

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского  
Российской академии наук

Морозова Ксения Георгиевна

**СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩАЯ  
РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО РАЗЛОМАМ И ТРЕЩИНАМ**

**Специальность 1.6.9 «Геофизика»**

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
кандидат физ.-мат. наук А.А. Остапчук

Научный консультант:  
доктор физ.-мат. наук, профессор Г.Г. Кочарян

Москва – 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.....	12
1.1. Сейсмические проявления различных режимов скольжения по разломам.....	13
1.2. Основные источники импульсов акустической эмиссии.....	16
1.3. Методы детектирования сейсмоакустических событий.....	18
1.3.1. Метод детектирования STA/LTA.....	19
1.3.2. Метод детектирования по порогу.....	21
1.3.3. Информационный критерий Акаике.....	23
1.4. Закономерности излучения сейсмоакустических событий при деформировании и разрушении горных пород.....	24
1.4.1. Закон Гутенберга-Рихтера.....	24
1.4.2. Прямой и обратный закон Омори.....	25
1.5. Контроль сейсмичности при проведении подземных горных работ.....	27
1.6. Применение методов машинного обучения для анализа сейсмических и акустических данных.....	31
1.6.1. Дерево принятия решений и случайный лес.....	34
1.6.2. Нейронные сети.....	36
Выводы к Главе 1.....	38
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	39
2.1. Описание лабораторной установки и процесса проведения лабораторных экспериментов.....	40
2.1.1. Регистрация механических параметров.....	40
2.2. Регистрация акустоэмиссионного сигнала.....	44
2.3. Континуум реализованных режимов скольжения.....	48
2.4. Формирование каталога импульсов АЭ.....	54

2.4.1. Параметры выделенных импульсов АЭ.....	56
Выводы к Главе 2.....	60
ГЛАВА 3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МОДЕЛЬНОГО МЕЖБЛОКОВОГО КОНТАКТА.....	61
3.1 Анализ непрерывного сигнала АЭ.....	61
3.1.1. Корреляция смещения межблокового контакта и энергии АЭ.....	61
3.1.2. Обобщенный дефицит межблокового контакта.....	64
3.1.3. Применение алгоритма случайный лес для определения динамики скольжения модельного разлома.....	70
3.2. Анализ каталога импульсов АЭ.....	74
3.2.1. Выполнение основных законов сейсмичности.....	74
3.2.2. Классификация импульсов АЭ по параметру волновой формы $WI$ .....	86
3.2.3. Эволюция межблокового контакта по данным о параметрах импульсов АЭ.....	93
3.2.4. Применение алгоритма случайный лес для определения времени до эпизода динамического скольжения.....	102
Выводы к Главе 3.....	104
ГЛАВА 4. АДАПТАЦИЯ МЕТОДА КЛАССИФИКАЦИИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ВОЛНОВОЙ ФОРМЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ.....	106
4.1. Метод классификации ансамбля микросейсмических импульсов на основе алгоритма $k$ -средних .....	107
4.2. Объект исследования и используемый каталог индуцированных микросейсмических импульсов.....	112
4.2.1. Определение параметров микросейсмических событий.....	114
4.3. Результаты применения метода КЛАСИ- $k$ .....	116

4.3.1. Классификация сейсмических событий методом КЛАСИ-k на основе очаговых параметров.....	117
Выводы к Главе 4.....	121
Заключение.....	122
Список литературы.....	124

## ВВЕДЕНИЕ

Тектонические разломы, границы литологических разностей, крупные трещины, микротрещиноватость являются разномасштабными проявлениями нарушенности земной коры. Именно дискретность является главной особенностью структуры массива горных пород, которая определяет закономерности накопления упругой энергии деформации и её реализации.

В дискретном массиве горных пород основным механизмом реализации накопленной энергии упругой деформации является фрикционное скольжение вдоль нарушений сплошности (Кочарян, 2016; Scholz, 2019). К подобным динамическим событиям относятся тектонические землетрясения, обрушения склонов, крупные горные удары и землетрясения, инициированные техногенной деятельностью. Говоря о фрикционном скольжении, например, тектонических разломов, долгое время предполагалось, что отдельный сегмент разлома может реализовывать накопленную энергию деформации либо посредством скольжения с постоянной скоростью – непрерывный крип, либо посредством периодически повторяющихся актов быстрого динамического проскальзывания, являющихся источником обычных землетрясений различной магнитуды. Однако за последние десятилетия были открыты и классифицированы переходные моды скольжения, при которых инициируются низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения, невулканический тремор (Peng, Gomberg, 2010; Кочарян, 2016). Появляется все больше свидетельств, что на одном и том же сегменте разлома могут быть реализованы различные моды скольжения и типы землетрясений (Frank et al., 2016; Veedu et al., 2020; Ostapchuk et al., 2020).

Экспериментальному исследованию закономерностей реализации различных режимов скольжения вдоль нарушений сплошности и разработке моделей их возникновения посвящено множество работ (Brace, Byerlee, 1966; Lockner et al., 1991; Marone, 1998; Соболев, Пономарев, 2004; Anthony, Marone, 2005; Кочарян, Новиков, 2015; Соболев и др., 2016; Bedford et al., 2022).

Незначительное изменение структуры зоны скольжения, нарушенности вмещающего массива, флюидного режима и напряженно-деформированного состояния может привести к изменению режима скольжения. Интегрально, режим скольжения определяется отношением сдвиговой жесткости сегмента разлома к жесткости вмещающего массива; вариация сдвиговой жесткости отдельных сегментов разломов является наиболее вероятным фактором, определяющим долю энергии, излучаемую при землетрясении (Leeman et al., 2016; Kocharyan et al., 2017).

Подготовка и инициирование актов динамической неустойчивости в массиве горных пород сопровождается увеличением поврежденности на микро-, мезо- и макроуровнях. При формировании структурных дефектов излучаются упругие колебания в широком диапазоне частот. В этой связи для контроля напряженного состояния массива широко используются сейсмические и акустические методы контроля (Захаров, 2002; Лавров, Шкуратник, 2005; Опарин и др., 2013; Гиляров и др., 2014; Востриков и др., 2016; Dixon et al., 2018; Ostapchuk et al., 2020; Bolton et al., 2019, Смирнов и др., 1995; Патонин и др., 2018; Шкуратник, Вознесенский, 2009). Выявление области формирования динамической подвижки и контроль её развития является комплексной задачей, полного решения которой в ближайшее время ожидать не приходится. В настоящее время не существует инструментальных методов, позволяющих измерить действующие напряжения или статическую жесткость в зоне готовящейся динамической подвижки (Rebetsky et al., 2016; Frank et al., 2016; Brodsky et al., 2020; Trugman, Ross, 2019).

### **Актуальность работы**

В настоящее время в науках о Земле все еще остается нерешенной задача дистанционного контроля напряженно-деформированного состояния в окрестности нарушений массива горных пород. Эволюция состояния массива сопровождается излучением большого количества сейсмических и акустических импульсов, несущих информацию о протекающих в нем процессах. С целью получения информации о процессах эволюции массива широкое распространение приобрели сети мониторинга слабой сейсмичности, что особенно актуально для горнодобывающих предприятий. Однако высокий уровень технологических шумов приводит к потере большого объема информации. В этой связи для увеличения доли извлекаемой полезной информации целесообразной является разработка методов, основанных на регистрации и определении параметров сейсмических и акустических импульсов.

**Целью диссертации** является разработка научных основ метода сейсмоакустического контроля режима деформирования тектонических нарушений на основе анализа параметров излучения, сопровождающего развитие скольжения по разломам и трещинам.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Проведение акустоэмиссионных лабораторных экспериментов, в которых реализуются различные режимы межблокового скольжения.
- Статистический анализ данных лабораторных экспериментов.
- Разработка метода классификации импульсов акустической эмиссии и установление закономерностей излучения при подготовке и реализации разных режимов скольжения.
- Анализ микросейсмичности, индуцированной массовыми взрывами в окрестности тектонического разлома на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии.

**Научная новизна результатов, полученных в диссертации,** заключается в обосновании нового метода сейсмоакустического контроля режима деформирования тектонических нарушений на основе разработанной методики выделения в ансамбле излучаемых сейсмических и акустических импульсов подмножеств, которые характеризуются различными скейлинговыми соотношениями. Показано, что закономерные вариации масштабных соотношений обусловлены изменением напряженно-деформированного состояния в окрестности структурного нарушения массива горных пород и могут являться прогностическим признаком динамических подвижек разного типа. В лабораторных экспериментах установлена связь между параметрами акустической эмиссии, кинематическими и прочностными характеристиками структурного нарушения.

**Практическая значимость** заключается в разработке методики применения интеллектуального анализа к исследованию сейсмоакустических данных. Разработанные методы могут быть использованы при проведении сейсмоакустического мониторинга в ходе подземной разработки месторождений полезных ископаемых, а также при обработке результатов сейсмических наблюдений, проводимых в окрестности разломных зон. Совместное использование разработанного метода классификации сейсмоакустических импульсов КЛАСИ-k в совокупности с ансамблевыми методами машинного обучения может эффективно описывать деформационные процессы в зоне тектонических нарушений и осуществлять успешный контроль их состояния на основе анализа относительно коротких временных интервалов.

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию закономерностей излучения сейсмоакустических импульсов при деформационных процессах в массиве горных пород.



**Защищаемые положения:**

1. При деформировании разлома или трещины закономерности излучения акустической эмиссии определяются структурными и фрикционными свойствами зоны скольжения.
2. Разработанный метод классификации импульсов акустической эмиссии, основанный на анализе параметра волновой формы  $WI$ , позволяет разделить совокупность регистрируемых сигналов на два подмножества, характеризующихся различными скейлинговыми соотношениями. Закономерные временные вариации  $b$ -value подмножества импульсов с  $WI > 0,1$  соответствуют циклам подготовки и реализации эпизодов динамического скольжения межблокового контакта и имеют прогностическую способность.
3. Предложенный подход к анализу данных акустической эмиссии позволяет по коротким временным интервалам восстановить основные параметры динамики деформирования межблокового контакта.
4. Разработанный алгоритм КЛАСИ-к позволяет выделять в ансамбле индуцированных микросейсмических событий подмножества, отличающиеся по величине приведенной сейсмической энергии.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается значительным объемом экспериментальных данных, полученных с использованием современных апробированных методик измерений и обработки данных, тщательным анализом имеющихся опубликованных сведений, сопоставлением результатов исследования с существующими представлениями, результатами численных расчетов и аналитическими оценками.

### **Личный вклад автора**

Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены соискателем лично. При работе над диссертацией автор, под руководством научного руководителя, принимал участие в постановке и проведении лабораторных экспериментов, получении и обработке экспериментальных данных, обработке и анализе данных шахтной микросейсмичности. Автором лично разработан алгоритм КЛАСИ-k классификации ансамбля микросейсмических импульсов методом k-средних.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационного исследования были доложены лично автором на 12 всероссийских конференциях:

Триггерные эффекты в геосистемах (Москва, 2019, 2022), конференциях ИФЗ РАН Молодежная тектонофизическая школа-семинар (Москва, 2019, 2021), Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, 2019, 2020, 2021), III Всероссийская акустическая конференция (Санкт-Петербург, 2020), Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов (Петропавловск-Камчатский, 2021), XXIII Уральская молодежная научная школа по геофизике (Екатеринбург, 2022), Всероссийская научная конференция «Добрецовские чтения: наука из первых рук» (Новосибирск, 2022), XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 2023).

По теме диссертации автором опубликовано 16 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах (входящих в перечень ВАК), 9 в научных сборниках и трудах конференций.

Исследования проводились в рамках работ по Государственному заданию ИДГ РАН, проектов Российского фонда фундаментальных исследований №№ 17-05-01271 и 20-35-90074, проектов Российского научного фонда №№ 20-77-10087 и 22-17-00204.

**Объем и структура работы:** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 144 страницах, включая 57 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 208 наименований.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. А.А. Остапчуку за основную идею, поддержку и постоянное внимание к работе, д.ф.-м.н., проф. Г.Г. Кочаряну за помощь в работе и ценные замечания при проведении исследований, к.ф.-м.н. Д.В. Павлову за помощь при проведении лабораторных экспериментов и к.ф.-м.н. А.Н. Бесединой за помощь при обработке и анализе данных шахтной микросейсмичности. Отдельно автор благодарит весь коллектив лаборатории Деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН за поддержку, обсуждение результатов и замечания, высказанные в процессе диссертационного исследования.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Процесс деформирования и эволюции состояния массива горных пород происходит на разных масштабных уровнях – от образования и роста трещин на микроуровне до скольжения по разломам и крупным трещинам на макроуровне. Любые структурные изменения сопровождаются излучением упругой энергии, которые регистрируются аппаратурой и определяются как акустические и/или сейсмические события, охватывающее масштаб от единиц микрометров до сотен метров (рисунок 1.1). Смещения по разлому достигают масштабов сотен-тысяч километров (Кочарян, Кишкина, 2020; Кочарян, 2016). Частотный диапазон, используемый в сейсмологии, ограничивается снизу долями Герц. С другой стороны, формирование трещин на микроуровне может сопровождаться излучением импульса акустической эмиссии (АЭ) с частотой до  $10^8$  Гц (Куксенко и др., 1982). Долгое время существовал масштабный разрыв между лабораторными исследованиями эволюции микротрещиноватости и природными землетрясениями. Однако этот пробел был преодолен благодаря недавним разработкам в исследованиях микросейсмичности (МС), вызванной горными работами (Kwiatek et al., 2010; Беседина, др., 2021). Диапазон микросейсмических измерений, используемых для шахтного мониторинга, лежит в диапазоне между сейсмологическим и акустоэмиссионным частотными диапазонами.

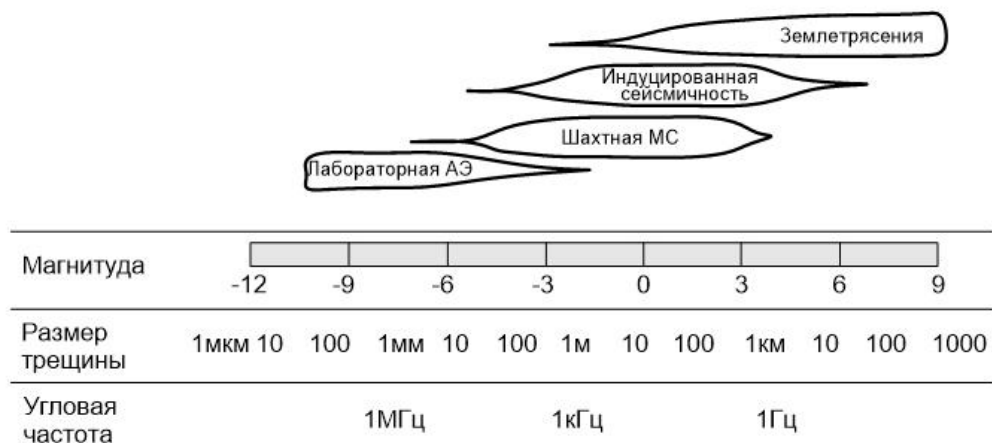


Рисунок 1.1 – Схематическая диаграмма, показывающая диапазоны основных характеристик событий, соответствующих сейсмологическим наблюдениям, индуцированной сейсмичности, шахтной микросейсмичности (МС), а также лабораторным акустоэмиссионным экспериментам (Lei, Ma, 2014)

## 1.1. Сейсмические проявления различных режимов скольжения по тектоническим разломам

Спектр режимов скольжения по тектоническим разломам охватывает континуум от быстрых динамических разрывов до событий медленного скольжения и непрерывного крипа (Peng, Gomberg, 2010; Кочарян, 2016; Burgmann, 2018). Типичная скорость асейсмического крипа по разломам составляет величину порядка нескольких сантиметров в год (Касахара, 1985). Возникновение определенного режима скольжения определяется неоднородностью распределения фрикционных свойств вдоль поверхности разлома и жесткостью сегмента разлома.

Условно, весь спектр скольжения по разломам разделяется на несколько групп. В качестве первой группы следует выделить динамические разрывы, при которых происходят нормальные землетрясения. Для таких событий характерны скорости скольжения до 5 м/с, что порождает интенсивные высокочастотные сейсмические волны (Кочарян, 2016; Burgmann, 2018). Длительность подвижки изменяется от миллисекунд до десятков секунд, а сейсмический момент  $M_0$  пропорционален кубу длительности события  $M_0 \sim T^3$  (Houston, 2001; Кочарян, 2016).

Наиболее медленной динамикой характеризуются, так называемые, события медленного скольжения (англ. slow slip events (SSE)). Они имеют настолько малые скорости скольжения, что излучение, сопровождающее это скольжение практически не регистрируется аппаратурой. В работе (Ide et al., 2007) впервые показано отличие скейлинга событий SSE от обычных землетрясений: сейсмический момент  $M_0$  пропорционален длительности события  $T$ :  $M_0 \sim T$ , причем продолжительность скольжения может варьироваться от десятков секунд до нескольких недель (Burgmann, 2018).

Переходные режимы скольжения сопровождаются инициированием «медленных» землетрясений, среди которых выделяют низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения. Для низкочастотных землетрясений (англ. low frequency earthquake (LFE)) характерны скорости смещения 0,01-0,1 м/с.

Предположительно, впервые такой тип землетрясений было детально описан в работе (Kanamori, Hauksson, 1992), где отмечено, что ни Р, ни S-волна не выделяются, а длительность событий аномально большая для такой магнитуды. Как правило, для такого типа землетрясений длительность подвижки на порядок выше, чем для нормальных землетрясений (Кочарян, 2016). Очень низкочастотные землетрясения (англ. very low frequency earthquake (VLFE)) характеризуются тем, что амплитуда излучаемого сигнала практически не растет с масштабом, а длительность в очаге может достигать сотен секунд.

Кроме отличия в физических характеристиках, различные типы землетрясений отличаются волновыми формами излучаемых импульсов (рисунок 1.2). Так, обычные землетрясения отличаются резким вступлением и разделением Р- и S- волн, в то время как тремороподобные импульсы и очень низкочастотные землетрясения характеризуются большей длительностью и плавностью нарастания амплитуды.

