600 до 750°C. Порог активного развития трещин определяется как значение девиаторного напряжения, при котором режим преобладающего сжатия сменяется на режим преобладающего растяжения, по данным об объемной деформации [115].

Обратная ситуация, когда механическое нагружение породы предшествует термическому воздействию на нее, может наблюдаться при магматических процессах или применении термических методов воздействия на пласт. Этот случай, однако, мало изучен в литературе.

1.2.2. Развитие разрушения в горных породах при термическом воздействии

Общие особенности

Нагрев горных пород до высоких температур может происходить в различных условиях. В природе это сопряжено, в первую очередь, с концепцией тектоники плит, с вулканической активностью при магматических интрузиях и с геотермальными системами [116]. Горные породы могут также испытывать высокотемпературное воздействие при разработке месторождений полезных ископаемых (в шахтах и карьерах при добыче твердых полезных ископаемых, в скважинах и коллекторах при добыче углеводородного сырья), в инженерных

сооружениях при пожарах, в местах захоронения радиоактивных отходов (прежде всего, в гранитных массивах). В связи с этим изучение процесса термического разрушения горных пород является важным направлением развития фундаментальной и прикладной геофизической науки.

В лабораторных исследованиях для отслеживания эволюции термического разрушения широко применяется метод регистрации термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ). ТАЭ может вызываться в первую очередь развитием микротрещин – их раскрытием, ростом и закрытием, трением между берегами, во вторую очередь – фазовыми переходами в минералах, слагающих породы, взрывными расширениями газожидких включений, испарением воды, включая физически связанную составляющую и др. Каждый из источников вносит различный вклад в ТАЭ в зависимости от режима нагрева, исходных характеристик и состава образцов и т.д. [10].

Влияние температуры и скорости нагрева

В основе термического разрушения горных пород лежат два механизма, непосредственно связанных со структурой и составом породы. Первый из них заключается в том, что минералы, слагающие породу, при увеличении температуры расширяются анизотропно, вызывая появление новых трещин. Кроме того, в составе горных пород обычно присутствуют различные минералы, имеющие разные значения коэффициента теплового расширения, что приводит к неравномерному расширению частей породы и её растрескиванию. Второй механизм учитывает влияние температурного градиента, обуславливающего нарастание температурных напряжений, которое приводит к развитию трещин. Исследованию вопроса о том, какой из указанных механизмов в большей мере обуславливает термическое разрушение породы, посвящена работа [117]. В ней описаны эксперименты по нагреву образцов гранитов (Westerly) с различной скоростью нагрева (от 0.4 до 12 град./мин). Результаты показали, что на некоторых этапах нагрева процесс развития микротрещин в исследуемых образцах обусловлен преимущественно температурой, а на некоторых – температурным градиентом.

В работе [118] исследовалось влияние температуры на физические свойства горных пород. Сильно отличающиеся по характеристикам образцы исландского базальта, шведского микрогаббро и шотландского микрогранита в условиях внешнего давления были нагреты до различных температур вплоть до 800°C со скоростью 1 град./мин, выдерживались в течение часа при максимальной температуре, после чего были охлаждены с той же скоростью до комнатной температуры. Образец базальта продемонстрировал значительное увеличение проницаемости после нагрева. Этот результат, в частности, может помочь в объяснении механизма преобразований породы в условиях высоких температур в подводных гидротермальных системах. Для микрогранита, содержащего включения анизотропно расширяющегося кварца, и микрогаббро, чьи размеры зёрен больше, чем у базальта, частота событий АЭ оказалась выше, однако существенных изменений в характеристиках выявлено не было.

Другим примером работы, посвященной исследованию влияния температуры на развитие разрушения в породе, является [26], где анализируются данные трёх циклов нагрева с образцами гранитов (Westerly) до температуры 450°C . Для оценки трещиноватости образцов, наряду со статистикой импульсов АЭ, авторы использовали метод интерферометрии кодовых волн, основанный на рассеянии искусственно генерируемых ультразвуковых сигналов на неоднородностях среды. Отмечается, что из-за малой скорости нагрева в экспериментах (1 град./мин) температурная инициация разрушения полагается основной и развитие трещиноватости, таким образом, обусловлено различием коэффициентов температурного расширения слагающих породу минералов. С ростом температуры и увеличением количества трещин скорости продольных и поперечных волн уменьшаются. В результате трёх циклов нагрева v_p падает от 4.89 до 2.71 км/с, v_s – от 2.7 до 2.2 км/с. Также в экспериментах наблюдается термический аналог эффекта Кайзера – снижение активности АЭ для образца в области температур, до которых образец нагревался ранее.

Описанный эффект памяти наблюдается во многих экспериментах, в частности, в [119]. В этой работе образцы соли и мрамора подвергались трем циклам нагрева со скоростью 20 град./мин с увеличивающейся максимальной температурой цикла (до $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$). Регистрировались импульсы АЭ и

электромагнитного излучения (ЭМИ). Результаты экспериментов показали, что уровни АЭ и ЭМИ до максимальных температур предшествующего цикла нагрева остаются слабыми и скачкообразно увеличиваются при дальнейшем нагреве. Авторы связывают это с изменением подвижности и количества незакрепленных дефектов при максимальной температуре предыдущего цикла нагрева. Эмиссионные эффекты памяти в случае термического и механического воздействия имеют схожую природу и обусловлены действовавшими на образец механическими и термическими напряжениями.

Часто в экспериментах по нагреву температурные градиенты при нагреве и охлаждении направлены в противоположные стороны. В работе [120] были проведены эксперименты с образцами различных горных пород, в которых температурный градиент имел только одно направление. Результаты позволяют подтвердить наличие обнаруженных ранее эффектов, связанных с термостимулированной АЭ, а также выявить новые: длительную АЭ после остывания образца и изменение интенсивности АЭ в зависимости от скорости нагрева, что может быть обусловлено нестационарностью микроскопического градиента температуры.

Изменение физических свойств при нагреве

Активно проводятся исследования, как после термического воздействия на породу меняются её геомеханические (плотность, упругие модули, коэффициент Пуассона, скорости упругих волн, прочность на растяжение, прочность на сжатие, вязкость, коэффициент теплового расширения), фильтрационно-емкостные (пористость, проницаемость) и тепловые (температура плавления, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность) свойства [116; 121–123].

В работе [70] описываются эксперименты с гранитами Стратбоги (Strathbogie), Австралия с разным размером зерен, подвергавшихся нескольким циклам нагрева до температур вплоть до 800 °С при двух типах охлаждения: медленном и быстром. После охлаждения производилось испытание прочности в условиях сжатия. Результаты показали, что пиковая прочность снижается с увеличением максимально достигнутой температуры при нагреве более

400 °С как при медленном, так и при быстром охлаждении, причем модуль упругости мелкозернистого гранита (с зернами размером от 10 мм до 200 мкм) при более высоких температурах показал значительно большее значения. Авторы связывают это с более интенсивным термическим растрескиванием и, как следствие, большим увеличением плотности трещин в среднезернистых (с зернами размером от 15 до 320 мкм) и крупнозернистых (с зернами размером от 70 до 600 мкм) образцах.

Более существенное влияние высокой температуры на разрушение для крупнозернистого гранита по сравнению с мелкозернистым отмечается также в [114]. Авторами исследуется возможность использования АЭ для мониторинга изменения электрического сопротивления материалов после температурного воздействия вплоть до 600°С. Установлено, что механизм растрескивания может быть разделен на три этапа по характеристике спада удельного электрического сопротивления – первичный быстрый спад, пологое снижение, вторичный быстрый спад. Последний этап может рассматриваться как предвестник стадии разрушения. Отмечается, что если электроды размещаются на верхней и нижней гранях образцов горной породы, разрушение при растяжении приводит к резкому увеличению удельного сопротивления, а разрушение при сдвиге – к его резкому уменьшению.

В экспериментах [3] образцы гранита из провинции Шаньдун (Китай), нагретые со скоростью 50 град./мин до различных температур (до 1000°С), выдерживались при достигнутой температуре для обеспечения равномерного распределения тепла в образце, после чего подвергались одноосному сжатию. При различной нагрузке в зависимости от температуры акустическая эмиссия показала разный характер, что позволило для каждого из этапов эксперимента описать развитие разрушения и связать его с изменениями в образцах (потеря связанной воды, полиморфные превращения и плавление минералов и др.). Анализ данных экспериментов также показал снижение хрупкости и повышение пластичности породы с ростом температуры.

Физические и механические свойства нагреваемого образца (скорости распространения упругих волн, плотность микротрещин, прочность, модуль Юнга и др.) могут зависеть от его размера. Совместное влияние температуры

и размера образца на характер разрушения горных пород было исследовано в экспериментах [17] по одноосному сжатию разогретых до различных температур вплоть до 600°C образцов мелкозернистого мрамора разного размера, к которым были подключены 4 датчика АЭ. Образцы выдерживались в течение 4-х часов при неизменной температуре, после чего печь отключали и происходило естественное остывание образцов. Для образцов с большим диаметром было зарегистрировано значительно больше сигналов АЭ по сравнению с образцами с меньшим диаметром. Для оценки интенсивности процессов разрушения на основе данных АЭ наряду с параметрами АЭ (количество, энергия, частота событий) использовалось значение *b-value*. Низкое значение *b-value* на определённом этапе может свидетельствовать том, что на этом этапе развивается большое число микротрещин с малыми характерными размерами. Результаты показали, что с повышением температуры *b-value* также возрастает. Это связано с тем, что при более высоких температурах в образцах больше развитых микротрещин.

Иная закономерность для *b-value* наблюдалась в работе [29], в которой анализировались эксперименты по нагреву образцов финских гранитов (Балтийское море). До температур 300°C распределение событий АЭ по энергиям описывается законом Гутенберга-Рихтера, *b-value* уменьшается с увеличением температуры. В области температур 300-600°C распределение становится близким к экспоненциальному распределению пуассоновского типа, что свидетельствует о стохастическом характере процесса трещинообразования. Для выявления переходного этапа от одного распределения к другому были рассмотрены временные интервалы между последовательными событиями АЭ, распределение которых во времени можно описать законом Омори. Подобный анализ для образцов со средним размером зёрен позволил установить, что переход от степенной зависимости к экспоненциальной происходит при температуре 400°C.

1.2.3. Группируемость событий акустической эмиссии

Одной из основополагающих задач, связанных с изучением распространения упругих колебаний в среде, является анализ зарегистрированных волновых форм.

В рамках этой задачи активно развиваются методы выделения групп (кластеров) волновых форм и соответствующих им источников, что важно, в частности, для локализации землетрясений в сейсмологии [124] и обработки событий АЭ при использовании методов акустического контроля [125]. Наиболее эффективным методом идентификации схожих сигналов во временных рядах является кросскорреляционный анализ. При этом оценивается взаимная корреляционная функция волновой формы идентифицируемого сигнала с волновой формой заданного сигнала (шаблоном), степень сходства между ними определяется максимумом корреляционной функции.

Если события АЭ группируются, это позволяет предположить развитие крупного нарушения в материале, например, трещины. Отсутствие группируемости событий АЭ может свидетельствовать в пользу того, что нарушенность среды в виде микротрещиноватости развивается более равномерно в объеме. Поэтому группируемость может использоваться как характеристика развития разрушения на мелких масштабах, однако это предположение требует отдельной экспериментальной проверки.

В работе [124] обсуждается возможность использования повторяющихся сигналов похожей формы для повышения чувствительности сейсмической сети. Авторы используют взаимнокорреляционную функцию шаблонного и текущего сигнала для оценки магнитуды последнего. Показано, что корреляционный метод позволяет избежать ложных тревог определенного класса и снизить порог автоматической регистрации.

Методу кросскорреляции волновых форм сейсмических сигналов также посвящена статья [126]. В качестве меры близости шаблонного и неизвестного сигналов используется коэффициент взаимной корреляции, определяемый для дискретной записи каждого из каналов сейсмической группы и шаблонного сигнала через его текущее значение и евклидову норму всего фрагмента записи. К агрегированному по всем каналам коэффициенту корреляции применяется детектор событий STA-LTA. Авторы заключают, что использование корреляции позволяет повысить соотношение сигнал/шум, особенно при использовании записей трехкомпонентных сейсмических станций.

Авторы [127] проводят взаимнокорреляционную обработку около 150 микросейсмических сигналов, записанных массивом геофонов при мониторинге добычи метана из угольных пластов, с целью выявления похожих между собой сигналов, которые они связывают с одним источником и одним механизмом. В результате получается корреляционная матрица со значениями сходства между парами сигналов, которая затем используется для иерархической кластеризации с порогом несходства 0.4. Авторы выделили несколько мультиплетов (кластеров) с количеством событий от 3 до 7, которые связаны с разными зонами месторождения.

Другим методом определения схожести сигналов АЭ является оценка схожести импульсов АЭ по параметрам их волновых форм. В [128] по параметрам импульсов АЭ с нескольких датчиков анализируется тип микротрещин при многократном нагружении образцов мрамора с повышением нагрузки от цикла к циклу. При первом нагружении до 10 МПа импульсы АЭ на диаграмме параметров $AF-RA$ (см. раздел 3.3) в основном сосредоточены в области с доминированием растяжения. По мере увеличения напряжения начального цикла кластеры постепенно перемещаются в сдвиговую область, т.е. режима разрушения переходит к сочетанию растяжения и сдвига.

В работе [101] на основе анализа параметров импульсов АЭ сделана попытка применить методы машинного обучения для распознавания типа трещин в экспериментах по нагружению образцов цементных композитных. Импульсы АЭ регистрировались как минимум двумя датчиками, что позволяло определить область, где находится источник. Анализировались параметры RA и AF ; для выделения кластеров событий применялась модель смеси гауссовских распределений, относящаяся к классу алгоритмов обучения без учителя. Выделенные кластеры впоследствии классифицировались по типам трещинообразования с помощью метода опорных векторов. В итоге такой анализ, по мнению авторов, позволяет предсказать стадию разрушения при отсутствии заранее размеченных данных.

В некоторых задачах, например, при термическом воздействии на образцы горных пород, доступны данные только с одного датчика АЭ, т.е. нет возможности провести даже зональную локацию. В то же время крайне важно отслеживать

развитие разрушения, особенно если оно связано с развитием конкретного крупного дефекта – например, трещины. Допустимо предположить, что развитие такого дефекта при термическом воздействии может идти скачкообразно, при этом форма излучаемых им сигналов АЭ может быть похожа друг на друга. Тогда анализ волновых форм сигналов АЭ и их параметров может служить основой для выделения кластеров событий, связанных с развитием дефекта. Возможное приложение результатов такого анализа – исследование истории воздействий на образец, например, определение того факта, что при предшествующем механическом нагружении начался необратимый процесс разрушения породы с формированием трещин разного масштаба [120].

Другое приложение такого анализа – оценка масштаба развивающихся разрушений. Если не получается выделить группы схожих событий, то это может говорить в пользу отсутствия крупных дефектов-трещин, многократно активизирующихся и подрастающих в процессе разрушения. В таком случае наиболее вероятно, что АЭ обусловлена в основном редко активизирующимися распределенными дефектами-микротрещинами [110].

Краткое содержание главы 1

В главе дан обзор наиболее распространенных методов, применяемых для анализа развития разрушения в горных породах как в реальном времени, так и после воздействия. В рамках текущего исследования основные акценты сделаны на методах акустической эмиссии и оптической микроскопии. Указаны основные особенности акустико-эмиссионного метода применительно к экспериментам по термическому и механическому воздействию на образцы горных пород. Приведено подробное описание подходов к анализу распределения по размерам зерен как элементов микроструктуры материала в методах, которые активно используются в металлографии и которые могут быть использованы для анализа горных пород. Рассмотрены основные особенности термостимулированного разрушения горных пород, описано изменение физических свойств материала при нагреве и вклад различных факторов, таких, как скорость изменения температуры, в процессы развития трещиноватости. Освещены вопросы

отслеживания развития разрушения путем сравнения волновых форм импульсов и параметров их волновых форм с целью выявления групп импульсов, которые могут быть отнесены к одному и тому же или схожим источникам. Таким образом, приведенные в главе 1 сведения позволяют построить общую картину современного состояния исследований процессов разрушения горных пород при температурном воздействии и обосновать необходимость комплексного подхода к анализу лабораторных данных, реализованного в данной работе.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Экспериментальный материал

Был проведен анализ данных экспериментов с различными образцами. Каждый образец представляет собой цилиндрический фрагмент породы, как правило, стандартных размеров – высотой 6 см и диаметром 3 см.

2.1.1. Образцы гранитов и базальтов

Анализировались данные экспериментов с 6 образцами гранитов и с 5 образцами базальтов, давших наиболее представительную статистику. На рисунке 1 для нескольких образцов приведены фотографии самих образцов до нагрева, для некоторых образцов даны фотографии керна, из которого они были взяты.



а) гранит 155-1-30



б) гранит 156-12Г



в) гранит 167-7-30



г) базальт 391-big



д) базальт KHA0314-3



е) базальт PHAN0487-1



ж) гранит PHAN0548-4

Рисунок 1 – Фотографии образцов: а – г; фотографии керна: д – ж.

Образцы одной породы характеризовались сходными петрофизическими характеристиками: плотностью (граниты – 2.55-2.70 г/см³, базальты – 2.80-2.95 г/см³), пористостью (граниты – 0.15-0.45%, базальты – 1.5-3.5%), скоростями 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. Информация об экспериментах по нагреву и подробные характеристики каждого из образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Данные по образцам и экспериментам (граниты и базальты).

Код эксперимента	Образец	Тип породы	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Происхождение	Кол-во событий, этап нагрева	Кол-во событий, этап охлаждения
sL3	155-1-30 (№1a)	гранит	2.672	0.42	серый мелкозернистый, Вестерли (Westerly)	4451	3388
sN2	156-12Г	гранит	2.573	0.49	красный крупнозернистый	9477	1649
sK3	167-7-30 (№7)	гранит	2.666	0.46	серый среднезернистый, Воронеж	5632	5505
sAC2	393-1-3C	гранит	2.692	0.13	индийский	34299	6781
sBH1	PHAN0548-4	гранит	2.742	0.21	индийский, скв. Phansavale (глубина 584 м)	540	758
sBE1	117-1-30	гранит	–	–	–	6823	5431
sBN2	KHA0314-3	базальт	2.814	3,43	индийский, скв. Khadi	2055	2363
sBI1	LAT0209-4-30	базальт	2.914	2	индийский, скв. Latur (глубина 209 м)	404	1389
sAB2	391-big	базальт	2.904	1.78	темно-коричневый индийский	3017	10366
sBQ2	LAT0411	базальт	–	–	индийский, скв. Latur (глубина 411 м)	18033	4782
sBO2	PHAN0487-1	базальт	–	–	индийский, скв. Phansavale (глубина 487 м)	2376	1773

2.1.2. Образцы метапесчаников

Для проведения экспериментов по термически стимулированному разрушению с последующим анализом микроструктуры были отобраны образцы

метапесчаников – метатерригенных горных пород Северного Приладожья (Карелия, Россия). Образцы представляют собой цилиндрические керны из флишеидной серии пород со средней плотностью 2.77 ± 0.07 г/см³, взятые в пяти разных зонах отбора в районе озера Янисъярви (рисунок 2).

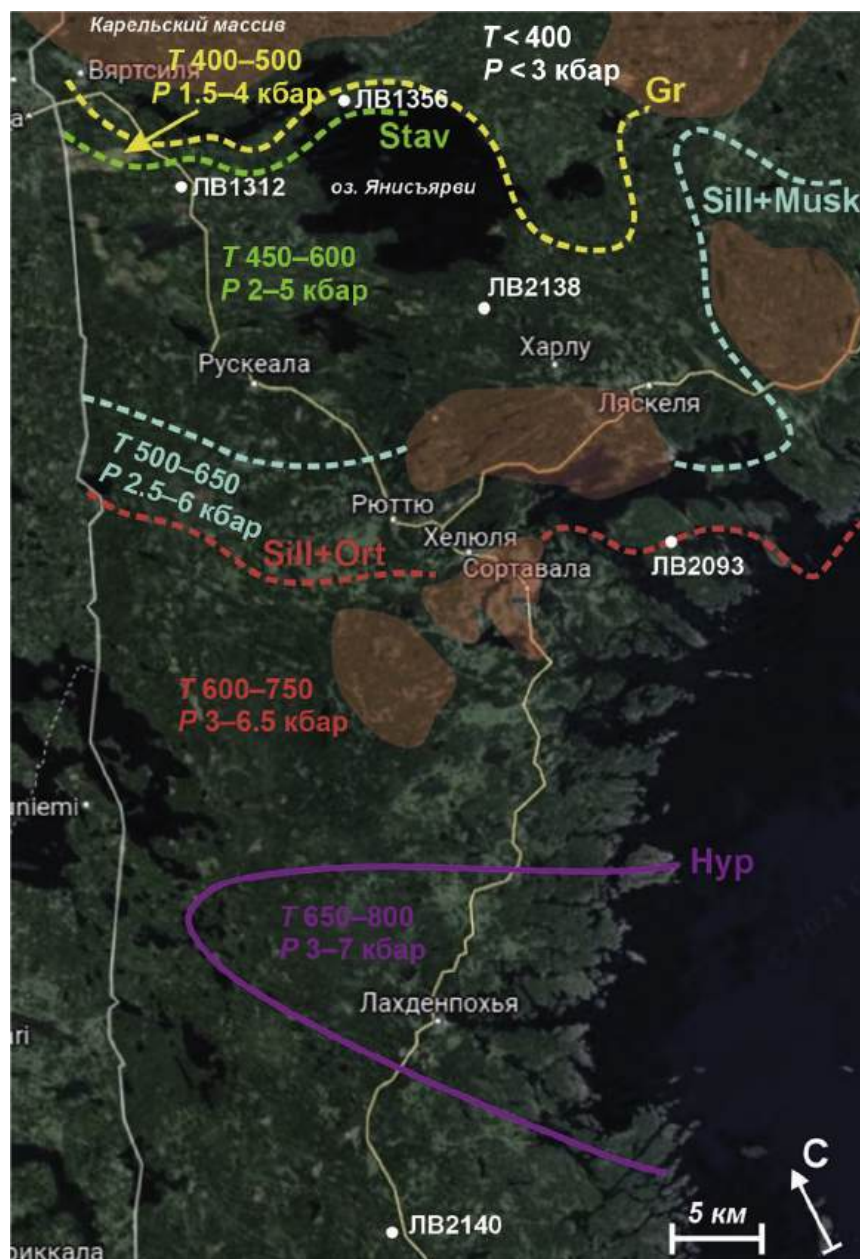


Рисунок 2 – Карта с указанием зон отбора кернов метапесчаников, различающихся р-Т условиями метаморфизма, оценки которых даны по [129]. Цветными линиями отмечены изограды граната (Gr), ставролита (Stav), силлиманит-мусковита (Sill+Musk), силлиманит-ортоклаза (Sill+Ort), гиперстена (Нур).

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. Оценки температуры метаморфизма, разделяемого изоградами минералов (граната, ставролита, гиперстена, силлиманит-мусковитовой и силлиманит-ортоклазовой ассоциациями), варьируются в диапазоне от 350°C до 750°C, а глубины – от 4 до 13 км. Наблюдается увеличение порфиروبластов, рост общей деформации и структурных изменений матрицы в породе с увеличением значений р-Т [130]. Существенной особенностью данных метапесчаников является влияние испытанных р-Т условий на размер кристаллических фаз минералов, что в свете высказанного предположения может обуславливать различный характер ТАЭ в экспериментах. Характеристики образцов представлены в таблице 2. Сводная информация по образцам и зонам отбора приведена в таблице 3.

Таблица 2. Данные по образцам и экспериментам (метапесчаники).

Код эксперимента	Образец	Зона отбора	Плотность, г/см ³ (до нагрева)	Пористость, % (до нагрева)	Плотность, г/см ³ (после нагрева)	Пористость, % (после нагрева)	T _{max} , °C, первый нагрев	T _{max} , °C, второй нагрев
sCB	ЛВ 1356 а	1	2.692	0.12	2.682	1.57	410	656
sCL	ЛВ 1340-1	1	2.804	0.74	2.722	5.57	467	700
sCO	ЛВ 1312	1	2.813	0.24	2.781	3.20	416	725
sCA	ЛВ 1246	2	2.764	0.54	2.743	3.34	402	658
sCG	ЛВ 1246-1	2	2.746	0.52	2.661	4.33	416	703
sCI	ЛВ 1310-2	2	2.775	0.64	2.723	5.16	408	727
sCJ	ЛВ 1350-1	2	2.512	0.16	2.607	3.42	427	746
sCP	ЛВ 1246+	2	2.723	0.92	2.642	5.16	401	751
sCQ	ЛВ 1246-2	2	2.775	0.49	2.633	4.96	425	727
sCC	ЛВ 1347	3	2.700	0.44	2.692	2.10	406	646
sCE	ЛВ 1365-1	4	2.838	0.16	2.824	2.15	410	649
sCK	ЛВ 1365-2	4	2.712	0.23	2.736	2.74	411	732
sCD	ЛВ 1362-2	5	2.803	0.53	2.792	3.21	440	674
sCH	ЛВ 1362-2+	5	2.792	0.66	2.758	4.09	406	729
sCM	ЛВ 1359-1	6	-	-	2.674	3.25	420	710

Таблица 3. Сводная информация о зонах отбора.

		Параметры метаморфизма (по [129])	
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	–	–

2.1.3. Образцы песчаника

Отдельно был проведен анализ группируемости событий при термическом воздействии и при наличии крупных нарушений (трещин). Эксперименты проведены на двух образцах мелкозернистого песчаника, один из которых (основной) предварительно подвергался одноосному нагружению до нагрузки, близкой к разрушающей, с видимыми проявлениями трещин на поверхности (рис. 3) [120].



Рисунок 3 – Фотография образца песчаника, предварительно подвергнутого механическому нагружению – *а*. Черными стрелками отмечены проявления некоторых трещин, возникших при механическом нагружении; зелеными стрелками отмечена область образца, микроскопическая фотография которого приведена на врезке – *б*

Второй (контрольный) образец не подвергался механическому нагружению. Образцы были взяты из одной партии (один блок породы), имели однородную видимую структуру, сходную микроструктуру по данным петрографического анализа, близкие значения пористости и скоростей упругих волн. Основной образец был подвергнут двум циклам нагрев-охлаждение до максимальной температуры около 650°C; скорость нагрева составляла 2-3°C/мин. Контрольный образец испытал три цикла нагрев-охлаждение до максимальных температур 250°C, 450°C и 650°C.

2.1.4. Искусственные образцы

Помимо образцов горных пород были исследованы модельные образцы. Они были изготовлены из гипса с добавлением кварцевого карьерного песка различных фракций, полученных путем просеивания через сита. Использован гипс Movatex T39743, смешение с водой и песком осуществлялось в массовом соотношении 4 (гипс) : 4 (вода) : 3 (песок), что соответствовало отдельному замешиванию с одной фракцией песка в соотношении 200 г (гипс) : 200 г (вода) : 150 г (песок). Всего было сделано 4 набора образцов с кварцевым песком по числу фракций песка. Также были исследованы образцы из гипса без примеси песка, выделенные в отдельную группу. Исследовано по одному образцу каждой группы, для каждого образца проведено 2 цикла нагрев-охлаждение со скоростью нагрева 3°C/мин и максимальной температурой нагрева 650°C.

Информация о гипсовых образцах приведена в таблице 4. Медиана размера зерна в таблице рассчитана по данным гранулометрии. Гранулометрия выполнена в Лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН (<http://eg.igras.ru/ru/4280-2/lpps/>) лазерно-дифрактометрическим методом на анализаторе размеров частиц Malvern Mastersizer 3000. Распределение размеров зерен во фракциях песка по данным гранулометрии показано на рисунке 4. Фотографии образцов до и после нагрева приведены в Приложении на рисунках 27 и 28 соответственно.

Таблица 4. 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

2.2. Эксперименты по термическому воздействию

2.2.1. Экспериментальная установка

Эксперименты по нагреву образцов проводились на установке, схема которой показана на рисунке 5 и подробно описана в [131]–[132].

Установка включала в себя следующие компоненты: устройство нагрева цилиндрических образцов горных пород, акустический волновод для вывода акустического сигнала наружу от находящегося в зоне нагрева образца, основной датчик ТАЭ и датчик контроля помех (пьезоэлектрические преобразователи Panametric V103 с резонансной частотой 1 МГц), систему регистрации АЭ ALine-32D производства компании Интерюнис (частота регистрации 5 МГц), термопару в зоне нагрева и блок регистрации температуры. Контрольный датчик АЭ находился снаружи печи и позволял определять порог регистрации импульсов АЭ, при котором количество импульсов помех за время эксперимента не превышает первых десятков.

2.2.2. Методика регистрации и первичной обработки сигналов акустической эмиссии

Первичная обработка зарегистрированных импульсов АЭ включала идентификацию и удаление помеховых импульсов, которые идентифицировались по сравнительному анализу сигналов с основного датчика ТАЭ и датчика

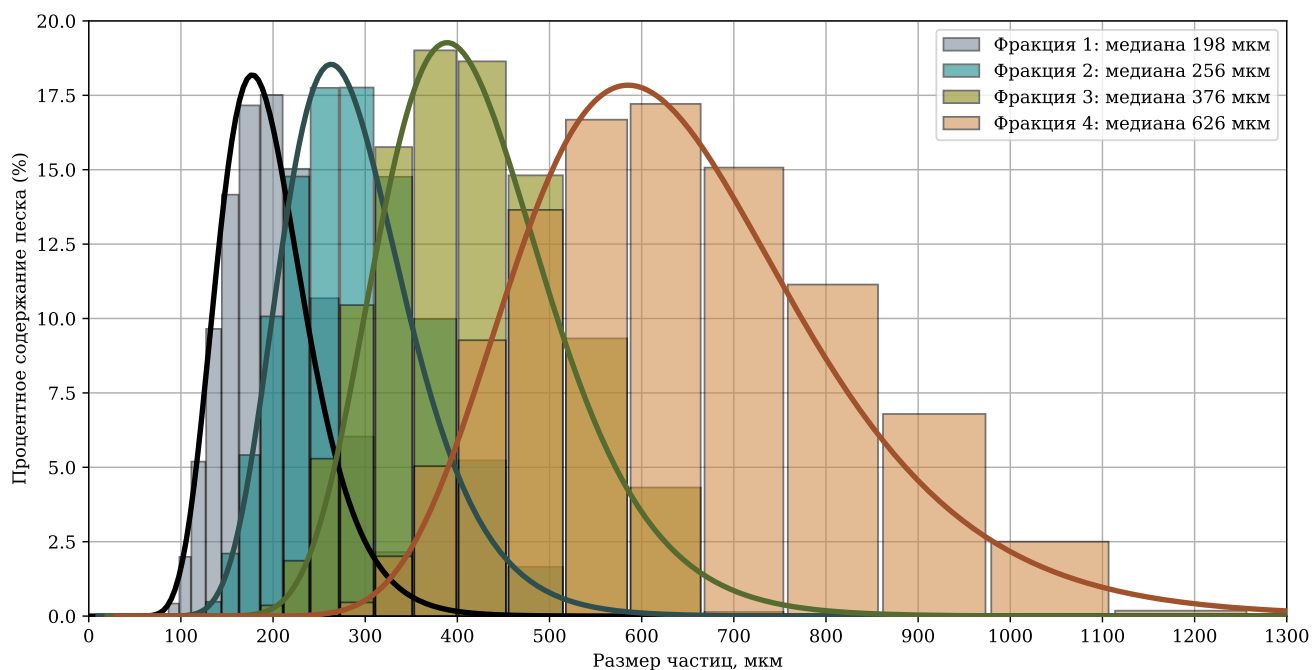


Рисунок 4 – Распределение частиц (зерен) песка по размерам на основе данных гранулометрии для разных фракций. Линиями показаны логнормальные аппроксимации распределений для каждой фракции.