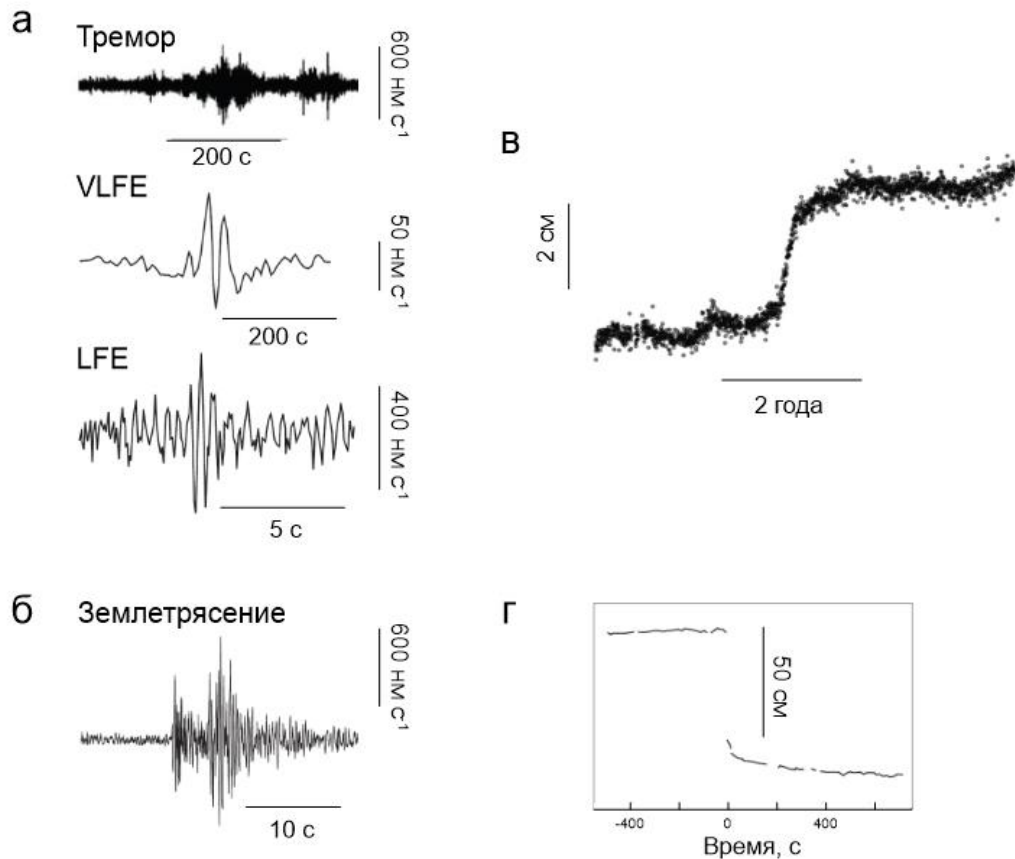


Рисунок 1.2 – Примеры сейсмических и геодезических записей при различных режимах скольжения (по (Peng, Gomberg, 2010) и (Nishikawa et al., 2023)):

а) сейсмические события, зарегистрированные в Японии. Тремор отфильтрован в диапазоне частот 2-8 Гц, VLFE в диапазоне 0,005-0,05 Гц;

б) землетрясение  $M_{1,9}$  в Восточном Вашингтоне; в) GPS данные горизонтальных смещений в направлении  $N130^{\circ}E$  при длиннопериодном SSE, зарегистрированного в проливе Бунго, Япония в 2003г.; г) GPS данные смещения при землетрясении  $M_{8,4}$  в Перу в 2001г.

Стоит также отметить, что сейсмические события с различным скейлингом длительность-магнитуда были выделены при проведении наблюдений за шахтной сейсмичностью. Наиболее вероятной причиной отличий в скейлинге являются вариации скорости распространения динамического разрыва (Yu, 2021).

## 1.2. Основные источники импульсов акустической эмиссии

Импульсы акустической эмиссии могут инициировать внутренние процессы, которые сопровождаются изменением локальной структуры материала при изменении внутренних напряжений, и характеризуются достаточно высокой скоростью распространения. Основными источниками АЭ являются (Грешников, Дробот, 1976; Лавров, Шкуратник, 2005 и др.):

- перемещение на границы зерен дислокации и их скоплений;
- двойникование;
- фазовые превращения;
- образование трещин;
- схлопывание пор;
- процессы трения и др.

Существуют условия, когда АЭ возникает от внешних источников: локальное воздействие вследствие конечной скорости распространения возмущений. Таким образом, основным условием возникновения АЭ при внешнем воздействии является его локальность.

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что макроскопическое разрушение при сдвиге в горных породах и других хрупких материалах не происходит за счет роста единственной трещины. Скорее, этому предшествует очень сложная повсеместная эволюция микроповреждений, предшествующих образованию макротрещины (Соболев, Кольцов, 1980; Виноградов, 1980; Cox, Scholz, 1988; Lockner et al., 1991; Sobolev et al., 1996; Lei et al., 2004; Вознесенский и др., 2010; Дамаскинская и др., 2017, Соболев, 2019). Динамика разрушения и эволюция микроповреждений в напряженных материалах были широко изучены в лаборатории с помощью ряда методов, включая прямое наблюдение за образцами с помощью сканирующей электронной микроскопии (Zhao, 1998; Дамаскинская и др., 2018; Renard et al., 2017) или оптической микроскопии (Wong, 1985; Cox, Scholz, 1988), выполняемой во время или после испытания на разрушение, и мониторинг пространственно-временного



распределения событий АЭ, вызванных эволюцией микротрещиноватости (Lockner et al. 1991; Lei et al., 1992; Kuksenko et al., 1996; Мубассарова и др., 2019; Вознесенский, Тавостин, 2005). Количество импульсов АЭ пропорционально количеству растущих трещин, а ее амплитуда пропорциональна длине приращений длины трещин в породе (Куксенко и др., 1983; Main et al. 1989, 1993; Sun et al. 1991).

В лабораторных исследованиях закономерностей фрикционного скольжения по трещинам отмечается излучение импульсов АЭ различной волновой формы, которые качественно напоминают обычные и медленные землетрясения и тремор (Voisin et al., 2008; Zigone et al., 2011; Остапчук и др., 2016; Bolton et al., 2022).

В работе (McLaskey et al., 2014) показано, как параметры импульсов АЭ, детектированных при лабораторном испытании образцов горных пород, соотносятся с параметрами природной сейсмичности и сейсмичности, инициированной горными работами. Переход от лабораторных данных АЭ к полевым условиям неразличим и указывает на первостепенную роль локального напряженного состояния и свойств горной породы (Goodfellow, Young, 2014).

### 1.3. Методы детектирования сейсмоакустических событий

Детектирование события – это идентификация различных типов упругих колебаний (продольных или Р-волн, поперечных или S-волн, волн Рэлея, волн Лява и т.д.) инициированных различными источниками, которые поступают на регистрирующие датчики в определенные моменты времени.

Идентификация прихода определенной фазы колебаний является задачей, предоставляющей важную геофизическую и сейсмологическую информацию, и которая традиционно часто выполняется вручную. Существует тесная взаимосвязь между методами детектирования в сейсмологии и в анализе АЭ, поскольку в данных областях важно определение точного времени начала регистрируемого события, а огромный объем данных, привел к необходимости автоматизировать этот процесс.

Существует большое количество методов детектирования событий, таких как статистика высокого порядка (Yung, Ikelle, 1997; Magotra et al., 1989), вейвлет-преобразование (Anant, Dowla, 1997), нечеткая логика (Chu, Mendel, 1994), полярность волны (Jurkevic, 1988), особое место занимают алгоритмы детектирования, основанные на использовании алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей (Zao, Takano, 1999; Wang, Teng, 1995). Далее будут представлены наиболее распространенные методы, использующиеся при детектировании как сейсмических, так и акустоэмиссионных импульсов.

### 1.3.1. Метод детектирования STA/LTA

Один из самых распространенных методов, используемых для выделения сейсмоакустических импульсов, является метод STA/LTA (краткосрочное среднее значение / долгосрочное среднее значение, (англ. short-term average / long-term average)) (Allen, 1978). Идея, лежащая в основе метода STA/LTA – превышение соотношения определенного заданного порога  $R = STA/LTA$ , где

$$STA = \frac{1}{N_S} \sum_{n=1}^{N_S} y_n, \quad (1.1)$$

$$LTA = \frac{1}{N_L} \sum_{n=-N_L}^0 y_n, \quad (1.2)$$

где  $STA$  – это краткосрочное среднее значение, рассчитанное в окне шириной  $N_S$ , а  $LTA$  – долгосрочное среднее значение, рассчитанное в окне шириной  $N_L$ . Величина  $R$  вычисляется непрерывно в каждый момент времени  $t$ . Параметр  $y_t$  представляет собой характеристическую функцию  $y_t = g(x_t)$ , которая рассчитывается таким образом, что усиливает изменения сигнала. Как правило, такая функция включают в себя энергию  $y_t = x_t^2$  (McEvelly & Majer, 1982), абсолютное значение  $y_t = |x_t|$  и функцию огибающей  $y = \sqrt{h_t^2 + h(x_t)^2}$ , где  $h$  обозначает преобразование Гильберта (Earle, Shearer, 1994).  $STA$  измеряет мгновенный уровень амплитуды (или другой характеристической функции), в то время как  $LTA$  отражает текущую среднюю амплитуду шума (или другой характеристической функции).

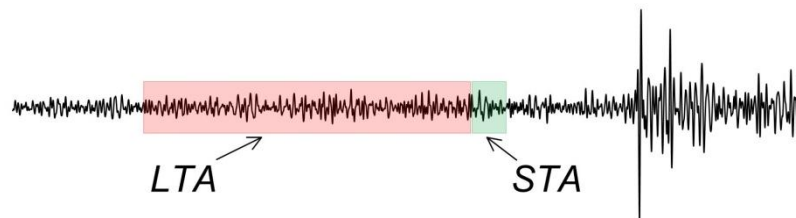
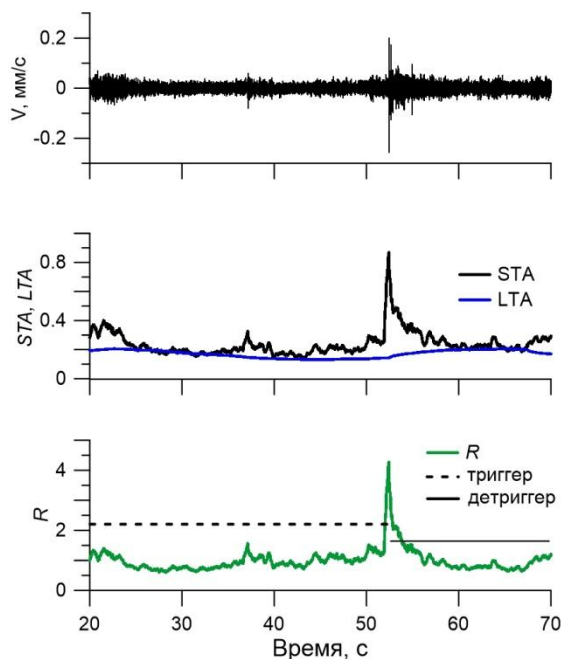


Рисунок 1.3 – Схема расчета вступления импульса методом LTA/STA. Красным цветом выделена часть, используемая для широкого окна (LTA), зеленая – для короткого окна (STA)

Превышение параметра  $R$  заданного порога триггера соответствует первому вступлению импульса. Триггер активен до тех пор, пока соотношение  $R$  не упадет ниже порога детриггера (Trnkoczy, 2002). Уровни для триггера и детриггера могут быть разными, но, как правило, они выбираются равными друг другу и называются порогом обнаружения, а их величина больше 1 (обычно 3-5). Несмотря на простоту метода, у него есть и свои недостатки. Например, необходимо тщательно подбирать параметры, такие как длины окон (как короткого, так и длинного окна) и пороговый уровень срабатывания триггера. При уменьшении длины короткого окна ( $STA$ ) возрастает чувствительность алгоритма к кратковременным всплескам, и как следствие, возрастает количество ложных срабатываний. Следует, чтобы длина короткого окна ( $STA$ ) была больше, чем самые короткие ожидаемые события. Пропуски малых событий возможны при слишком малых значениях длинного окна ( $LTA$ ). Слишком низкий порог, определяющий вступление, может привести к ложным срабатываниям, в то время как высокий порог может привести к пропуску слабых событий.

Таким образом, этот алгоритм детектирования является достаточно надежным и минимизирует пропуски событий и ложные срабатывания, но требует аккуратной настройки параметров (Trnkoczy, 2002), а наиболее важными параметрами алгоритма  $STA/LTA$  являются длины окон  $STA$  и  $LTA$  ( $N_S$  и  $N_L$ ) и порог обнаружения.



*Рисунок 1.4 – Принцип алгоритма детектирования импульсов методом STA/LTA. а) зарегистрированный сигнал; б) вариации значений рассчитываемых величин в широком – LTA (синий) и узком – STA (черный) окне; в) вариация величины  $R$  (зеленый) и пример установления величины триггера (пунктирная черная) и детриггера (сплошная черная)*

### 1.3.2. Метод детектирования по порогу

Довольно простым и распространенным методом дискриминации событий импульсов АЭ является фиксация превышения нарастающим фронтом принимаемого сигнала установленного порога дискриминации. При таком методе началу сигнала соответствует моменты превышения амплитуды выбранного значения порога. Порог, по которому происходит выделение, выбирается в зависимости от уровня фоновых шумов.

Основной проблемой при использовании этого метода является надлежащий выбор порога по отношению к фоновому шуму. Выбор слишком низкого значения может привести к преждевременному срабатыванию из-за предшествующего фоновому шуму, а выбор слишком высокого значения может привести к пропуску времени фактического начала импульса (Вай, 2017). Значение порога обнаружения может быть оптимизировано для конкретных

значений отношения сигнал/шум, если оно известно заранее; однако в реальных приложениях можно ожидать широкого диапазона соотношения сигнал/шум, что неизменно подразумевает уязвимость к ошибкам измерения. Несмотря на уязвимость, данный метод является наиболее распространенным при детектировании импульсов АЭ.

Принцип детектирования импульса по порогу энергии аналогичен методу детектирования по порогу амплитуды, с той разницей, что порог дискриминации задается для потока энергии  $\Pi(t)$  рассчитанного в скользящем окне шириной  $\Delta t$  в рабочем частотном диапазоне регистрирующего датчика:

$$\Pi(t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_t^{t+\Delta t} \frac{A(t_i)^2}{f_s}, \quad (1.3)$$

где  $A$  – зарегистрированная амплитуда сигнала АЭ, прошедшая процедуру фильтрации,  $f_s$  – частота дискретизации.

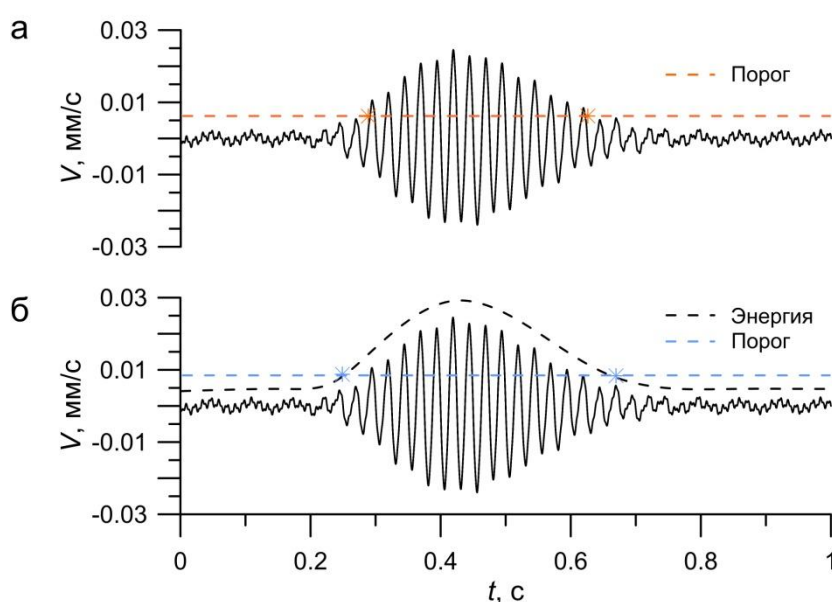


Рисунок 1.5 – Детектирование импульса по порогу амплитуды (а) и энергии (б). Черной сплошной линией показан зарегистрированный сигнал, пунктирной желтой линией показан порог по амплитуде (а), пунктирной черной линией показан поток энергии (б), синей пунктирной линией – порог по потоку энергии. Звездочками показаны моменты начала и окончания импульса

### 1.3.3. Информационный критерий Акаике

Для определения момента вступления импульса также используются информационные критерии, среди которых можно выделить информационный критерий Акаике (*AIC*) (Carpinteri et al., 2012). В основе метода лежит предположение о том, что сигнал АЭ можно разделить на отдельные интервалы, каждому из которых соответствует определенный авторегрессионный (АР) процесс (Sleeman, van Eck, 1999). *AIC* используется для определения порядка АР процесса, описывающего временной ряд. Момент времени, где *AIC* принимает минимальное значение, соответствует оптимальному разделению на интервалы, характеризующие различные стационарные процессы, и интерпретируется как момент вступления. В двухинтервальной модели сигнала *AIC* рассчитывается для скользящего окна длиной  $N$  точек и является функцией момента  $k$ , разделяющего два интервала (Maeda, 1985):

$$AIC(k) = k \lg S(A[1, k]) + (N - k - 1) \lg S(A[k + 1, N]), \quad (1.4)$$

где  $k$  – момент времени, разделяющий два интервала,  $S(A)$  – дисперсия ряда. Пример временной вариации параметра *AIC* представлен на рисунке 1.6.

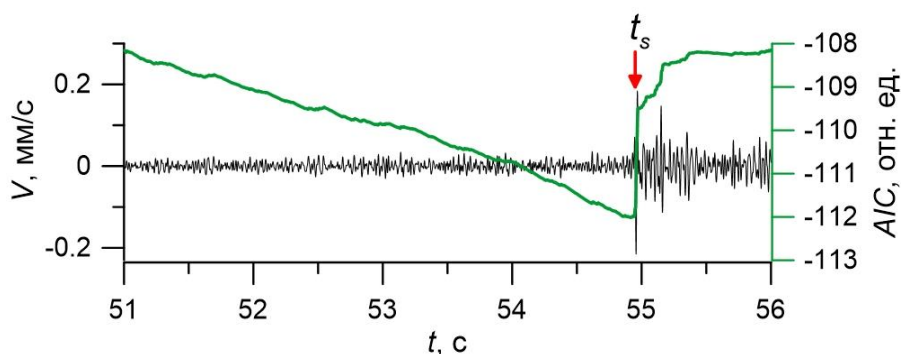


Рисунок 1.6 – Пример определения вступления импульса с помощью критерия Акаике. Черным цветом представлен пример зарегистрированного сигнала, зеленым – вариации критерия Акаике

## 1.4. Некоторые закономерности излучения сейсмоакустических событий при деформировании и разрушении горных пород

Многие физические процессы, исследуемые в лабораторных экспериментах – разрушение горных пород, фрикционное проскальзывание блоков горных пород, деформирование слоев гранулированных сред – статистически описываются соотношениями, подобными тем, что используются для статистического описания природной сейсмичности (Смирнов и др., 1995; Lockner et al., 1991; Hirata, 1987; Lei, 2003; Ojala et al., 2004; Соболев, Пономарев, 2003; Hirata et al., 1987; Lei et al., 1992; Дамаскинская и др., 2017, 2018; Пантелеев, 2020; Вознесенский, Тавостин, 2005).

### 1.4.1. Закон Гутенберга-Рихтера

В лабораторных АЭ экспериментов по деформированию и разрушению напряженных образцов горных пород, справедлив аналог закона повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера (Gutenberg, Richter, 1949; Mogi, 1962; Scholz, 1968), связывающий зависимость частоты появления землетрясений от их магнитуды  $M$ :

$$\lg(N) = a - bM, \quad (1.5)$$

где  $N$  – количество событий магнитудой  $M$  или больше, произошедших в единице площади и в единицу времени, а  $a$  и  $b$  – константы.

Параметр  $b$  (*b-value*) в сейсмически активных регионах близок к 1, а приведенное выше соотношение выполняется при магнитудах событий, превышающих нижнюю предельную магнитуду  $M_c$  (представительность каталога), которую способна обеспечить сейсмическая группа.

Начиная с работы (Mogi, 1962), многие лабораторные работы были мотивированы ожиданием того, что предшествующие изменения величины *b-value* могли быть результатом изменения напряжения и, таким образом, могли быть использованы для прогнозирования землетрясений и микросейсмических событий в шахтах. Действительно, лабораторные исследования событий АЭ



последовательно показывали снижение *b-value* с увеличением напряжения во время деформации неповрежденных образцов (Lockner et al., 1991; Lei, 2006; Lei, Satoh, 2007).

### 1.4.2. Прямой и обратный закон Омори

После сильных землетрясений наблюдается всплеск числа последующих событий, спадающий со временем. Закон Омори (Utsu, 1961) представляет собой эмпирический степенной закон, связывающий активность афтершоков со временем, прошедшим после главного события:

$$n(t) = \frac{K}{(t_{\text{после}} + c)^p}, \quad (1.6)$$

где  $t_{\text{после}}$  – время после основного толчка,  $n(t)$  – интенсивность потока афтершоков в момент времени  $t$ ,  $K$ ,  $c$ ,  $p$  – положительные параметры модели. Параметр  $K$  зависит от нижнего порога магнитуд рассматриваемых афтершоков и называется продуктивностью. Значение *p-value* отражает скорость снижения активности и обычно находится в диапазоне от 0,6 до 2,5 с глобальным средним значением порядка 1 (Utsu et al., 1995).

Перед сильными землетрясениями также наблюдается рост числа слабых землетрясений, возрастающий по мере приближения к моменту основного толчка. Форшоковая активность  $R$  перед главным событием подчиняется аналогичному степенному обратному закону Омори (Papazachos, 1973):

$$n(t) = n_{\min} + \frac{R}{(t_{\text{до}} - t_s)^{p^*}}, \quad (1.7)$$

где  $t_{\text{до}}$  – время до основного толчка,  $R$  – продуктивность форшоковой последовательности,  $n_{\min}$  – минимальный уровень активности. Параметры  $R$ ,  $t_s$  и  $p^*$  могут быть определены из наблюдений за форшоковой активностью до возникновения основного толчка.

При сдвиговом деформировании слоя гранулированного материала наблюдается степенной рост активности АЭ, который обусловлен микроподвижками по границам зерен (Johnson et al., 2013; Остапчук и др., 2016). При разрушении консолидированных сред рост активности обусловлен нелинейным увеличением числа микротрещин и их взаимодействием (Соболев, Пономарев, 2003). При моделировании афтершоковых последовательностей на ненарушенных образцах горных пород было выявлено несколько типов зависимости параметров релаксации активности АЭ от уровня действующих напряжений (Смирнов и др., 2019).

Также наблюдаются схожие картины пространственной локализации гипоцентров событий. Исследования локализации гипоцентров АЭ в гомогенной породе образцов были представлены в большом числе работ (Lockner, Byerlee, 1980; Nishizawa et al., 1982; Yanagidani et al., 1985; Hirata et al., 1987; Lei et al., 1992). Показан переход от случайного распределения к пространственной группировке гипоцентров, распределение которых обладает фрактальными свойствами. Гипоцентры АЭ, полученные при испытании образца гранита на ползучесть при трехосном сжатии, показывают уменьшение фрактальной размерности (Hirata et al., 1987). В природе перед сильными землетрясениями наблюдаются особенности пространственной локализации слабой сейсмичности, проявляющиеся в формировании цепочек эпицентров слабых и средних землетрясений (Shebalin, Keilis-Borok, 1999; Шебалин, 2005).

## 1.5 Контроль сейсмичности в шахтах

Добыча углеводородов, заполнение водохранилищ, использование геотермальной энергии, разработка месторождений полезных ископаемых и интенсификация добычи полезных ископаемых приводят к появлению или активизации сейсмических процессов – техногенной сейсмичности (Адушкин, Турунтаев, 2005). Риск возникновения индуцированных сейсмических событий значительной магнитуды существенно возрастает при интенсификации разработок месторождений полезных ископаемых (Адушкин и др., 2016), использовании новых технологий извлечения твердых и жидких полезных ископаемых (Ellsworth, 2013) и закачки флюида (Nicholson, 1992).

Основными направлениями в области изучения техногенной сейсмичности являются вопросы прогноза, оценки риска негативных последствий и предупреждения появления катастрофических сейсмических событий (Турунтаев и др., 2015). Ведение горных работ в условиях повышенного горного давления может повлечь за собой внезапные выбросы породы и газа, горные и горно-тектонические удары (Гиляров и др., 2014). Разрабатываются методики, способствующие минимизации сейсмических рисков при ведении крупномасштабных горных работ (Козырев и др., 2018). Для получения информации о пространственном расположении активно деформирующихся областей горного массива и об изменении его напряженно-деформированного состояния требуется регистрация и анализ слабых сейсмических событий (Адушкин, Турунтаев, 2015).

В русскоязычной литературе техногенную сейсмичность, как правило, разделяют на индуцированную (наведенную), которая возникает в результате техногенной деятельности, и инициированную (триггерную), когда деятельность человека вносит лишь малую долю в изменение напряженного состояния среды (Адушкин и др., 2017).

Источниками крупных техногенно-тектонических землетрясений являются подвижки по уже существующим разломным зонам, а энергия этих землетрясений

может существенно превышать энергию антропогенного воздействия в этом регионе (Сырников, Тряпицын, 1990; Адушкин, 2016). Наиболее крупные события обычно привязаны к существующим в горном массиве зонам тектонических нарушений и могут происходить с задержкой по времени и на значительном удалении от непосредственного участка проведения горных работ. Интенсивность инициированной сейсмичности зависит от таких параметров, как степень блочности, присутствие неоднородности, напряженно-деформированное состояние массива и его геолого-тектонических свойств (Kocharyan et al., 2022).

При разработке месторождений также наблюдаются сейсмические события с меньшей магнитудой, которые непосредственно вызваны техногенной деятельностью и происходят вблизи участков ведения горных работ (Zmushko et al., 2013). Расположение очагов таких событий приурочено к зонам концентрации напряжений или разгруженным областям массива (Gibowicz, Kijko, 1994; Urbancic, Trifu, 2000; Young et al., 2004; Orlecka-Sikora et al., 2012). Такие события называются индуцированными, а их источниками могут выступать образование трещин или подвижки по уже существующим трещинам.

Оценка параметров шахтной сейсмичности осуществляется на основании подходов, развитых в сейсмологии (Беседина и др., 2021; Gibowicz, Kijko, 1994; Kwiatek et al., 2011). Как правило, проводится оценка очаговых параметров сейсмических событий, основными из которых являются излученная сейсмическая энергия  $E_s$  и сейсмический момент  $M_0$  (Беседина и др., 2015; Gibowicz, Kijko, 1994), и как следствие – их отношение – приведенная сейсмическая энергия  $e = \frac{E_s}{M_0}$ . Развитие методов анализа сейсмических записей и усовершенствование инструментальной базы сейсмических каналов позволяет получать детальную информацию об очаговых процессах землетрясений разного масштаба.

Особое внимание в последние годы уделяется пассивному сейсмическому мониторингу, при котором с помощью чувствительной сети сейсмометров регистрируются слабые сейсмические события. В результате увеличения качества

наблюдений, в частности снижение порога чувствительности системы регистрации, возможна регистрация событий вплоть до магнитуд  $M_w = -4,1$  (Kwiatek et al., 2011).

На параметры и характеристики ансамбля излучаемых сейсмических событий оказывают влияние особенности геологического строения массива горных пород и технологический процесс его разработки. Например, для рудной шахты в Финляндии отмечены различные скейлинговые соотношения между сейсмическим моментом и угловой частотой источника для событий, отличающихся пространственной приуроченностью (Oye et al., 2005). На золоторудной шахте в Южной Африке выделяются два класса событий (Richardson, Jordan, 2002). К первому относятся сейсмические события малой магнитуды ( $<1$ ), непосредственно связанные с фронтом ведения горных работ; второй класс событий связан с подвижками по существующим структурным нарушениям – разломам и дайкам и характеризуется большими значениями магнитуд. Для событий второго класса длительность  $T$  пропорциональна кубическому корню из сейсмического момента  $M_0$ , что характерно для нормальных землетрясений. Ряд исследователей для слабых природных землетрясений отмечают наличие самоподобия ( $E_s \sim M_0$ ) (Ide, Beroza, 2001; Matsuzawa et al., 2004), в то время как для техногенной сейсмичности наклон регрессионных зависимостей  $E_s(M_0)$  принимает другие значения (Маловичко, Маловичко, 2010; Gibowicz et al., 1991). Для шахты в Канаде ( $-2,2 < M < -0,4$ ) (Urbancic, Young, 1993) и в Китае ( $0,1 < M < 4,2$ ) (Hua et al., 2013) получены одинаковые регрессионные зависимости с высоким показателем степени в масштабном соотношении  $E_s \sim M_0^{1.63}$ . Для шахты в Польше при проходке участка шахты в гранитах ( $-3,6 < M < -1,9$ ) (Gibowicz et al., 1991) справедливо соотношение  $E_s \sim M_0^{1.33}$ . В Германии, при анализе сейсмических событий с магнитудами  $-2 < M < 0$  получена зависимость энергии от масштаба  $E_s \sim M_0^{1.90}$  (Jost et al., 1998). Анализ очаговых параметров слабой сейсмичности может дать важную дополнительную информацию о склонности участка к динамическим

подвижкам по разломам и крупным тектоническим трещинам (Беседина, Кочарян, 2023). Однако по причине практически постоянных шумов, связанных с работой техники в исследуемых зонах, ряды наблюдений зачастую оказываются слишком короткими для анализа происходящих процессов. По этой причине актуальной задачей является разработка подходов к анализу коротких рядов сейсмических данных с целью увеличения полученной из них информации о состоянии системы.

## **1.6. Применение методов машинного обучения для анализа сейсмических и акустических данных**

В условиях, когда динамика системы не может быть полностью описана системой дифференциальных уравнений, или в случаях, когда физика процесса до конца не ясна, в последние годы стали применяться алгоритмы машинного обучения (МО) с целью моделирования и предсказания эволюции состояния динамической системы (Bergen et al., 2019). Преимущество этих методов заключается в возможности обрабатывать большие многомерные массивы данных, выявлять наиболее информативные параметры процесса и автоматически определять лучшие решения из всех возможных. Технология машинного обучения активно используется при исследовании динамики разломных зон, как в лабораторных экспериментах, так и в природе (Ren et al., 2020).

В широком смысле машинное обучение – это семейство методов для автоматического обнаружения особенностей в массиве данных и выявления неявных связей в них. Методы МО позволили добиться значительных успехов в автоматизированной обработке сигналов и распознавании образов (Bergen, 2019; Kong, 2018). Методы МО используются для предсказания времени до целевого события, детектирования импульсов, а также классификации сейсмоакустических событий (Hulbert et al., 2019; Rouet-Leduc et al., 2017; Pu et al., 2019; Mousavi et al., 2016; Sharma, Arora, 2005).

Лабораторный сейсмический режим является идеальным объектом для исследования методами МО, поскольку в лабораторных работах данные представляются в виде длинных рядов с заданными и контролируруемыми внешними условиями. Особый интерес к задаче предсказания времени до лабораторного землетрясения подтверждается проведенным в 2017 году соревнованием, в котором приняло участие более чем 4500 команд, по созданию алгоритма, в основе которого лежали методы МО, для прогнозирования времени до лабораторного землетрясения (Johnson et al., 2021).

В общем случае методы МО можно разделить на категорию «обучения с учителем», «обучения без учителя» (англ. supervised learning и unsupervised learning), а также «обучением с подкреплением» (англ. reinforcement learning). В работах геофизической направленности наибольшее распространение имеют первые две категории методов.

При обучении «с учителем» целью является получение правила отображения входных данных на выходные с учетом помеченных пар входных и выходных данных. Таким образом, главной целью обучения «с учителем» является выработка прогноза для не встречающихся ранее или будущих данных. Под понятием «с учителем» предполагается, что имеется набор входных данных с известными выходными метками. Метки могут быть категориальными или вещественнозначными скалярами для задач классификации и регрессии соответственно.

Задачи «обучения с учителем» разделяются на два больших класса: классификации и регрессии. При классификации решается задача прогнозирования категориальной метки класса, к которой принадлежат новые данные на основе прошлых наблюдений. В задачах регрессии осуществляется прогнозирование для непрерывных результатов. Таким образом, имея несколько переменных-признаков (англ. feature) и целевую переменную (англ. target variable), необходимо найти правило отображения (взаимосвязь между ними), которое позволило бы прогнозировать результат. При «обучении без учителя» данные изначально не размечены. Задачи такого обучения состоят в том, чтобы обнаружить структуру в данных для извлечения значимой информации. Примером «обучения без учителя» является кластерный анализ (например,  $k$ -средних) или задача понижения размерности.

На рисунке 1.7 схематично показана типичная рабочая схема применения метода МО. Предварительная обработка данных требуется для обеспечения оптимальной эффективности алгоритма МО. В нее могут входить отбор наиболее значимых признаков, приведение их к одинаковому масштабу (например, в



диапазоне  $[0, 1]$ , или приведение к стандартному распределению с нулевым средним и единичной дисперсией), понижение размерности и др.

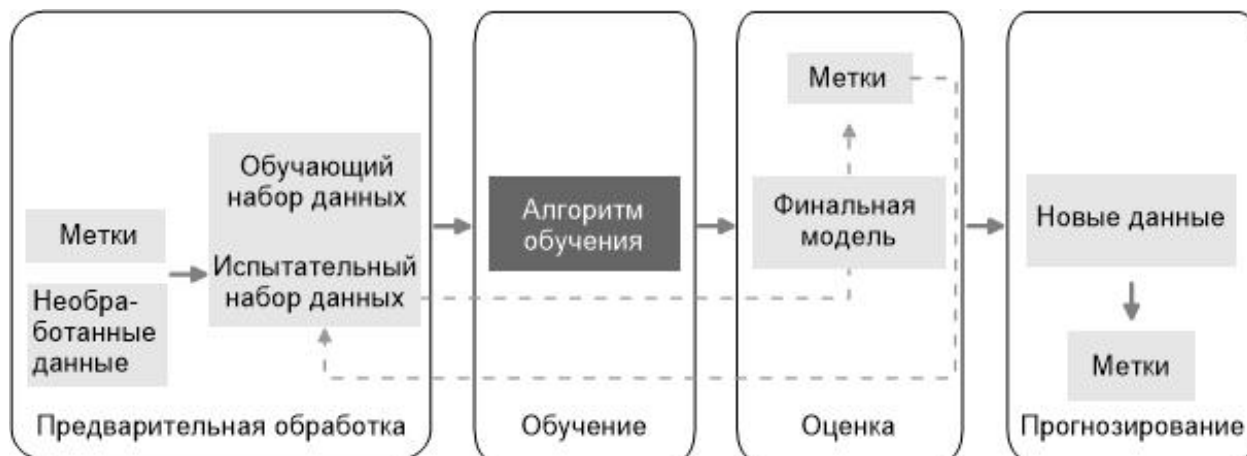


Рисунок 1.7 – Рабочий протокол для применения МО в прогнозирующем моделировании (Рашка, Мирджалили, 2020)

Схематично процесс выбора типа и алгоритма обучения МО представлен на блок схеме (рисунок 1.8), по которой в зависимости от имеющихся данных и целеполагания можно определить актуальный алгоритм МО (Kong, 2018).



Рисунок 1.8 – Блок-схема выбора подходящего алгоритма МО для имеющегося типа данных и поставленной задачи (Kong, 2018)

Для определения эффективности финальной модели МО применяется набор данных, который не использовался при обучении. Следовательно, предварительно

необходимо разбить все имеющиеся данные на обучающий (англ. training data) и тестовый (англ. test data) набор данных. После обучения алгоритма МО происходит проверка эффективности обучения на данных, на которых обучение не проводилось, для чего используются метрики оценки производительности. Например, для моделей на основе регрессии оценкой эффективности может выступать коэффициент детерминации  $R^2$  и среднеквадратичное отклонение, а для задач классификации – матрица ошибок и вычисляемые по ней параметры, например точность или полнота (Рашка, Мирджалили, 2020).