контроля помех, оценку стабильности характеристик за время эксперимента, измерение параметров импульсов АЭ, и производилась в программах A-Line 32D компании Интерюнис [133] и AE Workbench Correlation Expert разработки Комарова А.Г. [134]. Характерный вид волновых форм зарегистрированных импульсов АЭ показан на рис. 6, там же показано, как определяются некоторые параметры импульсов. Более подробно о некоторых регистрируемых в эксперименте параметрах импульсов рассказано в разделе 3.3.

2.3. Оптическая и электронная микроскопия

Основным объектом оптического микроскопического исследования горной породы является шлиф – тонкий срез образца горной породы. Изучение шлифа при разном освещении позволяет оценить цвет, величину преломления и плеохроизм слагающих минералов, благодаря чему можно наблюдать зерна минералов в виде различных отдельностей. Также используется оптическое микроскопическое изображение аншлифа – поверхности образца горной породы в отраженном свете.

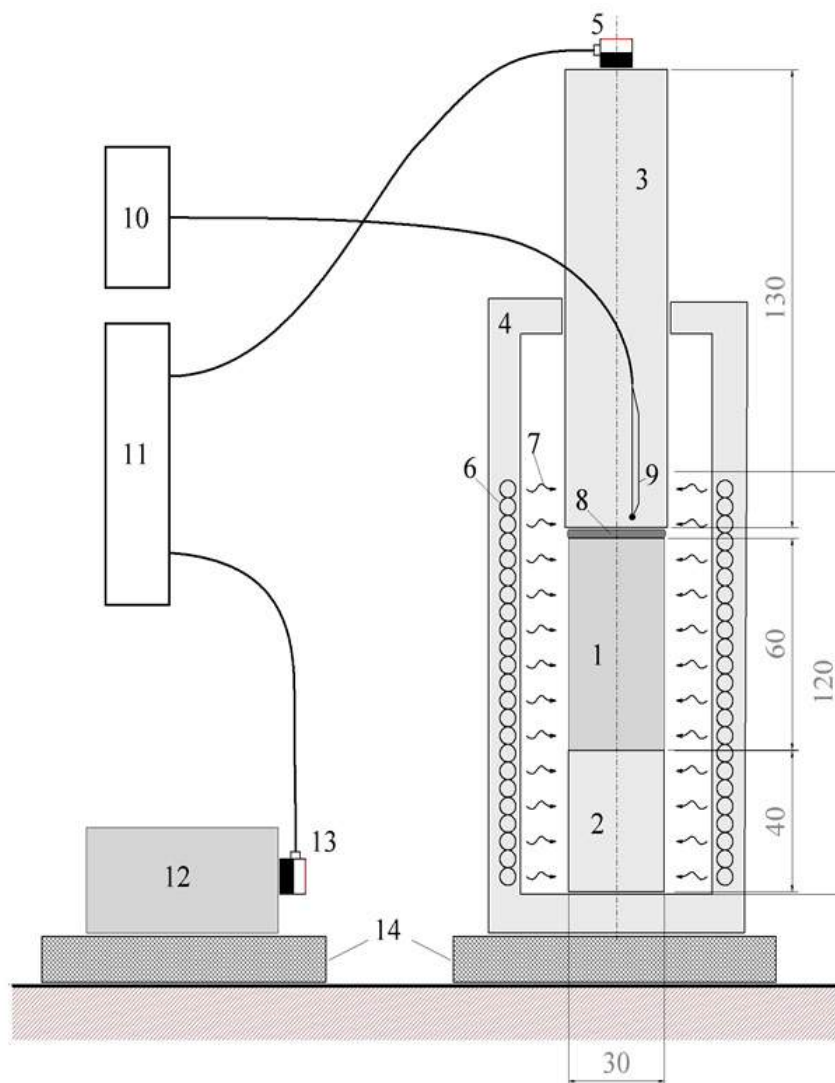


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки (разрез вдоль вертикальной оси): 1 – образец; 2 – подставка; 3 – волновод; 4 – корпус печи; 5 – основной датчик АЭ; 6 – нагреватель; 7 – тепловое излучение; 8 – прослойка из индия; 9 – термопара; 10 – блок регистрации температуры; 11 – система регистрации АЭ; 12 – образец, размещенный снаружи печи; 13 – датчик АЭ для контроля помех.

Анализ оптических изображений породы производился для образцов метапесчаников. На рисунке 7 приведены примеры полученных оптических изображений в преломленном и отраженном свете для образцов ЛВ1312 и ЛВ1356. Микрофотографии были получены на оптическом микроскопе Olympus BX35 в ЦКП ИФЗ РАН [135].

Кроме того, для некоторых образцов были сделаны снимки на электронном микроскопе Tescan Mira 4 LMS [130]. Изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), для произвольно выбранных аншлифов образцов ЛВ1312 и ЛВ1356 приведены на рисунке 8. Микроскоп

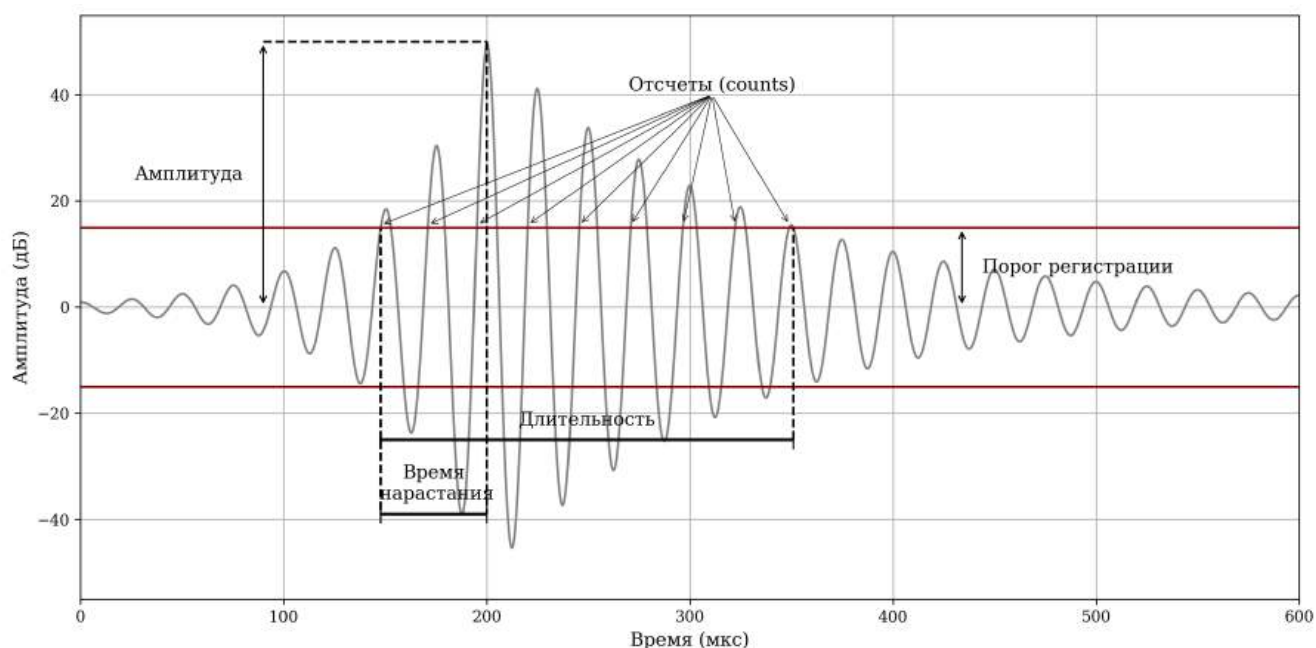


Рисунок 6 – Упрощенный вид регистрируемого сигнала с указанием некоторых параметров регистрации.

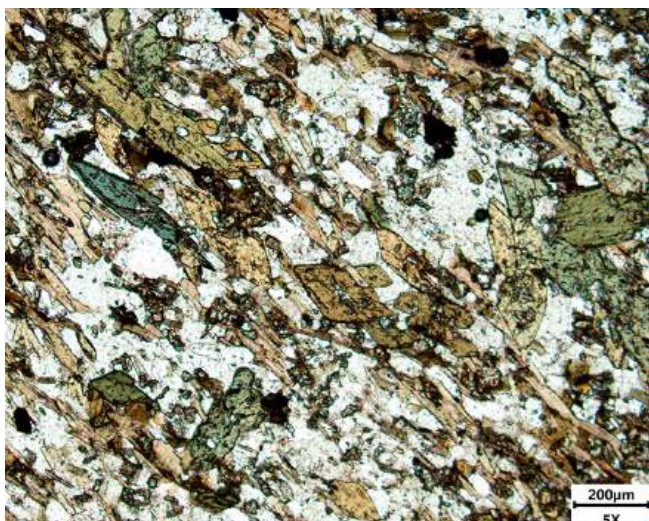
оснащен энергодисперсионным спектрометром от Oxford Instruments (Абингдон, Великобритания) с системой микроанализа на основе ПО Aztec (ЦКП ИФЗ РАН [135]). Анализ производился в режиме высокого вакуума ($< 9 \times 10^{-3}$ Па) при ускоряющем напряжении 20 кВ с высоким разрешением и рабочим расстоянием 15 мм. Образцы были покрыты углеродом путем вакуумного испарения.

2.4. Широкополосная акустическая спектроскопия

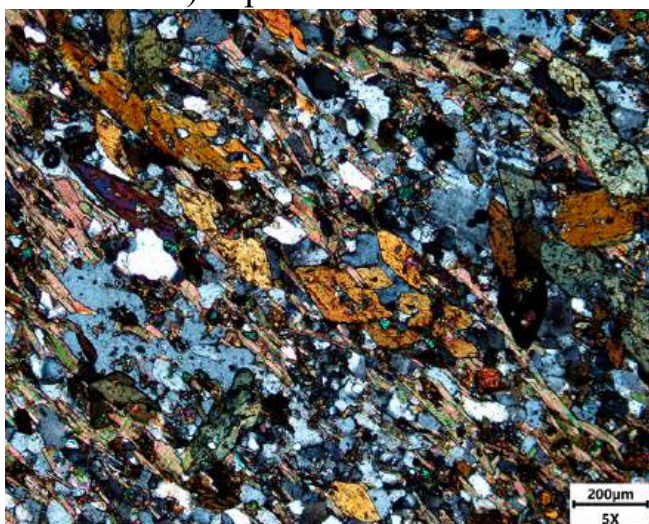
Для некоторых образцов метапесчаников была сделана оценка размеров зерен методом широкополосной акустической спектроскопии. Схема спектрометра приведена на рис. 9 и подробно описана в [130].

Для эксперимента [130] использовались дискообразные керны из метапесчаников с плоскопараллельными торцами и толщиной от 9.95 до 11.70 мм. Образец помещался между источником и приемником акустического импульса. Акустические контакты образца с аппаратурой обеспечивал слой иммерсионной жидкости толщиной 2 мм, слабо поглощающей ультразвук в рабочем диапазоне частот датчиков, в качестве которой использовалась

ЛВ1312

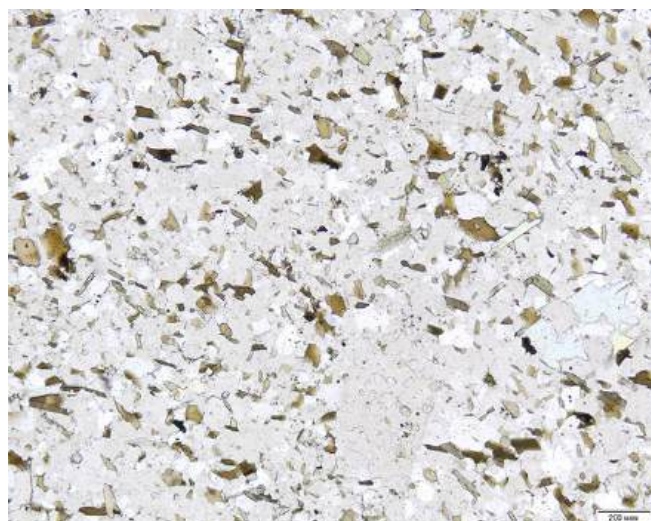


а) отраженный свет

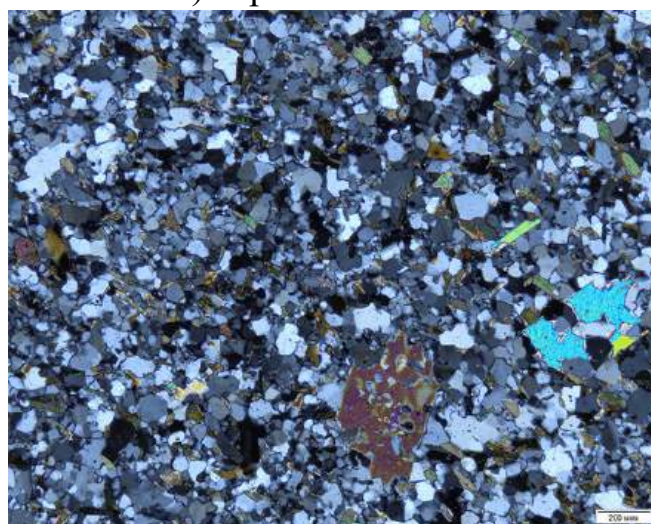


в) преломленный свет

ЛВ1356



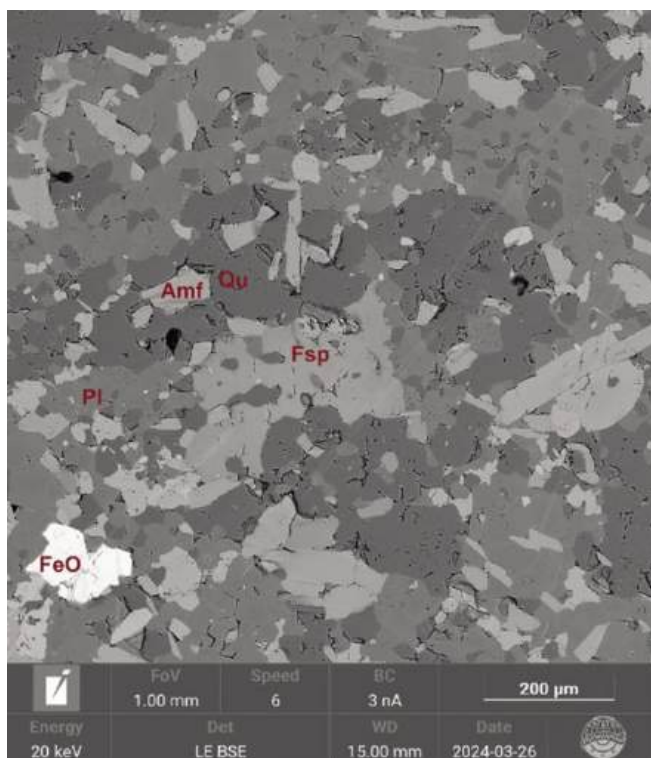
б) отраженный свет



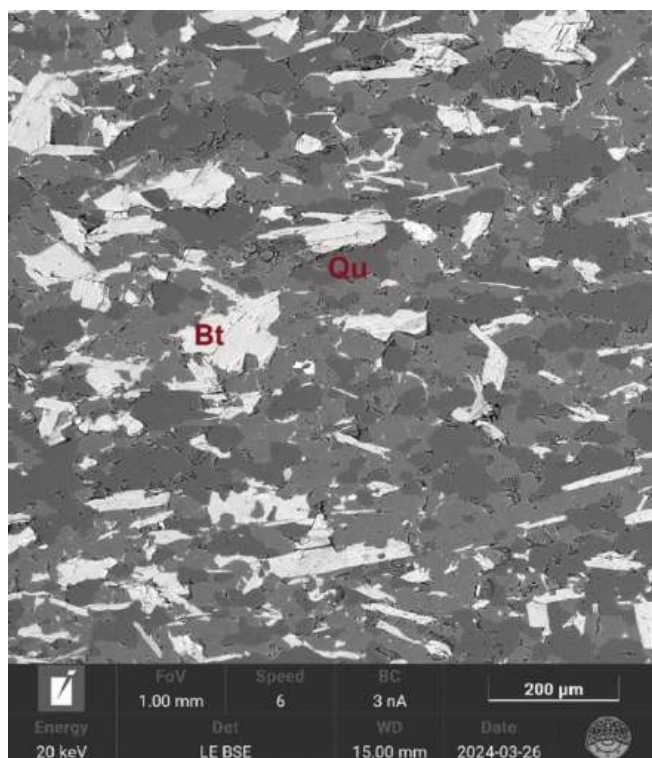
г) преломленный свет

Рисунок 7 – Оптические микрофотографии образцов ЛВ1312 (а, в) и ЛВ1356 (б, г) в отраженном и преломленном свете. Масштаб 200 мкм.

дистиллированная вода. Источником продольных ультразвуковых волн являлась плоскопараллельная пластина из оптического стекла (светофильтра) СЗС-22 с акустически свободной границей, возбуждаемая импульсами Nd:YAG лазера. Спектр эффективно возбуждаемых ультразвуковых частот составлял 1–70 МГц. Приемником являлся широкополосным пьезоэлектрическим датчик с рабочей полосой частот 1–80 МГц. В результате прохождения через образец профиль импульса искажался за счет затухания ультразвуковых волн. Дополнительно отслеживался неискаженный импульс – опорный. Опорный и прошедший импульсы регистрировались цифровым осциллографом Tektronix TDS 2012B с аналоговой полосой 100 МГц и частотой дискретизации сигнала 1 ГГц и



а) ЛВ1312



б) ЛВ1356

Рисунок 8 – СЭМ-изображения аншлифов образцов ЛВ1312 (а) и ЛВ1356 (б). Размер каждого кадра (поле обзора) составляет 1х1 мм. Подписи на изображениях: Amf – амфибол, Pl – плагиоклаз, Qu – кварц, Bt – биотит, FeO – оксид железа (II), Fsp – полево шпат.

передавались на компьютер для обработки. Максимальное отношение сигнал-шум регистрируемых электрических сигналов составляло порядка 2000.

Частотно-зависимый коэффициент затухания продольных волн $\alpha(f)$ может быть рассчитан через амплитудный спектр $S(f)$ ультразвукового импульса, прошедшего через образец толщины H [136]:

$$\alpha(f) = \frac{1}{H} \left[\ln \frac{S_0(f)}{S(f)} + \ln T_1 T_2 + \ln D(f) \right] \quad (2)$$

где $D(f)$ – фактор дифракционного искажения, $S_0(f)$ – амплитудный спектр опорного сигнала, T_1 и T_2 – амплитудные коэффициенты прохождения волны из воды в образец и из образца в воду соответственно. Дисперсию фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в образце $C(f)$ может быть получена по формуле [136]:

$$C(f) = \frac{2\pi f H}{\phi(f) - \phi_0(f)} \quad (3)$$

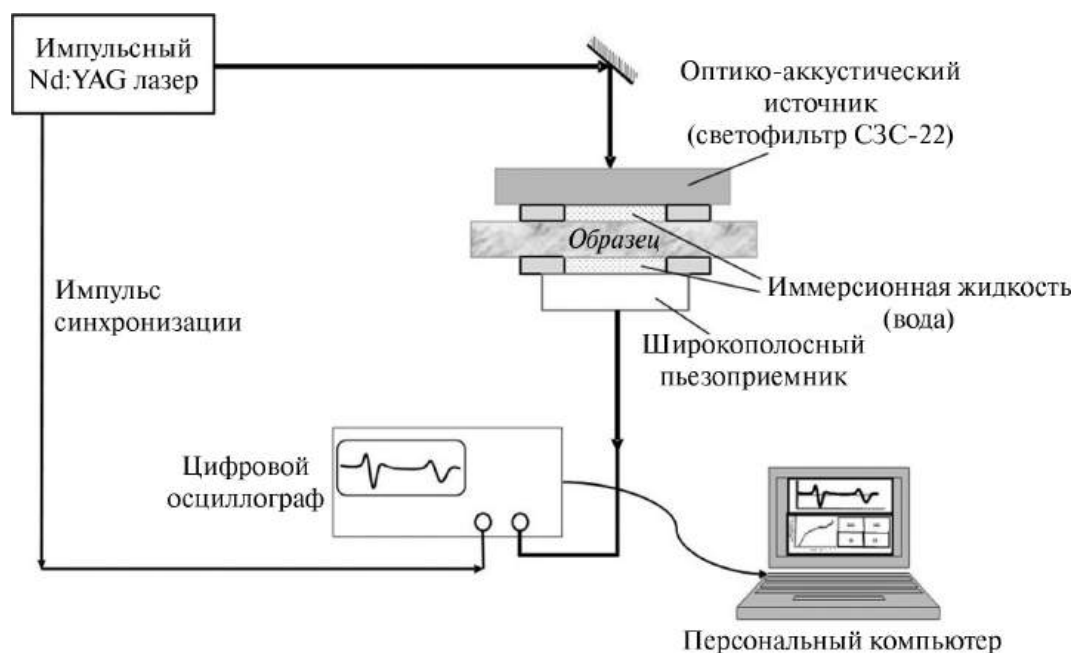


Рисунок 9 – Схема широкополосного акустического спектрометра с лазерным оптико-акустическим источником ультразвука [130].

где $\phi(f)$ и $\phi_0(f)$ – фазовые спектры прошедшего и опорного импульсов соответственно [130].

Краткое содержание главы 2

В главе описаны исследуемые образцы горных пород, методика проведения экспериментов по термическому воздействию, а также данные и методика для оценки размеров зерен образцов породы в рамках исследования микроструктуры. Исследовательским материалом являются образцы пяти типов: граниты, базальты, метапесчаники, песчаники и модельная порода (гипсово-песчаные образцы). Образцы претерпевали несколько циклов нагрева и охлаждения в экспериментальной установке, в ходе каждого эксперимента регистрировались импульсы термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ). Отмечена особенность регистрации, связанная с отсутствием локации импульсов (один датчик ТАЭ). Основным материалом для анализа микроструктуры (для образцов метапесчаников) являлись микроструктурные оптические фотографии шлифов, дополнительным – снимки, полученные на электронном микроскопе, и результаты применения метода широкополосной акустической спектроскопии. Описанные методы, объем экспериментального материала

и качество экспериментальных данных необходимы в качестве надежной основы для формулирования выводов об особенностях поведения пород при термическом воздействии, которые обосновывают **все три защищаемых положения** и которые представлены в главе 5.

ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРЫ ТЕРМИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

3.1. Активность акустической эмиссии

Активность потока акустической эмиссии определяется как количество событий АЭ в единицу времени [137]. Был произведен расчет активности ТАЭ I в импульсах в секунду (имп./с) в окне по 200 событий, которое дает наиболее представительную активность. В этом случае можно не только наблюдать разномасштабную активность и следить за ее общими изменениями в ходе эксперимента, но и отслеживать слабые вариации. Расчет активности I акустической эмиссии в окне производился по формуле:

$$I = \frac{N}{\Delta t}, \quad (4)$$

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

Особый интерес представляет период эксперимента, когда температура образца превышает 200°C. До 200°C процессы разрушения идут с низкой интенсивностью. Помимо этого, прослойка из индия обеспечивает плотный и стабильный контакт образца с волноводом только после расплавления металла (около 156°C). Заполнение расплавленным индием зазора между волноводом и образцом и вызываемая этим кратковременная подвижка волновода обуславливают всплеск активности, не связанный с процессами в образце. С учетом этого в экспериментах выделено 2 этапа: нагрев от 200°C до максимальной температуры и охлаждение от максимальной температуры до 200°C, когда все импульсы регистрировались как полезные и связанные с термическим разрушением.

3.2. Наклон графика повторяемости (b-value)

3.2.1. Расчет b-value, эквивалентного оценке по энергиям событий

Процесс развития трещины сопровождается, как правило, коротким импульсом ТАЭ. Продолжительные сигналы несут информацию не только об основном импульсе, но и о его переотражениях. Чаще всего в сигнале есть одна полуволна с амплитудой, уверенно превышающей остальные. Предполагается [131], что основная энергия события акустической эмиссии E примерно пропорциональна квадрату данной амплитуды:

$$E \approx k \cdot (A_V)^2, \quad (5)$$

где E – основная энергия события акустической эмиссии (в джоулях), A_V – максимальная амплитуда импульса акустической эмиссии (в вольтах), k – некоторый коэффициент пропорциональности, учитывающий параметры датчика АЭ и особенности распространения импульса от микротрещины до датчика [131].

Аппаратура регистрирует амплитуду импульса в микровольтах (мкВ), что затем программно пересчитывается в дБмкВ – децибелы относительно 1 мкВ [137]:

$$A_{dB} = 20 \cdot \lg A_{uV}, \quad (6)$$

где A_{dB} – амплитуда импульса акустической эмиссии, измеренная в дБмкВ, A_{uV} – она же, измеренная в мкВ. Во избежание регистрации шума в экспериментах был задан порог регистрации 35 дБмкВ. Все импульсы ТАЭ с амплитудой меньше указанного порога не регистрировались.

Для дальнейшего взаимного преобразования величин необходимо записать связь между логарифмом энергии события в джоулях и амплитудой импульса АЭ,

измеренной в дБмкВ. Логарифмируя (5), получим:

$$\begin{aligned}\lg E &\approx \lg k + 2 \lg A_V = \lg k + 2 \lg (A_{uV} \cdot 10^{-6}) = \\ &= \lg k - 12 + 2 \lg A_{uV} = \lg k - 12 + \frac{1}{10} \cdot 20 \cdot \lg A_{uV}\end{aligned}$$

Преобразуя это к дБмкВ с учетом (6), для связи энергии и амплитуды запишем:

$$\lg E \approx c_1 + \frac{1}{10} A_{dB} \quad (7)$$

где c_1 учитывает преобразование порядков единиц и методические особенности регистрации; как можно заметить, c_1 не оказывает влияния на пропорциональность между логарифмом энергии и амплитудой импульса в дБмкВ.

По аналогии с законом Гутенберга-Рихтера [138] график повторяемости событий, т.е. зависимость логарифма числа событий акустической эмиссии в образце N от энергии события E (в джоулях), может быть аппроксимирован законом [131]:

$$\lg N = a - b \cdot \lg E \quad (8)$$

где N – число событий в интервале энергий $[\lg E; \lg E + d_E]$, d_E – ширина интервала энергий (на логарифмической шкале), a и b – параметры аппроксимации. Для рассмотрения в данной работе важен параметр b , характеризующий наклон графика повторяемости событий по энергиям, называемый далее просто b-value. В приведенном виде закон (8) описывает т.н. дифференциальный график повторяемости, который используется для расчета b-value, например, методом линейной регрессии.

Используя (5) и (7), можно записать выражение для закона повторяемости импульсов по амплитудам, измеренным в вольтах и в дБмкВ соответственно:

$$\lg N = a - b \cdot \lg E = a - b \cdot \lg k + b \cdot 2 \lg A_V = a_{A_V} - b_{A_V} \cdot \lg A_V \quad (9.1)$$

$$\lg N = a - b \cdot \lg E = a - b \cdot c_1 - b \cdot \frac{1}{10} A_{dB} = a_{A_{dB}} - b_{A_{dB}} \cdot A_{dB} \quad (9.2)$$

где a_{A_V} и b_{A_V} , $a_{A_{dB}}$ и $b_{A_{dB}}$ – параметры аппроксимации закона повторяемости импульсов для амплитуд, измеренных в вольтах и в дБмкВ соответственно.

Для корректного сравнения натурных данных (сейсмология) и данных экспериментов запишем вместе выражения для связи энергий событий акустической эмиссии и амплитуд импульсов акустической эмиссии (7), энергий землетрясений и магнитуд поверхностных и объемных сейсмических волн [139] в тех единицах, которые являются наиболее употребительными при инструментальном анализе:

$$\lg E \approx \lg k + 2 \cdot \lg A_V \quad (10.1)$$

$$\lg E \approx c_1 + \frac{1}{10} A_{dB} \quad (10.2)$$

$$\lg E_{EQ} \approx 4.8 + 1.5 \cdot M_S \quad (10.3)$$

$$\lg E_{EQ} \approx -1.2 + 2.4 \cdot m_b \quad (10.4)$$

где E – энергия события акустической эмиссии (в джоулях); A_V и A_{dB} – амплитуда импульса акустической эмиссии, измеренная в вольтах и в дБмкВ, соответственно; E_{EQ} – энергия землетрясения (в джоулях); M_S и m_b – магнитуда поверхностных и объемных сейсмических волн, соответственно; k и c_1 – некоторые константы.

Запишем вместе законы повторяемости. Для событий акустической эмиссии по энергиям (7):

$$\lg N = a - b \cdot \lg E \quad (11.1)$$

импульсов акустической эмиссии по амплитудам (9.1) – (9.2):

$$\lg N = a_{A_V} - b_{A_V} \cdot \lg A_V \quad (12.2)$$

$$\lg N = a_{A_{dB}} - b_{A_{dB}} \cdot A_{dB} \quad (12.3)$$

сейсмических событий по энергиям:

$$\lg N_{EQ} = a_{EQ} - b_{EQ} \cdot \lg E_{EQ} \quad (12.4)$$

поверхностных и объемных волн по магнитудам [139]:

$$\lg N_{EQ} = a_{M_s} - b_{M_s} \cdot M_s \quad (12.5)$$

$$\lg N_{EQ} = a_{m_b} - b_{m_b} \cdot m_b \quad (12.6)$$

где параметры a и b аппроксимации закона повторяемости (с соответствующими индексами) определены для каждого из записанных законов по отдельности. Между собой параметры b связаны следующим образом, с учетом (9.1) - (9.2), (10.1) - (10.4) и (11.1) - (12.6):

$$b = \frac{1}{2} \cdot b_{A_v} \quad (13.1)$$

$$b = 10 \cdot b_{A_{dB}} \quad (13.2)$$

$$b_{EQ} = \frac{1}{1.5} \cdot b_{M_s} \quad (13.3)$$

$$b_{EQ} = \frac{1}{2.4} \cdot b_{m_b} \quad (13.4)$$

Важно отметить, что сравнение результатов натурных наблюдений и лабораторного эксперимента возможно только для b и b_{EQ} , поскольку только эти параметры аппроксимируют закон повторяемости на одинаковой шкале энергий событий, акустических или сейсмических, заданных в одних и тех же единицах измерения – джоулях [140]. Все значения b-value, рассчитанные по экспериментальным данным через амплитуды импульсов ТАЭ A_{dB} , являлись параметром $b_{A_{dB}}$ в (12.3). Они были преобразованы согласно (13.2) к b-value, рассчитываемому по энергиями импульсов ТАЭ. Таким образом, все приводимые далее значения b-value соответствуют b , определяемому по энергиям событий акустической эмиссии по (8) или (11.1), если не оговорено иное.

3.2.2. Оценка методом линейной регрессии

Одним из способов расчета значения и погрешности b -value, среднего за этап и в динамике изменения, был метод линейной регрессии с интервальной оценкой параметра (доверительный интервал 95%) [140].