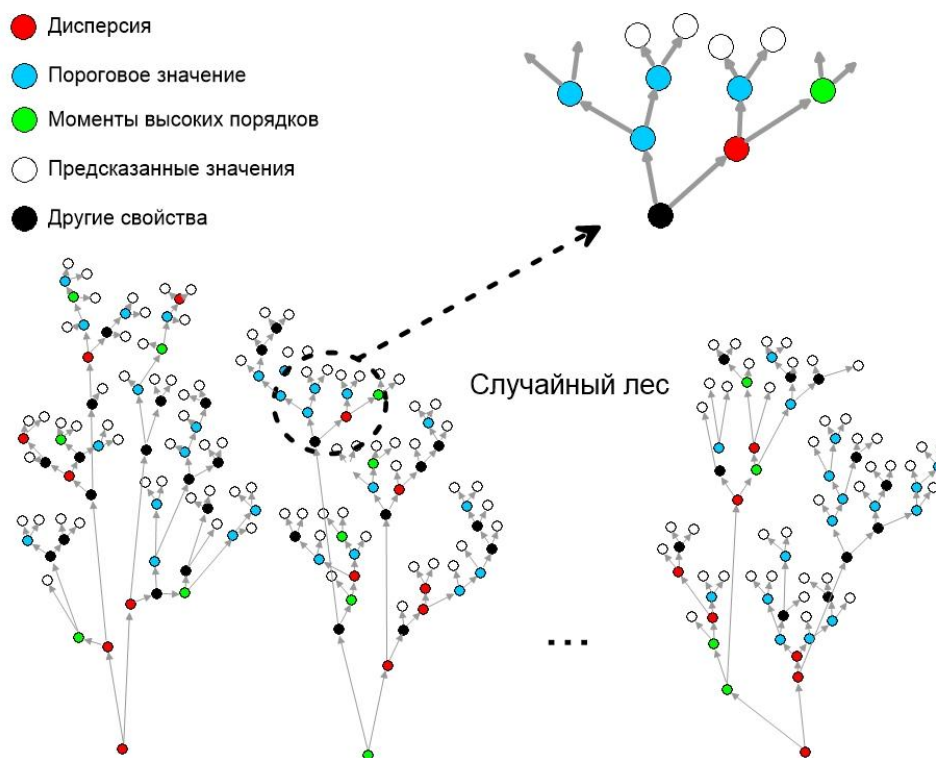
### 1.6.1. Дерево принятия решений и Случайный лес

Деревья принятия решений являются моделями обучения «с учителем» и представляют собой иерархическую древовидную структуру, которая в итоге разбивает данные, используя условное ветвление, что отличает их простотой интерпретируемости. В обучающем множестве должно быть задано целевое значение, по типу которого и определяется тип дерева: дереву классификации соответствует дискретная или качественная целевая переменная, дереву регрессии – непрерывная количественная переменная. Метод представления решающих правил включает в себя два типа элементов – узлы и листья. Все данные попадают в узел, где делятся на два подмножества. Процесс деления продолжается до тех пор, пока все ветви не будут оканчиваться листьями – множеством решений (рисунок 1.9).

Часто используются ограничения на глубину дерева, то есть ограничивается максимальное количество узлов. Это делается для решения проблемы переобучения (англ. overfitting), которое означает, что алгоритм излишне хорошо предсказывает значения для обучающего набора данных, но плохо для испытательного набора.

Само по себе решающее дерево имеет невысокое качество классификации. О создании ансамбля решающих деревьев позволяет существенно повысить эффективность классификации. Отдельные деревья решений в ансамбле должны отличаться между собой набором признаков, по которым происходит деление

данных. Чем больший набор свойств используется для построения каждого дерева, тем более решения этих деревьев будут похожи друг на друга. Такой подход называется Алгоритмом случайного леса (англ. Random Forest).



*Рисунок 1.9 – Схема модели Случайный лес с указанием параметров, по которым происходит расщепление в узлах (цветные точки): модель усредняет прогнозы нескольких деревьев решений, где каждое дерево делает прогноз (белый узел) (Rouet-Leduc et al., 2017)*

На основе алгоритма Случайный лес было показано, что различные режимы скольжения по модельным разломам имеют схожие сейсмоакустические проявления и, следовательно, единый механизм (Hulbert, 2019). В исследовании (Rouet-Leduc et al., 2017) алгоритм Случайный лес применялся для выявления соответствующих статистических характеристик, полученных из сигнала АЭ, сопровождающего динамическую подвижку. Порядка 100 статистических признаков (среднее значение, эксцесс, дисперсия и т.д.) были вычислены в скользящих временных окнах по записи сигнала АЭ, которые затем использовались для прогнозирования времени до следующего срыва.

## 1.6.2. Нейронные сети

Термин «нейронная сеть» берет свое начало в попытках найти математические представления обработки информации в биологических системах. Впервые термин «нейрон» был введен в статье 1943г., в которой представлена первая концепция упрощенной клетки головного мозга, которая сейчас известна как нейрон Мак-Каллока-Питтса.

Сейчас под термином «нейрон» понимается такая вычислительная единица, которая получает информацию, производит над ней вычисления и передает ее дальше (Hammerstrom, 1993). Нейроны делятся на три основных типа: входной, скрытый и выходной (рисунок 1.10). Слой представляет собой большое количество нейронов. Соответственно, есть входной слой, который получает информацию, скрытые слои, которые ее обрабатывают, и выходной слой, который выводит результат. У каждого из нейронов есть 2 основных параметра: входные данные (англ. input data) и выходные данные (англ. output data). В случае входного нейрона:  $input=output$ . В остальных, в поле  $input$  попадает суммарная информация всех нейронов с предыдущего слоя, после чего, она нормализуется, с помощью функции активации и попадает в поле выхода.

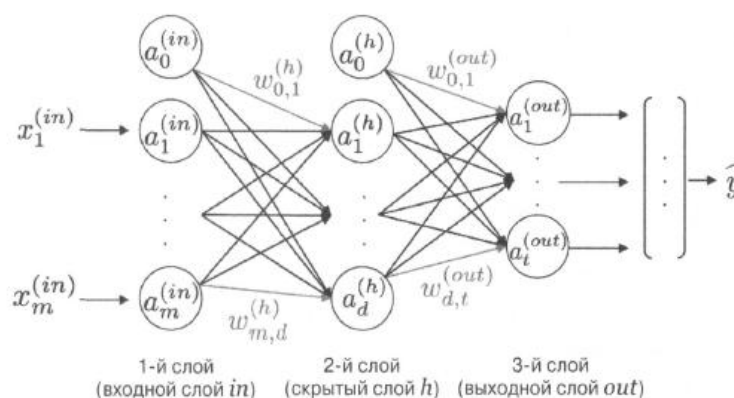


Рисунок 1.10 – Принципиальная схема работы нейронной сети (Рашка, Мирджалили, 2020)

Нейронные сети используются в задачах предсказания, классификации, кластеризации и задачах распознавания, например, выделения сигнала в шуме.

Использование алгоритма нейронных сетей позволило разработать эффективный алгоритм классификации глубоких и приповерхностных микросейсмических событий на основе записей волновых форм (Mousavi et al., 2016). В 1995 году, в работе (Wang, Teng, 1995) обнаружили, что нейронные сети, обученные на данных афтершоков землетрясения Ландерс 1992 года, превзошли результаты стандартного подхода детектирования STA/LTA. Однако несомненным преимуществом алгоритма STA/LTA является его простота переноса на другие районы и/или другие сейсмические станции, в то время как алгоритмы сопоставления шаблонов показывают хороший результат только внутри региона, на котором они были обучены. Таким образом, нейронные сети не могут быть применены на регионах, для которых было каталогизировано лишь небольшое количество данных.

## Выводы к Главе 1

Деформационные процессы, протекающие в массиве горных пород, охватывают пространственный масштаб от долей микрометров до сотен километров, которые сопровождаются излучением колебаний в интервале от долей Герц до сотен МГц. Выявляется качественное сходство в сейсмоакустических проявлениях между природными процессами на метровом и километровом масштабах и лабораторным испытанием образцов.

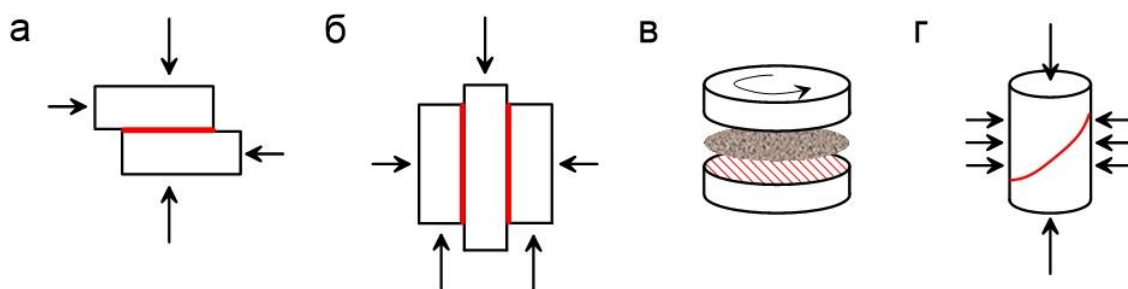
Процессы, происходящие на всех масштабных уровнях, сопровождаются излучением большого числа импульсов, которые несут в себе информацию о состоянии системы. Большое распространение в последнее время получили сети для регистрации слабой сейсмичности, однако большая часть полезной информации теряется по причине присутствия при проведении горных работ посторонних шумов. Разработка методов, основанных на регистрации параметров сейсмоакустических импульсов, позволила бы углубить понимание о процессах, происходящих в массиве.

Представленный выше обзор демонстрирует возможность разработки единого подхода при анализе сейсмоакустических импульсов, основанного на методологии интеллектуального анализа данных. При разработке единого подхода к анализу данных сейсмоакустического мониторинга представляется возможным использовать результаты лабораторных экспериментов, в которых контролируются как деформационные характеристики образцов, так и является возможным регистрация непрерывных сейсмоакустических сигналов.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Многие деформационные процессы представляют собой скольжение по существующим разломам и зонам локализованного сдвига. Лабораторные эксперименты являются одним из методов получения новой информации о закономерностях развития процессов деформирования напряженного межблокового контакта. Для изучения закономерностей скольжения вдоль межблоковых границ используются четыре основные схемы проведения экспериментов (Byerlee, 1967; Dieterich, 1972; Marone, 1998; Anthony, Marone, 2005; Di Toro et al., 2010; Faoro et al., 2009; Goebel et al., 2012; Johnson et al., 2013; Кочарян, Новиков, 2015; Соболев и др., 2016; Остапчук и др., 2016; Leeman et al., 2016; Zhong et al., 2016; Wu et al., 2017; McLaskey & Lockner, 2018; Zhao et al. 2018; Zhao et al., 2018; Scuderi, Colletini, 2018; Rivière et al., 2018; Lei et al., 2018; Смирнов и др., 2019; Trugman et al., 2020; Sebry, McLaskey, 2021):

- прямой сдвиг (рисунок 2.1 а);
- двойной прямой сдвиг или «сэндвич» (рисунок 2.1 б);
- ротационный сдвиг (рисунок 2.1 в);
- трехосный сдвиг (рисунок 2.1 г).



*Рисунок 2.1 – Принципиальные схема лабораторных экспериментальных установок: а) прямой сдвиг; б) двойной прямой сдвиг; в) ротационный сдвиг; г) трехосный сдвиг. Стрелками указаны направления приложения напряжений, красные линии – зоны локализованного сдвига*

При лабораторных исследованиях закономерностей сдвигового деформирования межблоковых контактов выполнить одновременно все критерии подобия невозможно (Rosenau et al., 2017). В этой связи получаемые в лабораторных экспериментах результаты должны использоваться для улучшения понимания отдельных составляющих деформационных процессов, гипотетически происходящих в природе, детали которых недоступны для непосредственного наблюдения.

## **2.1. Описание лабораторной установки и процесса проведения лабораторных экспериментов**

Лабораторные эксперименты проводились в постановке прямого сдвига (рисунок 2.1 а). Эксперименты были направлены на изучение закономерностей акустической эмиссии в процессе деформирования межблокового контакта. Выяснение соответствия между АЭ в лабораторных экспериментах, с одной стороны, и природными сейсмическими явлениями, с другой, помогает раскрыть природу сейсмического процесса.

### **2.1.1. Регистрация механических параметров**

Эксперименты выполнялись на геомеханическом стенде лаборатории Деформационных процессов в земной коре Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН. Схема и фото установки представлены на рисунке 2.2. Мраморный блок 1 размером  $8 \times 8 \times 4,5 \text{ см}^3$  и массой 0,8 кг под действием приложенных нормального и сдвигового усилий скользил вдоль поверхности неподвижного гранитного стержня 2 длиной 2,5 м и площадью сечения  $0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$ . Контактующие поверхности имели шероховатость глубиной 0,8–1,0 мм. Контакт между шероховатыми поверхностями блока и стержня заполнялся слоем мелкодисперсного гранулированного материала 3 толщиной  $\sim 3 \text{ мм}$ . Гранулированный слой укладывался с использованием выравнивающей рамки, так что начальная толщина слоя была одинаковой во всех экспериментах. К концу экспериментов толщина слоя обычно уменьшалась до 2-



2,5 мм. Все эксперименты проводились при комнатных температурах и влажности.

Мраморный блок скользил вдоль границы раздела под действием приложенных нормальных и сдвиговых усилий. Нормальное усилие составляло  $F_N = 500$  Н и создавалось с помощью набора грузов. Оно прилагалось через специальное устройство, что исключало появление дополнительных сдвиговых усилий на верхней грани блока. Сдвиговое усилие прикладывалось к блоку через упругий пружинный элемент (6) с жесткостью  $K = 55$  кН/м. Его свободный конец смещался с постоянной скоростью (скорость нагружения)  $u_s = 8$  мкм/с. Сдвиговое усилие контролировалось датчиком силы CFT/5kN 5 (изготовитель НВМ, Германия) с точностью 1 Н. Относительное перемещение блока 1 контролировалось с помощью лазерного датчика перемещения ILD2220-10 (Micro-Epsilon, Германия) (4) в полосе частот 0-5 кГц с точностью 0,1 мкм.

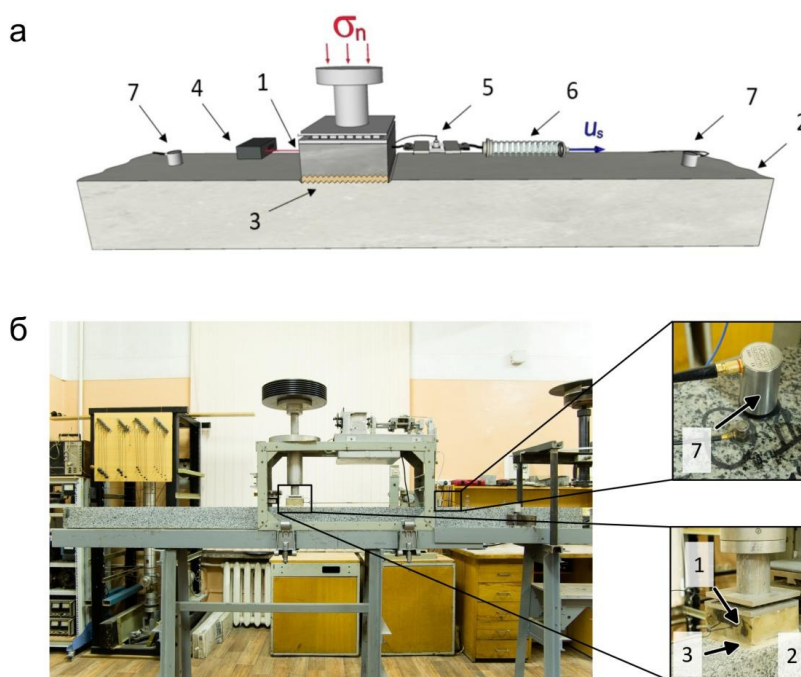


Рисунок 2.2 – Схема и фотография экспериментальной установки  
 а) схема установки экспериментального геомеханического стенда ИДГ РАН;  
 б) фото экспериментальной установки, на вставках крупным планом показан датчик АЭ (сверху) и подвижный блок. Условные обозначения: 1 – подвижный блок, 2 – гранитное неподвижное основание, 3 – слой заполнителя, 4 – датчик перемещения, 5 – датчик силы, 6 – пружинный элемент, 7 – датчики АЭ

В качестве заполнителей межблокового контакта использовались смеси различных природных и искусственных гранулированных материалов. Все использованные заполнители перечислены в Таблице 2.1. Структурные свойства этих заполнителей определяли режимы скольжения (Ikari, 2011; Mair et al., 2002; Anthony, Marone, 2005; Кочарян и др., 2014). За счет вариаций вещественного и гранулометрического состава заполнителя модельного разлома были реализованы различные режимы скольжения: регулярное прерывистое скольжение (стик-слип), которое характеризуется квазипериодическими актами быстрого проскальзывания, сопровождающимся большой амплитудой сброса сдвигового усилия (рисунок 2.3); нерегулярное прерывистое скольжение, для которого характерны как быстрые, так и медленные акты проскальзывания, чередующиеся случайным образом; стабильное скольжение (крип), при котором актов проскальзывания не происходит, а блок скользит с постоянной скоростью.

На рисунке 2.3 показаны изменения сдвигового усилия и смещения во время экспериментов, в которых были реализованы регулярное и нерегулярное прерывистое скольжение и крип. Эволюция межблокового контакта проходит несколько этапов (Gerasimova et al., 1995; Scuderi et al., 2017). На начальном этапе межблоковый контакт достигает предельной прочности на сдвиг, этот этап на рисунке 2.3 отмечен серой областью и в данной работе не рассматривается. Дальнейшее накопление сдвиговых перемещений сопровождается снижением прочности и межблоковый контакт переходит к достижению остаточной прочности  $\tau_s$ . В настоящей работе исследуются закономерности деформирования межблокового контакта после достижения остаточной прочности.

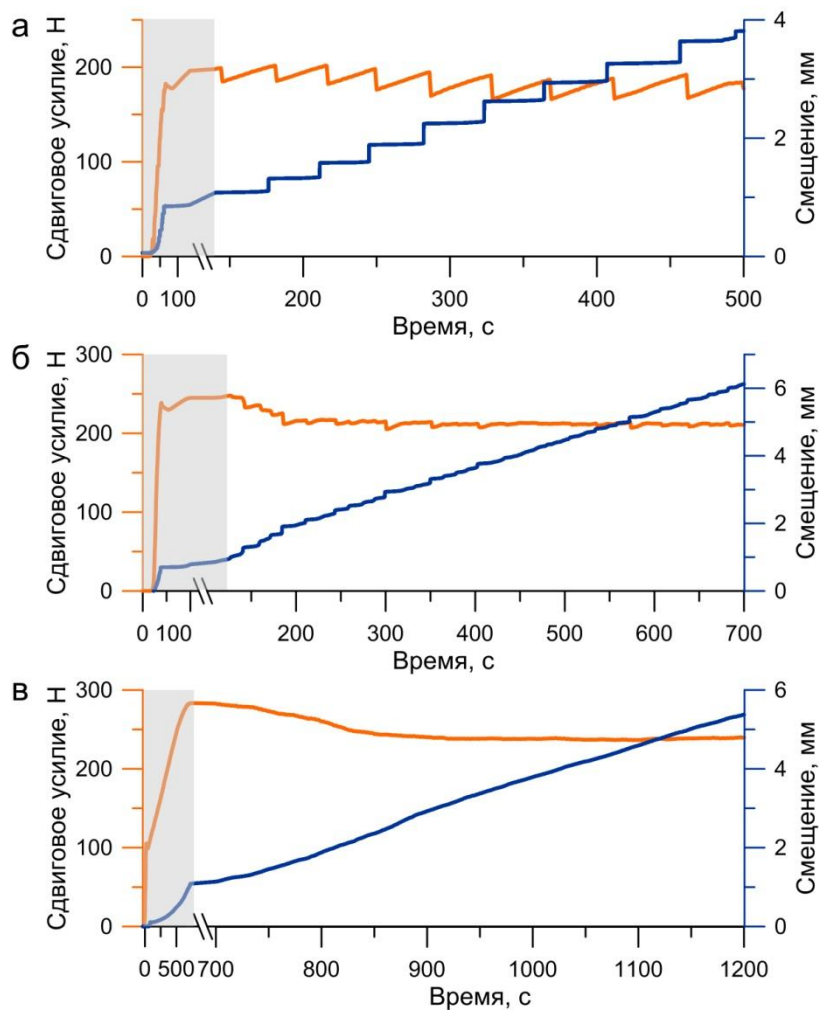


Рисунок 2.3 – Пример временных вариаций сдвигового усилия и смещения блока при реализации регулярного эксперимент № 10 (а) и нерегулярного эксперимент №16 (б) режимов скольжения и стабильного скольжения (крипа) эксперимент №22 (в). Серым цветом выделена стадия нагружения

## 2.2. Регистрация акустоэмиссионного сигнала

Смещение блока сопровождалось излучением высокочастотных упругих колебаний — акустических импульсов, которые непрерывно регистрировались акустическим измерительным каналом. Принципиальная схема измерительного канала приведена на рисунке 2.4.

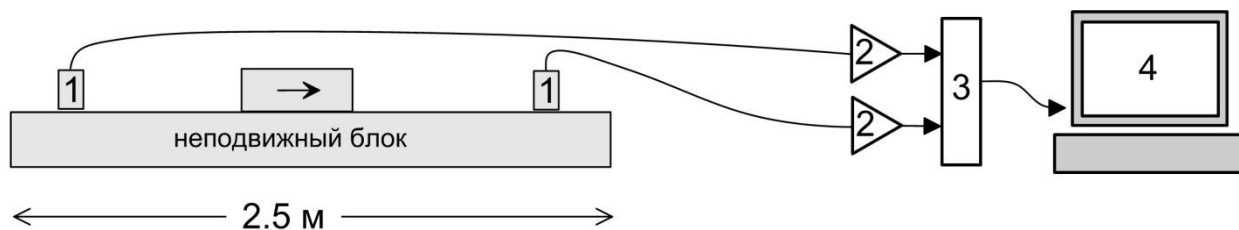


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема измерительного канала.

1 – преобразователь акустической эмиссии VS30-V (Vallen System, Германия),  
2- предусилитель АЕР5 (Vallen System, Германия), 3 – аналого-цифровой преобразователь E20-10 (L-Card, Россия), 4 – персональный компьютер

Акустоэмиссионный сигнал фиксируется преобразователем АЭ (1), VS30-V (Vallen System, Германия) с рабочим диапазоном частот 20 – 80 кГц. Преобразователи были установлены на неподвижном гранитном блоке на расстоянии 0,6 и 0,7 м от движущегося блока. Амплитудно-частотная характеристика преобразователей АЭ показана на рисунке 2.5.

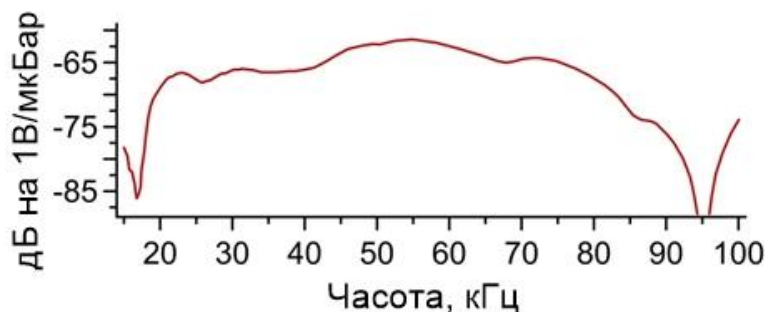
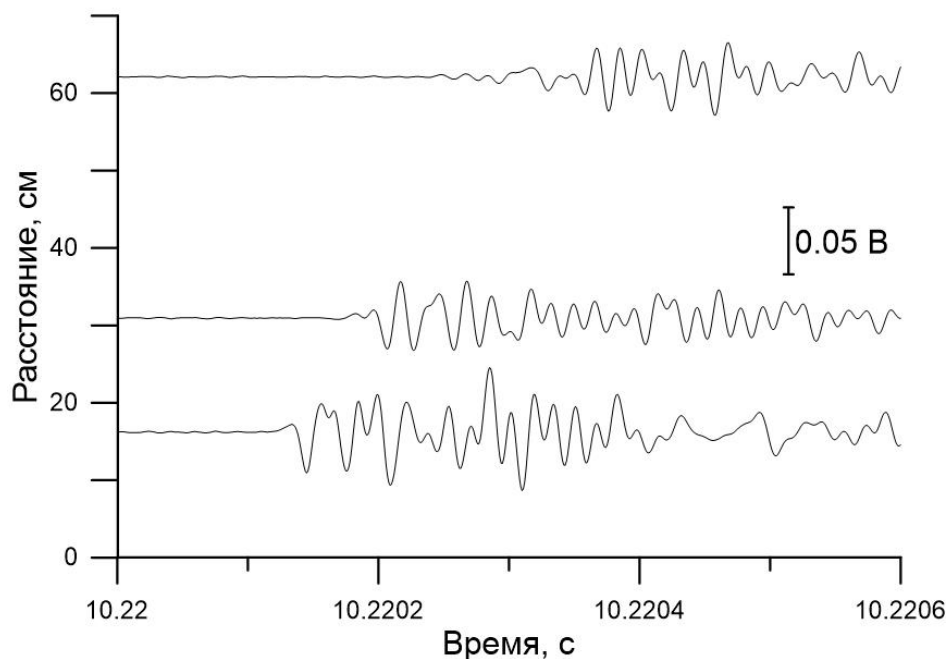


Рисунок 2.5 – Амплитудно-частотная характеристика датчика акустической эмиссии VS30-V (Vallen System, Германия)

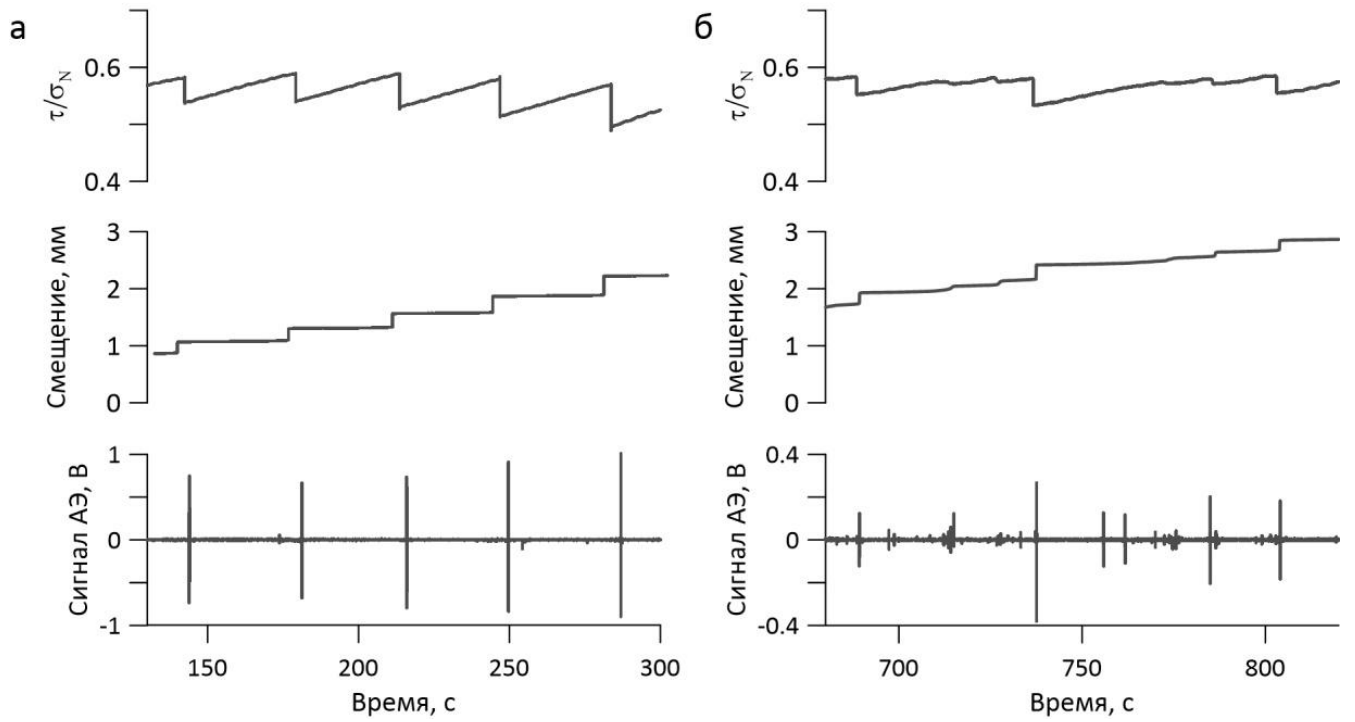
Регистрируемый сигнал усиливался предварительными усилителями (2) АЕР5 (Vallen System, Германия) с усилением 34 дБ и подавался на вход модуля 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя (3) E20-10 (L-Card, Россия). От него оцифрованный сигнал проходит через шину USB к компьютеру (4), где он записывался на жесткие диски. Система выполняет непрерывную и полную запись сигнала по каналам без пропусков в течение всего времени эксперимента. Во время эксперимента работа нагружающего устройства и внешние акустические сигналы не влияли на параметры регистрируемого сигнала.

Предварительная подготовка измерительного канала заключалась в изучении закономерностей распространения сигнала. Для этого была применена различная конфигурация расположения датчиков АЭ относительно центральной части модельного разлома. Расположение датчиков на равноудаленном расстоянии по разные стороны от центральной части модельного разлома (70 см справа и 63 см слева) позволяет зарегистрировать схожие волновые формы, что говорит об изотропности среды. Последовательное расположение датчиков на расстоянии 16, 31 и 62 см от центральной части разлома показывает постепенное уменьшение амплитуды сигнала с удалением от источника (рисунок 2.6).



*Рисунок 2.6 – Изменение волновой формы импульса АЭ при распространении вдоль блока основания*

Пример сигнала акустической эмиссии, зарегистрированного при различных реализованных режимах скольжения, представлен на рисунке 2.7 (внизу). Квазипериодическим сбросам напряжения (рисунок 2.7 а) соответствуют резкие высокоамплитудные всплески сигнала малой длительности. При нерегулярном режиме скольжения (рисунок 2.7 б) наблюдается более сложная запись сигнала АЭ.



*Рисунок 2.7 – Примеры изменения контролируемых параметров модельного разлома (сдвигового усилия, смещения и сигнала АЭ) во времени при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах скольжения*

### 2.3. Континуум реализованных режимов скольжения

Основываясь на результатах исследований (Остапчук и др., 2016), благодаря вариации вещественного и гранулометрического состава заполнителя межблокового контакта в лабораторных условиях был реализован полный спектр режимов межблокового проскальзывания. Примеры различных актов проскальзывания представлены на рисунке 2.8.

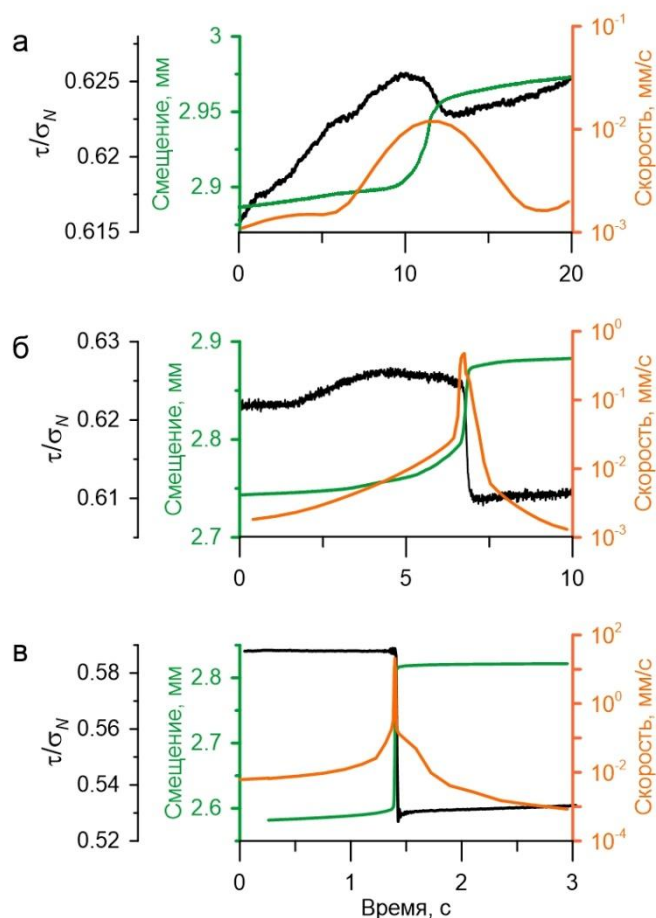


Рисунок 2.8 – Примеры реализованных актов межблокового проскальзывания: а) эпизод медленного скольжения, б) переходный эпизод скольжения, в) эпизод быстрого скольжения. Скорость нагружения  $u_s = 8$  мкм/с

Период времени, когда скорость блока превышает скорость протяжки  $u_s$ , соответствует длительности события скольжения ( $T$ ); смещение блока за этот период времени рассматривается как амплитуда косейсмического скольжения ( $\Delta L$ ). Для вычисления максимальных скоростей ( $V_{peak}$ ) во время событий



проскальзывания использовалась запись смещения подвижного блока относительно неподвижного основания. На рисунке 2.9 показано изменение параметров событий проскальзывания. Они образуют связное множество в пространстве  $(V_{peak}, T, \Delta L)$ . Учет различных параметров позволил качественно разделить события на три типа. Первый тип событий – это эпизоды быстрого скольжения с пиковыми скоростями выше 8 мм/с ( $1000 u_s$ ) и длительностью менее 0,8 с (рисунок 2.9 б), на рисунке 2.9 а и б они отмечены как FSE (Fast Slip Event). Самые быстрые эпизоды проскальзывания имеют пиковые скорости до 48 мм/с ( $6000 u_s$ ). Второй тип – это эпизоды медленного скольжения (на рисунке 2.9 они отмечены как SSE). Такие события скольжения имеют пиковые скорости 2-5  $u_s$  и относительные изменения трения менее  $10^{-2}$ . Продолжительность лабораторных событий медленного скольжения варьировалась от 2 с до 15-20 с. Следует отметить, что события медленного скольжения с длительностью более 10 с были характерны для заполнителя модельного разлома с большим содержанием глины. Третий тип – переходный эпизод скольжения (на рисунке 2.9 они отмечены как ISE). Он демонстрирует большое разнообразие параметров и фактически заполняет промежуток между событиями медленного и быстрого скольжения, указывая на непрерывность спектра режимов фрикционного скольжения.

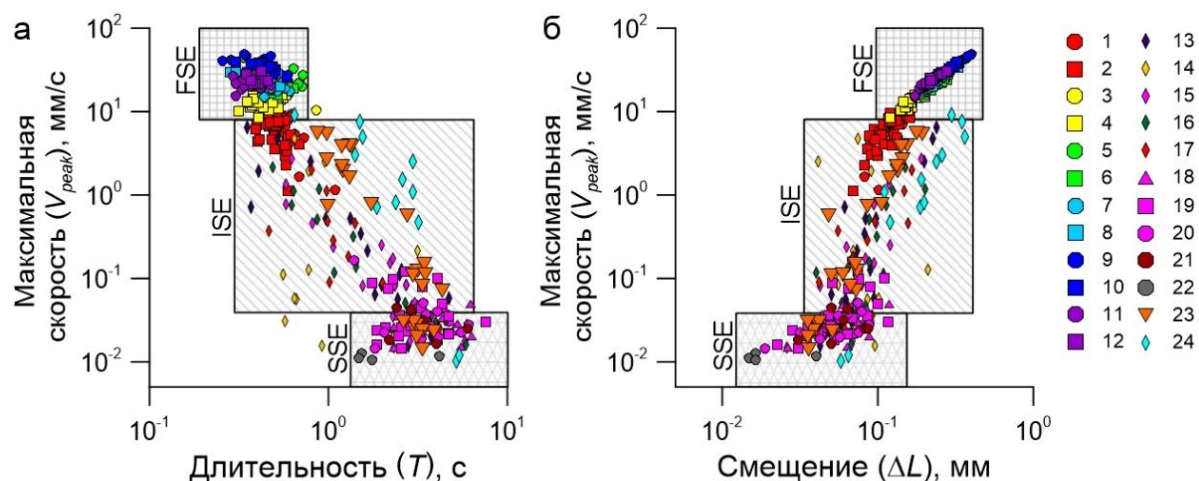


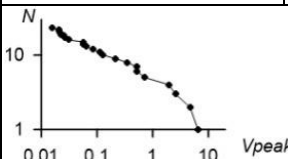
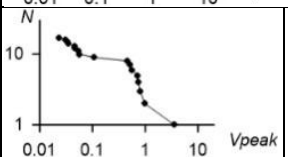
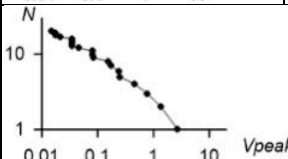
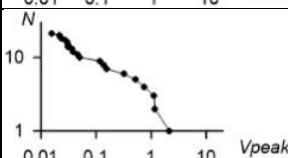
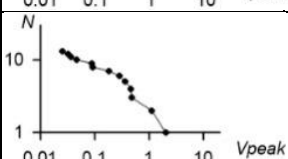
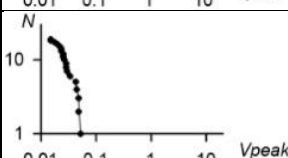
Рисунок 2.9 – Вариации параметров реализованных эпизодов скольжения. Зависимости максимальной скорости  $V_{peak}$  от длительности события скольжения  $T$  (а) и от кумулятивного скольжения  $\Delta L$  (б). Область в пространстве параметров, специфичная для эпизодов быстрого скольжения, помечается как FSE, переходные эпизоды скольжения — ISE, эпизоды медленного скольжения — SSE.