Оценка b -value производилась в двух вариантах – для целого этапа нагрева или охлаждения (среднее значение b -value за этап) и в скользящем окне (динамика изменения b -value). Для двух вариантов отдельно был выбран диапазон анализируемых амплитуд импульсов ТАЭ. На низких амплитудах возможна регистрация некоторых помех (шумов), что увеличивает число событий. В области больших амплитуд, наоборот, импульсов крайне мало и возможен дефицит количества зарегистрированных импульсов из-за того, что высокоамплитудный импульс может попасть в одно окно, и не попасть в другое. Пример распределения событий для одного из экспериментов на всем этапе нагрева и в окне в 200 событий в середине нагрева показан на рисунке 10.

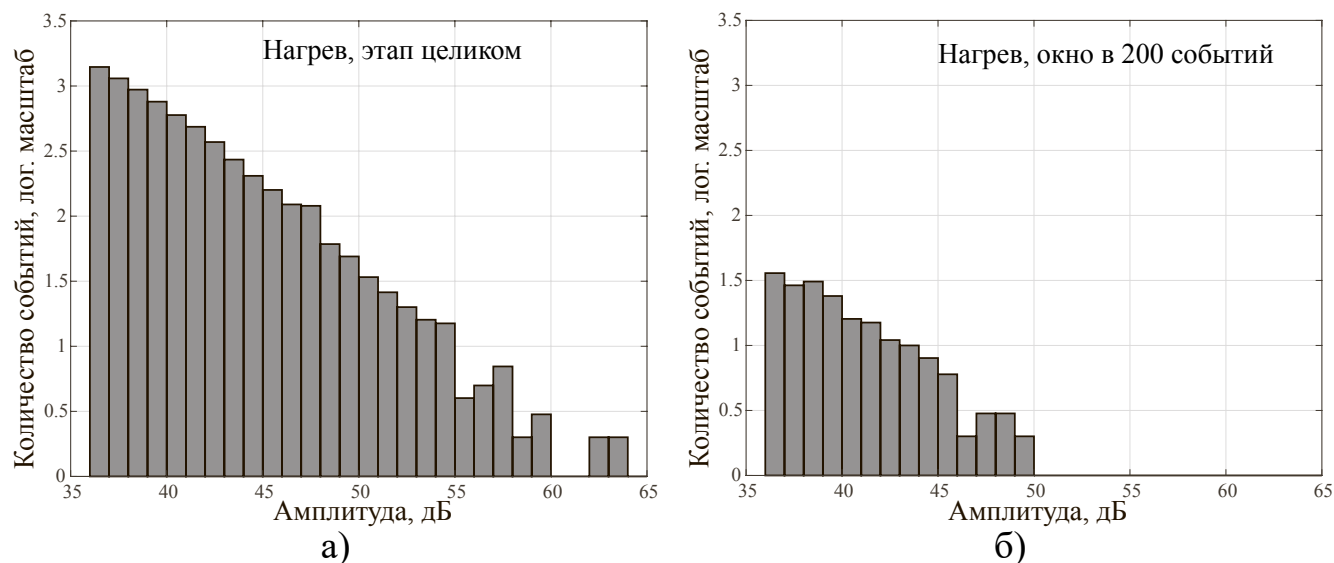


Рисунок 10 – График повторяемости событий по амплитудам в эксперименте с образцом гранита 117-1-30 для всего этапа нагрева от 200°C до T_{max} (а) и для избранного окна в 200 событий в середине нагрева (б).

Для оценки b -value, среднего за этап нагрева или охлаждения целиком, было решено работать с диапазоном амплитуд сигналов АЭ 36-56 дБ, так как в этом диапазоне в основном график повторяемости достаточно ровный (рисунок 10-а). Вариация границ диапазона показывает, что в этом интервале амплитуд b -value

выходит на стабильное постоянное значение. Оптимальный диапазон амплитуд для оценки динамики изменения b-value в окне в 200 событий составил 36-46 дБ (рисунок 10-б).

3.2.3. Оценка максимального правдоподобия по максимальной кривизне

Для части экспериментов, с целью проверки результатов, полученных с помощью линейной регрессии, для расчета b-value использовался метод максимального правдоподобия с оценкой представительной амплитуды по максимальной кривизне [141]:

$$b = \frac{\lg e}{\overline{M} - \left(M_c - \frac{\Delta M}{2}\right)} \quad (14)$$

где $\overline{M}$ – средняя магнитуда для событий с магнитудой, большей M_c , ΔM – ширина столбца магнитуд (ширина биннинга). Величина M_c определяется как значение магнитуды, при котором производная частотного графика распределения максимальна. Для оценки погрешности оценки b-value использовался критерий стабильности δb [141; 142]

$$\delta b = 2.3 \cdot b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \overline{M})^2}{N(N-1)}} \quad (15)$$

где N – количество столбцов магнитуд M_i . Так как в проведенных экспериментах амплитуда акустического импульса по своему смыслу и размерности соответствует магнитуде сейсмического события, то вместо M использовались значения амплитуды событий ТАЭ в дБ – A_{dB} . Таким образом, в данной работе формулы (14)-(15) были преобразованы в (16)-(17) для расчета b-value и погрешности b-value соответственно:

$$b_{A_{dB}} = \frac{\lg e}{\overline{A_{dB}} - \left(A_{dB_c} - \frac{\Delta A_{dB}}{2}\right)} \quad (16)$$

$$\delta b_{A_{dB}} = 2.3 \cdot b_{A_{dB}}^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_{dB}^{<i>} - \overline{A_{dB}})^2}{N(N-1)}} \quad (17)$$

где $\overline{A_{dB}}$ – средняя амплитуда для событий с амплитудой, большей A_{dB_c} ; A_{dB_c} – представительная амплитуда событий на графике повторяемости; ΔA_{dB} – ширина столбца амплитуд, N – количество столбцов амплитуд $A_{dB}^{<i>}$. В реализованном алгоритме A_{dB_c} определялась способом, эквивалентным определению M_c по [141], – как амплитуда столбца дифференциального графика повторяемости с максимальным числом событий. Окончательно $b_{A_{dB}}$ пересчитывалось к b согласно (13.2).

3.2.4. Оценка максимального правдоподобия для цензурированной выборки

Основным методом расчета b-value являлась оценка максимального правдоподобия для цензурированной выборки по алгоритму, описанному в [143]. Несмотря на то, что оценка b-value методами 3.2.2 и 3.2.3 производится в оптимальном диапазоне, вероятность событий с амплитудой, большей максимальной в этом диапазоне, не равна нулю. Эти события не учитываются, что приводит к занижению оценки b-value. Поэтому оценка b-value по цензурированной выборке для данных ТАЭ может интерпретироваться как оценка «снизу».

Оценка b-value методом максимального правдоподобия по цензурированной выборке заключается в следующем. Пусть задано цензурированное экспоненциальное распределение амплитуд x с параметром α :

$$p(x) = \frac{\alpha e^{\alpha X_1}}{1 - e^{-\alpha(X_2 - X_1)}} e^{-\alpha x}, \quad x \in [X_1, X_2] \quad (18)$$

где X_1 и X_2 – границы диапазона амплитуд выборки, состоящей из N событий. Для этого распределения можно записать логарифм функции правдоподобия L

(19) и его частную производную по параметру α (20) :

$$\ln L = N \ln \alpha + N \alpha X_1 - \alpha \sum_{i=1}^N x_i - N \ln \left(1 - e^{-\alpha(X_2 - X_1)} \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = \frac{N}{\alpha} - N \frac{\Delta X}{e^{\Delta X} - 1} - \frac{N}{\alpha_0} \quad (20)$$

где введены обозначения:

$$\frac{1}{\alpha_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - X_1$$

$$\Delta X = X_2 - X_1$$

Из условия максимума функции правдоподобия из (20) получается уравнение относительно параметра α , которое решается численно:

$$f(\alpha) = -\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\Delta X}{e^{\Delta X} - 1} = 0 \quad (21)$$

Перепишем согласно (12.3) в других обозначениях распределение амплитуд A в эксперименте (аналогичное закону Гутенберга-Рихтера для магнитуд (12.5) – (12.6)) через экспоненту с учетом (13.2):

$$\frac{N}{N_{tot.}} \sim p(A) \sim 10^{-bA} = e^{-bA \ln 10} \quad (22)$$

Сопоставляя (18) и (22), для оценки b-value окончательно получим [143]:

$$b = \frac{\alpha}{\ln 10} \quad (23)$$

Для погрешности b-value [143]:

$$S_b = \frac{S_\alpha}{\ln 10} \quad (24)$$

где S_α :

$$S_\alpha = \sqrt{\left(-\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \alpha^2}\right)} = \frac{\alpha}{\sqrt{N}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\alpha \Delta X}{e^{\alpha \Delta X} - 1}\right)^2 e^{\alpha \Delta X}}}$$

Так как ОМП для цензурированной выборки дает наиболее надежную оценку параметра b , 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.

3.3. Вторичные параметры импульсов ТАЭ

Параметры импульса АЭ можно разделить на первичные и вторичные. Первичные измеряются непосредственно по волновой форме: максимальная амплитуда A , время нарастания T_{rise} , длительность T_{dur} , число пересечений порога регистрации H_{counts} и др., см. рис. 6. Вторичные параметры измеряются более сложными способами или вычисляются по первичным параметрам: скорость нарастания, средняя частота и др. Вторичные параметры применяются, например, для определения типа микротрещин, образующихся в горных породах в процессе нагружения [144]. Для этого используется совместный анализ по параметрам RA и AF , где RA («Rise Angle») – «угол нарастания», отношение длительности нарастания сигнала к его максимальной амплитуде («Rise Time To Amplitude»), а AF («Average Frequency») – «средняя частота», отношение общей длительности сигнала к числу пересечений порога:

$$RA = \frac{T_{\text{rise}}}{A} \quad (25.1)$$

$$AF = \frac{T_{\text{dur}}}{H_{\text{counts}}} \quad (25.2)$$

RA можно интерпретировать как величину, обратно пропорциональную скорости нарастания огибающей сигнала АЭ [145]. Так, сдвиговые («shear-mode») трещины характеризуются в целом более низкочастотным сигналом

(низкая средняя частота AF) и длительным временем нарастания (большое значение RA), в то время как трещины растяжения («tensile-mode»), напротив, характеризуются высокими средними частотами AF и малыми RA [146].

Ко вторичным параметрам АЭ относятся энергия импульса E и амплитуда A , а также связанные с ними величины. Параметр LC дополнительно к RA характеризует форму сигнала:

$$LC = \frac{\ln(A/A_{\text{trshld}})}{H_{\text{counts}}} \quad (26)$$

где A_{trshld} – величина порога детектирования импульсов АЭ. Этот параметр характеризует, прежде всего, затухание сигнала, в предположении, что его огибающая при затухании близка к экспоненте [125; 147]. Если тип источника и параметры затухания на пути распространения сигнала от источника до регистратора не изменяются, то LC тоже должен оставаться практически неизменным.

О параметрах энергии и амплитуде речь шла ранее в разделе 3.2.1. Такой параметр, как амплитуда сигнала A_{dB} , представлен в дБмкВ, т.е. дБ относительно 1 мкВ (см. выражение 6). Энергия событий E_{dB} представлена в дБиДж, т.е. дБ относительно 10^{-24} Дж или иоктоджоуля:

$$E_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{E}{10^{-24} \text{ Дж}} \right)$$

где E – энергия импульса, определенная по квадрату амплитуды первого колебания (см. выражение 5) или сумме квадратов амплитуд нескольких первых колебаний, алгоритм расчета зависит от системы регистрации. Параметры A_{dB} и E_{dB} , несмотря на значительную корреляцию между собой, могут по-разному характеризовать распределение импульсов АЭ [110].

3.4. Кластеризация импульсов ТАЭ

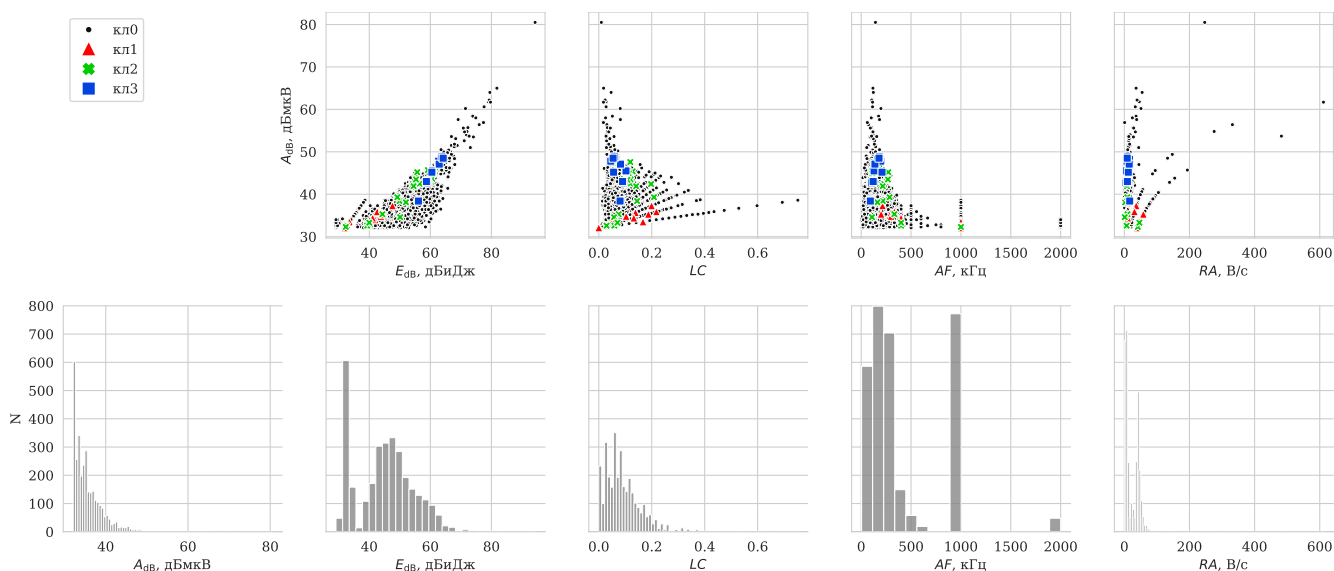
3.4.1. Входные данные для кластеризации импульсов ТАЭ

Как было отмечено в 1.2.3, волновые формы импульсов одного и того же источника или схожих источников предполагаются схожими между собой. Мера их сходства часто определяется корреляционной функцией, инвариантной к абсолютному значению амплитуды импульса и к сдвигу волновой формы во времени. Коэффициент корреляции часто определяется как максимум взаимнокорреляционной функции. Вычислительная сложность такого выделения групп импульсов АЭ составляет весьма большую величину порядка $O(n^2 \cdot m^2)$, где n – длина кадра регистрации (импульса), а m – число зарегистрированных импульсов. Для уменьшения затрат времени и вычислительных ресурсов на определение устойчивых групп импульсов АЭ представляется актуальным применение методов машинного обучения для анализа параметров импульсов АЭ.

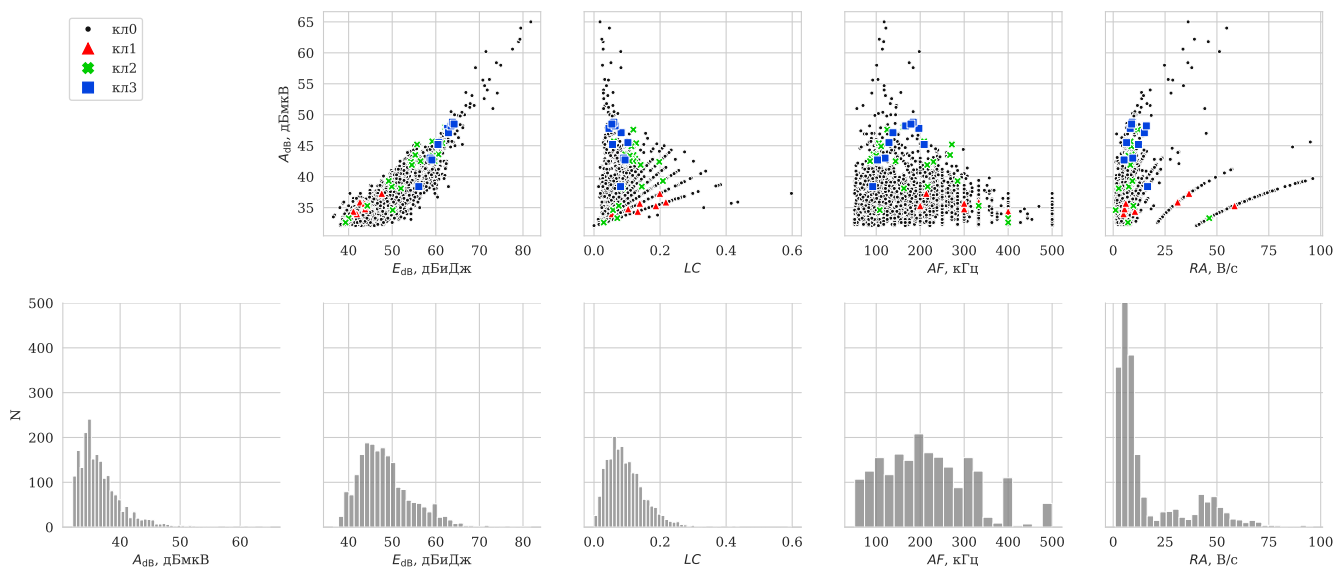
При анализе группируемости зарегистрированных событий ТАЭ целью работы является установление возможности выявления устойчивых групп импульсов и характерных особенностей процесса разрушения образцов горных пород на основе параметров волновых форм импульсов термостимулированной ТАЭ. Объектом изучения являются данные термического нагружения образцов горных пород, в первую очередь, волновых форм импульсов ТАЭ, указанные в предыдущих разделах, такие как амплитуда, продолжительность сигнала, количество пересечений порога регистрации и др.

Входные данные для кластеризации по параметрам представляют собой таблицу параметров импульсов ТАЭ, зарегистрированных в отдельно проведенных экспериментах с термическим воздействием на образцы песчаника, один из которых предварительно подвергался механическому нагружению, а другой – нет (см. раздел 1.2.3). Фрагмент исходного датасета и описание всех параметров представлены в Приложении в таблице 14. Имеется 15 признаков и 1 целевая переменная – *Clust* или индекс группы. В ходе предварительной обработки с помощью взаимнокорреляционного метода волновых форм импульсов ТАЭ было выявлено 3 группы импульсов (1, 2, 3 соответственно),

остальные импульсы отнесены к классу 0. Таким образом, к классу 0 принадлежат те импульсы, которые имеют уникальные волновые формы и поэтому могут быть отнесены к группе фоновому шуму, состоящему из импульсов от многочисленных микротрещин и частично из помеховых импульсов. Исходное распределение некоторых признаков показано на рис. 11-а.



а) данные до фильтрации



б) данные после фильтрации

Рисунок 11 – Избранные диаграммы разброса импульсов ТАЭ в пространстве параметров A_{dB} , E_{dB} , AF , RA и LC и частотные гистограммы параметров, до (а) и после фильтрации (б). 1-3 – импульсы ТАЭ из 1-3 исходных кластеров, 0 – некластеризованные импульсы.

Из исходного датасета были исключены импульсы, относящиеся к

типичным помехам в соответствии с условиями, налагаемыми на среднюю частоту AF и амплитудно-временной параметр сигнала RA : $50 < AF < 550$ кГц, $1 < RA < 100$ В/с. Диапазон значений AF обусловлен суммарной амплитудно-частотной характеристикой измерительного канала «датчик АЭ – предварительный усилитель – аналоговый фильтр – цифровой фильтр». На границах указанного диапазона коэффициент передачи канала в 10 раз меньше его максимального значения внутри диапазона. Высокоамплитудные импульсы с $AF < 50$ кГц и $AF > 550$ кГц скорее всего, являются гармоническими и импульсными электромагнитными помехами, соответственно. Нижняя граница обоснована максимально возможной скоростью нарастания сигнала, которая на порядок меньше отношения максимально возможного размаха сигнала за один период дискретизации.

Для параметра RA верхняя граница обусловлена разрешающей способностью по амплитуде и максимально возможной длительностью сигнала, которая одного порядка с длительностью регистрируемого кадра. Фильтрация по этому параметру не означает, что импульс физически не может существовать, но говорит о том, что вне этого диапазона параметр RA не имеет физического смысла, т.е. его величина обусловлена либо импульсной помехой, либо шумом (при малой амплитуде сигнала) [110].

Для самых малоамплитудных импульсов АЭ или помех нельзя корректно оценить параметры T_{dur} , T_{rise} , AF и RA , поскольку есть только одно пересечение порога. Таким импульсам приходится приписывать некоторую минимальную длительность T_{dur} , например, 1 мкс, как это делается в промышленных системах регистрации АЭ, и оценка даст $AF = 1000$ кГц. Поэтому такие импульсы должны быть исключены при анализе параметров вне зависимости от их происхождения.

Также в ходе подготовки датасета к анализу из него был исключен признак A_{adc} , представляющий собой амплитуду импульса в единицах АЦП и линейно связанный с амплитудой в мкВ – признаком A_{uV} .

Таким образом, в фильтрованном датасете представлено 14 признаков и 2053 строк данных. Подавляющее большинство импульсов принадлежит фоновому классу. Распределение импульсов после фильтрации для некоторых признаков

приведено в табл. 5 и на рис. 11-б. Первый и второй кластеры потеряли 4 и 2 импульса, третий кластер не потерял ни одного импульса. Всего было отсеяно около трети всех импульсов. Частотные распределения импульсов по параметрам A_{dB} , E_{dB} , AF и RA после фильтрации стали более плавными. Признак LC использовался только в модели адаптивного бустинга [110]. Корреляционная матрица признаков приведена в Приложении на рисунке 29.

Таблица 5. Распределение импульсов по классам в датасете (предварительно нагруженный песчаник).

№ кластера	Импульсов АЭ	
	до фильтрации	после фильтрации
1	11	7
2	23	21
3	10	10
вне кластеров	3094	2015

Был проведен дисперсионный анализ признаков датасета для проверки различимости классов. Была исследована совокупность признаков с помощью многомерного дисперсионного анализа (MANOVA) [148], который позволяет одновременно оценивать влияние одной или нескольких категориальных переменных на несколько зависимых переменных, чтобы выявить общие различия между группами. Затем было оценено распределение классов по каждому признаку с помощью одномерного дисперсионного анализа (ANOVA) [149], предназначенного для проверки различий средних значений одной зависимой переменной между двумя и более группами. Для проверки различий классов между собой было проведено их попарное сравнение при помощи теста Тьюки [149; 150].

С помощью MANOVA было проанализировано влияние номера класса на вектор из 13 зависимых переменных, что меньше на 1 признак от общего числа содержащихся в датасете из-за высокой корреляции между некоторыми признаками. Анализировались четыре тестовых критерия: лямбда Уилкса, след Пиллая, след Лоули-Хотеллинга и максимальный характеристический корень по методу Роя [148], каждый из которых оценивал гипотезу о равенстве векторных средних во всех группах, определяемых номером класса. Результаты показали,

что классы статистически различимы при доле объяснённой дисперсии около 10% (таблица 6). Это указывает на умеренную силу различий между классами.

Таблица 6. Результаты многомерного дисперсионного анализа (MANOVA) для фильтрованного датасета.

Критерий	Значение	Число признаков (степеней свободы)	p-value
Лямбда Уилкса	0.9061	13	< 0.0001
След Пиллая	0.0939	13	< 0.0001
След Лоули-Хотеллинга	0.1036	13	< 0.0001
Макс. хар. корень по методу Роя	0.1036	13	< 0.0001

Таблица 7. Результаты одномерного дисперсионного анализа (ANOVA) для фильтрованного датасета.

№	Признак	p-value
1	AdB	$2.33 \cdot 10^{-18}$
2	EdB	$3.92 \cdot 10^{-14}$
3	AuV	$8.40 \cdot 10^{-6}$
4	hcounts	$3.23 \cdot 10^{-5}$
5	Emarse	$4.22 \cdot 10^{-5}$
6	Trise	$5.54 \cdot 10^{-4}$
7	A2hcounts	$6.69 \cdot 10^{-4}$
8	AF	$1.38 \cdot 10^{-2}$
9	Tdur	$2.71 \cdot 10^{-2}$
10	Heat	$4.70 \cdot 10^{-2}$

Анализ ANOVA подтверждает выводы MANOVA (таблица 7): из 14 проанализированных признаков, 10 оказались статистически значимыми при уровне значимости 0.05 [149]. На рисунке 12 приведены распределения некоторых признаков по классам. Несмотря на то, что различия между классами 1-3 могут быть выражены неярко, эти классы существенно отличимы от фонового класса 0, что особенно заметно для класса 3.

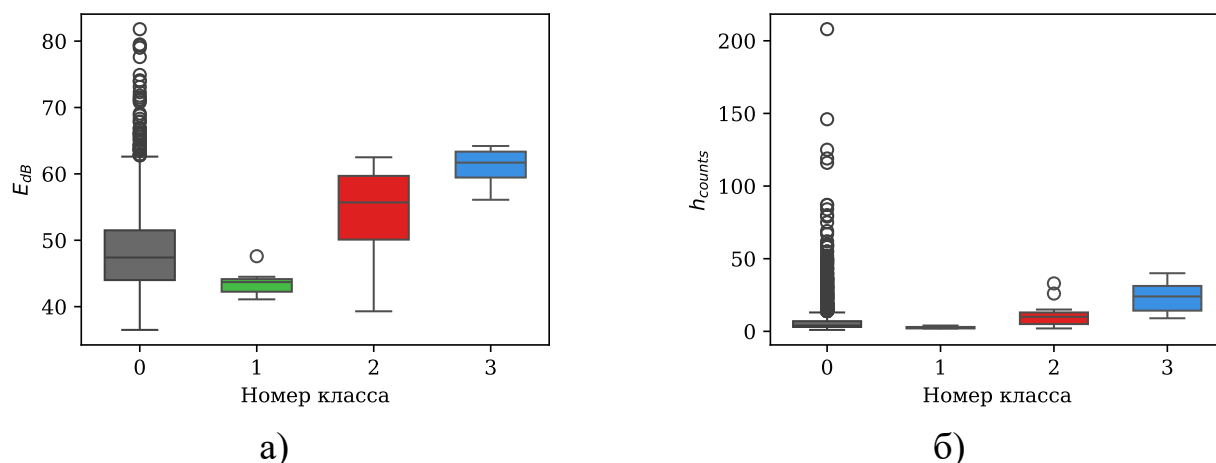


Рисунок 12 – Распределения по классам некоторых признаков из фильтрованного датасета: а) – E_{dB} (энергия импульса в дБ относительно 10^{-24} Дж), б) – h_{counts} .

Результаты парных сравнений признаков по тесту Тьюки [150] показывают, что распределение признаков между классами неоднородно и имеет четко выраженную иерархию отличий. Для большинства признаков есть уверенное различие между классами 0 и 2, 0 и 3, 1 и 2, 1 и 3. При этом между классами 0 и 1 по большинству признаков значимых различий не наблюдается (A_{dB} , E_{dB} , A_{uV} , h_{counts} , E_{MARSE} , T_{rise}), а класс 3, как правило, отличается от всех остальных классов по большинству признаков с высокой статистической значимостью.

Таким образом, классы 0 и 1 могут рассматриваться как близкие или смежные группы, а классы 2 и 3 – как более отчетливо разделенные. Следует ожидать, что при классификации классы 2 и 3 будут легче определяться, причем класс 3 лучше прочих.

3.4.2. Методы машинного обучения, примененные в работе

Для анализа датасета с целью классификации импульсов были использованы стандартные методы машинного обучения: Random forest [151], XGBoost [152], CatBoost [153]. Данные делились на обучающую и тестовую выборку со стратификацией в соотношении 65% к 35% ввиду малого числа импульсов для тестирования модели. К данным применялись разные способы уравнивания числа объектов разных классов для обучения: undersampling (выбор числа объектов обучения, соответствующего размеру наименьшего класса, с выбрасыванием

значений), oversampling (выбор числа объектов обучения, соответствующего размеру наибольшего класса, с повторением значений), SMOTE (синтезирование объектов минорных классов [154]). Лучший результат получен с применением SMOTE. Кроме того, был использован алгоритм AdaBoost [155] для оценки устойчивости выделенных групп импульсов, обученный на всем фильтрованном датасете. Наиболее подходящие параметры для модели подбирались с помощью Optuna [156]. Проводилась кросс-валидация (от 5 до 30 выборок), оценивались метрики F1-score, Precision, Recall, определяемые, как:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (27)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (28)$$

$$\text{F1-score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (29)$$

где TP (True Positive) – число объектов, верно предсказанных положительными, FP (False Positive) – ложно предсказанных положительными, TN (True Negative) – верно предсказанных отрицательными, FN (False Negative) – ложно предсказанных отрицательными. Метрика Recall (полнота), таким образом, в поставленной задаче отражает долю верно предсказанных объектов класса из общего числа объектов данного класса. Метрика Precision (точность) показывает долю верно предсказанных объектов класса среди объектов, отнесенных моделью к данному классу. Метрика F1-score (F_1 -мера) представляет собой гармоническое среднее точности и полноты.

При обучении модели AdaBoost [155] классификация по каждому исходному кластеру как отдельному целевому классу производилась независимо. Таким образом, при обучении модели импульсы из первого исходного кластера принимались за целевой класс, все остальные импульсы полагались фоновым классом. Подобные операции отдельно повторялись для второго и третьего исходных кластеров. В качестве целевой меры использовалась ошибка несоответствия e_{mst} , противоположная метрике Recall, выражающая

относительное количество (долю) нераспознанных импульсов целевого класса:

$$e_{\text{mst}} = \frac{FN}{TP + FN} \quad (30)$$

Так как классы 1, 2 и 3 малочисленны и представляют собой «полезный» сигнал на общем фоне импульсов, был проведен поиск аномалий в данных на полном датасете (обучение без учителя) с использованием моделей Isolation forest [157], One-class SVM [158] и LOF [159] с подбором параметра *contamination/nu* с помощью Optuna. В качестве метрики использовалось число импульсов классов 1-3, распознанных алгоритмом как аномалия. Кластеризация выделенных аномалий производилась методами K-means [160] и DBSCAN [161] с целью получения исходного разбиения импульсов на классы 1-3.

Также была использована иерархическая кластеризация в агломеративном варианте (формирование дендрограммы в направлении от «листьев» к «корню»). Использовалась евклидова норма и три метода оценки связности между кластерами – метод Уорда, пригодный для выделения близкорасположенных кластеров, и, для сравнения с ним, медианный и центроидный методы [162].

Ниже представлен глоссарий упомянутых моделей и методов:

- **Адаптивный бустинг (AdaBoost)** – ансамблевый метод, последовательно обучающий слабые классификаторы (решающие деревья), с увеличением веса предыдущих ошибок [155].
- **Случайный лес (Random Forest)** – ансамблевый метод, строящий множество решающих деревьев и объединяющий их предсказания путем усреднения (для регрессии) или голосования (для классификации) [151].
- **Экстремальный градиентный бустинг (XGBoost)** – эффективная реализация градиентного бустинга над деревьями решений с регуляризацией и оптимизацией по скорости [152].
- **Категориальный бустинг (CatBoost)** – градиентный бустинг, оптимизированный для работы с категориальными признаками [153].