Символы 1-24 соответствуют экспериментам, указанным в Таблице 2.1

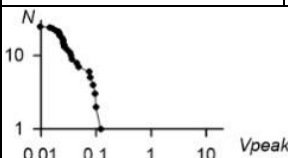
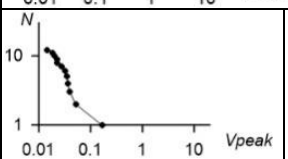
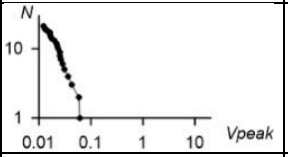
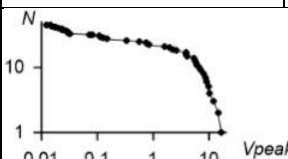
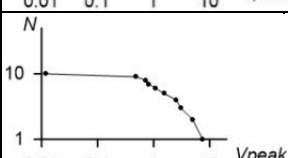
Таблица 2.1. Механические параметры скольжения для всех реализованных режимов скольжения

№	Заполнитель	Режим скольжения	Механические параметры скольжения	
			$V_{peak}$ , мм/с	Коэффициент трения ( $\tau/\sigma_N$ )
1	Кварцевый песок (250-315мкм)	Регулярный	6,6±1,9	0,63
2	Кварцевый песок (250-315 мкм)	Регулярный	5,8±1,8	0,63
3	Кварцевый песок (90%) и стеклянные шарики (10%)	Регулярный	18,1±3,30	0,54
4	Кварцевый песок (90%) и стеклянные шарики (10%)	Регулярный	12,9±1,8	0,58
5	Кварцевый песок (80%) и стеклянные шарики (20%)	Регулярный	26,2±3,8	0,53
6	Кварцевый песок (80%) и стеклянные шарики (20%)	Регулярный	20,4±2,8	0,57
7	Кварцевый песок (65%) и стеклянные шарики (35%)	Регулярный	21,3±3,3	0,51
8	Кварцевый песок (65%) и стеклянные шарики (35%)	Регулярный	25,7±3,2	0,52
9	Кварцевый песок (50%) и стеклянные шарики (50%)	Регулярный	44,0±2,5	0,47

Продолжение таблицы 2.1

№	Заполнитель	Режим скольжения	Механические параметры скольжения	
			$V_{peak}$ , мм/с	Коэффициент трения ( $\tau/\sigma_N$ )
10	Кварцевый песок (50%) и стеклянные шарики (50%)	Регулярный	33,0±3,4	0,46
11	Кварцевый песок (40%) и стеклянные шарики (60%)	Регулярный	21,9±2,0	0,48
12	Кварцевый песок (40%) и стеклянные шарики (60%)	Регулярный	24,5±2,7	0,47
13	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	Нерегулярный		0,8
14	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	Нерегулярный		0,73
15	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	Нерегулярный		0,86
16	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	Нерегулярный		0,75
17	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	Нерегулярный		0,83
18	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	Нерегулярный		0,76

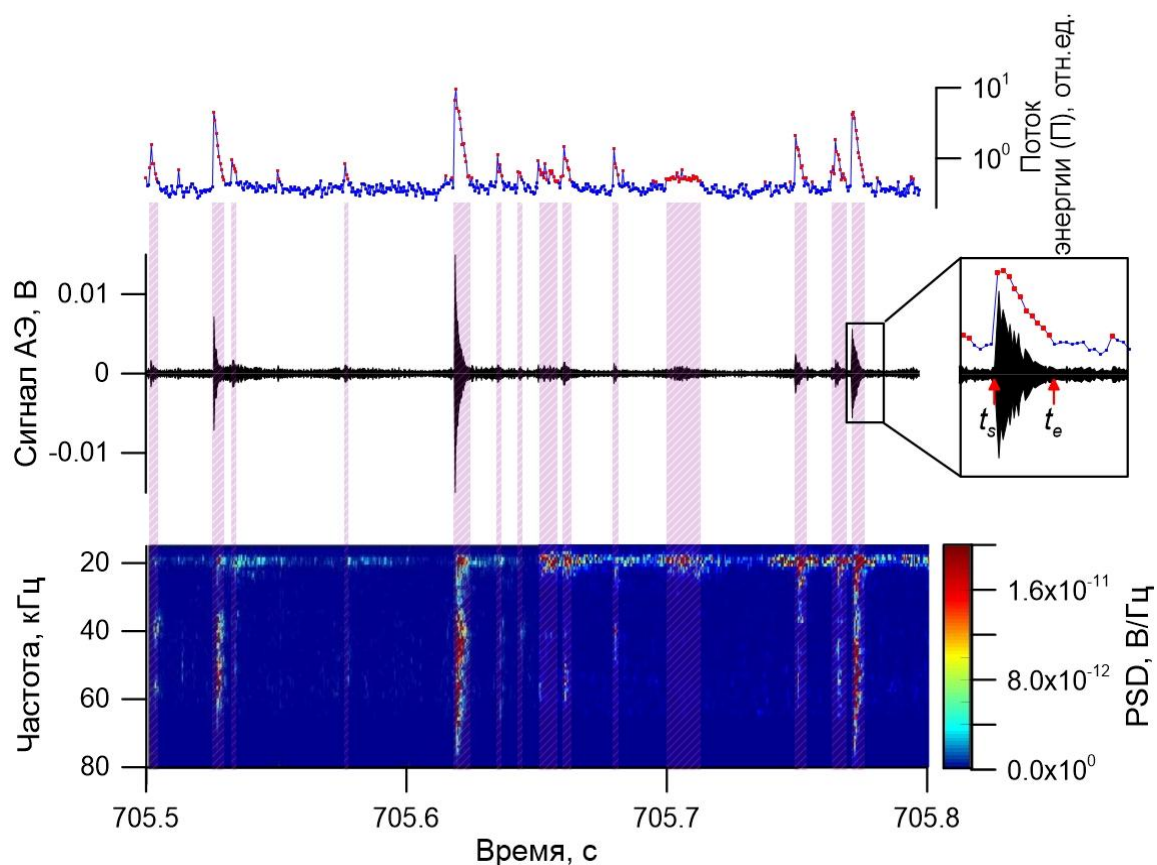
Продолжение таблицы 2.1

№	Заполнитель	Режим скольжения	Механические параметры скольжения	
			$V_{peak}$ , мм/с	Коэффициент трения ( $\tau/\sigma_N$ )
19	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	Нерегулярный		0,78
20	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	Нерегулярный		0,80
21	Кварцевый песок (90%) и глина (10%)	Нерегулярный		0,81
22	Кварцевый песок (70%) глина (30%)	Стабильное скольжение	< 0,2	0,79
23	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	Нерегулярный		0,68
24	Увлажненный кварцевый песок (50-1000 мкм)	Регулярный		0,81

## 2.4. Формирование каталога импульсов АЭ

Хранение и высокопроизводительная обработка непрерывных высокочастотных записей сейсмических и/или акустических колебаний требует больших вычислительных мощностей. Доступные автоматизированные системы сбора акустических данных предполагают автоматическое выделение импульсов по порогу и сохранение только фрейма импульса, что является неприемлемым при существенной вариации шума. Непрерывная регистрация сигнала АЭ позволяет использовать разные подходы к выделению импульса АЭ на фоне шума. В данной работе использовались два метода выделения импульсов АЭ – превышение потока энергии порогового уровня и информационный критерий Акаике. Предварительно перед применением алгоритма выделения сигнал был отфильтрован в рабочем диапазоне частот преобразователя АЭ.

При выделении импульсов по потоку энергии временные вариации потока рассчитывались согласно соотношению (1.3) в окне  $t = 0,5$  мс с шагом  $t/2$  (предполагалось, что длительность импульсов должна превышать 1 мс). На рисунке 2.10 представлен алгоритм выделения импульсов АЭ по порогу потока энергии. Время  $t_s$ , когда поток энергии начинает превышать пороговое значение, принимается за начало импульса АЭ, а время  $t_e$ , когда поток энергии выходит за пороговое значение — за конец импульса АЭ. Точки начала и окончания определялись с точностью 250 мкс. Для проверки данного автоматизированного алгоритма выделения импульсов АЭ проводился визуальный контроль: случайная выборка из 1000 выделенных алгоритмом импульсов АЭ показала, что только 47 импульсов были некорректно выделены. Визуально они представляли дуплеты и мультиплеты.



*Рисунок 2.10 – Алгоритм выделения импульсов АЭ по превышению потока энергии порогового уровня. На рисунке показана запись отфильтрованного сигнала АЭ в полосе частот 20-80 кГц, для которого был рассчитан поток энергии ( $\Gamma$ ) (синяя линия). Красными точками обозначены моменты превышения фиксированного порога, определенного соотношением (1.3). Выделенные импульсы АЭ отмечены заштрихованными областями. Спектрограмма акустического сигнала указывает на изменения в спектре, соответствующие выделенным импульсам АЭ*

Применение информационного критерия Акаике ( $AIC$ ) позволяет точно определить момент времени вступления Р-волны импульса АЭ (Carpinteri et al., 2012). Расчет параметра  $AIC$  выполнялся согласно соотношению (1.4).

На рисунке 2.11 приведен пример временной вариации параметра  $AIC$ , который использовался для определения момента вступления импульса АЭ.  $AIC$  рассчитывался для окна длиной  $N = 500$  точек с шагом перекрытия  $1/2$ .

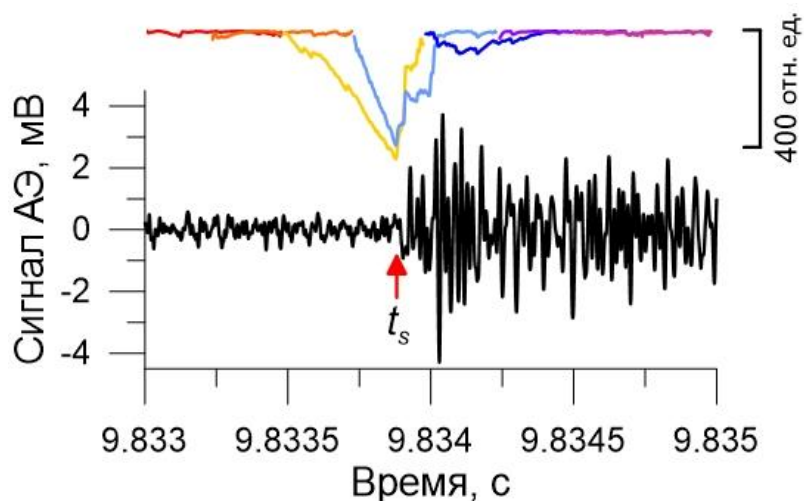


Рисунок 2.11 – Пример определения вступления импульса с помощью критерия Акаике AIC. Разноцветными кривыми показаны вариации критерия Акаике в интервалах шириной 500 точек с перекрытием  $\frac{1}{2}$

#### 2.4.1 Параметры выделенных импульсов АЭ

Для выделенных импульсов АЭ были определены следующие параметры: длительность ( $dt$ ), амплитуда ( $A_s$ ), (рисунок 2.12) и энергия ( $E$ ), которая была оценена следующим образом:

$$E = 1/fs \sum_{t_s}^{t_e} A(t_i)^2, \quad (2.1)$$

где  $fs$  – частота дискретизации  $t_s$  – вступление импульса,  $t_e$  – окончание импульса АЭ,  $A$  – отфильтрованный сигнал АЭ. На рисунке 2.12 показаны пример зарегистрированного события и его параметры.



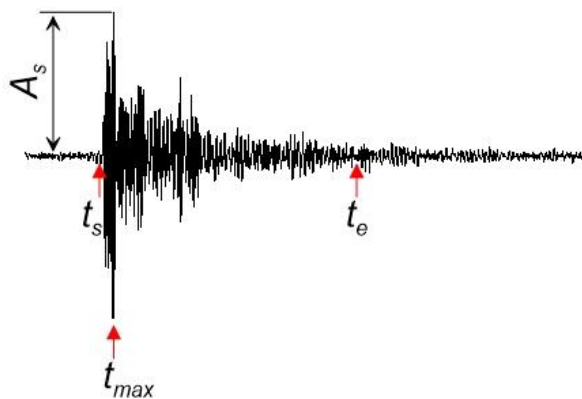


Рисунок 2.12 – Параметры детектированного импульса АЭ: амплитуда ( $A_s$ ), время начала ( $t_s$ ), время окончания ( $t_e$ ), момент достижения максимального значения амплитуды ( $t_{max}$ )

Вероятно, волновая форма импульса АЭ указывает на механизм и интенсивность процесса эволюции в зоне локализации межблокового контакта (Shiotani et al., 2001; Zigone et al., 2011; Ostapchuk et al., 2016). Чтобы описать изменение волновой формы излучаемых импульсов, был введен параметр волновой формы  $WI$  (Ostapchuk, Morozova, 2020). Значение  $WI$  было рассчитано согласно формуле:

$$WI = \frac{RT}{DT}, \quad (2.2)$$

где  $RT = t_{max} - t_s$ ,  $DT = t_e - t_{max}$ ,  $t_{max}$  – момент достижения импульсов максимального значения амплитуды  $A_s$ . Схематично определение этих величин показано на рисунке 2.13. Параметр волновой формы  $WI$  принципиально схож с параметром  $RA$ , который обратно пропорционален скорости нарастания амплитуды сигнала и определяется согласно соотношению

$$RA = RT/A_s \quad (2.3)$$

В отличие от  $RA$  параметр  $WI$  является безразмерным и позволяет качественно оценить форму сигнала АЭ. Этот параметр проще в интерпретации, чем  $RA$ , так как по сути он определяет относительное положение максимума

импульса, то есть чем больше параметр  $WI$ , тем медленнее нарастает амплитуда импульса  $A_s$ , а при  $WI = 1$  импульс имеет симметричную форму (рисунок 2.14).

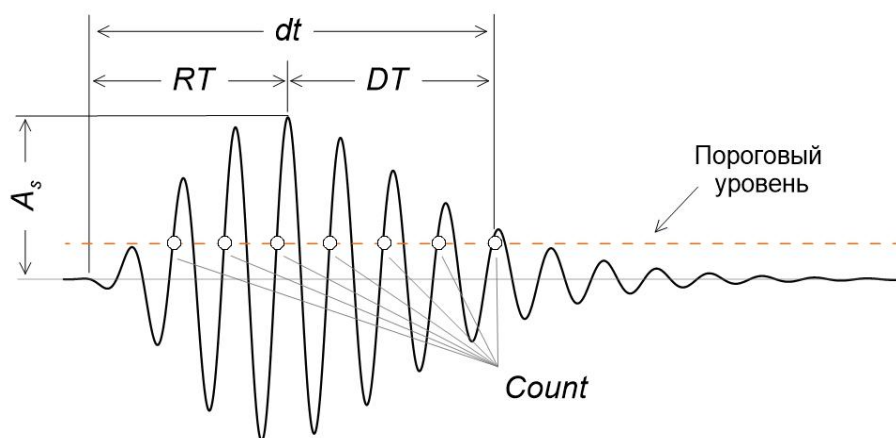


Рисунок 2.13 – Схема определения параметров, описывающих волновую форму импульса АЭ: амплитуда ( $A_s$ ), время нарастания импульса ( $RA$ ), длительность ( $dt$ ), время затухания импульса ( $DT$ ), количество пересечений порогового уровня ( $Count$ )

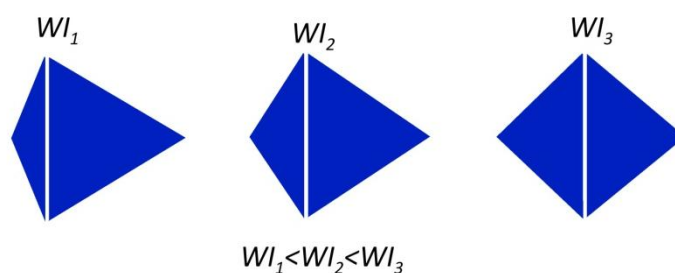


Рисунок 2.14 – Схематичное представление волновой формы импульса при разных значениях параметра  $WI$  (увеличение величины  $WI$  слева направо)

Так же для описания волновой формы используется параметр  $AF$ , который определяется следующим соотношением:

$$AF = Count/dt, \quad (2.4)$$

где  $Count$  – количество пересечений порогового уровня (рисунок 2.13),  $dt$  – длительность импульса АЭ.



## Выводы к Главе 2

- Отработана методика воспроизведения различных режимов межблокового скольжения на геомеханическом стенде лаборатории Деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН в постановке слайдер-модели и проведена серия акустоэмиссионных экспериментов по сдвиговому деформированию межблокового контакта.
- Экспериментально показано, что изменение вещественного и гранулометрического состава заполнителя межблокового контакта приводит к существенному изменению волновой формы регистрируемого сигнала АЭ.
- Предложена классификация эпизодов межблокового проскальзывания на основе максимальной скорости относительного смещения блоков  $V_{peak}$  и длительности событий. В проведенных лабораторных экспериментах акты динамического проскальзывания классифицированы на эпизоды быстрого скольжения с  $V_{peak} > 1000 \text{ } \mu\text{s}$  и длительностью менее 0,8 с, эпизоды медленного скольжения с максимальными скоростями  $V_{peak} = 2...5 \text{ } \mu\text{s}$  и длительностью от 2 с до 15-20 с, третий тип – переходные эпизоды скольжения, которые объединяют эпизоды медленного и быстрого скольжения и непрерывность континуума эпизодов скольжения.
- Реализован алгоритм выделения импульсов АЭ из непрерывной записи АЭ, сопровождающей сдвиговое деформирование межблокового контакта. Сформирован каталог импульсов АЭ, содержащий параметры, описывающие их волновую форму и время детектирования.