- **Изолирующий лес (Isolation Forest)** – метод обнаружения аномалий, основанный на том, насколько легко изолировать точку с помощью случайных разбиений [157].
- **Одноклассовый метод опорных векторов (One-Class SVM)** – вариант SVM, обучающийся только на «нормальных» данных для выявления аномалий [158].
- **Локальный уровень выброса (LOF, Local Outlier Factor)** – метод выявления аномалий на основе сравнения локальной плотности точки с плотностью её соседей [159].
- **Метод k -средних (K-means)** – алгоритм кластеризации, который делит данные на k кластеров, минимизируя внутрикластерные расстояния до центроидов [160].
- **DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)** – метод кластеризации, выделяющий области высокой плотности и обозначающий точки вне этих областей как шум [161].
- **Метод главных компонент (PCA, Principal Component Analysis)** – метод уменьшения размерности данных за счёт проекции их на новые оси (главные компоненты), которые максимизируют дисперсию [163].
- **Синтетическое увеличение числа объектов минорного класса (SMOTE)** – метод балансировки классов через генерацию новых точек путём интерполяции между ближайшими соседями [154].
- **Optuna** – библиотека для автоматического подбора гиперпараметров с использованием поиска и стохастических методов, включая байесовские подходы [156].

Краткое содержание главы 3

В главе рассмотрены параметры термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ), анализируемые в работе и рассчитанные на основе данных

экспериментов, параметры волновых форм импульсов, методы и алгоритмы оценок параметров. Приведены формулы расчета параметров активности ТАЭ и наклона графика повторяемости (b-value) применительно к обрабатываемым лабораторным экспериментам. Параметр b-value был пересчитан к величине, оцениваемой по энергии событий ТАЭ. Расчет параметров осуществлялся как в непересекающихся временных окнах в 200 событий ТАЭ, так и для этапов нагрева и охлаждения целиком. Приведены сведения о параметрах волновых форм импульсов, отмечены особенности и физическая интерпретация параметров угла нарастания (RA) и средней частоты (AF) импульса. Подробно описаны методы машинного обучения, применяемые для исследования группирования импульсов ТАЭ по параметрам волновых форм, и входные данные для них. Описанные методики позволяют проводить оценки параметров и свойств ТАЭ для возможности их корректного сравнения с лабораторными данными других исследователей и с сейсмологическими наблюдениями, что обосновывает достоверность полученных результатов, которые, в свою очередь, были положены в основу **всех трех защищаемых положений**.

ГЛАВА 4. ПАРАМЕТРЫ МИКРОСТРУКТУРЫ ИССЛЕДОВАННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

4.1. Оценка размеров зерен горных пород по микрофотографии

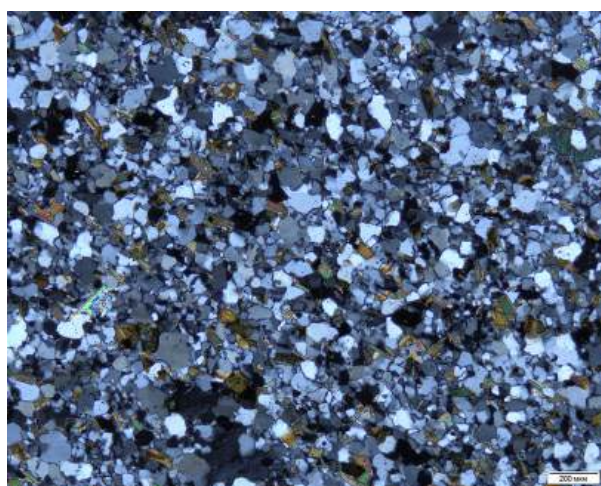
Для одного из образцов метапесчаников (ЛВ1356) с целью подбора наиболее подходящего метода анализа микроструктуры была проведена оценка распределения размеров зёрен тремя методами: ручными методом, методом пересечений опорных линий [76; 78; 89], и методом случайного бросания точек с построением из них ориентированных опорных отрезков, который позволяет получить косвенную оценку площади зерен [164]. Анализировались микрофотографии, полученные на оптическом микроскопе в поляризованном и неполяризованном свете [81].

Образец ЛВ1356 представляет собой массивную мелкозернистую породу из зоны граната (область $p < 1.5-4$ кбар и T около $400-500^{\circ}\text{C}$ на рис. 2). Состав: кварц с полевым шпатом около 70%, биотит около 20-25%, мусковит до 10%. В матрице породы сохранены элементы исходной обломочной структуры в виде разноразмерных зёрен каркасных и слоистых силикатов (от 30 до 200 мкм), а также порфиробластов мусковита (до 600 мкм). Чешуйки биотита распределены неупорядоченно. В некоторых участках присутствуют гранатовые порфиробласты, размер которых достигает 50 мкм [130].

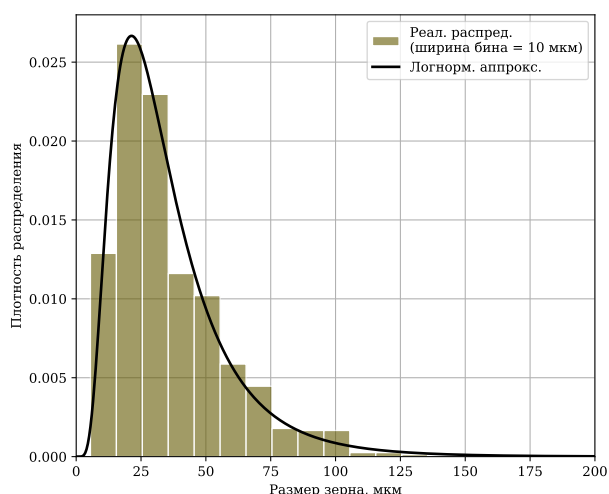
4.1.1. Ручное измерение

В методе ручной оценки размеров зерен использовалась микрофотография шлифа, полученная в поляризованном свете, так как для такого изображения границы между отдельными зёрнами визуально лучше различимы (рисунок 13-а). Измерение проведено сотрудниками компании «Системы для микроскопии и анализа» (ООО «СМА») с помощью собственного программного обеспечения (системы анализа изображений) на основе предоставленных микроскопических изображений шлифов. Было выделено 2 группы зерен: зерна кварца и зерна темноцветных минералов. После калибровки масштаба на основе масштабного отрезка снимка и настройки для изображения яркости, контраста и резкости,

обеспечивающих лучшее различение границ, для каждой из групп экспертом вручную были определены характерные линейные размеры отдельных зерен. Характерный линейный размер зерна определялся как среднее между его максимальным и минимальным линейным размерами. Распределение размеров зерен для совокупности обеих групп представлено на рисунке 13-б, значения полученных параметров распределения – в таблице 8 далее.



а)



б)

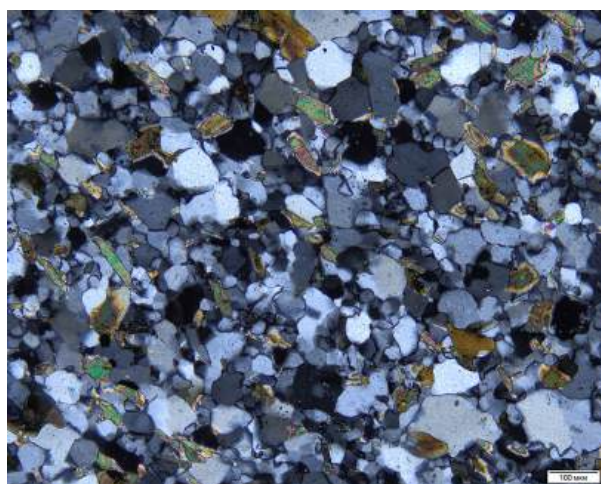
Рисунок 13 – Ручная оценка размеров зёрен по данным оптической микроскопии для образца ЛВ1356: микрофотография масштаба 200 мкм (а) и соответствующая ей распределение зёрен по размерам (б). Столбчатая диаграмма отображает измеренное распределение зерен по размерам с шагом 10 мкм, черная кривая соответствует логнормальной аппроксимации.

4.1.2. Метод пересечения опорных линий

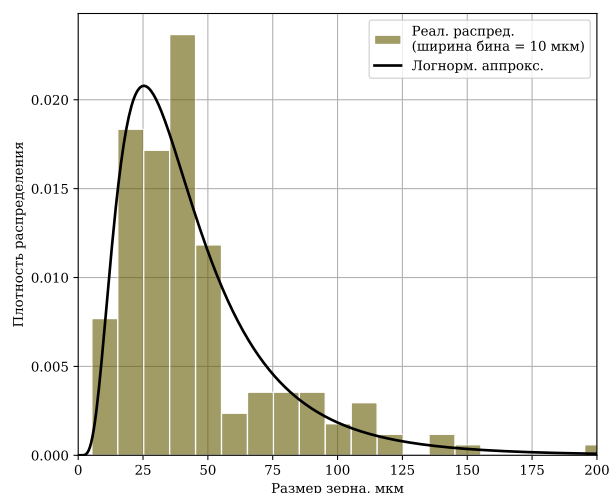
Метод пересечения опорных линий использует нанесение на изображение нескольких (чаще всего 5–7) параллельных линий на равном расстоянии друг от друга, после чего вручную были отмечены все пересечения линий с границами зёрен. Распределение полученных длин отрезков было пересчитано в распределение зёрен горной породы по линейным размерам.

Анализировались два изображения образца ЛВ1356 в различных масштабах съемки: размеры масштабной линейки 100 мкм (поле зрения размерами около 2×2.5 мм) и 200 мкм (поле зрения размерами около 1×1.25 мм). Микрофотографии шлифов и распределения размеров зёрен приведены на

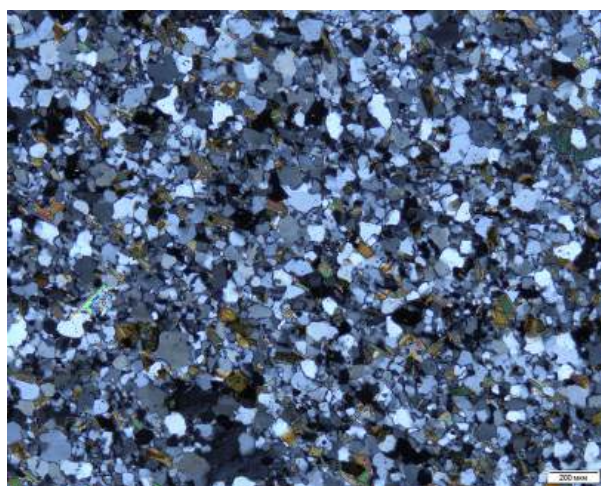
рисунке 14. Параметры распределений приведены в таблице 8 далее; значения получены для измеренного распределения зёрен и для его аппроксимации логнормальной функцией, традиционно используемой для этой цели [95]. Определялись параметры распределений: мода, среднее, медиана (т.е. 50% квантиль, $q_{50\%}$), 85%, 90% и 95% квантили ($q_{85\%}$, $q_{90\%}$, $q_{95\%}$ соответственно). Высшие (85% и более) квантили определялись только для логнормальной аппроксимации из-за малого количества зёрен большого размера.



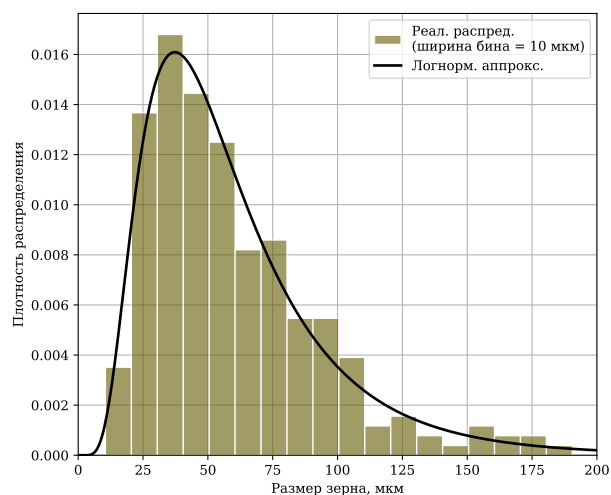
а)



б)



в)



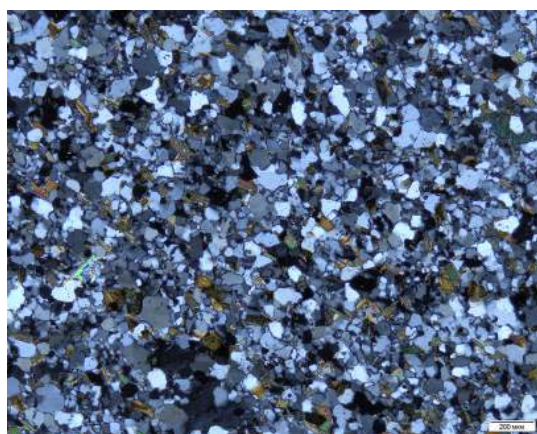
г)

Рисунок 14 – Оценка размеров зёрен методом пересечения опорных линий по данным оптической микроскопии для образца ЛВ1356: микрофотография масштаба 100 мкм (а) и соответствующее ей распределение зёрен по размерам (б); микрофотография масштаба 200 мкм (в) и соответствующее ей распределение зёрен по размерам (г). Обозначения на графиках такие же, как и на рисунке 13.

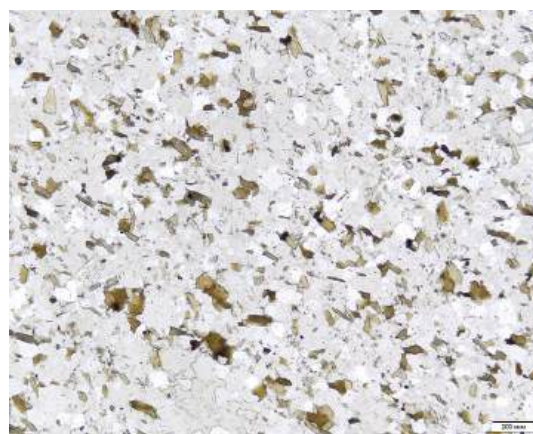
4.1.3. Квазипланиметрические методы

Метод случайного бросания точек с построением из них ориентированных опорных отрезков работает с изображениями как в поляризованном, так и в неполяризованном свете. Из двух наложенных друг на друга снимков была сформирована карта границ зерен (маска) – изображение, на котором все зерна окрашены одним цветом (черным), а границы между ними другим (белым). Исходные изображения и маска показаны на рисунке 15.

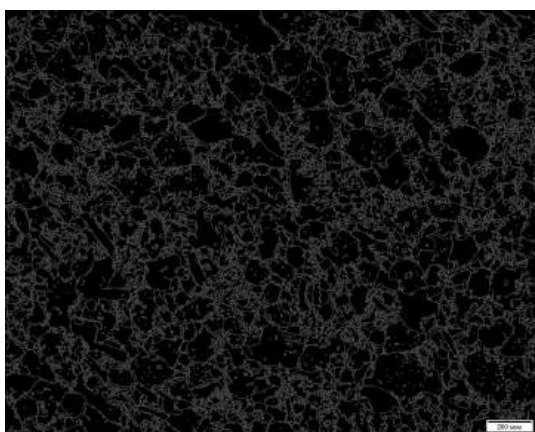
Такое изображение подходит для использования метода случайного бросания точек, подробно описанного в [164]. Суть метода заключается в оценке площади, ограниченной замкнутым контуром границы, по длине двух пар ортогональных отрезков, проведенных из случайно выбранной точки внутри контура до его границ. Так как, согласно стереографическим соотношениям, площадная доля области зерна статистически соотносится с объемной долей, то получаемый в данном методе размер зерна является объемно-взвешенный размером. Полученные значения параметров распределения представлены в таблице 8 далее.



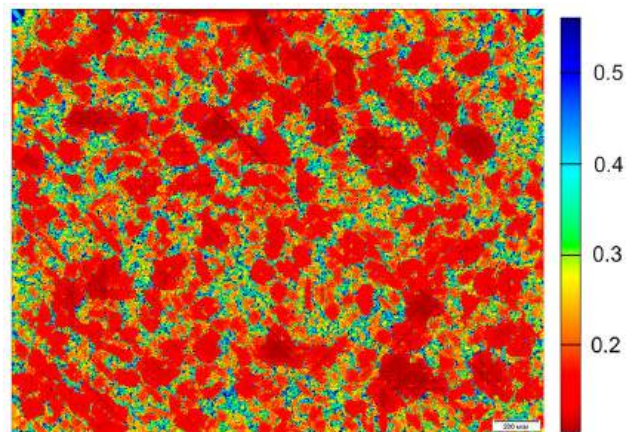
а)



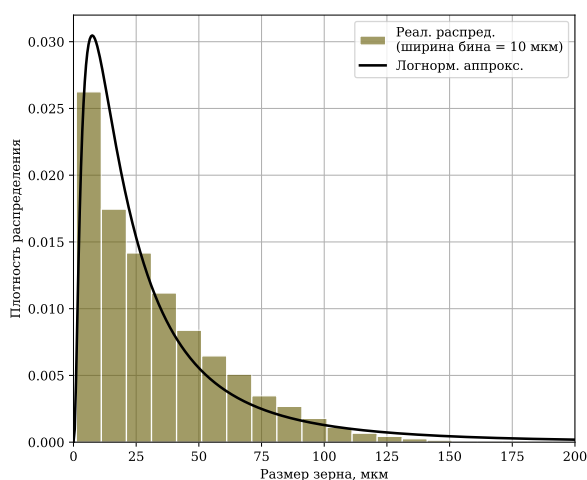
б)



в)



г)



д)

Рисунок 15 – Оценка размеров зёрен по данным оптической микроскопии для образца ЛВ1356 методом случайного бросания точек с построением из них ориентированных опорных отрезков: микрофотография масштаба 200 мкм в поляризованном свете (а) и неполяризованном (б) свете; (в) – фрагмент маски с выделенными границами; (г) – фрагмент результата работы алгоритма в виде цветовой карты объемно-взвешенного размера зерна по каждой точечной оценке; (д) – распределение зёрен по размерам. Фрагменты соответствуют левому верхнему углу исходного изображения. Обозначения на графиках такие же, как и на рисунке 13.

4.1.4. Сравнение методов

Таким образом, тремя различными методами анализа изображений для образца ЛВ1356 были получены распределения зерен минералов по размерам и оценены параметры этих распределений – таблица 8 [81].

Таблица 8. Параметры распределений зёрен по размерам для образца ЛВ1356, полученные разными методами.

Параметр, мкм Распределение	Мода	Среднее	Медиана ($q_{50\%}$)	$q_{85\%}$	$q_{90\%}$	$q_{95\%}$
Ручное измерение						
Масштаб изображения 200 мкм						
реальное	18.7	35.8	30.0	—	—	—
логнорм. аппрокс.*	21.3	35.9	30.19	56.8	66.6	78.5
Метод пересечения опорных линий						
Масштаб изображения 200 мкм						
реальное	23.6	60.18	52.5	—	—	—
логнорм. аппрокс.	37.5	60.4	51.4	92.22	105.09	127.9
Масштаб изображения 100 мкм						
реальное	23.7	45.3	36.9	—	—	—
логнорм. аппрокс.	27.5	45.5	37.4	76.6	92.16	110.7
Квазипланиметрический метод						
Масштаб изображения 200 мкм						
реальное	3.7	33.5	25.6	—	—	—
логнорм. аппрокс.	7.5	36.7	21.6	63.3	73.7	90.1

* «логнорм. аппрокс.» – аппроксимация данных логнормальным распределением.

Одним из наиболее важных параметров распределения зерен по размерам является средний размер зерна. Как было указано в 1.1.4, средний диаметр зерна $\langle D \rangle_{\text{Opt}}$ (в предположении о его форме, близкой к сферической) может быть найден по медиане распределения линейных размеров зерен, определенных по сечениям:

$$\langle D \rangle_{\text{Opt}} = 1.45 \cdot q_{50\%} \quad (31)$$

Метод прямого ручного измерения согласно таблице 8 дал значение медианного размера сечений зерна около 30 мкм, что по (31) соответствует среднему диаметру зерна горной породы $\langle D \rangle_{\text{Opt-man}} \approx 44$ мкм.

Метод пересечений опорных линий дал два значения медианного размера сечений зерна: около 52 мкм для изображения масштаба 200 мкм и около 37 мкм для изображения масштаба 100 мкм. Поскольку медиана чувствительна к полноте учета количества всех зерен, можно ожидать, что она точнее определяется для меньшего из двух рассмотренных масштабов (100 мкм). Тогда средний диаметр зерна горной породы, полученный данным методом, составляет $\langle D \rangle_{\text{Opt-linecut}} \approx 55$ мкм.

Из общих соображений следует, что распределение зёрен по размерам должны быть наиболее представительны вблизи моды как наиболее часто встречающегося значения. При наличии двух распределений, полученных по изображениям двух разных, но близких масштабов, если оба распределения представительны в области моды, то можно говорить о их согласованности, и наоборот. Для изображений шлифа ЛВ1356 масштаба 100 и 200 мкм моды реальных распределений очень близки друг другу и составляют около 23 мкм. Это позволяет предположить, что распределения согласованы друг с другом с области размеров зерен около 20-30 мкм. При этом распределение, полученное по изображению меньшего масштаба, позволяет учесть большее количество малых зёрен, вносящих основной вклад, а распределение, полученное по изображению большего масштаба, позволяет оценить частоту встречаемости больших зёрен.

Метод случайного бросания точек с построением из них ориентированных опорных отрезков дает оценку медианного размера сечений зерна около 25 мкм. Это дает средний размер зерна по (31) равный $\langle D \rangle_{\text{Opt-randpoint}} \approx 37.5$ мкм.

Сравнение трех оценок показывает, что наименьшее значение среднего диаметра зерна (37.5 мкм) дает метод бросания точек, наибольшее (55 мкм) – метод пересечения опорных линий, а метод ручного измерения дает значение почти посередине между ними (44 мкм). Относительно последнего значения разброс составляет 7-11 мкм или 15-25%. Проанализируем возможные причины разброса.

Оценка по ручному методу потребовала большого времени и отличалась высокой трудоемкостью, и потребовала привлечения специального программного обеспечения для анализа изображения, ввиду его большого размера. Ручной

метод использовал оценку размера сечения зерна как среднего арифметического между максимальным и минимальным характерными размерами сечения зерна. Предполагается, что сечения зерна имеет эллипсовидную форму, и тогда эти два размера соответствуют большой и малой осям эллипса. Определение этих характерных размеров производилось экспертом. Вероятно, при этом могла появляться небольшая систематическая ошибка, связанная с особенностями визуального восприятия человека. Количественно оценить величину ошибки в рамках данного исследования не представляется возможным. Но можно предположить, что, во-первых, для сечений зерен труднее оценить максимальный характерный размер, поскольку может быть несколько вариантов проведения отрезков длиной, близкой к максимальному характерному размеру. В идеале необходимо все такие отрезки провести и выбирать максимальный из них. Во-вторых, оценка минимального размера может быть занижена для сечений с вогнутым краем или с вогнутостью на границе, поскольку она меньше малой оси эллипса. Тогда можно ожидать занижения оценки размеров сечений зерен и, следовательно, среднего размера зерна.

Метод бросания точек чувствителен к качеству определения маски. Главным критерием при обработке исходных изображений для получения маски была сплошность границ между зернами. В этом случае приходится завышать контраст и возможно появление ложных малых зерен и незамкнутых границ, соответствующих контрастным оптическим дефектам (бликам, преломлениям, интерференционным полосам) на исходном изображении. Поэтому метод может давать повышенное количество зерен малых размеров, занижать результаты для моды и медианы распределения и, соответственно, занижать средний размер зерна.

Метод ручного измерения и метод бросания точек позволяют получить параметры каждого отдельного зерна, в то время метод пересечения линий не дает этого, а дает только распределение длин отрезков, эквивалентное распределению размеров зерен. В некотором смысле метод пересечения опорных линий производит усреднение. За счет измерения вдоль одной опорной линии можно ожидать учета вклада в распределения каждого размера пропорционально этому самому размеру (чем больше зерно, тем большую долю опорной линии

оно занимает). За счет использования нескольких опорных линий можно ожидать усреднения нескольких распределений по каждой из опорных линий и представительной оценки в области размеров зерен, сопоставимых с расстоянием между линиями. С этой точки зрения, метод пересечения опорных линий даёт наиболее представительную оценку среднего размера зерна. Данный метод был использован для оценки распределения зерен по размерам для остальных образцов метапесчаников.

4.2. Верификация полученных оценок размеров зерен

Для образцов метапесчаников ЛВ1356 и ЛВ1312 проводилась оценка среднего и максимального размеров зерен методом широкополосной акустической спектроскопии с оптико-акустическим (лазерным) источником ультразвука [165], описанном в разделе 2.4. Частотные зависимости коэффициента затухания $\alpha(f)$ (2) и фазовой скорости $C(f)$ (3) продольных ультразвуковых волн частоты f были измерены в пяти произвольно выбранных участках на расстоянии двух-трех миллиметров друг от друга. Согласно модели рассеяния ультразвука в поликристаллических материалах, для случая, когда длина зондирующей ультразвуковой волны существенно больше среднего линейного размера зерен, характерно рэлеевское рассеяние с $\alpha(f) \sim f^4$. Для случая, когда длина зондирующей ультразвуковой волны сравнима со средним линейным размером зерен, характерно стохастическое рассеяние с $\alpha(f) \sim f^2$. В области рэлеевского рассеяния можно оценить максимальный $D_{\max}$, а в области стохастического – средний $\langle D \rangle_{\text{acoust}}$ размеры зерен:

$$D_{\max} \approx \frac{C(f_R)}{2\pi f_R} \quad (32.1)$$

$$\langle D \rangle_{\text{acoust}} \approx \frac{C(f_s)}{2\pi f_s} \quad (32.2)$$

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 .

Полученная указанным методом оценка характерных частот и размеров зерен представлена в таблице 9.

Результаты применения метода пересечения опорных линий (4.1.2) для анализа распределения размеров зерен в образцах ЛВ1312 и ЛВ1356 по оптическим микрофотографиям породы приведены в таблице 10 [130].

Поскольку основной вклад в распределение вносят мелкие зерна, предполагаем, что медиана точнее определяется для меньшего масштаба. Из данных, представленных в таблице 10, следует, что, согласно (31):

$$\langle D \rangle_{\text{opt-ЛВ1356}} \approx 55 \pm 13 \text{ мкм}$$

$$\langle D \rangle_{\text{opt-ЛВ1312}} \approx 81 \pm 17 \text{ мкм}$$

Эти значения очень близки к усредненным значениям, полученным по данным акустической спектроскопии (таблица 9) [81; 130]:

$$\langle D \rangle_{\text{ЛВ1356}} \approx 50 \pm 14 \text{ мкм}$$

$$\langle D \rangle_{\text{ЛВ1312}} \approx 83 \pm 21 \text{ мкм}$$

Таблица 9. Результаты широкополосной акустической спектроскопии образцов метапесчаников и характерные линейные размеры зерен, рассчитанные по модели рассеяния ультразвука в поликристаллических материалах.

№ образца	№ участка	f_R , МГц	$C(f_R)$, м/с	f_s , МГц	$C(f_s)$, м/с	$D_{\max}$, мкм	$\langle D \rangle$, мкм
ЛВ1312	1	4.7	5880	12.3	5890	200	80
	2	4.9	5900	11.8	5910	190	80
	3	4.0	5830	—	—	230	—
	4	3.7	5810	8.5	5820	250	110
	5	6.1	5970	14.8	5950	160	60
	среднее	4.68	5878	11.85	5892.5	206	82.5
ЛВ1356	1	5.7	5700	12.6	5700	160	70
	2	5.7	5750	23.4	5750	160	40
	3	5.1	5800	24.7	5790	180	40
	4	4.7	5760	20.3	5730	200	50
	5	5.2	5800	—	—	180	—
	среднее	5.28	5762	20.25	5742.5	176	50

Таблица 10. Параметры распределений зёрен по размерам для образцов метапесчаников, полученные по фотографиям с оптического микроскопа.

Параметр, мкм Распределение	Мода	Среднее	Медиана ($q_{50\%}$)	$q_{85\%}$	$q_{90\%}$	$q_{95\%}$
ЛВ1356, масштаб 200 мкм						
реальное	23.6	60.18	52.5	—	—	—
логнорм. аппрокс.*	37.5	60.4	51.4	92.22	105.09	127.9
ЛВ1356, масштаб 100 мкм						
реальное	23.7	45.3	36.9	—	—	—
логнорм. аппрокс.	27.5	45.5	37.4	76.6	92.16	110.7
ЛВ1312, масштаб 500 мкм						
реальное	116.7	128.01	111.4	—	—	—
логнорм. аппрокс.	77.5	128.9	109.3	194.4	225.9	278.7
ЛВ1312, масштаб 100 мкм						
реальное	17.16	81.04	54.12	—	—	—
логнорм. аппрокс.	27.5	80.5	57.01	133.8	181.6	197.9

* «логнорм. аппрокс.» – аппроксимация данных логнормальным распределением.

Что касается оценки максимального размера зерна, то это является более сложной задачей. Для представительного сравнения с результатами акустической спектроскопии необходим сопоставимый объем выборки. Непосредственным измерением это сделать невозможно, поэтому приходится использовать логнормальную аппроксимацию распределения зерен по размерам. Объем выборки при акустической спектроскопии может быть оценен как:

$$V_{as} = S_{lb} \cdot H = \pi r_{lb}^2 \cdot H \quad (33)$$

где S_{lb} и r_{lb} – площадь сечения и радиус опорного ультразвукового пучка, совпадающего с таковыми для лазерного пучка; H – толщина образца. С учетом разброса величин получаем $V_{as} \approx 125\text{--}330 \text{ мм}^3$

Согласно основным стереометрическим соотношениям [91], доли p

p_h , занимаемые некоторой фазой, равны между собой для оценок разной размерности. В частности, для линейных и объемных размеров:

$$p = \frac{L_{ph}}{L} = \frac{V_{ph}}{V} \quad (34)$$

где L_{ph} и V_{ph} – суммарная длина секущих и объем, приходящиеся на определенную фазу (например, на все зерна одного размера); L и V – полная длина секущих и полный объем выборки. Объем всех зерен одного размера как объем фазы может быть определен как $V_{ph} = n_{ph} \cdot V_{one_grain}$, где n_{ph} – количество зерен данного размера в выборке; V_{one_grain} – объем одного зерна. Запишем (33) для зерен диаметром D как искомой фазы:

$$p_D = \frac{L_D}{L} = \frac{V_D}{V} = \frac{n_D \cdot V_{one_grain}}{V_{as}} = \frac{n_D \cdot (\pi D^3/6)}{V_{as}} \quad (35)$$

Доля p_D зерен диаметром D известна из логнормальной аппроксимации распределения зерен по размерам; объем одного зерна получаем из его аппроксимации сферой диаметром D ; количество зерен данного размера принимаем $n_D \approx 1-3$ с учетом того, что при прозвучивании зерна могут располагаться друг за другом и взаимно маскироваться и что соотношение диаметра пучка и длины образца составляет 3–6. Нормируем p_D на D^3 :

$$g(D) = \frac{p_D}{D^3} = \frac{n_D \cdot \pi}{6V_{as}} \quad (36)$$

Подставляя конкретные значения величин с учетом разбросов, получаем, что для объема, наблюдаемого при акустической спектроскопии, функция $g(D)$ должна иметь значение в диапазоне 0.013–0.1. Графики функции $g(D)$ для образцов ЛВ1356 и ЛВ1312 показаны на рисунке 16; там же выделен искомый диапазон значений функции $g(D)$. Можно определить разброс максимальных размеров зерна по данным оптической микроскопии как $D_{max_opt-ЛВ1356} \approx 150-215$ мкм и $D_{max_opt-ЛВ1312} \approx 200-305$ мкм. Эти диапазоны перекрываются с диапазонами максимальных размеров зерен, полученных по данным акустической спектроскопии $D_{max_ЛВ1356} \approx 160-200$ мкм и $D_{max_ЛВ1312} \approx 160-250$ мкм.