### ГЛАВА 3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МОДЕЛЬНОГО МЕЖБЛОКОВОГО КОНТАКТА

Многие закономерности формирования и эволюции структурных нарушений исследуются путем контроля параметров АЭ (Соболев, Пономарев, 2003; Остапчук и др., 2016; Lherminier et al., 2019; и др.), что можно считать определенным аналогом пассивного сейсмического мониторинга. В данной главе анализируются закономерности акустической эмиссии, сопровождающей различные режимы скольжения межблокового контакта, сложенного слоем гранулированного материала.

#### 3.1 Анализ непрерывного сигнала АЭ

##### 3.1.1 Корреляция смещения межблокового контакта и энергии АЭ

При сдвиге межблокового контакта деформационные процессы протекают на разных масштабных уровнях: в условиях сдвигового нагружения возникающая локальная потеря устойчивости (межзерновое проскальзывание) в ходе самоорганизации слоя гранулированной среды является микро- и мезомасштабным процессом, в то время как глобальная потеря устойчивости (динамическое проскальзывание контакта) уже макромасштабное явление. В условиях формирования актов динамического проскальзывания наблюдаются существенные отклонения кумулятивного перемещения и излученной энергии АЭ от линейного тренда. Величина отклонения может быть охарактеризована в терминах дефицита. Дефицит перемещения  $\delta X$  можно определить следующим образом:

$$\delta X(t) = u_s t - X(t) \quad (3.1)$$

где  $X(t)$  – смещение подвижного блока относительно неподвижного основания,  $u_s$  – скорость протяжки. Аналогичным образом определяется дефицит излученной энергии  $\delta E$ :

$$\delta E(t) = et - E_{cum}(t) \quad (3.2)$$

где  $E_{cum}(t) = \int_0^t A^2 dt$  – кумулятивная величина излученной энергии АЭ,  $e$  – коэффициент линейной регрессии зависимости  $E_{cum}(t)$  (соответствует среднему значению потока энергии АЭ). На рисунке 3.1 показаны временные вариации  $E_{cum}(t)$  и  $X(t)$  для разных режимов скольжения межблокового контакта. Вариации  $X$  и  $E_{cum}$  имеют сходные тенденции (рисунок 3.1). Для всех режимов скольжения регрессионная модель  $E_{cum}(X)$  имеет вид:

$$E_{cum} = \gamma X \quad (3.3)$$

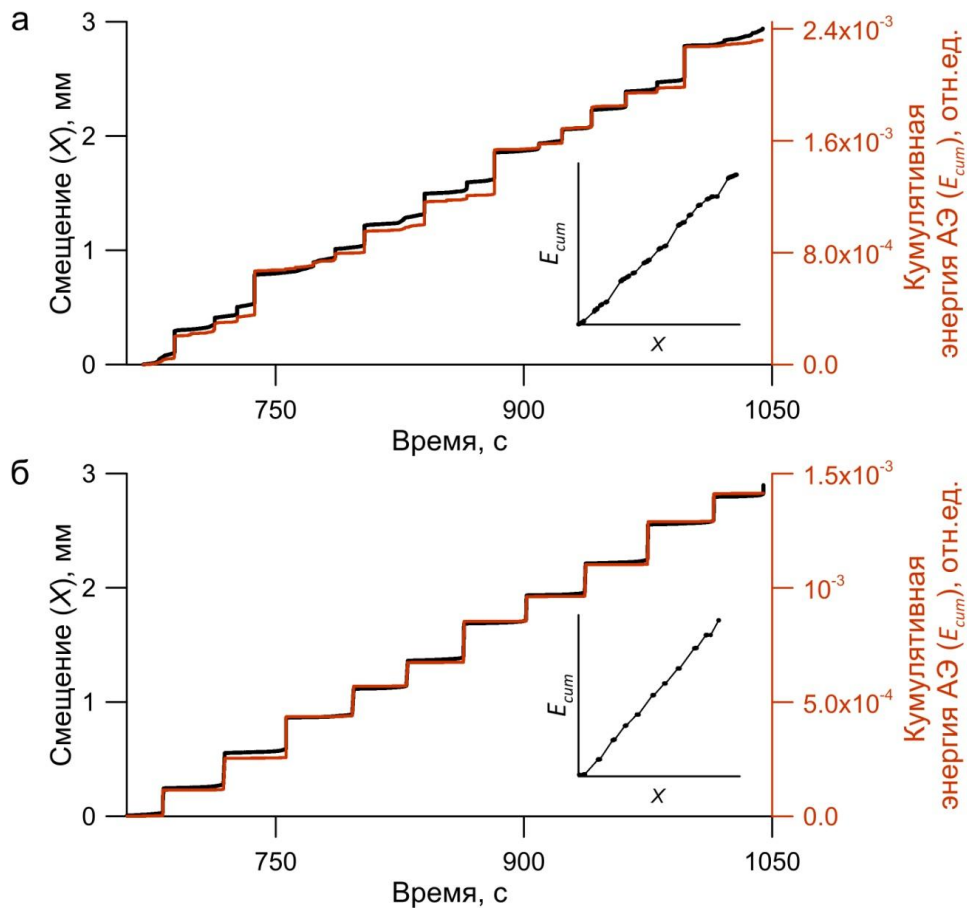
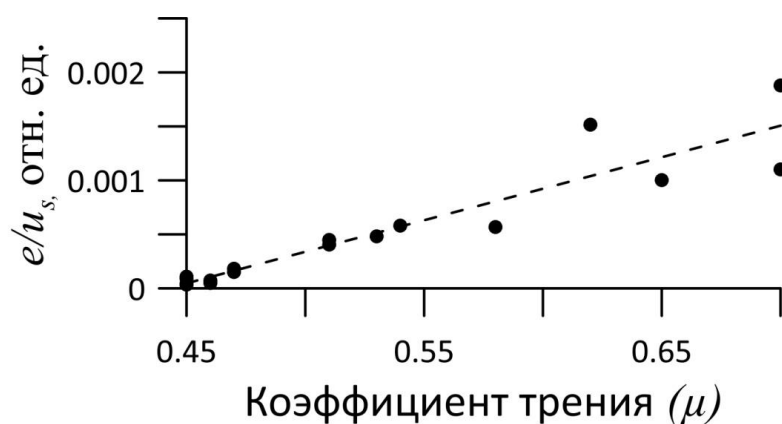


Рисунок 3.1 – Временные вариации кумулятивной излученной энергии АЭ  $E_{cum}(t)$  и смещения межблокового контакта  $X(t)$  для (а) нерегулярного прерывистого скольжения - эксперимент №23 и (б) регулярного прерывистого скольжения - эксперимент №5. На врезках показана зависимость кумулятивной излученной энергии АЭ от смещения

Структура гранулированного слоя межблокового контакта определяет как особенности процессов самоорганизации гранулированного слоя (Пантелеев, 2020; Метелёв и др., 2019; Mair et al., 2002; Кочарян и др., 2013), так и фрикционную прочность контакта (Кочарян и др., 2013; Biegel, Sammis, 1989). Анализ совокупности всех экспериментальных данных позволил установить функциональную зависимость между параметрами межблокового контакта  $\{e, u_s, \mu\}$  (рисунок 3.2), которая выражается следующим образом:

$$\frac{e}{u_s \cdot (\mu - \mu_0)} = (6 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.}, \quad (3.4)$$

где  $\mu_0$  – минимальное значение коэффициента трения, при котором наблюдалось нестабильное скольжение. Для горных пород характерное значение  $\mu_0$  составляет 0,5 (Ikari et al., 2011). На графике наблюдается существенное отклонение точек от регрессионной прямой при  $\mu > 0,6$ , при котором был реализован нерегулярный режим скольжения. Вероятно, отклонения обусловлены различием излучательной эффективности быстрых и медленных актов проскальзывания при нерегулярном режиме скольжения (Ostapchuk et. al., 2021).



*Рисунок 3.2 – Зависимость соотношения  $e / u_s$  от коэффициента трения  $\mu$  для всех проведенных экспериментов по сдвиговому деформированию модельной трещины*

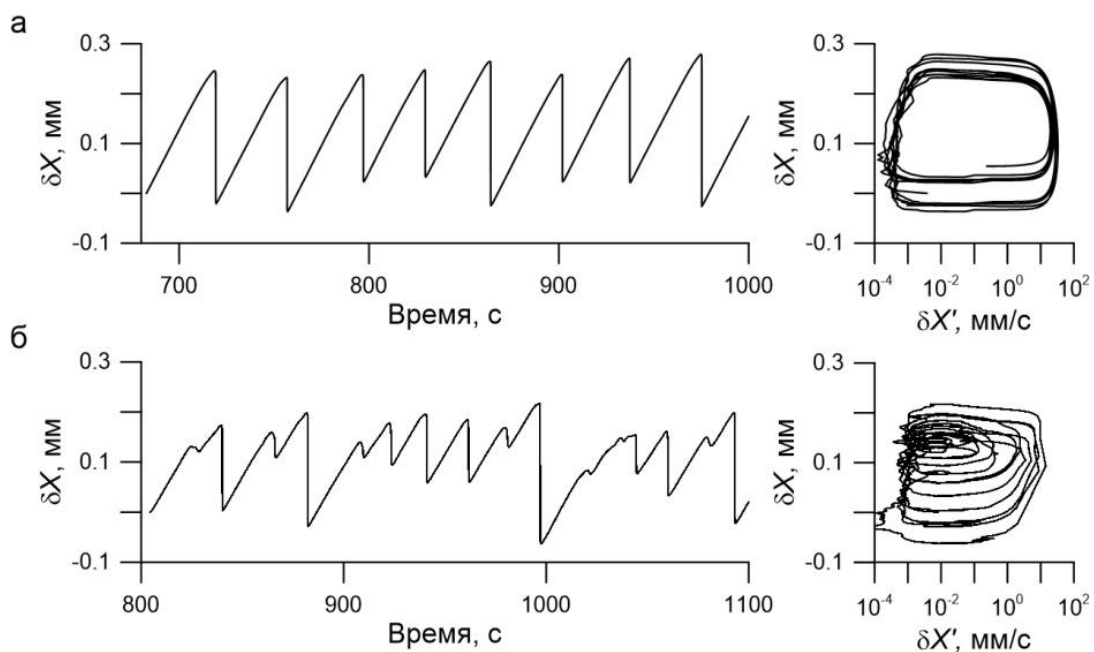
Учитывая возможность формирования различных режимов скольжения, выявленная функциональная зависимость между фрикционной прочностью межблокового контакта, скоростью нагружения и потоком энергии АЭ указывает

на определяющую роль структуры гранулированного слоя межблокового контакта при реализации того или иного режима скольжения.

### 3.1.2 Обобщенный дефицит межблокового контакта

Режим регулярного прерывистого скольжения (стик-слип) характеризуется выраженной периодичностью и близкими параметрами эпизодов динамического проскальзывания. На стадии накопления потенциальной энергии блок смещается со скоростью существенно ниже скорости протяжки  $u_s$ , в связи с чем наблюдается рост величины дефицита перемещений  $\delta X$  (3.1). На динамической стадии скорость скольжения резко возрастает, а величина функции (3.1) снижается до локального минимума. При стик-слипе наблюдается постоянная картина вариаций параметров межблокового контакта. Фазовый портрет явным образом демонстрирует регулярную повторяемость деформационного процесса (рисунок 3.3 а). Траектория описывает предельный устойчивый цикл динамической системы, причем можно с высокой точностью определить области фазового пространства, соответствующие потере динамической устойчивости и началу эпизодов быстрого скольжения. Для нерегулярного режима характерна более сложная картина изменения скорости скольжения. Наблюдаются как интервалы повторяющихся событий, так и интервалы квазистационарного скольжения, когда вариации дефицита перемещения относительно малы, а величина скорости близка к скорости протяжки  $u_s$ . Фазовый портрет такого режима представляет собой совокупность случайных круговых траекторий, охватывающих определенную область фазового пространства (рисунок 3.3 б).

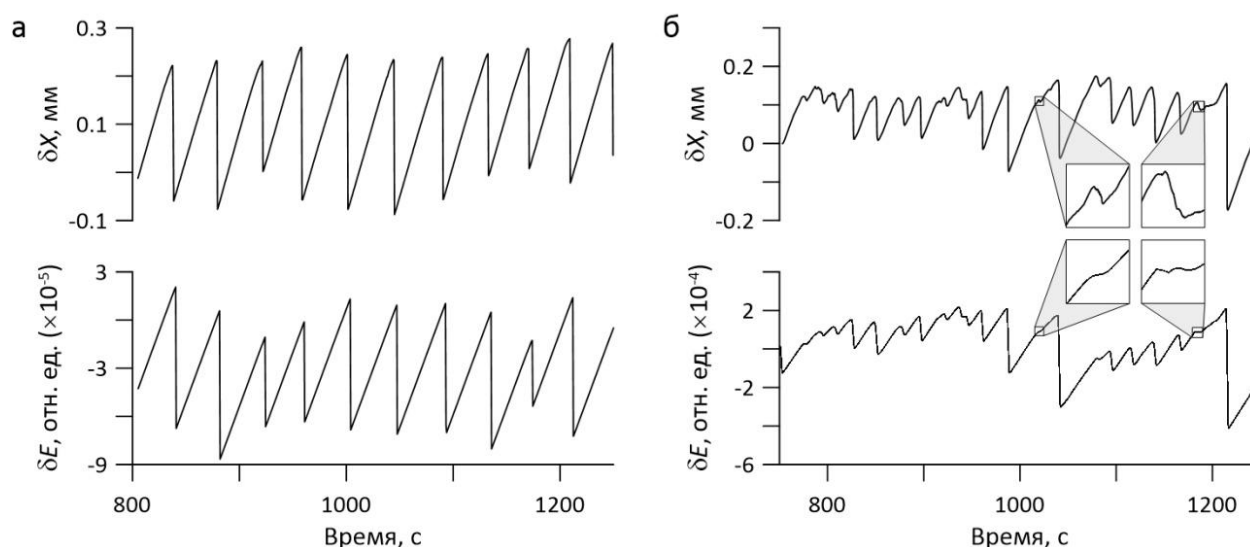




*Рисунок 3.3 – Временные вариации дефицита перемещения ( $\delta X$ ) при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах скольжения. Справа представлены фазовые портреты реализованных режимов скольжения*

При изменении режима скольжения закономерности временных вариаций дефицитов перемещения  $\delta X$  и энергии АЭ  $\delta E$  существенно изменяются. При стик-слипе наблюдается выраженная цикличность: по мере приближения межблокового контакта к моменту динамической неустойчивости величина дефицитов монотонно увеличивается, достигая локального максимума перед эпизодом быстрого скольжения; во время динамического проскальзывания значения дефицитов резко снижаются, принимая значение локального минимума (рисунок 3.3 а). Уровень локальных максимумов близок перед всеми актами динамической неустойчивости. Так, для регулярного прерывистого скольжения наблюдается высокая корреляция между дефицитами перемещения и энергии АЭ (коэффициент корреляции более 0,9). При нерегулярном режиме скольжения временные вариации дефицита энергии АЭ  $\delta E$  имеют более сложную картину изменения. При эпизодах быстрого скольжения наблюдается резкое снижение  $\delta E$  до локального минимума, аналогично для  $\delta X$ . В то же время при эпизодах медленного скольжения (например, врезки 1010-1020 с и 1170-1180 с на рисунке 3.4 б)  $\delta E$  не убывает в отличие от  $\delta X$ , т.е. инициирование динамической

неустойчивости происходит без достижения локального максимума  $\delta E$ . Коэффициент корреляции между дефицитами перемещения и энергии АЭ при нерегулярном режиме скольжения составляет 0,7. Наблюдаемые отличия временных вариаций дефицитов при подготовке быстрых и медленных актов проскальзывания указывают на сложность протекающих на микромасштабе процессов эволюции гранулированного слоя межблокового контакта.