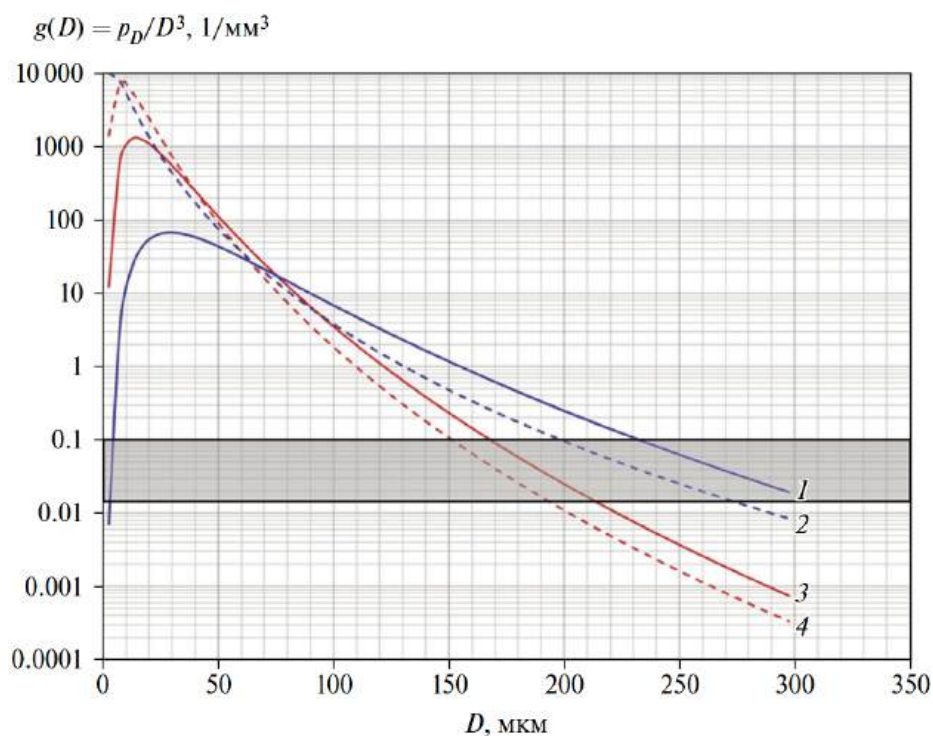


Рисунок 16 – Графики функции $g(D)$, полученные для логнормальных аппроксимаций распределений зерен по размерам по микрофотографиям образцов ЛВ1312 в масштабе 500 мкм (1) и 100 мкм (2), ЛВ1356 в масштабе 200 мкм (3) и 100 мкм (4). Серым прямоугольником выделен искомый диапазон значений $g(D)$, соответствующий объему выборки, охваченной акустической спектроскопией.

Краткое содержание главы 4

В главе описаны методы оценки распределения зерен горных пород по размерам, проведено их сравнение и дано обоснование выбора метода пересечения опорных линий в качестве основного при анализе оптических микроструктурных снимков образцов метапесчаников. Описаны используемые процедуры предобработки изображений и оценки статистических параметров распределения зерен. Приведено сравнение результатов примененных методов с результатами широкополосной акустической спектроскопии (независимый контрольный метод), подкрепленное анализом снимков с электронного микроскопа. С учетом того, что методы пересечения опорных линий и акустической спектроскопии дали наиболее близкие оценки среднего размера зерна для рассмотренных образцов и что метод пересечения опорных линий можно частично автоматизировать, он был адаптирован для оценки

размеров зерен метапесчаников; разработано необходимое программное обеспечение. Для всего исследуемого набора образцов метапесчаников были получены распределения зерен по размерам, получены оценки параметров распределений. Таким образом, данные по микроструктуре метапесчаников, полученные по оптическим микрофотографиям шлифов, легли в основу **второго защищаемого положения**, а их верификация с помощью данных независимого метода широкополосной акустической спектроскопии и данных электронной микроскопии обосновывает достоверность полученных результатов.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Активность акустической эмиссии и наклон графика повторяемости (b-value)

5.1.1. Граниты и базальты

Образцы гранитов и базальтов показали разный характер активности ТАЭ. Было выделено четыре типа активности: слабая (меньше 0.1 имп./с), средняя (от 0.1 до 2 имп./с), сильная (от 2 до 10 имп./с), критическая (разрушившиеся образцы). Систематизация экспериментов по нагреву приведена в таблице 11.

Таблица 11. Систематизация образцов по типу активности.

Активность АЭ, имп./с \ Тип породы	Гранит	Базальт
Слабая (менее 0.1)	PHAN0548-4	LAT0209-4-30
Средняя (от 0.1 до 2)	155-1-30 (№1а) 117-1-30	КНА0314-3 PHAN0487-1
Сильная (от 2 до 10)	167-7-30 (№7) 156-12Г	LAT0411
Критическая (разрушившиеся образцы)	393-1-3С	391-big

Для разрушившихся образцов число зарегистрированных событий может быть меньше числа реально произошедших событий. Это связано с ухудшением контакта волновода с образцом из-за проседания образца в момент разрушения и уменьшением «наблюдаемого» объема образца после разрушения. Кроме того, процесс разрушения может вызывать образование большого числа трещин, способных развиваться за короткий промежуток времени (стягивание к макротрещине, см. п. 5.4). Это приводит к появлению плотного потока акустических импульсов, который используемая аппаратура может не успевать регистрировать. В связи с этим разрушившиеся образцы были выделены в отдельный тип.

Для каждого из экспериментов был оценен параметр b-value на всем этапе нагрева и в динамике тремя разными методами: линейная регрессия и метод

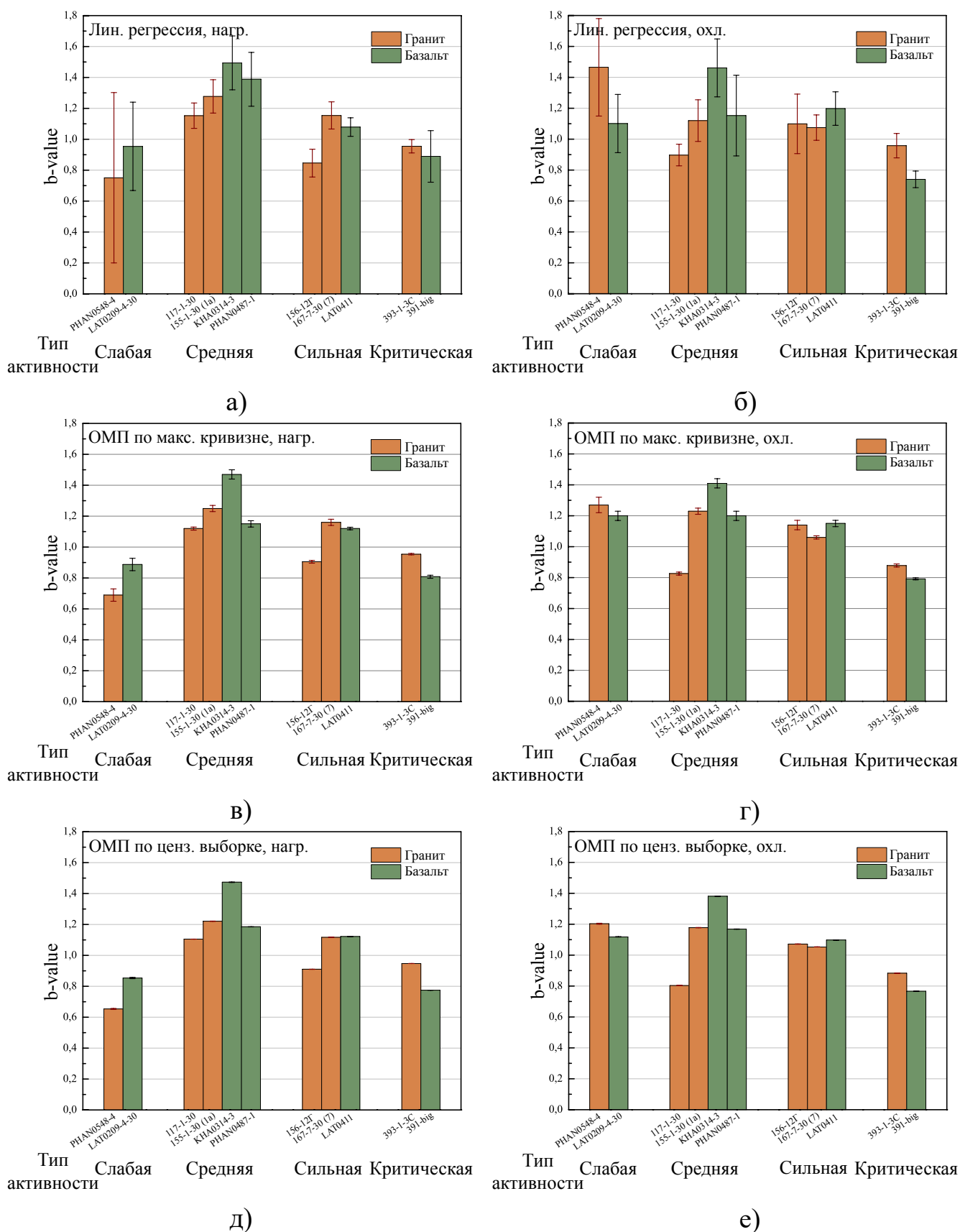


Рисунок 17 – Гистограммы среднего за этапы нагрева (а, в, д) и охлаждения (б, г, е) наклона графика повторяемости (b-value), рассчитанного методом линейной регрессии (а, б), методом максимального правдоподобия по максимальной кривизне (в, г) и по цензурированной выборке (д, е), для всех экспериментов с группировкой по типам активности.

максимального правдоподобия с оценкой представительной магнитуды по максимальной кривизне и по цензурированной выборке. Динамика параметров активности ТАЭ и b -value для одного из образцов гранитов представлена на рисунке 18. В динамике параметров явных закономерностей обнаружено не было.

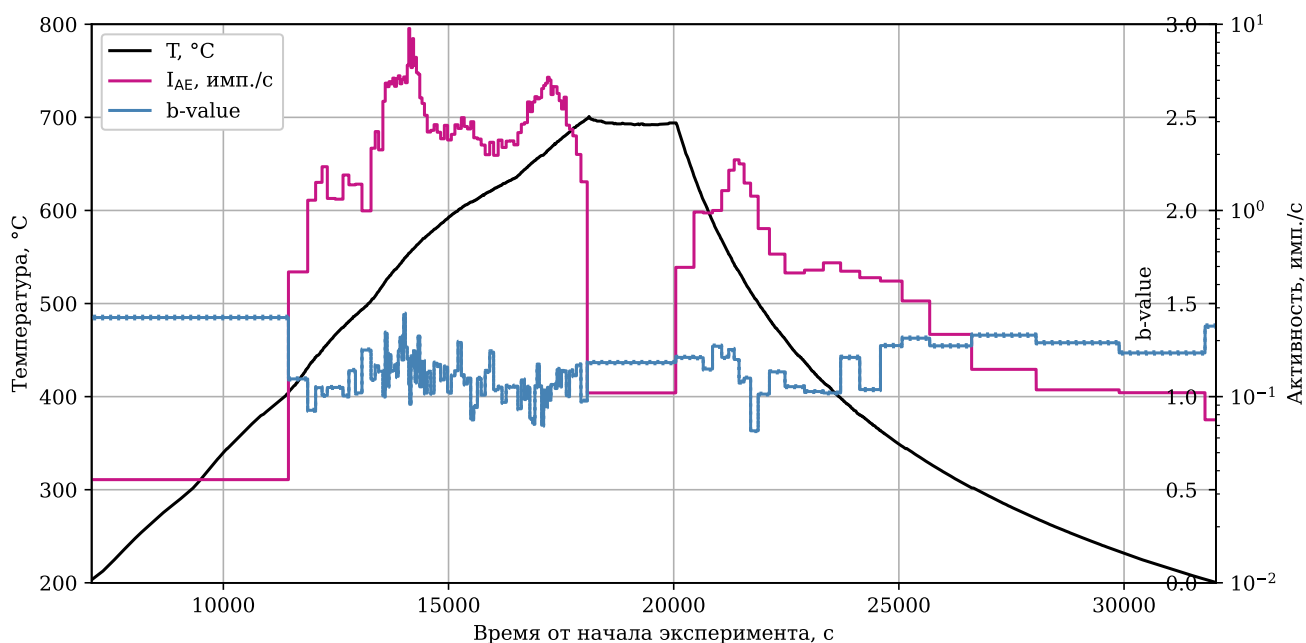


Рисунок 18 – Динамика изменения параметров активности ТАЭ и b -value (ОМП по цензурированной выборке) для образца базальта LAT0411 на этапах нагрева и охлаждения.

На рисунке 17 представлены гистограммы средних за этап значений b -value для обоих типов пород в зависимости от типа активности. На графиках для этапа нагрева с расчетом b -value всеми тремя методами (а, в, д) заметна тенденция – уменьшение b -value с изменением типа активности в последовательности средняя–сильная–критическая [140]. Для этапа охлаждения такая тенденция выражена слабее, во всяком случае, для гранитов. 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.

5.1.2. Метапесчаники

Были рассмотрены статистические параметры ТАЭ – активность и b-value – для образцов метапесчаников. Временная зависимость величин для одного из экспериментов приведена на рисунке 19.

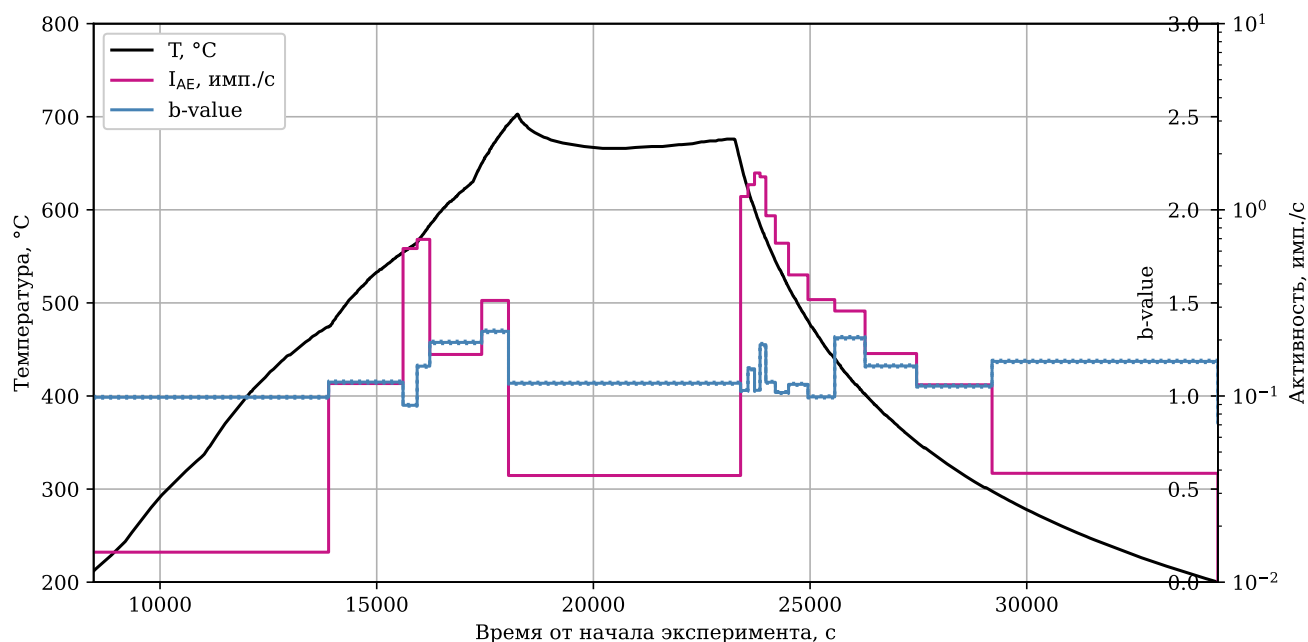
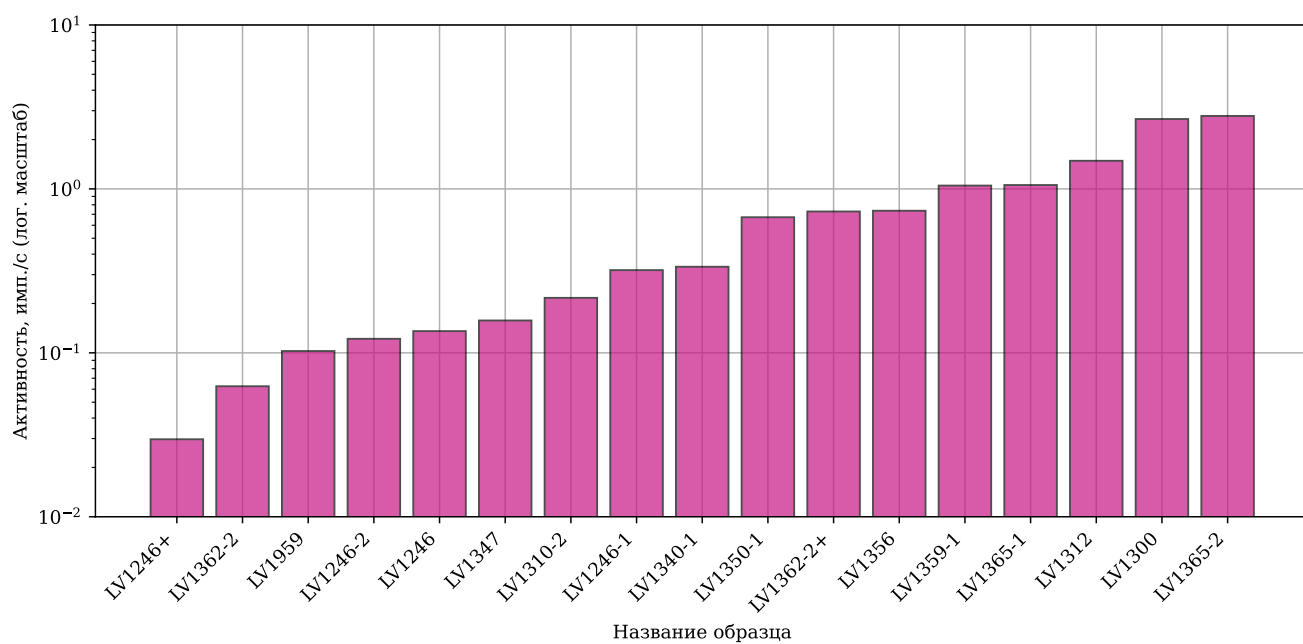
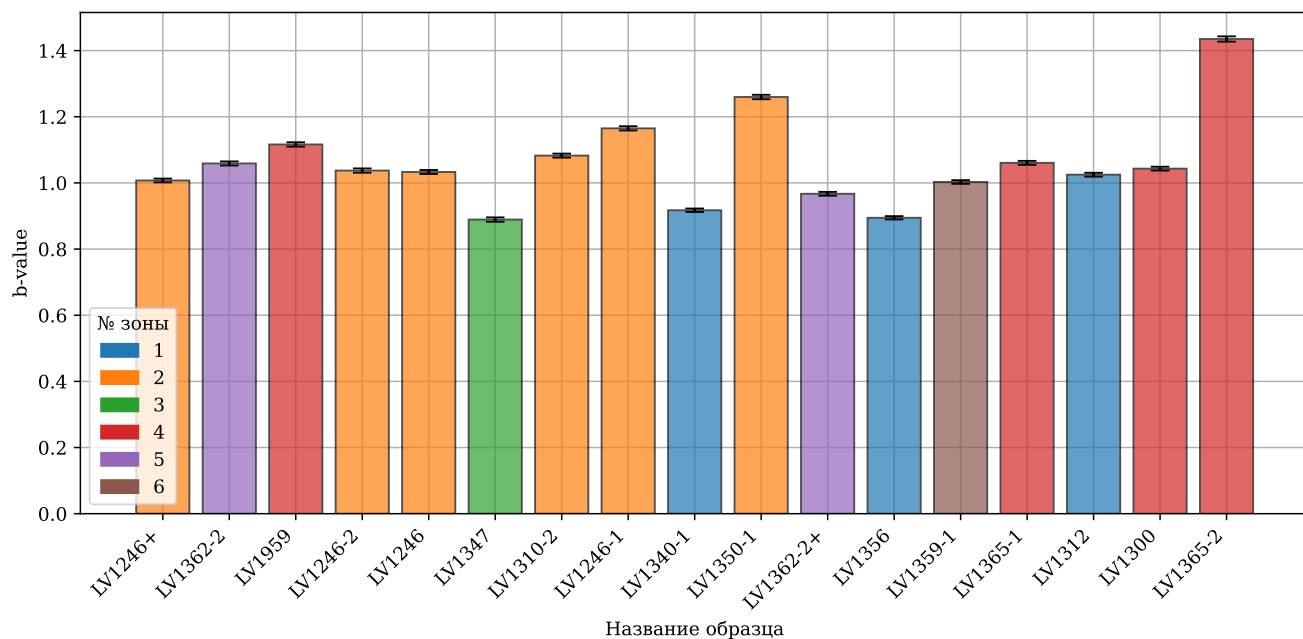


Рисунок 19 – Динамика изменения параметров активности ТАЭ и b-value (ОМП по цензурированной выборке) для образца метапесчаника ЛВ1246-1 на этапах нагрева и охлаждения.

Рассчитанные за периоды нагрева и охлаждения параметры b-value для каждого из образцов были упорядочены по величине средней за этап активности. Полученный результат для этапа нагрева приведен на рисунке 20. Для метапесчаников не наблюдается явного тренда, выявленного для гранитов и базальтов – уменьшения среднего b-value с ростом средней активности. В целом заметна некоторая корреляция, что подробнее показано в разделе 5.2. Для отдельных зон отбора, таких как 1 или 4, замечен слабый тренд на увеличение b-value с ростом активности. Для зоны 2 он выражен сильнее.



а)



б)

Рисунок 20 – Гистограммы средней активности (а) и среднего за этапы нагрева b-value (б) для образцов метапесчаника, упорядоченные по возрастанию средней активности.

Также были рассчитаны средние за этапы эксперимента и за весь эксперимент значения AF и RA . Дополнительно рассчитывался параметр расстояния от точки среднего значения параметров до прямой $AF = RA$, в

совокупности характеризующий оба параметра:

$$D = \frac{\langle RA \rangle - \langle AF \rangle}{\sqrt{2}} \quad (37)$$

Пример распределения значений $AF-RA$ для одного из экспериментов приведен на рисунке 21.

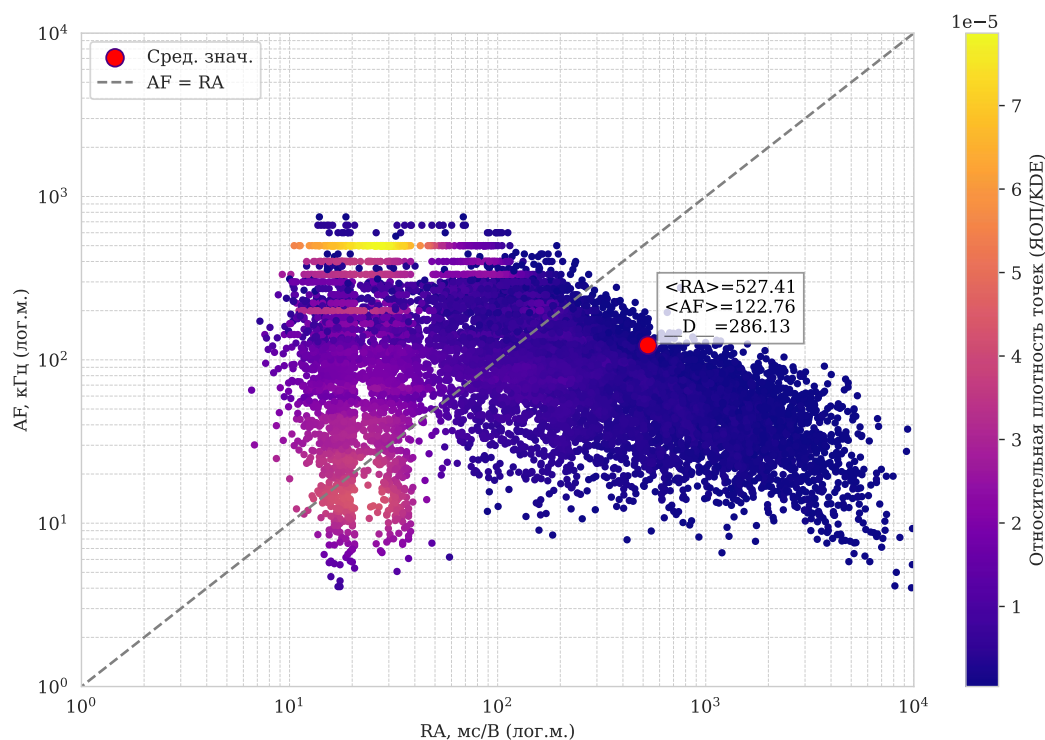


Рисунок 21 – Диаграмма значений $AF-RA$ для образца ЛВ1362-2+ в двойном логарифмическом масштабе. Красной точкой отмечено положение средних значений AF и RA , D – расстояние от красной точки до прямой $AF-RA$. Визуализация распределения выполнена с использованием ядерной оценки плотности (ЯОП). Ширина сглаживания определена по правилу Скотта как функция числа точек, размерности пространства (равна числу параметров) и дисперсий параметров AF и RA . В результате, для каждой точки построено двумерное гауссово ядро с одинаковыми для всех точек ширинами сглаживания: 6.85 кГц по оси AF и 54.77 мс/В по оси RA .

Для всех образцов средние значения AF и RA лежат в области правее линии $AF = RA$, что может указывать на преобладание трещин сдвигового типа.

5.1.3. Искусственные образцы

Для гипсовых образцов с примесью песка различных фракций в целом наблюдалось меньше событий за эксперимент по сравнению с образцами горных пород. Все образцы показали схожую временную динамику b -value и активности: слабая вариация параметров на этапе нагрева, спад активности во время выдерживания постоянной температуры в высшей точке нагрева, резкое возрастание активности и усиление вариаций b -value на этапе охлаждения. Как и для образцов горных пород, в динамике статистических параметров для модельных образцов закономерностей не выявлено. Динамика параметров активности и b -value для одного из экспериментов в гипсовыми образцами показана на рисунке 22.

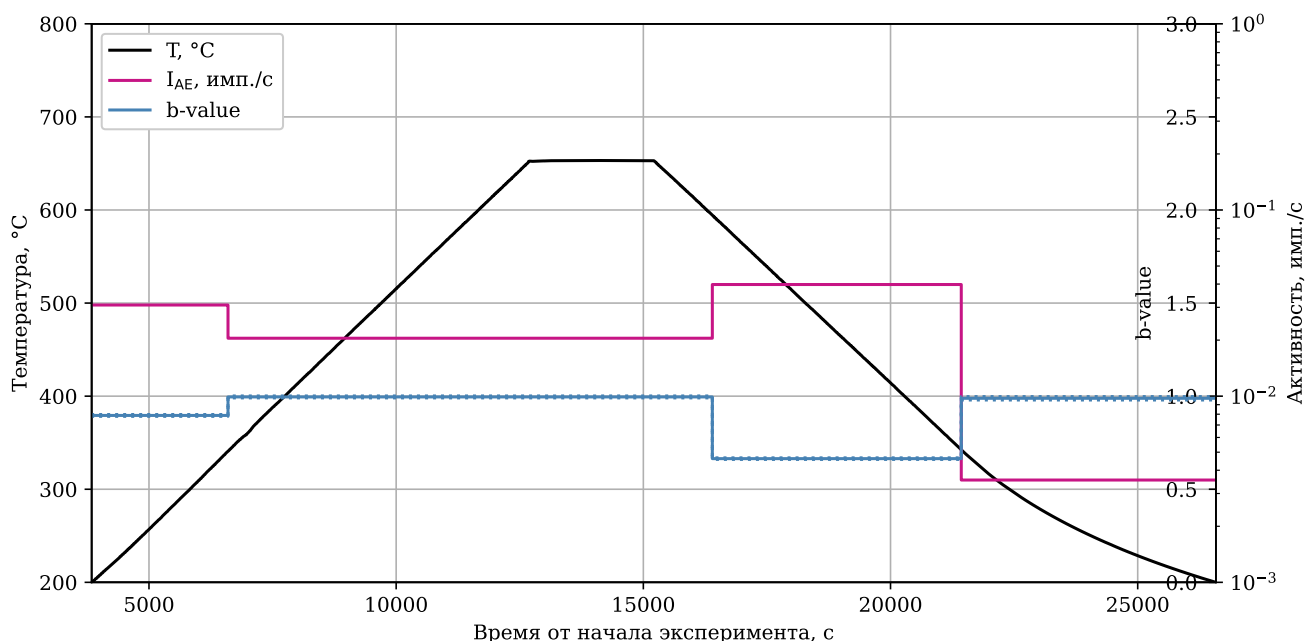


Рисунок 22 – Динамика изменения параметров активности ТАЭ и b -value (ОМП по цензурированной выборке) для гипсового образца без примеси (GS0430C0-1) на этапах нагрева и охлаждения (I цикл нагрева).

5.2. Сопоставление параметров акустической эмиссии и микроструктуры

Среди параметров, рассчитанных для метапесчаников, для сопоставления выбраны следующие: номер зоны отбора образца, параметр D , характеризующий средние значения AF и RA , средняя величина b -value на

этапе нагрева, средняя активность ТАЭ на этапе нагрева, средний размер зерна, оцененный через медиану измеренного распределения по формуле 31. Для оценки размера зерна методом пересечения опорных линий были использованы микрофотографии масштабом 200 мкм. Корреляционная матрица параметров для каждой пары величин, приведена на рисунке 23. Для ее расчета был использован коэффициент Пирсона в предположении о возможной взаимной зависимости величин, близкой к линейной.

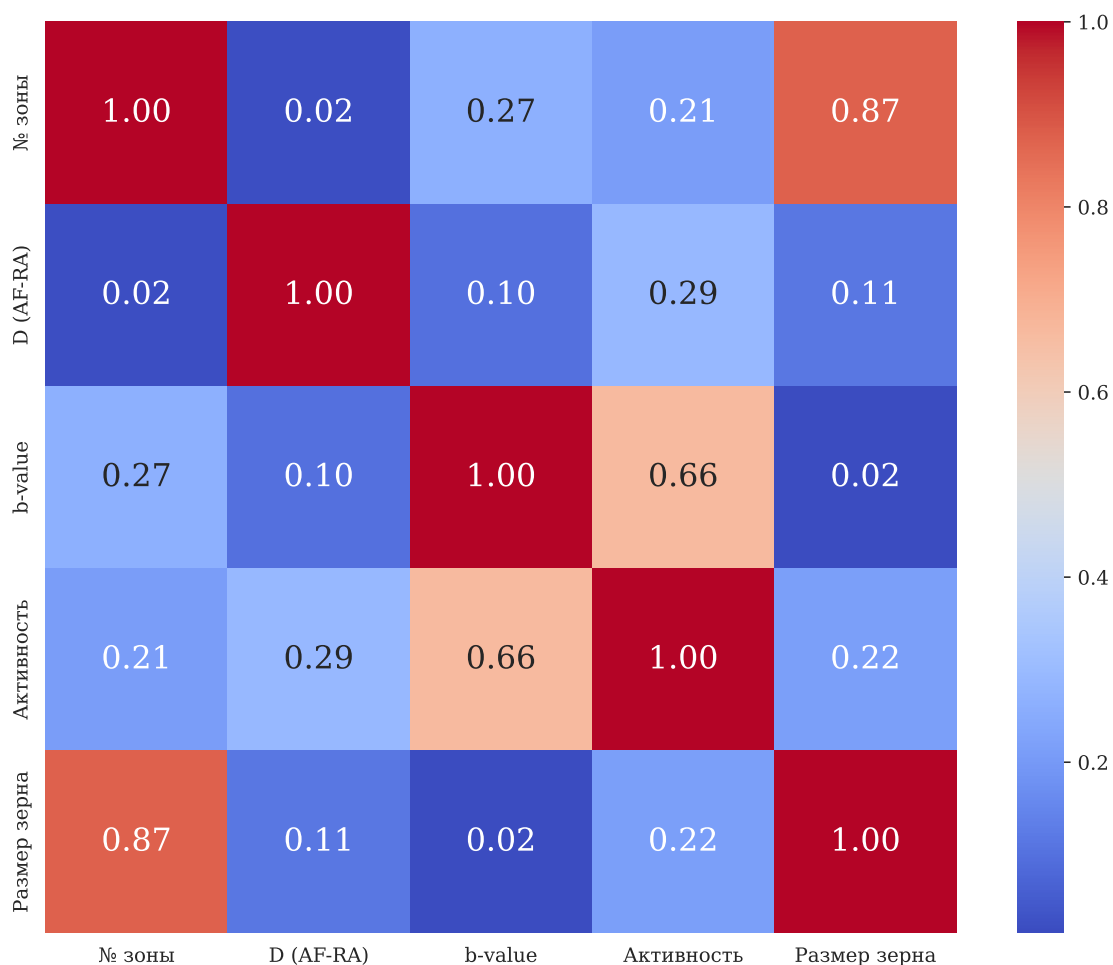


Рисунок 23 – Корреляционная матрица параметров, рассчитанных для образцов метапесчаников.

Корреляционная матрица позволяет заключить, что в целом параметры слабо зависят друг от друга. Тем не менее, для параметров b-value и активности 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 24. На графике 24-а отмечены значения размера зерна в образце, оцененные по доступной микрофотографии. Несмотря

на то, что для некоторых образцов разброс оценок довольно велик, наблюдаемая зависимость остается ярко выраженной.

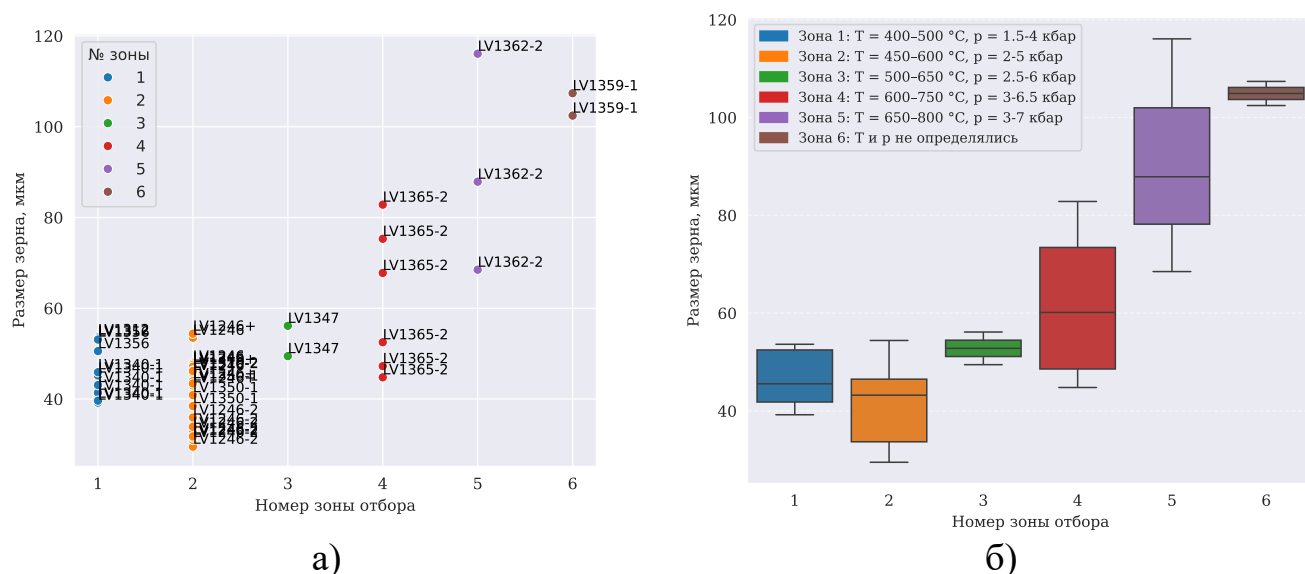


Рисунок 24 – Зависимость размера зерна от зоны отбора для каждой микрофотографии масштаба 200 мкм образцов метапесчаников: а) – отдельные значения, б) – диаграммы размаха.

Анализ корреляции между зонами глубинности метаморфизма и параметрами ТАЭ показывает довольно слабую корреляцию или её отсутствие: $r = 0.27$ для b-value, $r = 0.21$ для активности ТАЭ и $r = 0.02$ для параметра D . Аналогично анализ взаимосвязи между размерами зерен и параметрами ТАЭ показал отсутствие корреляции или слабую корреляцию: $r = 0.02$ для b-value, $r = 0.22$ для активности ТАЭ и $r = 0.11$ для параметра D .

Для экспериментов с искусственными образцами наблюдается корреляция между размером частиц фракций песка и b-value для обоих циклов нагрева (рисунок 25). С ростом размера частиц b-value уменьшается. Активность при этом не показывает значимой корреляции с размером частиц примеси.

Для первого цикла общий тренд сохраняется для фракций 0–3, для самой крупной фракции 4 наблюдается небольшое увеличение b-value. Диапазоны распределения зерен во фракциях (рисунок 4) перекрываются, что может объяснять схожие значения b-value для соседних фракций. Для второго цикла нагрева величина b-value для фракций 0 (гипс без примесей) и 4 может показывать нерепрезентативные значения ввиду малого числа событий по сравнению с

другими экспериментами. При этом для фракций 1–3 тренд сохраняется.

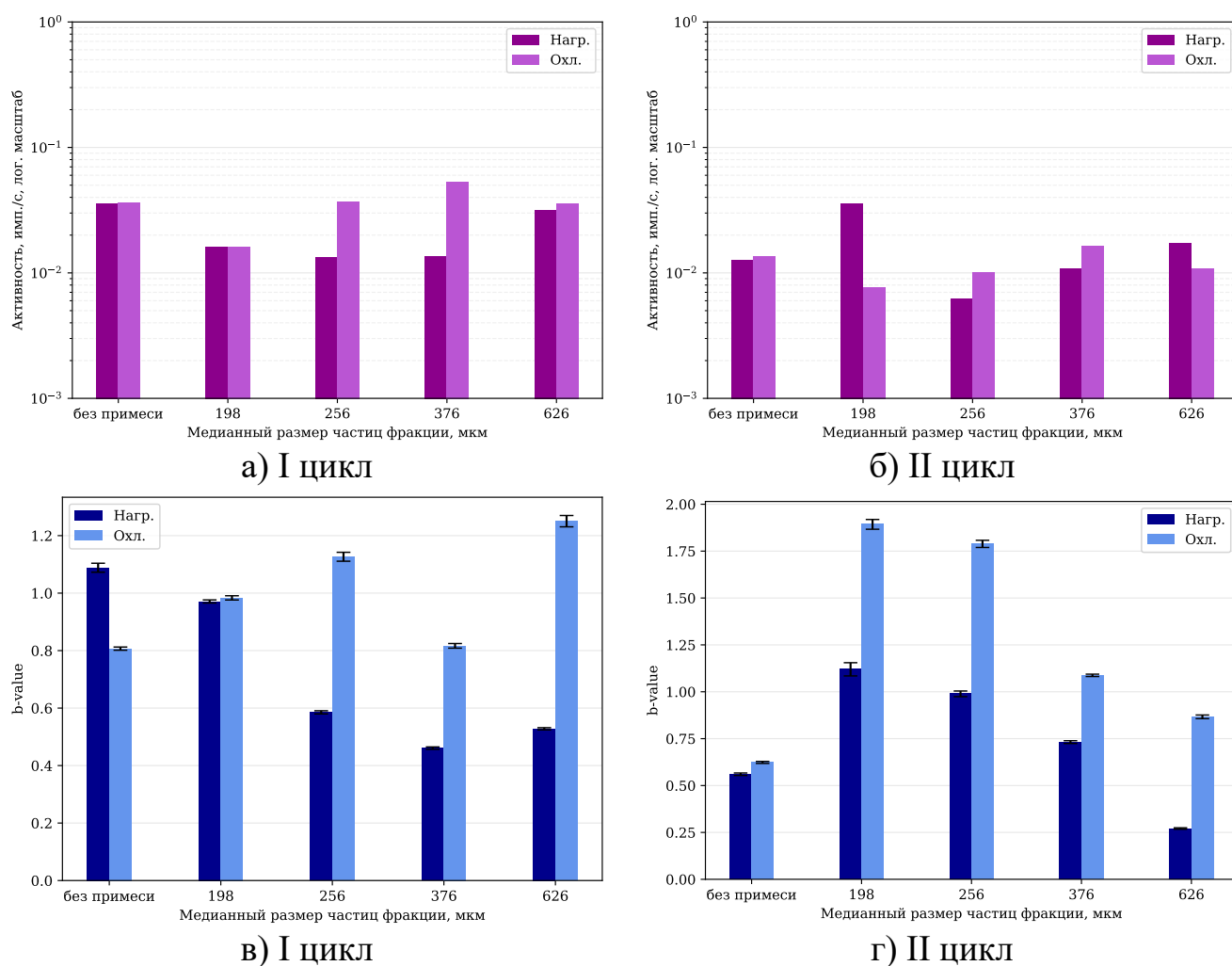
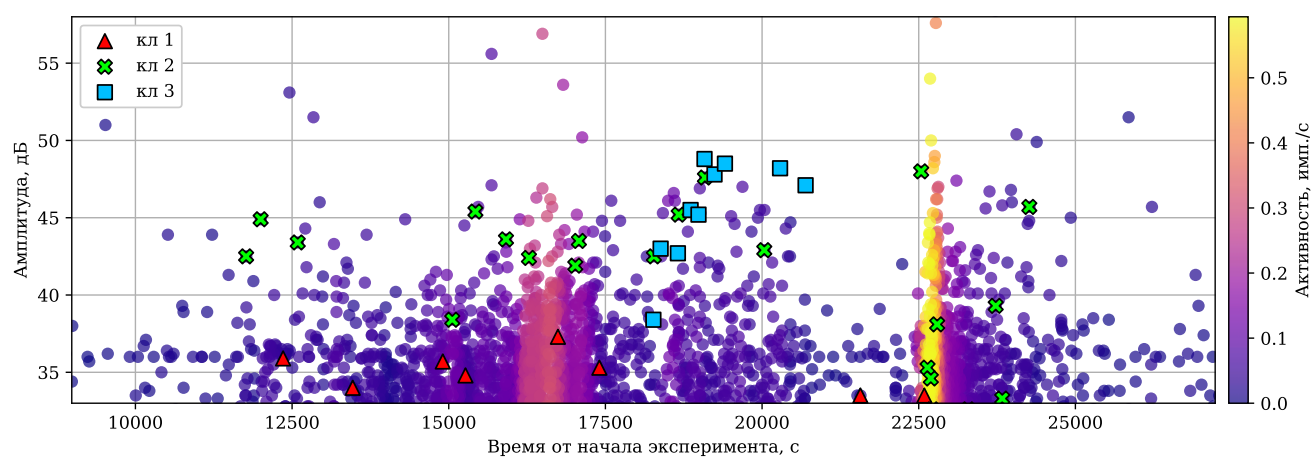


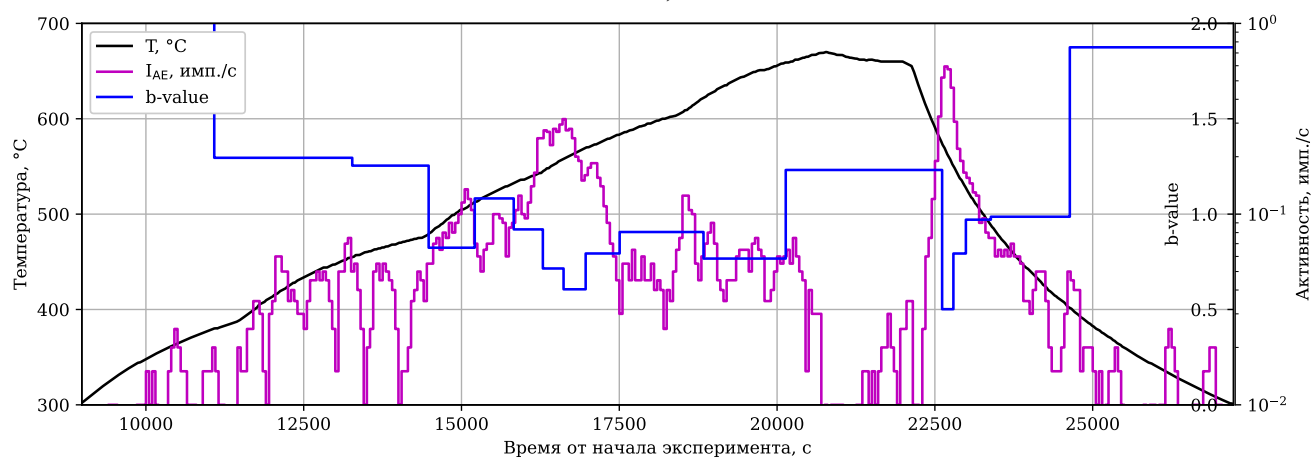
Рисунок 25 – Зависимость средних значений b-value и активности на этапах нагрева и охлаждения от медианного размера частиц фракции песка для гипсовых образцов: а), в) – I цикл нагрева, б), г) – II цикл нагрева.

5.3. Группирование импульсов акустической эмиссии

В данном разделе приведены основные показатели моделей, описанных в методологии. В задачах классификации и поиска аномалий/выбросов использовались предварительно размеченные данные, в которых каждому импульсу ТАЭ присвоено значение класса, определенного по кластеризации волновых форм. При решении задачи кластеризации по параметрами импульсов сделана попытка различить события ТАЭ без привлечения предварительной разметки по классам. На рисунке 26 показано амплитудно-временное распределение импульсов из исходных кластеров в эксперименте.



а)



б)

Рисунок 26 – Временные зависимости для образца песчаника, предварительно подвергнутого механическому нагружению: а) – амплитуда импульсов и активность ТАЭ (показана цветом). Импульсы кластеров отмечены маркерами; б) – температура, активность ТАЭ и b-value.

5.3.1. Задача классификации

Результаты тестирования моделей приведены в таблице 12. Вклады признаков и матрицы несоответствий для каждой из моделей приведены в Приложении на рисунке 30.

Таблица 12. Результаты тестирования моделей в задаче классификации.

Random Forest				
Класс	Precision	Recall	F1-score	кол-во объектов
0	0.99	0.99	0.99	706
1	0	0	0	2
2	0.22	0.27	0.25	7
3	0.40	0.50	0.44	4
XGBoost				
Класс	Precision	Recall	F1-score	кол-во объектов
0	0.99	0.99	0.99	706
1	0	0	0	2
2	0.25	0.29	0.27	7
3	0.43	0.75	0.55	4
CatBoost				
Класс	Precision	Recall	F1-score	кол-во объектов
0	0.99	0.96	0.97	706
1	0	0	0	2
2	0.20	0.57	0.30	7
3	0.20	0.50	0.29	4

Для модели **Random forest** основным параметром являлась максимальная глубина дерева. Однако при любой глубине класс 3 выделялся в целом лучше: 2 из 4 импульсов для максимальной глубины больше 5, в то время как класс 1 не был выделен при любой конфигурации, а оценки для класса 2 оказывались неустойчивыми. Параметры модели были подобраны с помощью Optuna на кросс-валидации с числом подвыборок 5 и оценкой метрики Recall.

Модель **XGBoost** лучше всего определяла класс 3 из трех целевых классов при любой конфигурации параметров. Параметры модели определены с помощью Optuna на кросс-валидации с числом фолдов 30 и оценкой метрики Recall.

Модель **CatBoost** существенным образом не отличается от предыдущих,

однако лучше всего распознает класс 2. Параметры модели подбирались с помощью Optuna с оценкой метрики Recall для валидационной выборки (20% от обучающей выборки) вместо кросс-валидации для экономии времени на обучение.

Для модели **AdaBoost** при минимальной глубине деревьев, равной 1, только из третьего исходного кластера была распознана хотя бы половина импульсов (при 5000 деревьев в составе ансамбля). С увеличением глубины дерева третий кластер раньше всех распознавался полностью, затем распознавался первый кластер, и последним распознавался второй кластер (при глубине дерева 8-11) [110].

5.3.2. Задача поиска аномалий

При поиске аномалий в данных, к которым могут принадлежать события, отличающиеся по значениям параметров от общей совокупности импульсов ТАЗ, модель машинного обучения **Isolation Forest** использовалась в двух вариантах: с делением выборки на обучающую/тестовую и без разделения. В первом случае были рассмотрены признаки, коэффициент корреляции которых с другими признаками меньше 0.9. Из датасета были удалены признаки A_{adc} , A_{uv} , E_{yJ} , E_{MARSE} (см. таблицу 14 в Приложении). На основе обучающей выборки с помощью Optuna были подобраны оптимальные параметры модели на основании метрики F1-score, так как при выделении аномалий существенным является выделение импульсов, не относящихся к классам 1-3. Иными словами, модель может выделить вместе с импульсами целевых классов 1-3 большое число фоновых импульсов. Для параметра *contamination*, отвечающего за долю аномалий в данных, было получено значение 0.1884. Результаты тестирования модели выражались в количестве импульсов классов, распознанных как аномальные. Процент выделения класса 0 в качестве аномалии можно считать погрешностью работы алгоритма. Визуализация выделенных аномалий приведена в Приложении на рисунке 31. Алгоритм старается выбрать значения, находящиеся на границе облака точек по некоторым признакам, в то время как изначальная классификация проводилась с учетом волновых форм и

может быть не отражена в признаковом пространстве, полученном для анализа.

Во втором случае модель Isolation forest применялась ко всему датасету. Были рассмотрены случаи, когда из датасета были удалены скоррелированные признаки, и когда использовался датасет целиком. Так как метод слабо чувствителен к корреляции признаков друг с другом, различия оказались незначительными. В таблице 13 приводятся данные для полного датасета. Приведены результаты работы Isolation forest с параметром *contamination* = 18%. В то время как для классов 1 и 2 алгоритм справляется слабо, класс 3 выделяется практически целиком.

Таблица 13. Результаты применения моделей для решения задачи поиска аномалий с долей выбросов 18%.

Isolation Forest			
Класс	Выделено импульсов	Всего импульсов	Отн. число аномалий
0	350	2015	17%
1	0	7	0%
2	11	21	52%
3	9	10	90%
One class SVM			
Класс	Выделено импульсов	Всего импульсов	Отн. число аномалий
0	357	2015	18%
1	0	7	0%
2	7	21	33%
3	5	10	50%
Local Outlier Factor (LOF)			
Класс	Выделено импульсов	Всего импульсов	Отн. число аномалий
0	362	2015	18%
1	3	7	43%
2	4	21	19%
3	1	10	10%

Аналогично Isolation forest была применена модель **One class SVM**. Для сравнения работы разных методов выявления аномалий, был установлен одинаковый параметр доли выбросов (18%). Результаты приведены в таблице 13. Алгоритм хуже распознает 3 класс, хотя этот класс все равно выделяется лучше остальных.

В отличие от двух предыдущих методов, **Local Outlier Factor (LOF)** обращает большее внимание на первый класс. Однако его общие результаты сравнительно хуже, чем у SVM и Isolation forest. Результаты работы модели LOF также приведены в таблице 13.

5.3.3. Задача кластеризации

К аномалиям, выделенным с помощью модели Isolation forest, показавшей лучший результат среди испробованных методов, были применены стандартные методы кластеризации – **K-means** и **DBSCAN**. Так как классы 1–3 были представлены малым числом импульсов, проводилось разбиение аномалий на два класса – фон и «полезный» сигнал, в который, как предполагалось, могут попасть импульсы классов 1–3. Визуализация разбиения классов в пространстве признаков, редуцированном к двумерному представлению с помощью метода главных компонент (PCA [163]), приведена в Приложении на рисунке 32. К сожалению, в выделенный минорный кластер не попали импульсы из классов 1–3. Все 5 выделенных импульсов принадлежат фоновому классу 0.

5.4. Выводы и обсуждение

5.4.1. Параметры ТАЭ

Для образцов гранитов и базальтов с разной активностью ТАЭ (за исключением случая слабой активности) на этапе нагрева чётко прослеживается тенденция – чем больше средняя за нагрев активность АЭ для образца, тем меньше b-value. Сопоставление диаграмм b-value, оцененного различными методами, для этапа охлаждения, в целом, не позволяет выявить подобной зависимости уменьшения b-value с ростом активности, во всяком случае, для образцов гранитов, что говорит против погрешности методики. Для образцов со слабой активностью общее число зарегистрированных импульсов крайне мало. Статистика по таким образцам оказывается нерепрезентативной, поэтому полученные для них оценки b-value не учитывались при анализе. Таким образом, на этапе нагрева с ростом активности уменьшается разница в количестве между

низкоамплитудными и высокоамплитудными событиями. В соответствии со сценарием развития разрушения в породе (на основе модели ЛНТ) величина b -value должна уменьшаться с ростом активности, что подтверждается в экспериментах с гранитами и базальтами.

По величине b -value незаметно разницы по породам – гранитам и базальтам. Разные породы с одинаковым типом активности имеют примерно одинаковые значения b -value в среднем за этап нагрева/охлаждения.

Для образцов метапесчаников и модельных образцов не наблюдается зависимости между параметрами активности ТАЭ и b -value, подобной выявленной в экспериментах с гранитами и базальтами. В целом корреляция между величинами выражена слабо. У образцов метапесчаников внутри отдельных зон отбора может наблюдаться увеличение b -value с ростом активности.

Параметры волновых форм импульсов AF и RA показывают слабую корреляцию с активностью ТАЭ и b -value. Для всех образцов средние значения AF и RA принадлежат области правее прямой $AF = RA$, что соответствует зоне преобладания трещин сдвига. Тем не менее, эти значения довольно близки к прямой $AF = RA$, что не позволяет однозначно утверждать о преобладании одного типа трещин над другим. Это характерно как для величин AF и RA , рассчитанных на отдельных этапах нагрева/охлаждения, так и для всего эксперимента.

Модель ЛНТ и накопление интегральной разрушенности

Уменьшение b -value с ростом активности на этапе нагрева для образцов гранитов и базальтов можно интерпретировать с позиции концепции слияния и роста трещин, известной как модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [166; 167]. В основе этой модели лежат явления взаимодействия полей напряжений трещин и локализации процесса трещинообразования, которые не зависят существенным образом от масштаба рассматриваемой области. Образование макротрещины в рамках модели ЛНТ протекает в несколько последовательных этапов. Сначала происходит накопление

микротрещин в некотором объеме до достижения критической концентрации, после чего начинается их слияние и образование пространственных сгущений трещин – кластеров. При этом развитие трещин, находящихся в плоскости трещины большего размера, ускоряется, что приводит к слиянию трещин, а развитие прочих (неблагоприятно расположенных) трещин замедляется. Последний этап характеризуется стягиванием процессов трещинообразования к поверхности будущей макротрещины (макроразрыва).

Модель ЛНТ была разработана прежде всего для механического одноосного нагружения. В отличие от него, при термическом воздействии в образце горной породы не возникает глобального поля напряжений с одним преобладающим компонентом тензора напряжений, так как отсутствуют приложенные внешние силы. Возникающие термомеханические напряжения связаны с расширением и уменьшением объема как отдельных зерен, так и образца в целом. Для нескольких произвольно взятых трещин, находящихся в одной плоскости близко друг другу, поля напряжений могут отличаться. По этой причине в случае термического воздействия на образец нет выделенной плоскости, к которой могли бы стягиваться трещины с последующим образованием магистрального разрыва.

С другой стороны, в масштабах зерен и групп (кластеров) зерен возможно наличие несимметричных зерен (например, эллипсовидной формы) и преобладающей ориентации границ зерен. Согласно общим представлениям о развитии термомеханического разрушения [6; 10], микротрещины образуются вдоль границ зерен (межзерновые трещины) и внутри зерен (внутризерновые трещины). В такой ситуации возможно наличие преобладающего направления для развития микротрещин. Кроме того, в масштабах зерен и кластеров зерен может возникнуть ситуация, когда при некотором распределении зерен поле напряжений будет условно однородным с преобладающим компонентом тензора напряжений. В таких случаях может быть применима модель ЛНТ.

Количество событий АЭ определяется числом трещин, развивающихся в образце. В проведенных экспериментах использовались образцы пород одинакового размера, поэтому в образцах, показавших большую активность АЭ, концентрация трещин выше и, следовательно, выше вероятность их слияния и

образования более крупных трещин. Для крупных трещин, число которых за весь эксперимент порядка единиц и десятков, более вероятен дефицит, т.к. некоторые из этих трещин могли не реализоваться (в процессе развития термомеханических напряжений не был преодолен порог активации трещины) и не сгенерировать импульс акустической эмиссии. Поэтому для образцов с малой активностью АЭ может наблюдаться дефицит высокоамплитудных событий АЭ, что приводит к большему b-value («заваливание» графика повторяемости в области больших амплитуд) по сравнению с образцами с большой активностью АЭ.

Согласно основным представлениям теории разрушения, для разрушения характерна фрактальность структуры, т.е. самоподобие иерархии образующихся трещин [168; 169]. Фрактальность обнаруживается как для микротрещин в масштабах зерен, так и для сейсмогенных разрывов. В то же время фрактальность структуры не является статической картиной распределения трещин, а наблюдается во временной динамике. При термическом воздействии с ростом температуры растут термомеханические напряжения и начинают развиваться все более крупные трещины с большим порогом активации. Т.е. сначала образуются трещины малого, а затем – все большего размеров, и количество высокоамплитудных событий АЭ растет. При использовании модели ЛНТ для случая термического разрушения в определенный момент образование новых трещин малого размера будет затруднено, т.к. все большая часть из них реализуется на ранних этапах разрушения. Если в образце есть преимущественное направление развития трещин (обусловленное структурой породы – формой, ориентацией зерен и т.п.), то ситуация усугубится, т.к. развитие неблагоприятно расположенных трещин малого размера будет подавлено сильнее, чем в случае породы с однородной структурой. Таким образом, из соображений фрактальности структуры развивающегося разрушения и из применения модели ЛНТ следует, что чем сильнее развивается разрушение (и больше активность АЭ), тем больше дефицит низкоамплитудных событий АЭ и меньше b-value, что соответствует наблюдаемой тенденции для гранитов и базальтов.

В отличие от образцов гранитов и базальтов, среди образцов метапесчаников не было тех, что разрушились в результате эксперимента (т.е. таких, что показали критическую активность). Наблюдаемое увеличение порового

пространства (см. таблицу 2) связано преимущественно с активизацией множества мелких микротрещин, распределённых по всему объёму образца и слабо взаимодействующих для слияния в более крупные трещины. Таким образом, рост активности, вызываемый накоплением микротрещиноватости при отсутствии слияния трещин, приводит к увеличению числа мелкоамплитудных событий, имеющему следствием увеличение b -value. Иными словами, если накопление трещиноватости не приводит к лавинообразному слиянию трещин, растёт количество слабо зависимых мелкоамплитудных событий, что приводит к одновременному изменению активности и b -value. Для отдельного образца эти изменения будут происходить относительно тех групп образцов, в которых микроструктурные условия развития разрушения схожи, и в результате нагрева развилось большее или меньшее число трещин. Так как образцы из одинаковых зон отбора характеризовались близкими параметрами распределений зерен по размерам, можно полагать, что разрушение в них могло развиваться в схожих микроструктурных условиях. Это означает, что в том случае, если в образцах из одной зоны отбора развивалось большое количество независимых мелких трещин, для этой зоны отбора может наблюдаться увеличение b -value с ростом активности ТАЭ. Подобный сценарий, как предполагается, реализовался для второй зоны отбора метапесчаников, из которой было достаточно много образцов для представительной статистики. Схожие величины b -value для образцов гранитов и базальтов с одинаковым типом активности ТАЭ также укладываются в данную интерпретацию.

Образцы из гипса с примесью песка различных фракций также не показали зависимости между активностью ТАЭ и b -value. Подобно метапесчаникам, образцы не разрушились в результате эксперимента. Тем не менее, искусственные образцы изначально получились довольно хрупкими, что, в частности, не позволило провести их прозвучивание методом широкополосной ультразвуковой спектроскопии (образцы сильно пылят, впитывают влагу и легко скалываются). По этой причине трудно оценить степень их разрушенности после нагрева. Все образцы дали примерно одинаковое количество событий в экспериментах, кроме второго цикла нагрева гипса без примеси (фракция 0) и гипса с самым крупным песком (фракция 4), а наблюдаемые значения активности ТАЭ и b -value носят индивидуальный характер для образцов.

5.4.2. Параметры ТАЭ и микроструктура

Для образцов метапесчаника получены слабые корреляции между номером зоны и *b-value*, между номером зоны и активностью ТАЭ, между средним размером зерна и активностью ТАЭ (рисунок 23). Корреляция между средним размером зерна и *b-value* практически полностью отсутствует. Это согласуется с представлениями о том, что при термическом воздействии во всем объеме образца происходит появление и подрастание мелких трещин без образования выделенного направления разрушения. Статистика микротрещин, их размеров и величины подрастания в таком сценарии не зависит от размера зерна. Рост этих трещин определяется только уровнем термомеханических напряжений. Размер зерна может приводить к тому, что наблюдается больше или меньше эпизодов подрастания межзерновых трещин, что определяет большую или меньшую активность.

Наблюдается рост среднего размера зерен метапесчаников с увеличением номера зоны отбора, характеризующего *p-T* условия формирования породы. Это можно объяснить тем, что при метаморфизме с ростом температуры и давления растет вероятность частичного расплавления минералов с возможным участием флюидов. После этого при уменьшении давления и температуры происходит перекристаллизация. Чем больше объем, затронутый частичным плавлением, тем больше размер новых сформированных зерен.

Результаты экспериментов с образцами модельных горных пород показали зависимость *b-value* от медианного размера примешанного песка. Данное отличие от метапесчаников может быть связано с тем, что в искусственных образцах одиночные песчинки кварца «взвешены» в гипсовом цементе. Развитие трещин около таких песчинок, вероятно, зависит от размеров самих частиц. Из-за этого для образцов с частицами большего размера развиваются более крупные дефекты, что приводит к появлению более высокоамплитудных событий и уменьшению *b-value*. В метапесчаниках каждый кристалл соприкасается с другими, из-за чего межзерновые трещины развиваются по-другому.

5.4.3. Кластеризация импульсов ТАЭ

Суммарно, анализ полученных результатов позволяет предположить, что импульсы из третьего исходного кластера 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). Импульсы из третьего кластера не наблюдаются на этапе охлаждения, что говорит об отсутствии условий роста для трещины.

Импульсы из первого и второго кластера наблюдаются на всем протяжении нагрева с началом общей активизации ТАЭ, а также, в значительно меньшем количестве, на этапе охлаждения. Это, а также небольшая амплитуда импульсов первого кластера и плохая группируемость импульсов второго кластера, вызывает сомнения в их источнике в виде термически активированных трещин. С другой стороны, отсутствие кластеризации по волновым формам для ненагруженного песчаника позволяет предположить, что условия излучения источников-трещин для первого и второго кластера могут быть существенно хуже, чем для третьего – например, источник находится на дальнем от датчика конце образца и энергия импульса сильнее поглощается, или направленность излучения источника менее удачная.

В то же время 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.

Основные итоги главы 5

Далее перечислены краткие итоги этой главы:

- Все исследованные образцы не показали заметных закономерностей в динамике активности термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) и наклона графика повторяемости (b-value) за этапы нагрева и охлаждения.

- Для экспериментов с образцами гранитов и базальтов было выделено четыре типа активности ТАЭ: слабая (менее 0.1 имп./с), средняя (0.1-2 имп./с), сильная (более 2 имп./с) и критическая (образец разрушился). Образцы со слабой активностью исключены из рассмотрения из-за малой представительности данных.
- Совместный анализ средней за нагрев активности ТАЭ и b-value для гранитов и базальтов показал, что наблюдается тенденция уменьшения b-value с ростом активности в соответствии с ее типом. Тенденция определяется для b-value, рассчитанного тремя различными методами: методом линейной регрессии, методом максимального правдоподобия (ММП) с оценкой представительной амплитуды импульса ТАЭ по максимальной кривизне и ММП для цензурированной выборки. При этом ММП для цензурированной выборки дает наименьшую погрешность оценки b-value и был использован для расчета b-value для других образцов.
- Для объяснения выявленной взаимосвязи между активностью ТАЭ и b-value для гранитов и базальтов предложена интерпретация в рамках модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ).
- Средние за этап нагрева значения b-value и активности ТАЭ для всех образцов метапесчаников не показывают зависимости от типа активности. Для некоторых образцов, взятых из одной зоны отбора и характеризующихся схожими p-T условиями метаморфизма, возможна тенденция увеличения b-value с ростом активности (наиболее явно выражено для зоны 2).
- Для искусственных образцов не наблюдается зависимости между средней активностью ТАЭ и средним b-value на этапах нагрева и охлаждения.
- Отсутствие зависимости между b-value и активностью для метапесчаников и модельной породы может свидетельствовать о диффузном характере разрушения, при котором развитие трещиноватости протекает во всем объеме без существенного слияния микротрещин и локализации процессов разрушения.
- Средние значения параметров волновых форм импульсов AF и RA

указывают на то, что при термическом воздействии трещины сдвига и растяжения образуются примерно в равном количестве с возможным небольшим преобладанием сдвиговых трещин.

Описанные результаты совместного анализа активности ТАЭ и b-value для всех исследованных образцов позволили обосновать **первое защищаемое положение**.

- Анализ взаимной корреляции совокупности параметров, рассчитанных для образцов метапесчаников, дает следующие результаты: наблюдается сильная корреляция между средним размером зерна и зоной отбора образца (коэффициент корреляции 0.87), средняя корреляция активности ТАЭ и b-value за счет корреляции внутри зон отбора (коэффициент корреляции 0.66), слабая корреляция активности и b-value с зоной отбора (коэффициенты корреляции 0.21 и 0.27 соответственно). Корреляция b-value со средним размером зерна отсутствует (коэффициент корреляции 0.02). Также отсутствует корреляция параметра D (расстояние от средних значений AF и RA до прямой $AF = RA$) с зоной отбора и размером зерна (коэффициенты корреляции 0.02 и 0.11 соответственно).
- Для образцов модельной породы наблюдается уменьшение b-value с увеличением медианного размера частиц песка. Отличие от результатов для образцов метапесчаников может быть обусловлено отсутствием метаморфизма для искусственных образцов, ответственного за перекристаллизацию зерен с формированием характерной структуры горной породы.

Результаты совместного анализа параметров ТАЭ и микроструктуры позволили обосновать **второе защищаемое положение**.

- Для предварительно нагруженного образца песчаника удастся выделить три кластера импульсов ТАЭ, которые обладают схожими волновыми формами (внутри каждого кластера) и каждый из которых может относиться к определенной трещине, развивающейся в образце в процессе термического воздействия.

- Тестирование представительности выделенных кластеров в пространстве параметров, проведенное в рамках задач классификации и выделения их как аномалий, позволяет оценить достоверность выделенных кластеров. Алгоритмы случайного леса и экстремального градиентного бустинга, адаптивного бустинга, изолирующего леса и одноклассовый метод опорных векторов лучше всего выделяют (классифицируют как отдельный класс) третий кластер. Модель категориального бустинга обращает большее внимание на второй кластер, а модель локального уровня выброса – на первый кластер. Таким образом, третий кластер оказывается наиболее достоверным, первый и второй менее достоверными.
- Для других ненагружавшихся образцов подобные кластеры не были обнаружены, что вероятнее всего свидетельствует о преобладании распределенного трещинообразования в случае термического воздействия.

Результаты анализа группируемости импульсов ТАЭ позволили обосновать **третье защищаемое положение.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторное моделирование процессов термически стимулированного разрушения горных пород является важным направлением исследования процессов, сопровождающих, в частности, вулканические и глубокофокусные землетрясения. В данной работе исследовалось развитие термически стимулированного разрушения при нагреве образцов различных горных пород на основе регистрации термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ). Образцы нагревались в специально разработанной установке до температур 650-700°C со скоростью около 2-3°C/мин. Также для образцов метапесчаников и искусственных образцов была исследована микроструктура и ее связь с параметрами ТАЭ.

В соответствии с методикой обработки данных экспериментов была рассчитана активность ТАЭ и получены оценки наклона графика повторяемости (b-value) как для целых этапов нагрева и охлаждения образца, так и во временной динамике в непересекающихся окнах в 200 событий. Величина b-value оценивалась тремя разными методами. Сравнение временной и температурной динамики b-value и активности АЭ показало, что различия между породами и образцами незначительны для выявления характерных особенностей.

Для интегральных показателей образцов пород гранитов и базальтов обнаруживается тенденция – значения b-value на всем этапе нагрева меньше для образцов, показавших большую активность ТАЭ. Этот результат согласуется с моделью лавинно-неустойчивого трещинообразования, адаптированной по отношению к экспериментам по термостимулированному разрушению горных пород в масштабах зерен и кластеров зерен. Значения b-value для прочих образцов (метапесчаников и образцов модельных горных пород), в целом, не показывают зависимости от типа активности. Для образцов метапесчаников, отобранных внутри одних и тех же зон отбора и характеризующихся схожими микроструктурными особенностями, может наблюдаться увеличение b-value с ростом активности, что может быть связано с интегральными накоплением микротрещиноватости без перехода к лавинно-неустойчивому типу разрушения.

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**:

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.

Средний размер зерна образцов метапесчаников показывает явную зависимость от зоны отбора образцов (коэффициент корреляции 0.87). С увеличением температуры и давления метаморфизма увеличивается средний размер зерен (кристаллов) породы, что может быть обусловлено увеличением области, затронутой их частичным плавлением и перекристаллизацией в ходе метаморфизма. Выявленная положительная корреляция между параметрами ТАЭ (b-value, активность, параметр D, связанный со средней частотой и скоростью нарастания сигнала) и размером зерна оказывается слабой или отсутствующей (коэффициенты корреляции 0.02, 0.22 и 0.11 соответственно). Это может быть обусловлено фрактальным характером развития разрушения, не зависящим от размера разрушаемой области, определяемой размерами зерен.

Для гипсовых образцов с примесью кварцевого песка обнаружено уменьшение b-value с ростом медианного размера зерна. Данная зависимость может быть связана с особым характером развития трещин в искусственных образцах, в которых отдельные частицы песка представляют собой вкрапления в гипсовой матрице. В отличие от зерен в горных породах, эти зерна могут даже не соприкасаться друг с другом. Такая конфигурация может обуславливать зависимость развивающихся трещин от размера вкраплений: чем больше размер зерна, тем более крупные трещины могут развиваться вблизи него.

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 (микросталлов) и в целом микроструктуры метапесчаников, которую необходимо учитывать наряду со средним размером зерна – характеристикой размера отдельных частиц микроструктуры. Этот результат подтверждает **второе защищаемое положение**:

2. Для метапесчаников, претерпевших метаморфические преобразования при различных p - T 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.

Анализ кластеризуемости событий по параметрам волновых форм импульсов ТАЭ для экспериментов по термическому воздействию показывает, что импульсы ТАЭ относятся преимущественно к разным независимым источникам. Методами машинного обучения удастся уверенно выявить и валидировать небольшие кластеры событий ТАЭ для исследованного образца, подвергнувшегося механическому воздействию с образованием крупных трещин. Для всех остальных образцов, которые не подвергались механическому воздействию, подобных кластеров выявлено не было, что свидетельствует о развитии разрушения при термическом воздействии во всем объеме образцов без формирования преимущественных зон локализации деформации. При наличии дефекта следует ожидать появления событий ТАЭ, приуроченных, как предполагается, к зоне крупной трещины и, как следствие, концентрации разрушения вблизи нее. Такой результат подтверждает представление о том, что в случае термостимулированного разрушения при отсутствии крупных трещин источники импульсов ТАЭ распределены во всем объеме разрушаемой области горной породы, что подтверждает **третье защищаемое положение**:

3. При отсутствии крупных дефектов в образце горной породы основной вклад

в термически стимулированную акустическую эмиссию вносят распределенные источники.

Основная проблема при анализе данных экспериментов по термически стимулированному разрушению горных пород заключается в том, что событий мало и одни и те же породы могут давать различную статистику. Дальнейшие исследования в данной области должны сопровождаться накоплением акустико-эмиссионных данных по различным породам и развитием методик, как для оценки статистических параметров, так и для получения информации о микроструктуре образцов. Для изучения возможных зависимостей между разнородными данными необходимо применять современные методы анализа, включая методы машинного обучения и нейронные сети.

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. *Nasseri M.H.B., Mohanty B., Young R.P.* Fracture Toughness Measurements and Acoustic Emission Activity in Brittle Rocks // *Rock Damage and Fluid Transport, Part I* / ed. by G. Dresen, A. Zang, O. Stephansson. — Basel : Birkhäuser Basel, 2006. — P. 917–945. — DOI: 10.1007/3-7643-7712-7_2.
5. *Nasseri M.H.B., Mohanty B.* Fracture toughness anisotropy in granitic rocks // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. — 2008. — Vol. 45, no. 2. — P. 167–193. — DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.04.005.
6. *Nasseri M.H.B., Schubnel A., Benson P.M., Young R.P.* Common Evolution of Mechanical and Transport Properties in Thermally Cracked Westerly Granite at Elevated Hydrostatic Pressure // *Pure and Applied Geophysics*. — 2009. — No. 166. — P. 927–948. — DOI: 10.1007/s00024-009-0485-2.
7. *Шкуратник В.Л., Кучурин С.В., Винников В.А.* Закономерности акустической эмиссии и термоэмиссионного эффекта памяти в образцах угля при различных режимах термического воздействия // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2007. — № 4. — С. 61—70.

8. *Винников В.А., Шкуратник В.Л.* Моделирование влияния помеховых факторов на термоэмиссионный эффект памяти в горных породах // ГИАБ. — 2009. — № 2. — С. 5—11.
9. *Шкуратник В.Л., Николенко П.В.* Об использовании эффекта Кайзера в эпоксидной смоле с кварцевым наполнителем для оценки напряжений в массиве горных пород // ГИАБ. — 2012. — № 1. — С. 97—104.
10. *Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Вознесенский А.С., Винников В.А.* Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. — М. : Горная книга, 2015. — 241 с.
11. *Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С.* Качество проявления акустико-эмиссионного эффекта Кайзера в антраците как показатель его стойкости к криотермическим воздействиям // ГИАБ. — 2020. — № 7. — С. 5—12. — DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-5-12.
12. *Browning J., Meredith P., Gudmundsson A.* Cooling-dominated cracking in thermally stressed volcanic rocks // *Geophysical Research Letters*. — 2016. — Vol. 43, no. 16. — P. 8417–8425. — DOI: 10.1002/2016GL070532.
13. *Browning J., Meredith P.G., Stuart C., Harland S., Healy D., Mitchell T.M.* A Directional Crack Damage Memory Effect in Sandstone Under True Triaxial Loading // *Geophysical Research Letters*. — 2018. — Vol. 45, no. 14. — P. 6878–6886. — DOI: 10.1029/2018GL078207.
14. *Daoud A., Browning J., Meredith P.G., Mitchell T.M.* Microstructural Controls on Thermal Crack Damage and the Presence of a Temperature-Memory Effect During Cyclic Thermal Stressing of Rocks // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47, no. 19. — e2020GL088693. — DOI: 10.1029/2020GL088693.
15. *Yang J., Rong G., Hou D., Peng J., Zhou C.* Experimental Study on Peak Shear Strength Criterion for Rock Joints // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. — 2016. — Vol. 49, no. 3. — P. 821–835. — DOI: 10.1007/s00603-015-0791-1.
16. *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.

17. *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.
18. *Li X., Peng K., Peng J., Hou D.* Experimental investigation of cyclic wetting-drying effect on mechanical behavior of a medium-grained sandstone // *Engineering Geology*. — 2021. — Vol. 293. — P. 106335. — DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106335.
19. *Peng J., Xu C., Dai B., Sun L., Feng J., Huang Q.* Numerical Investigation of Brittleness Effect on Strength and Microcracking Behavior of Crystalline Rock // *International Journal of Geomechanics*. — 2022. — Vol. 22, no. 10. — P. 04022178. — DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002529.
20. *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.
21. *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.
22. *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.
23. *Meredith P.G., Knight K.S., Boon S.A., Wood I.G.* The microscopic origin of thermal cracking in rocks: An investigation by simultaneous time-of-flight neutron diffraction and acoustic emission monitoring // *Geophysical Research Letters*. — 2001. — Vol. 28, no. 10. — P. 2105–2108. — DOI: 10.1029/2000GL012470.
24. *Дамаскинская Е.Е., Гиляров В.Л., Фролов Д.И., Кривоносов Ю.С., Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е.* Эволюция микротрещин в процессе деформирования горных пород: рентгеновская микротомография и моделирование методом дискретных элементов // *Триггерные эффекты*

- в геосистемах: тезисы докладов VII Международной конференции (2–5 июля 2024 г., Долгопрудный, Московская область). — Москва : ИДГ РАН, 2024. — С. 36—37.
25. *Louis L., Hender S., Honarpour M., Araujo E., Bryant D.* Experimental study on the hydromechanical behavior of a Gulf of Mexico reservoir sand analogue at in situ conditions of pressure and temperature // 52nd US Rock Mechanics Symposium. — Seattle, Washington, USA : American Rock Mechanics Association, 06/2018.
26. *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.
27. *Menéndez B., David C., Darot M.* A study of the crack network in thermally and mechanically cracked granite samples using confocal scanning laser microscopy // Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy. — 1999. — Vol. 24, no. 7. — P. 627–632. — DOI: 10.1016/S1464-1895(99)00091-5.
28. *Васин Р.Н., Никитин А.Н., Локаичек Т., Рудаев В.* Акустическая эмиссия квазиизотропных образцов горных пород, инициированная температурными градиентами // Физика Земли. — 2006. — № 10. — С. 26—35.
29. *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.
30. *Kong B., Wang E., Li Z., Wang X., Niu Y., Kong X.* Acoustic emission signals frequency-amplitude characteristics of sandstone after thermal treated under uniaxial compression // Journal of Applied Geophysics. — 2017. — Vol. 136. — P. 190–197. — DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.11.008.

31. *Kong B., Li Z., Wang E.* Fine characterization rock thermal damage by acoustic emission technique // *Journal of Geophysics and Engineering*. — 2017. — Dec. — Vol. 15, no. 1. — P. 1–12. — DOI: 10.1088/1742-2140/aa9a54.
32. *Collins B.D., Stock G.M.* Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures // *Nature Geoscience*. — 2016. — May. — Vol. 9, no. 5. — P. 395–400. — DOI: 10.1038/ngeo2686.
33. *Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород: Учебное пособие. — 5-е. — Москва : URSS, 2010. — С. 359.
34. *Schön J.H.* Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. — 2nd ed. — Amsterdam : Elsevier, 2015. — P. 512.
35. *Нагата Т.* Магнетизм горных пород. — Москва : Издательство иностранной литературы, 1956. — С. 210. — <https://www.geokniga.org/books/25896>.
36. *Hall E.O.* The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results // *Proceedings of the Physical Society. Section B*. — 1951. — Sept. — Vol. 64, no. 9. — P. 747. — DOI: 10.1088/0370-1301/64/9/303.
37. *Petch N.J.* The Cleavage Strength of Polycrystals // *Journal of the Iron and Steel Institute*. — 1953. — Vol. 174. — P. 25–28. — <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570291225556359040>.
38. *Hansen N.* Hall-Petch relation and boundary strengthening // *Scripta Materialia*. — 2004. — Vol. 51, no. 8. — P. 801–806. — DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.06.002.
39. *Zhu T.T., Bushby A.J., Dunstan D.J.* Materials mechanical size effects: a review // *Materials Technology*. — 2008. — Vol. 23, no. 4. — P. 193–209. — DOI: 10.1179/175355508X376843.
40. *Lv J., Zheng J.-H., Yardley V.A., Shi Z., Lin J.* A Review of Microstructural Evolution and Modelling of Aluminium Alloys under Hot Forming Conditions // *Metals*. — 2020. — Vol. 10, no. 11. — DOI: 10.3390/met10111516.
41. *Chandross M., Argibay N.* Friction of Metals: A Review of Microstructural Evolution and Nanoscale Phenomena in Shearing Contacts // *Tribology Letters*. — 2021. — Vol. 69, no. 4. — P. 119. — DOI: 10.1007/s11249-021-01477-z.

42. *Figueiredo R.B., Kawasaki M., Langdon T.G.* Seventy years of Hall-Petch, ninety years of superplasticity and a generalized approach to the effect of grain size on flow stress // *Progress in Materials Science*. — 2023. — Vol. 137. — P. 101131. — DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101131.
43. *Tang Y., Wang R., Xiao B., Zhang Z., Li S., Qiao J., Bai S., Zhang Y., Liaw P.K.* A review on the dynamic-mechanical behaviors of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. — 2023. — Vol. 135. — P. 101090. — DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101090.
44. *Fredrich J.T., Evans B., Wong T.-F.* Effect of grain size on brittle and semibrittle strength: Implications for micromechanical modelling of failure in compression // *Journal of Geophysical Research*. — 1990. — Vol. 95, B7. — P. 10907–10920. — DOI: 10.1029/JB095iB07p10907.
45. *He W., Hayatdavoudi A., Shi H., Sawant K., Huang P.* A Preliminary Fractal Interpretation of Effects of Grain Size and Grain Shape on Rock Strength // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. — 2019. — Vol. 52, no. 6. — P. 1745–1765. — DOI: 10.1007/s00603-018-1645-4.
46. *Renner J., Evans B., Siddiqi G.* Dislocation creep of calcite // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2002. — Vol. 107, B12. — ECV 6-1-ECV 6–16. — DOI: 10.1029/2001JB001680.
47. *Liu S., Zhang Y., Zhang H., Zhang J., Qiu M., Li G., Ma F., Guo J.* Numerical study of the fluid fracturing mechanism of granite at the mineral grain scale // *Frontiers in Earth Science*. — 2023. — Vol. 11. — DOI: 10.3389/feart.2023.1289662.
48. *Pan C., Zhao G., Meng X., Dong C., Gao P.* Numerical investigation of the influence of mineral mesostructure on quasi-static compressive behaviors of granite using a breakable grain-based model // *Frontiers in Ecology and Evolution*. — 2023. — Vol. 11. — P. 1288870. — DOI: 10.3389/fevo.2023.1288870.
49. *Atapour H., Mortazavi A.* The influence of mean grain size on unconfined compressive strength of weakly consolidated reservoir sandstones // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2018. — Vol. 171. — P. 63–70. — DOI: 10.1016/j.petrol.2018.07.029.

50. *He W., Hayatdavoudi A.* A comprehensive analysis of fracture initiation and propagation in sandstones based on micro-level observation and digital imaging correlation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2018. — Vol. 164. — P. 75–86. — DOI: 10.1016/j.petrol.2018.01.041.
51. *Kronenberg A.K., Tullis J.* Flow strengths of quartz aggregates: Grain size and pressure effects due to hydrolytic weakening // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 1984. — Vol. 89, B6. — P. 4281–4297. — DOI: 10.1029/JB089iB06p04281.
52. *Millard J.W., Holyoke C.W., Wells R.K., Blasko C., Kronenberg A.K., Raterron P., Braccia C., Jackson N., McDaniel C.A., Tokle L.* Pressure Dependence of Magnesite Creep // *Geosciences*. — 2019. — Vol. 9, no. 10. — DOI: 10.3390/geosciences9100420.
53. *Chen B., Xiang J., Latham J.-P., Bakker R.R.* Grain-scale failure mechanism of porous sandstone: An experimental and numerical FDEM study of the Brazilian Tensile Strength test using CT-Scan microstructure // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. — 2020. — Vol. 132. — P. 104348. — DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104348.
54. *Peng J., Wong L.N.Y., Teh C.I.* Influence of grain size heterogeneity on strength and microcracking behavior of crystalline rocks // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2017. — Vol. 122, no. 2. — P. 1054–1073. — DOI: 10.1002/2016JB013469.
55. *Austin N.* An experimental investigation of textural controls on the brittle deformation of dolomite : M.Sc. Thesis / Austin N.J. — Vancouver, BC : University of British Columbia, 2003. — P. 106.
56. *Han Q., Gao Y., Zhang Y.* Experimental Study of Size Effects on the Deformation Strength and Failure Characteristics of Hard Rocks under True Triaxial Compression // *Advances in Civil Engineering*. — 2021. — Vol. 2021, no. 1. — P. 6832775. — DOI: 10.1155/2021/6832775.
57. *Ishida T., Sasaki S., Matsunaga I., Chen Q., Mizuta Y.* Effect of Grain Size in Granitic Rocks on Hydraulic Fracturing Mechanism // *Trends in Rock Mechanics*. — 2000. — P. 128–139. — DOI: 10.1061/40514(290)9.

58. *Iravani A., Ouchterlony F., Kukolj I., Åström J.A.* Generation of fine fragments during dynamic propagation of pressurized cracks // *Phys. Rev. E.* — 2020. — Feb. — Vol. 101, issue 2. — P. 023002. — DOI: 10.1103/PhysRevE.101.023002.
59. *Jamtveit B., Petley-Ragan A., Incel S., Dunkel K.G., Aupart C., Austrheim H., Corfu F., Menegon L., Renard F.* The Effects of Earthquakes and Fluids on the Metamorphism of the Lower Continental Crust // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* — 2019. — Vol. 124, no. 8. — P. 7725–7755. — DOI: 10.1029/2018JB016461.
60. *Zhong X., Petley-Ragan A.J., Incel S.H.M., Dabrowski M., Andersen N.H., Jamtveit B.* Lower crustal earthquake associated with highly pressurized frictional melts // *Nature Geoscience.* — 2021. — Vol. 14, no. 7. — P. 519–525. — DOI: 10.1038/s41561-021-00760-x.
61. *Karato S.-I., Wu P.* Rheology of the upper mantle: A synthesis // *Science.* — 1993. — Vol. 260, no. 5109. — P. 771–778. — DOI: 10.1126/science.260.5109.771.
62. *Faul U.H., Jackson I.* The seismological signature of temperature and grain size variations in the upper mantle // *Earth and Planetary Science Letters.* — 2005. — Vol. 234, no. 1. — P. 119–134. — DOI: 10.1016/j.epsl.2005.02.008.
63. *Bruijn R.H., Skemer P.* Grain-size sensitive rheology of orthopyroxene // *Geophysical Research Letters.* — 2014. — Vol. 41, no. 14. — P. 4894–4903. — DOI: 10.1002/2014GL060607.
64. *Ruh J.B., Togle L., Behr W.M.* Grain-size-evolution controls on lithospheric weakening during continental rifting // *Nature Geoscience.* — 2022. — Vol. 15, no. 7. — P. 585–590. — DOI: 10.1038/s41561-022-00964-9.
65. *Stipp M., Tullis J., Scherwath M., Behrmann J.H.* A new perspective on paleopiezometry: Dynamically recrystallized grain size distributions indicate mechanism changes // *Geology.* — 2010. — Aug. — Vol. 38, no. 8. — P. 759–762. — DOI: 10.1130/G31162.1.

66. *Fukuda J.-i., Holyoke III C.W., Kronenberg A.K.* Deformation of Fine-Grained Quartz Aggregates by Mixed Diffusion and Dislocation Creep // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. — 2018. — Vol. 123, no. 6. — P. 4676–4696. — DOI: 10.1029/2017JB015133.
67. *Gopon P., Forshaw J.B., Wade J., Waters D.J., Gopon C.* Seeing through metamorphic overprints in Archean granulites: Combined high-resolution thermometry and phase equilibrium modeling of the Lewisian Complex, Scotland // *American Mineralogist*. — 2022. — Aug. — Vol. 107, no. 8. — P. 1487–1500. — DOI: 10.2138/am-2022-8214CCBY.
68. *Philpotts A., Ague J.* Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. — 3rd. — Cambridge : Cambridge University Press, 2022. — P. 802.
69. *Platt J.* A process-based theory for subgrain-size and grain-size piezometry // *Journal of Structural Geology*. — 2023. — Vol. 177. — P. 104987. — DOI: 10.1016/j.jsg.2023.104987.
70. *Shao S., Wasantha P., Ranjith P., Chen B.* Effect of cooling rate on the mechanical behavior of heated Strathbogie granite with different grain sizes // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. — 2014. — Vol. 70. — P. 381–387. — DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.04.003.
71. *Kang F., Li Y., Tang C.* Grain size heterogeneity controls strengthening to weakening of granite over high-temperature treatment // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. — 2021. — Vol. 145. — P. 104848. — DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104848.
72. *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.
73. *Гайдуков М.Г., Садовский В.Д.* К вопросу о влиянии величины зерна аустенита на мартенситное превращение в стали // *Докл. АН СССР*. — 1954. — Т. 96, № 1. — С. 67—69.
74. *Глезер А.М., Блинова Е.Н., Поздняков В.А.* Мартенситное превращение в микрокристаллических сплавах железо–никель // *Известия РАН. Сер. физическая*. — 2002. — Т. 66, № 9. — С. 1263—1275.

75. *Кащенко М.П., Кащенко Н.М., Королев А.В., Оглезнева С.А., Чащина В.Г.* Оценка критического размера зерна при γ - α мартенситном превращении с атермической макрокинетикой на примере системы Fe–Ni–Cr // *Физическая мезомеханика*. — 2017. — Т. 20, № 6. — С. 56—61.
76. ASTM E112-13 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. — ASTM, 2021. — 11 p.
77. ГОСТ Р ИСО 643-2015 Сталь. Металлографическое определение наблюдаемого размера зерна. — М. : Стандартинформ, 2016. — 36 с.
78. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. — М. : Издательство стандартов, 2003. — 20 с.
79. ГОСТ 21073.0-75 Металлы цветные. Определение величины зерна. Общие требования. — М. : Издательство стандартов, 2002. — 10 с.
80. *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.
81. *Kaznacheev P.A., Indakov G.S., Podymova N.B., Ponomarev A.V., Matveev M.A., Maibuk Z.-Y.Y., 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. — DOI: 10.1134/S1069351325700053.
82. ASTM E562-19 Standard Test Methods for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count. — ASTM, 2019. — 4 p.
83. ASTM E930-99 Standard Test Methods for Estimating the Largest Grain Observed in a Metallographic Section (ALA Grain Size). — ASTM, 2015. — 3 p.
84. ASTM E1181-02 Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes. — ASTM, 2023. — 7 p.
85. ASTM E1245-03 Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis. — ASTM, 2023. — 5 p.

86. ASTM E1382-97 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis. — ASTM, 2023. — 11 p.
87. ГОСТ 21073.1-75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур. — М. : Издательство стандартов, 2002. — 6 с.
88. ГОСТ 21073.2-75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета зерен. — М. : Издательство стандартов, 2002. — 3 с.
89. ГОСТ 21073.3-75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечений зерен. — М. : Издательство стандартов, 2002. — 2 с.
90. ГОСТ 21073.4-75 Металлы цветные. Определение величины зерна планиметрическим методом. — М. : Издательство стандартов, 2002. — 3 с.
91. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография: Учебное пособие. — Москва : Металлургия, 1976. — С. 271.
92. *Voort G.* Introduction to stereological principles // Practical Guide to Image Analysis. — ASM Intl., 2000. — P. 15–34.
93. *Friel J.* Measurements // Practical Guide to Image Analysis. — ASM Intl., 2000. — P. 101–128.
94. *Kellerhals R., Shaw J., Arora V.K.* On Grain Size from Thin Sections // The Journal of Geology. — 1975. — Vol. 83, no. 1. — P. 79–96. — DOI: 10.1086/628046.
95. *Higgins M.* Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology. — Cambridge : Cambridge University Press, 2006. — P. 276.
96. *Peterson T.D.* A refined technique for measuring crystal size distributions in thin section // Contributions to Mineralogy and Petrology. — 1996. — Vol. 124, no. 3. — P. 395–405. — DOI: 10.1007/s004100050199.
97. *Jutzeler M., Proussevitch A., Allen S.* Grain-size distribution of volcanoclastic rocks 1: A new technique based on functional stereology // Journal of Volcanology and Geothermal Research. — 2012. — Vol. 239/240. — P. 1–11. — DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.05.013.

98. *Jiang Z.-D., Wang Q.-B., Brye K.R., Adhikari K., Sun F.-J., Sun Z.-X., Chen S., Owens P.R.* Quantifying organic carbon stocks using a stereological profile imaging method to account for rock fragments in stony soils // *Geoderma*. — 2021. — Vol. 385. — P. 114837. — DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114837.
99. *Nurzynska K., Iwaszenko S.* Application of Texture Features and Machine Learning Methods to Grain Segmentation in Rock Material Images // *Image Analysis and Stereology*. — 2020. — June. — Vol. 39, no. 2. — P. 73–90. — DOI: 10.5566/ias.2186.
100. *Yu J., Wellmann F., Virgo S., von Domarus M., Jiang M., Schmatz J., Leibe B.* Superpixel segmentations for thin sections: Evaluation of methods to enable the generation of machine learning training data sets // *Computers & Geosciences*. — 2023. — Vol. 170. — P. 105232. — DOI: 10.1016/j.cageo.2022.105232.
101. *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.
102. *Barbosa R.T.C.M., Faria E.L., Klatt M., Silva T.C., Coelho J.M., Matos T.F., Santos B.C.C., Gonzalez J.L., Bom C.R., Albuquerque M.P. de, Albuquerque M.P. de.* Unsupervised segmentation for sandstone thin section image analysis // *Computational Geosciences*. — 2024. — Vol. 28, no. 6. — P. 1049–1057. — DOI: 10.1007/s10596-024-10304-y.
103. *Ren Y., Li X., Bi J., Zhang Y., Su Q., Wang W., Li H.* Multi-channel attention transformer for rock thin-section image segmentation // *Journal of Engineering Research*. — 2025. — Vol. 13, no. 2. — P. 730–740. — DOI: 10.1016/j.jer.2024.04.009.
104. *Cheng Z., Liu H.* Digital grain-size analysis based on autocorrelation algorithm // *Sedimentary Geology*. — 2015. — Vol. 327. — P. 21–31. — DOI: 10.1016/j.sedgeo.2015.07.008.
105. *van den Berg E.H., Meesters A.G.C.A., Kenter J.A.M., Schlager W.* Automated separation of touching grains in digital images of thin sections // *Computers &*

- Geosciences. — 2002. — Vol. 28, no. 2. — P. 179–190. — DOI: 10.1016/S0098-3004(01)00038-3.
106. *Graham D.J., Reid I., Rice S.P.* Automated Sizing of Coarse-Grained Sediments: Image-Processing Procedures // *Mathematical Geology*. — 2005. — Vol. 37, no. 1. — P. 1–28. — DOI: 10.1007/s11004-005-8745-x.
107. *Outal S., Jeulin D., Schleifer J.* A new method for estimating the 3D size-distribution curve of fragmented rocks out of 2D images // *Image Analysis and Stereology*. — 2011. — May. — Vol. 27, no. 2. — P. 97–105. — DOI: 10.5566/ias.v27.p97-105.
108. *Jungmann M., Pape H., Wißkirchen P., Clauser C., Berlage T.* Segmentation of thin section images for grain size analysis using region competition and edge-weighted region merging // *Computers & Geosciences*. — 2014. — Vol. 72. — P. 33–48. — DOI: 10.1016/j.cageo.2014.07.002.
109. *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.
110. *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. — DOI: 10.21455/gr2025.2-7.
111. *Ильинов М.Д., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А.* Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // *Горные науки и технологии*. — 2023. — Т. 8, № 4. — С. 290–302. — DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150.
112. *Meredith P.G., Atkinson B.K.* Fracture toughness and subcritical crack growth during high-temperature tensile deformation of Westerly granite and Black gabbro // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. — 1985. — Vol. 39, no. 1. — P. 33–51. — DOI: 10.1016/0031-9201(85)90113-X.

113. *Wang H.F., Bonner B.P., Carlson S.R., Kowallis B.J., Heard H.C.* Thermal stress cracking in granite // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* — 1989. — Vol. 94, B2. — P. 1745–1758. — DOI: 10.1029/JB094iB02p01745.
114. *Jia P., Qian Y., Wang Q., Mao S., Lu J.* Mechanical and electrical responses of natural-cooled high-temperature granite of different grain sizes // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources.* — 2023. — Vol. 9. — P. 158. — DOI: 10.1007/s40948-023-00702-4.
115. *Yang S.-Q.* Mechanical Behavior and Damage Fracture Mechanism of Deep Rocks. — Singapore : Springer, 2022. — DOI: 10.1007/978-981-16-7739-7.
116. *Heuze F.E.* High-temperature mechanical, physical and Thermal properties of granitic rocks— A review // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts.* — 1983. — Vol. 20, no. 1. — P. 3–10. — DOI: 10.1016/0148-9062(83)91609-1.
117. *Yong C., Wang C.-Y.* Thermally induced acoustic emission in westerly granite // *Geophysical Research Letters.* — 1980. — Vol. 7, no. 12. — P. 1089–1092. — DOI: 10.1029/GL007i012p01089.
118. *Jones C., Keaney G., Meredith P., Murrell S.* Acoustic emission and fluid permeability measurements on thermally cracked rocks // *Physics and Chemistry of the Earth.* — 1997. — Vol. 22, no. 1. — P. 13–17. — DOI: 10.1016/S0079-1946(97)00071-2.
119. *Ржевский В.В., Ямищikov В.С., Шкуратник В.Л., Фараонов В.М., Лыков К.Г.* Термозмиссионные эффекты памяти в горных породах // *Докл. АН СССР.* — 1985. — Т. 283, № 4. — С. 843—845.
120. *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.
121. *Sha S., Rong G., Tan J., He R., Li B.* Tensile strength and brittleness of sandstone and granite after high-temperature treatment: a review // *Arabian Journal of Geosciences.* — 2020. — Vol. 13, no. 14. — P. 598. — DOI: 10.1007/s12517-020-05647-6.

122. *Paul S., Chattopadhyaya S., Raina A.K., Sharma S., Li C., Zhang Y., Kumar A., Tag-Eldin E.* A Review on the Impact of High-Temperature Treatment on the Physico-Mechanical, Dynamic, and Thermal Properties of Granite // Sustainability. — 2022. — Vol. 14, 22:14839. — DOI: 10.3390/su142214839.
123. *Wang Y., Peng J., Wang L., Xu C., Dai B.* Micro-macro evolution of mechanical behaviors of thermally damaged rock: A state-of-the-art review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2024. — Vol. 16, no. 7. — P. 2833–2853. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.012.
124. *Gibbons S.J., Ringdal F.* The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation // Geophysical Journal International. — 2006. — Apr. — Vol. 165, no. 1. — P. 149–166. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x.
125. *Иванов В.И., Барат В.А.* Акустико-эмиссионная диагностика. — Москва : Спектр, 2017. — С. 368.
126. *Адушкин 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.
127. *Septyana T., Nugraha A.D., Widiyantoro 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.
128. *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.
129. *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.

130. 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.
131. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б. К вопросу об анализе статистики событий акустической эмиссии по данным одиночного датчика в экспериментах с термическим разрушением горных пород // Геофизические исследования. — 2019. — Т. 20, № 1. — С. 52—64. — DOI: 10.21455/gr2019.1-5.
132. 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.
133. Елизаров С.В., Букатин А.В., Ростовцев М.Ю., Терентьев Д.А. Новинки программного обеспечения АЭ систем семейства A-Line // В мире неразрушающего контроля. — 2008. — № 3. — С. 18—21.
134. Комаров А.Г. Программное обеспечение для обработки данных АЭ испытаний // Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018): Всероссийская конференция с международным участием (Тольятти, 28 мая – 1 июня 2018 года): сборник материалов / под ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. — С. 41—43.
135. 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.
136. *Fitting D.W., Adler L. Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation. — New York : Plenum Press, 1981. — P. 354.*

137. *Pollock A.* Acoustic Emission Inspection // Nondestructive Evaluation and Quality Control. Vol. 17. — ASM Handbook, 1989. — (the 9th Edition of Metals Handbook).
138. *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>.
139. *Касахара К.* Механика землетрясений. — М. : Мир, 1985. — 264 с.
140. *Индаков Г.С., Казначеев П.А.* Оценка статистических параметров потока импульсов термически стимулированной акустической эмиссии в лабораторных экспериментах // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2021. — № 1, 2110501. — С. 1—12. — <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2021/1/2110501/>.
141. *Mignan A., Woessner J.* Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs // Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. — 2012. — Apr. — DOI: 10.5078/corssa-00180805.
142. *Shi Y., Bolt B.A.* The standard error of the magnitude-frequency b value // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1982. — Oct. — Vol. 72, no. 5. — P. 1677–1687. — DOI: 10.1785/BSSA0720051677.
143. *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.
144. *Cui Y., Xue L., Zhai M., Xu C., Bu F., Wan L.* Experimental investigation on the influence on mechanical properties and acoustic emission characteristics of granite after heating and water-cooling cycles // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. — 2023. — Vol. 9, no. 88. — DOI: 10.1007/s40948-023-00627-y.
145. *Liu X., Liu Z., Li X., Cui J.* Acoustic Emission RA-Value and Granite Fracture Modes Under Dynamic and Static Loads // Advances in Acoustic Emission Technology / ed. by G. Shen, J. Zhang, Z. Wu. — Cham : Springer International Publishing, 2019. — P. 141–153.

146. *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.
147. *Yudin A.A., Ivanov V.I.* Acoustic emission in plastic deformation of metals (review). Report 2 // *Strength of Materials*. — 1985. — Vol. 17, no. 6. — P. 851–862. — DOI: 10.1007/BF01528740.
148. *Johnson R.A., Wichern D.W.* *Applied Multivariate Statistical Analysis*. — Pearson Prentice Hall, 2007. — 773 p.
149. *James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R.* *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. — Springer New York, NY, 2013. — 426 p. — DOI: 10.1007/978-1-4614-7138-7.
150. *Tukey J.W.* A Survey of Sampling from Contaminated Distributions // *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling* / ed. by I. Olkin, S.G. Ghurye, W. Hoeffding, W.G. Madow, H.B. Mann. — Stanford, CA : Stanford University Press, 1960. — P. 448–485.
151. *Breiman L.* Random Forests // *Machine Learning*. — 2001. — Oct. — Vol. 45, no. 1. — P. 5–32. — DOI: 10.1023/A:1010933404324.
152. *Chen T., Guestrin C.* XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. — San Francisco, California, USA : Association for Computing Machinery, 2016. — P. 785–794. — (KDD '16). — DOI: 10.1145/2939672.2939785.
153. *Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin A.* CatBoost: unbiased boosting with categorical features // *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 31 / ed. by S. Bengio, H. Wallach, H. Larochelle, K. Grauman, N. Cesa-Bianchi, R. Garnett. — Curran Associates, Inc., 2018.
154. *Chawla N.V., Bowyer K.W., Hall L.O., Kegelmeyer W.P.* SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique // *Journal of Artificial Intelligence Research*. — 2002. — Vol. 16. — P. 321–357. — DOI: 10.1613/jair.953.

155. *Freund Y., Schapire R.E.* A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting // Journal of Computer and System Sciences. — 1997. — Vol. 55, no. 1. — P. 119–139. — DOI: 10.1006/jcss.1997.1504.
156. *Akiba T., Sano S., Yanase T., Ohta T., Koyama M.* Optuna: A Next-generation Hyperparameter Optimization Framework // Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. — Anchorage, AK, USA : Association for Computing Machinery, 2019. — P. 2623–2631. — (KDD '19). — DOI: 10.1145/3292500.3330701.
157. *Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.-H.* Isolation Forest // 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. — Pisa, Italy, 2008. — P. 413–422. — DOI: 10.1109/ICDM.2008.17.
158. *Schölkopf B., Platt J.C., Shawe-Taylor J., Smola A.J., Williamson R.C.* Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution // Neural Computation. — 2001. — July. — Vol. 13, no. 7. — P. 1443–1471. — DOI: 10.1162/089976601750264965.
159. *Breunig M.M., Kriegel H.-P., Ng R.T., Sander J.* LOF: identifying density-based local outliers // SIGMOD Rec. — New York, NY, USA, 2000. — May. — Vol. 29, no. 2. — P. 93–104. — DOI: 10.1145/335191.335388.
160. *MacQueen J.B.* Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Vol. 1. — Berkeley, CA : University of California Press, 1967. — P. 281–297.
161. *Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X.* A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — Portland, Oregon : AAAI Press, 1996. — P. 226–231. — (KDD'96).
162. *Müllner D.* Modern hierarchical, agglomerative clustering algorithms // arXiv preprint arXiv:1109.2378. — 2011. — <https://arxiv.org/abs/1109.2378>.

163. *Hotelling H.* Analysis of a Complex of Statistical Variables into Principal Components // *Journal of Educational Psychology*. — 1933. — Vol. 24. — P. 417–441. — DOI: 10.1037/h0071325.
164. *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.
165. *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.
166. *Соболев Г.А.* Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // *Физика Земли*. — 2019. — № 1. — С. 166–179. — DOI: 10.31857/S0002-333720191166-179.
167. *Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук З.-Ю.Я., Закржевская Н.А., Понятовская В.И., Соболев Д.Г., Хромов А.А., Цывинская Ю.В.* Динамика акустической эмиссии при инициировании водой // *Физика Земли*. — 2010. — № 2. — С. 50–67.
168. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. — Рос. акад. наук. Объед. ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. – М. : Наука, 2003. — 269 с.
169. *Смирнов В.Б., Завьялов А.Д.* Концентрационный критерий разрушения с учетом фрактального распределения разрывов // *Вулканология и сейсмология*. — 1996. — № 4. — С. 75–80.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рисунок 27 – Фотографии гипсовых образцов с примесью песка различных фракций (до нагрева): а) – без примеси, б) – фракция $d < 200$ мкм, в) – фракция $200 < d < 315$ мкм, г) – фракция $315 < d < 400$ мкм, д) – фракция $400 < d < 630$ мкм. Для каждого образца даны фотографии сбоку и сверху.



а) GS4030C0-1



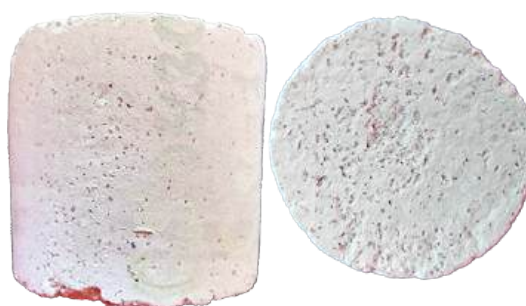
б) GS4030C1-1



в) GS4030C2-1



г) GS4030C3-1



д) GS4030C4-1

Рисунок 28 – Фотографии гипсовых образцов с примесью песка различных фракций (после нагрева): а) – без примеси, б) – фракция $d < 200$ мкм, в) – фракция $200 < d < 315$ мкм, г) – фракция $315 < d < 400$ мкм, д) – фракция $400 < d < 630$ мкм. Для каждого образца даны фотографии сбоку и сверху.

Таблица 14. Фрагмент датасета (предварительно нагруженный песчаник).

<i>time</i>	A_{adc}	A_{dB}	A_{uV}	A/h_{counts}	$\ln(A/h_{\text{counts}})$	E_{yJ}	E_{dB}	E_{MARSE}	T_{dur}	T_{rise}	h_{counts}	AF	RA	$Clust$	$Heat$
230.456	57.0	36.8	69.4	6.9	0.05465	162861.0	52.1	403560.5	57.0	35.0	10.0	175.0	1.983	0.0	1.0
923.214	60.0	37.3	73.1	8.1	0.06643	106406.0	50.3	326199.9	41.0	5.0	9.0	219.0	14.620	0.0	1.0
1821.328	52.0	36.0	63.3	12.7	0.09095	87070.0	49.4	295076.0	29.0	1.0	5.0	172.0	63.300	0.0	1.0
3980.934	40.0	33.8	48.7	24.4	0.09619	14664.0	41.7	121096.0	7.0	7.0	2.0	285.0	6.957	0.0	1.0
3999.754	45.0	34.8	54.8	18.3	0.10338	51946.0	47.2	227916.5	25.0	13.0	3.0	120.0	4.215	0.0	1.0

Описание столбцов датасета:

- $time$ – Время регистрации импульса с начала эксперимента (превышения сигналом порогового уровня), с.
- A_{adc} – Амплитуда (максимальная) импульса, в единицах АЦП.
- A_{dB} – Амплитуда $-/-$, в децибеллах (дБ) относительно 1 мкВ. Определяется через A_{uV} , как: $A_{\text{dB}} = 20 \cdot \lg(A_{\text{uV}}/1 \text{ мкВ})$.
- A_{uV} – Амплитуда $-/-$, мкВ. Определяется через A_{adc} , как: $A_{\text{uV}} = A_{\text{adc}} \cdot LSB$, где LSB – величина младшего значащего разряда АЦП в мкВ.
- A/h_{counts} – отношение A_{uV} к h_{counts} , мкВ.
- $\ln(A/h_{\text{counts}})$ – натуральный логарифм отношения A/h_{counts} .
- E_{yJ} – Энергия импульса, иДж (иоктоджоуль или 10^{-24} Дж). Определяется через сумму квадратов нескольких первых амплитуд импульса.
- E_{dB} – Энергия, дБ (относительно 10^{-24} Дж).
- E_{MARSE} – Энергия, MARSE (оценка, близкая к площади кривой под графиком сигнала).
- T_{dur} – Длительность импульса, мкс.
- T_{rise} – Время нарастания импульса, мкс.
- h_{counts} – Количество выбросов (превышений порога регистрации за длительность импульса).
- $AF = h_{\text{counts}}/T_{\text{dur}}$ (эквивалентно «средней» частоте импульса – «Average frequency»), кГц.
- $RA = T_{\text{rise}}/A_{\text{uV}}$ (величина, обратно пропорциональная скорости нарастания импульса), с/В.
- $Clust$ – номер кластера, определенного в результате корреляции волновых форм друг с другом: 1–3 – группы коррелирующих импульсов, 0 – остальные импульсы.
- $Heat$ – нагрев/охлаждение (1 – нагрев, 0 – охлаждение).

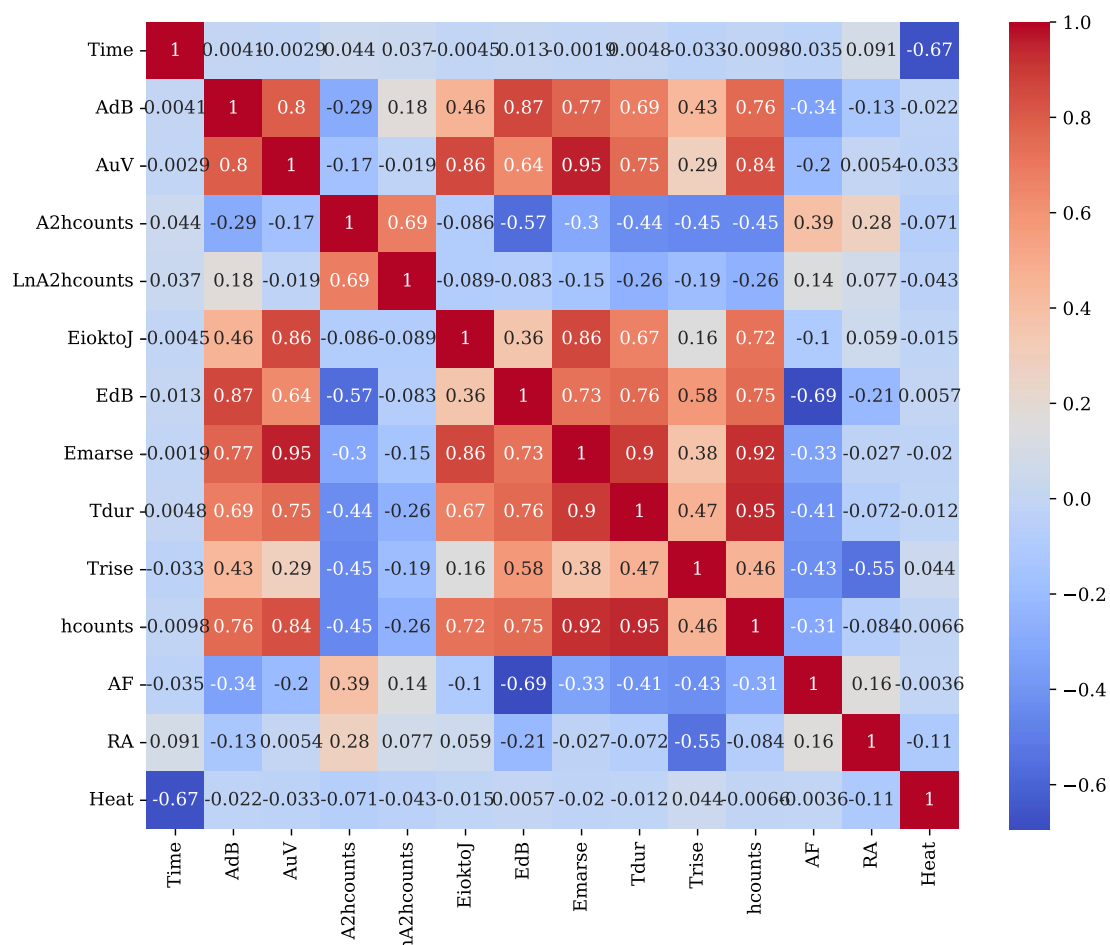
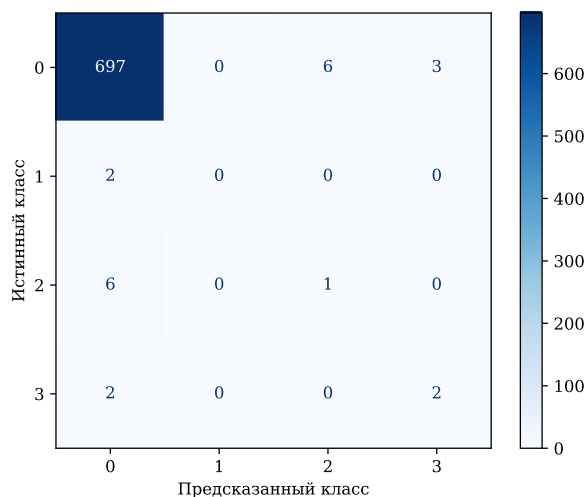
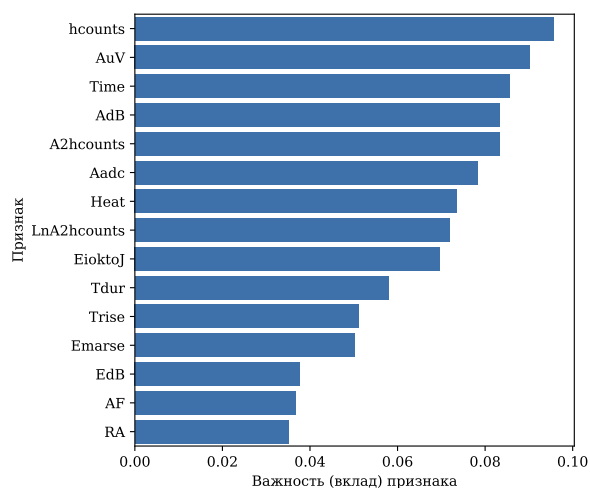


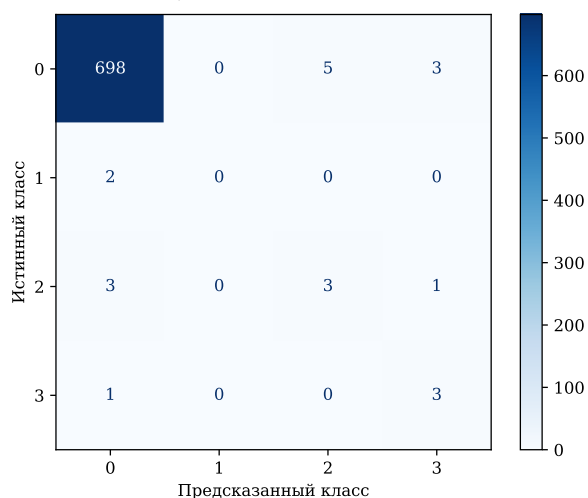
Рисунок 29 – Корреляционная матрица признаков фильтрованного датасета, анализируемого методами машинного обучения (за исключением модели адаптивного бустинга – AdaBoost).



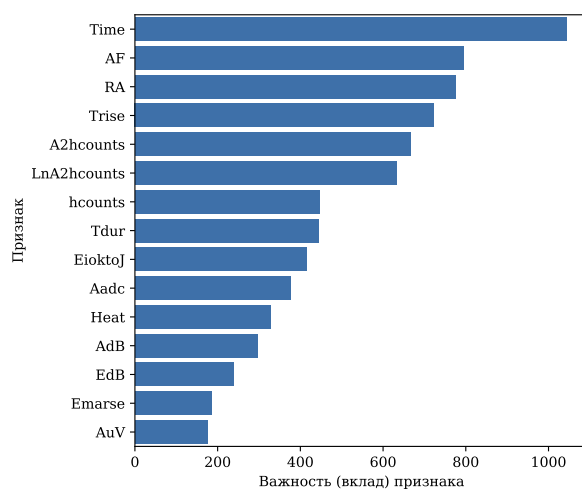
а) Random Forest



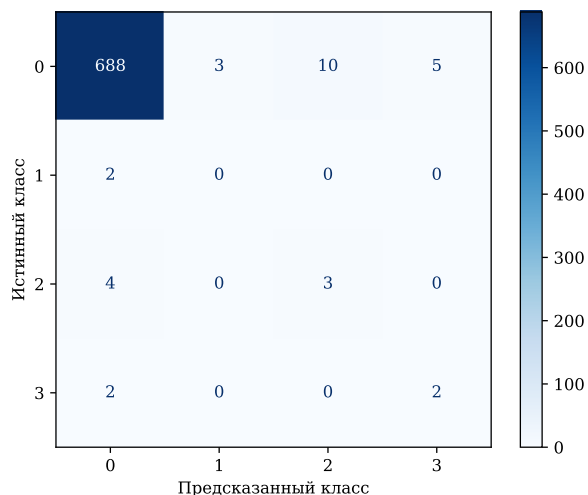
б) Random Forest



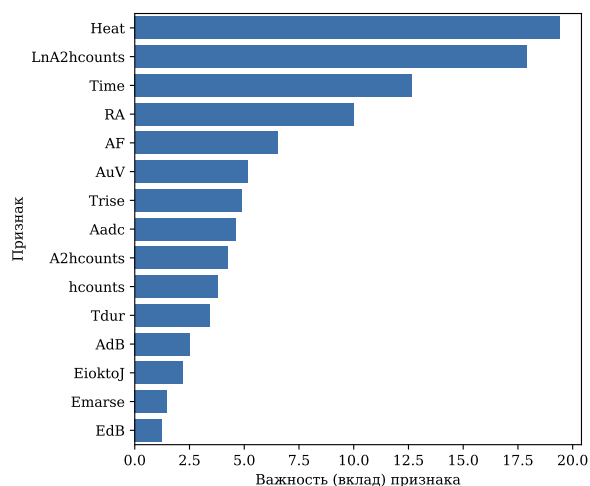
в) XGBoost



г) XGBoost



д) CatBoost



е) CatBoost

Рисунок 30 – Результаты тестирования моделей классификации: матрицы несоответствий (а, в, д) и вклады признаков (б, г, е) для моделей Random Forest, XGBoost и CatBoost соответственно.

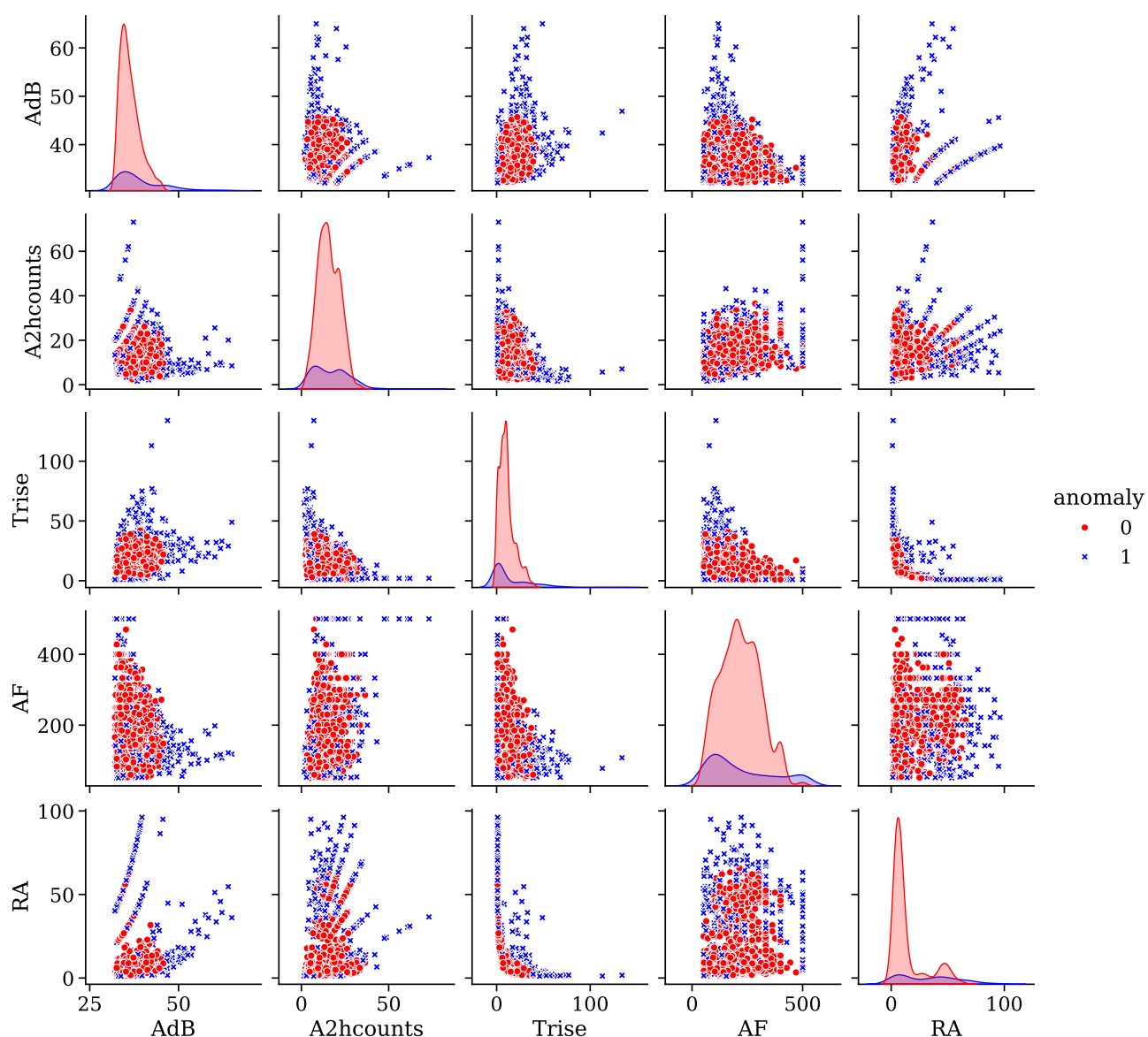
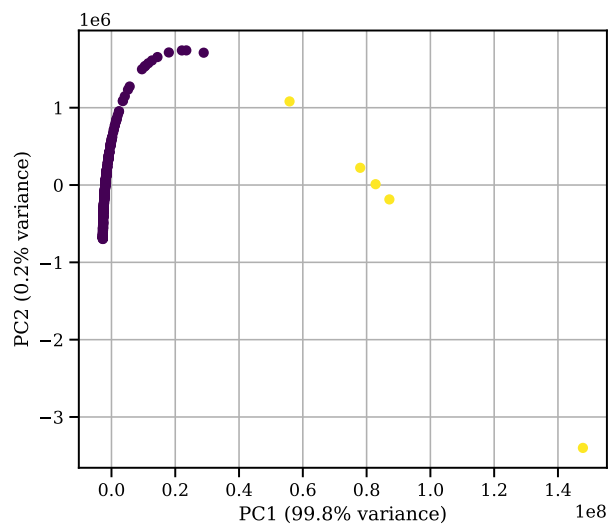
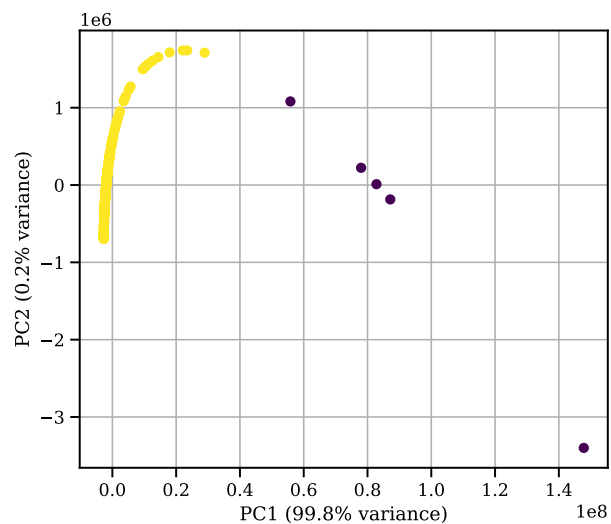


Рисунок 31 – Распределение событий для некоторых признаков фильтрованного датасета по результатам работы модели изолирующего леса (Isolation Forest). Синим отмечены события, которые модель определила, как аномальные.



а) K-means



б) DBSCAN

Рисунок 32 – Визуализация разбиения выделенных аномалий на кластеры методами К-средних (а) и DBSCAN (б) методом главных компонент. На осях отложены значения двух главных компонент (PC1 и PC2), для каждой указана доля объясненной дисперсии. Выделено 2 кластера, импульсы меньшего кластера принадлежат классу 0.