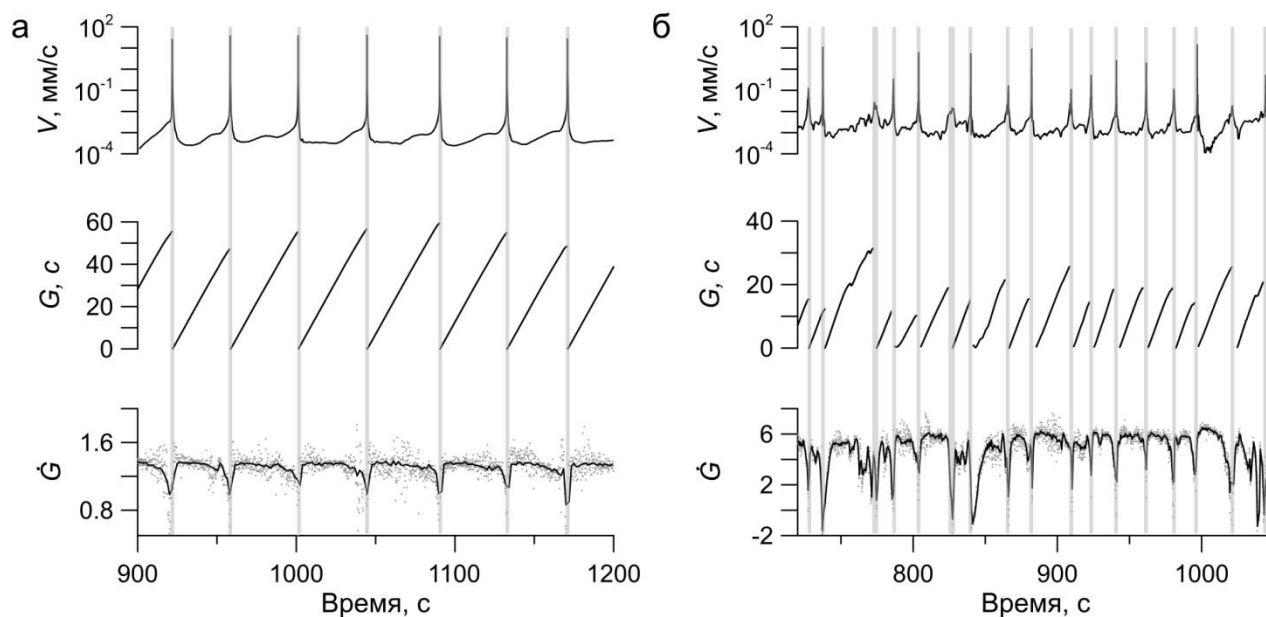
*Рисунок 3.4 – Временные вариации дефицита перемещения  $\delta X$  и энергии АЭ  $\delta E$  для регулярного (а) и нерегулярного (б) режимов прерывистого скольжения. На врезках справа показаны примеры вариаций  $\delta X$  и  $\delta E$  при эпизодах медленного скольжения*

Эволюция модельного межблокового контакта сопровождается процессами, протекающими на разных масштабах. АЭ характеризует процессы, протекающие на микромасштабе, в то время как смещение межблокового контакта характеризует процесс на макромасштабе. С целью объединения информации о разномасштабных процессах эволюции межблокового контакта определим обобщенный дефицит  $G$  межблокового контакта следующим образом:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\delta X}{u_s}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{e}\right)^2} \quad (3.5)$$

Величина дефицитов перемещения и энергии АЭ нормированы на соответствующие значения скорости протяжки  $u_s$  и коэффициента линейной

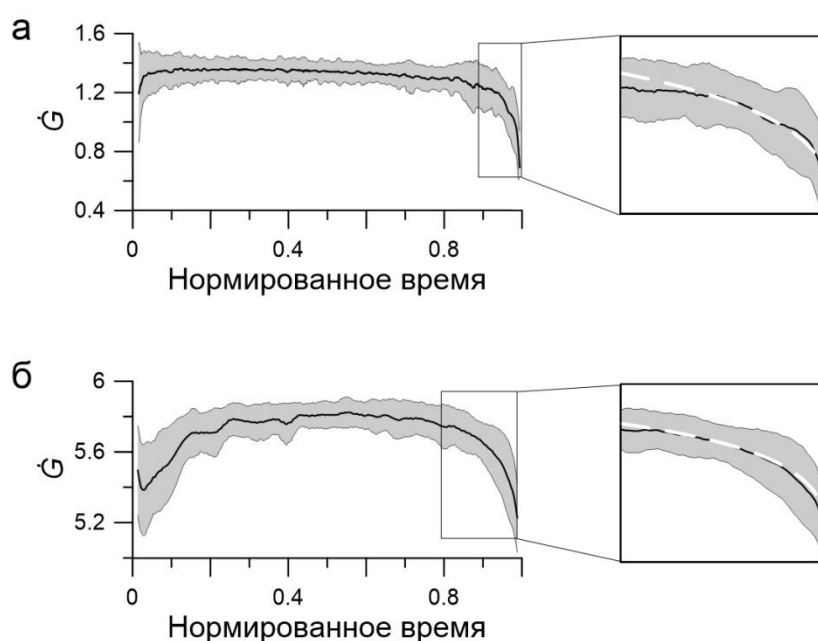
регрессии  $e$ , которые представляют собой трендовые составляющие кумулятивного смещения и энергии ((3.1), (3.2)), с целью соразмерить вклад процессов, протекающих на различных масштабных уровнях. С учетом нормировки размерность обобщенного дефицита  $[G] = [с]$ . Временные вариации обобщенного дефицита  $G$  и скорости его приращения  $\dot{G}$  представлены на рисунке 3.5.



*Рисунок 3.5 – Эволюция состояния межблокового контакта во времени при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах скольжения. Представлены временные вариации скорости скольжения межблокового контакта  $V$ , обобщенного дефицита  $G$  и скорости его приращения  $\dot{G}$  (черной линией показано средняя величина в скользящем окне 5 мс)*

Если для обобщенного дефицита  $G$  наблюдается монотонный рост между динамическими событиями с различной величиной локального максимума, то скорость приращения обобщенного дефицита  $\dot{G}$  является параметром, динамика изменения которого позволяет с высокой точностью судить о состоянии межблокового контакта (Рисунок 3.6). Наблюдается выраженная цикличность изменения с характерными тремя стадиями подготовки динамической неустойчивости. Сразу после динамической неустойчивости наблюдается быстрый рост  $\dot{G}$ . Далее наступает условно стабильная стадия, на которой величина  $\dot{G}$  примерно постоянна. На третьей стадии по мере приближения к

моменту динамической неустойчивости переход межблокового контакта в предельное состояние сопровождается монотонным снижением  $\dot{G}$ , которая достигает минимума в момент динамической неустойчивости. Выделенные стадии характерны как для периодически повторяющихся эпизодов быстрого скольжения при режиме регулярного прерывистого скольжения, так и для аperiodических эпизодов быстрого и медленного скольжения при нерегулярном режиме. При этом можно определить характерный вид изменения параметра  $\dot{G}$  для всех режимов скольжения (рисунок 3.6).



*Рисунок 3.6 – Изменение скорости приращения обобщенного дефицита  $\dot{G}$  межблокового контакта при подготовке эпизодов динамического скольжения при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах скольжения. Черная линия соответствует среднему значению скорости приращения дефицита, определенная по всей совокупности экспериментов, серая область соответствует её стандартному отклонению. Время нормировано на рекуррентное время подготовки соответствующего эпизода динамического скольжения.*

*На вставках представлены аппроксимации временных вариаций  $\dot{G}$  (белая пунктирная линия) на заключительной стадии подготовки динамического скольжения зависимостями  $\dot{G} = 1.9 (1 - t)^{0,17}$  (а) и  $\dot{G} = 6.1 (1 - t)^{0,03}$  (б)*

Переход межблокового контакта в состояние предельного равновесия сопровождается связностью и согласованностью процессов, протекающих на разных масштабах. Эксперименты показали, что введение обобщенного дефицита  $G$ , учитывающего, фактически, процессы и на микро-, и на макромасштабе, позволяет надежно контролировать процесс подготовки актов динамического проскальзывания. Снижение скорости приращения дефицита  $\dot{G}$ , характерное для заключительной стадии подготовки динамической неустойчивости, может быть представлено в виде степенной функции:

$$\dot{G} = a (1 - t)^b, \quad (3.6)$$

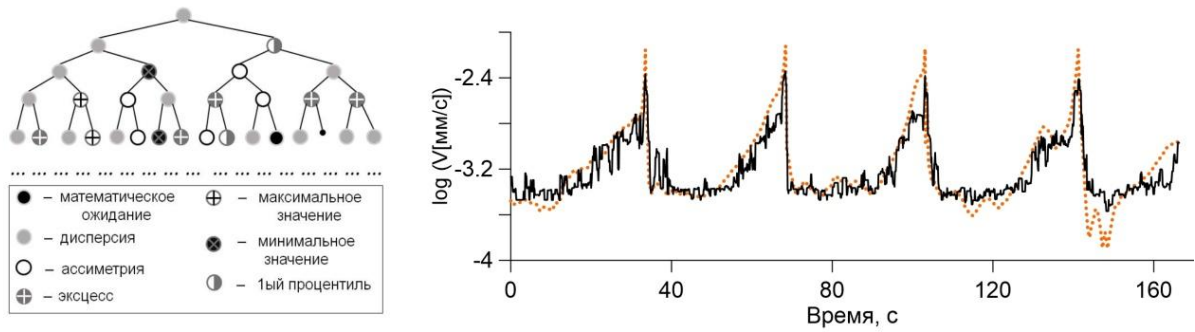
где  $a$  и  $b$  – константы.

Выявление универсального степенного закона эволюции межблокового контакта, сложенного гранулированным материалом, указывает на определяющую роль процессов самоорганизации и, как следствие, пространственной структурированности тонкого гранулированного слоя, слагающего межблоковый контакт. При этом скорость приращения дефицита  $\dot{G}$  может выступать в качестве акустоэмиссионно-деформационного индикатора состояния, позволяющего с высокой точностью контролировать подготовку эпизодов динамического скольжения.

### **3.1.3. Применение алгоритма Случайный лес для определения динамики скольжения модельного разлома**

Для определения ожидаемой скорости скольжения межблокового контакта и момента старта динамического события на основе только непрерывных акустоэмиссионных данных был применен алгоритм Случайный лес (Breiman, 2001). Программная реализация алгоритма выполнена в среде MATLAB. Алгоритм предполагает построение совокупности независимых деревьев принятых решений на основе набора параметров (рисунок 1.9). Каждое дерево независимо определяет значение параметра, а результатом работы алгоритма является значение параметра, усредненное по всем деревьям. Если одно из деревьев решений является ошибочным, то усреднение по совокупности независимых деревьев минимизирует данную ошибку. Количество деревьев в модели было принято равным 200, минимальная глубина каждого дерева составляла 20. Для определения скорости скольжения была рассмотрена непрерывная запись сигнала АЭ.

Применение алгоритма случайный лес предполагает, что на первом этапе выполняется обучение модели на известных данных. Обучение заключается в установлении связи между входными статистическими параметрами и выходными значениями относительной скорости смещения межблокового контакта (рисунок 3.7). При обучении не учитывается информация о прошлом или будущем состоянии межблокового контакта, в модели используются данные АЭ только в пределах выбранного временного окна. Обучение алгоритма проводилось на данных двух экспериментов, в которых были реализованы регулярный и нерегулярный режимы скольжения. При обучении алгоритма определения скорости скольжения были использованы параметры сигнала АЭ, рассчитанные во временном окне 1 секунда с перекрытием 90 %. В качестве параметров были взяты значения среднего, дисперсии, коэффициент асимметрии и эксцесса, процентиля от 1-го до 9-го и от 91-го до 99-го с шагом 1 %, максимальные и минимальные значения амплитуды сигнала.



*Рисунок 3.7 – Обучение алгоритма случайный лес предсказания скорости скольжения межблокового контакта.*

*Слева представлен пример одного из деревьев решений и параметры, на основании которых принимается решение в определенном узле дерева.*

*Справа представлена экспериментальные временные вариации скорости (пунктирная линия) и ее предсказанные значения (сплошная линия).*

*Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,79$*

На Рисунке 3.8 показан результат применения алгоритма восстановления скорости скольжения блока по данным регистрации сигнала АЭ для данных АЭ, которые алгоритм случайного леса никогда ранее не «видел». По непрерывному сигналу АЭ достаточно успешно предсказывается скорость смещения блока, как при регулярном, так и при нерегулярном режиме скольжения. Результаты всех экспериментов обобщены в таблице 3.1.

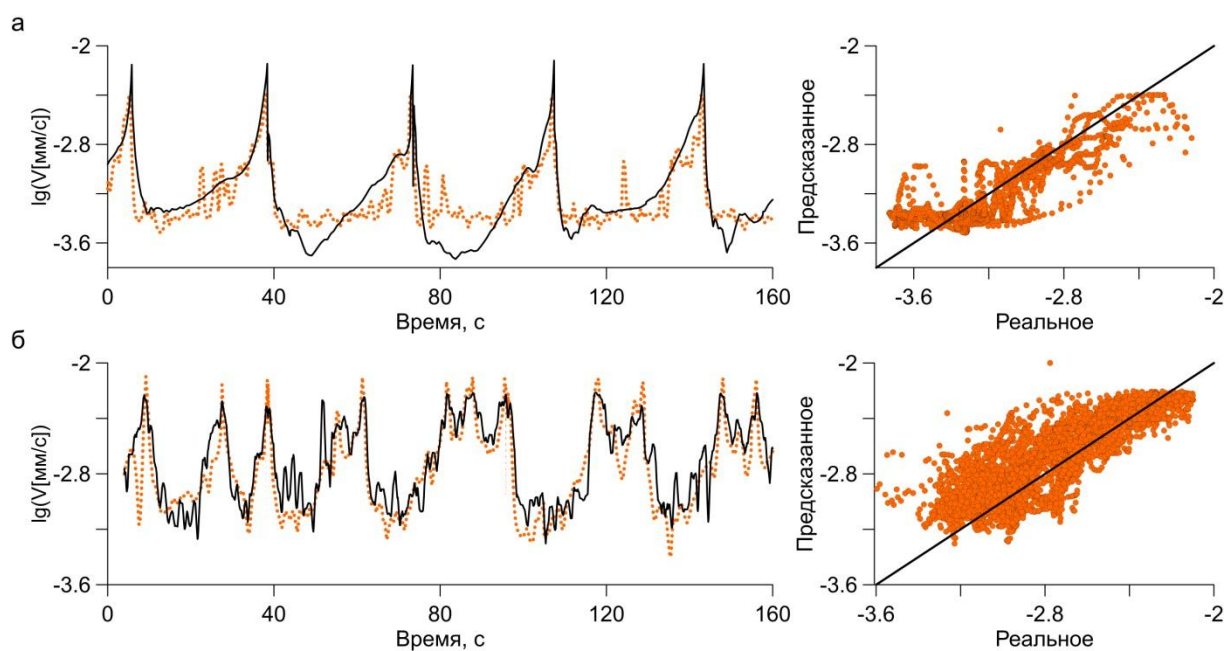


Рисунок 3.8 – Определение скорости скольжения межблокового контакта при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах.

Сплошная линия – реальные значения скорости, пунктирная линия – значения, предсказанные моделью. Справа представлено сравнение истинных и предсказанных значений  $\lg(V)$ . Прямая линия соответствует точному определению скорости. При регулярном режиме точность (коэффициент детерминации) алгоритма составляет  $R^2=0,69$ , при нерегулярном –  $R^2=0,54$



Таблица 3.1. Точность предсказания скорости скольжения межблокового контакта на основе алгоритма Случайный лес

№	Заполнитель центральной части	Тип режима	Определение параметров скольжения на основе алгоритма машинного обучения	
			Коэффициент детерминации алгоритма ( $R^2$ ) определения скорости	Наиболее вероятная ошибка определения момента динамического события
1	Эксперимент №1	Регулярный	0,71	0,2
2	эксперимент №6	Регулярный	0,69	0,4
3	Эксперимент №13	Нерегулярный	0,54	1,5
4	Эксперимент №16	Нерегулярный	0,50	2,5
5	Эксперимент №21	Нерегулярный	0,54	2,7

Имея только лишь данные АЭ, можно определить скорость скольжения межблокового контакта. При этом, используя понимание того, как ведут себя дефициты энергии АЭ и относительного смещения блоков, можно предсказать, на какой стадии сейсмического цикла находится исследуемая система, так как скорость приращения обобщенного дефицита  $\dot{G}$  имеет характерный вид на различных стадиях нагружения межблокового контакта.

## 3.2. Анализ каталога импульсов АЭ

### 3.2.1. Выполнение основных законов сейсмичности

Каталог импульсов АЭ содержит информацию об импульсах, которые характеризуются различными волновыми формами и значениями амплитуд. В зависимости от режима скольжения активность импульсов АЭ варьировалась от одиночных “щелчков” с интервалом в несколько секунд до регулярно повторяющихся импульсов с интервалом в 1-2 мс. Стоит разделять импульсы АЭ, которые сопровождают эпизоды динамического скольжения, и импульсы, излучаемые при подготовке эпизодов скольжения. Примеры импульсов АЭ, сопровождающие реализацию различных эпизодов динамического скольжения, представлены на рисунке 3.9.

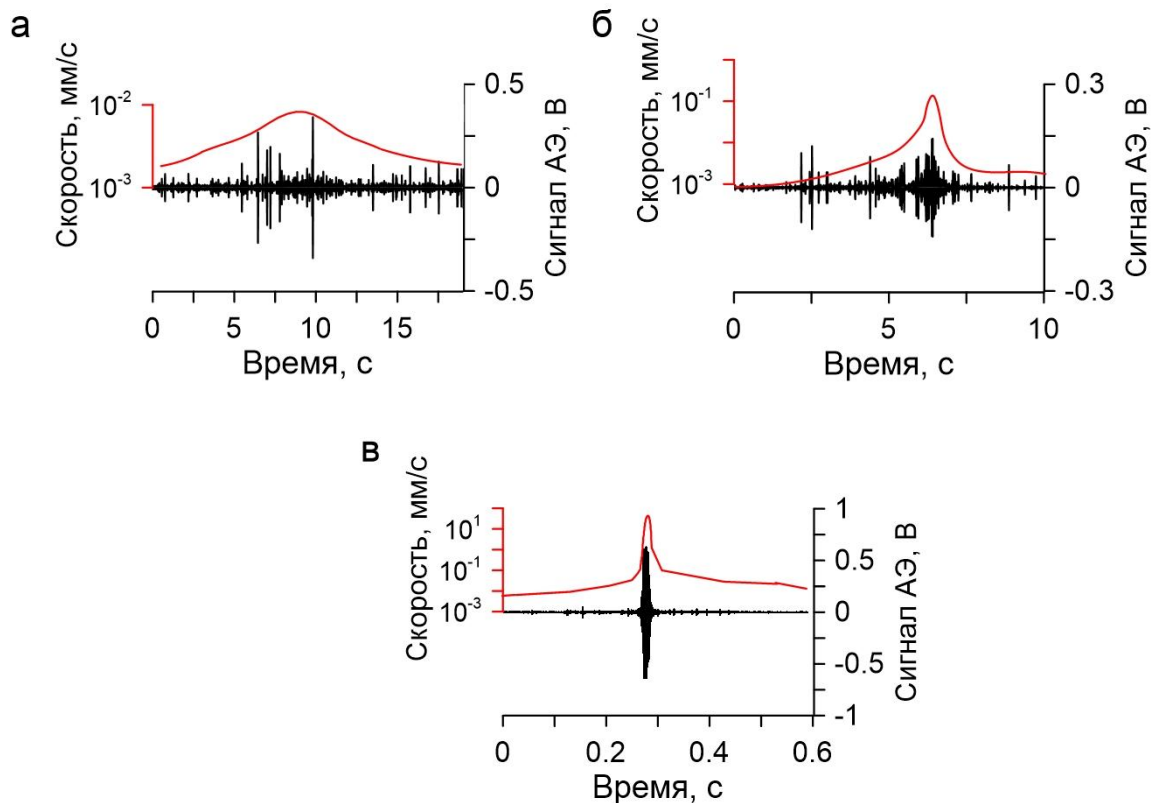


Рисунок 3.9 – Импульсы АЭ, сопровождающие реализацию а) эпизода медленного скольжения, б) переходный эпизод скольжения, в) эпизод быстрого скольжения

Эпизоды скольжения демонстрируют сильную вариацию излучаемой энергии АЭ. На рисунке 3.10 представлена вариация энергии АЭ эпизодов динамического скольжения. Для сравнения величин излученной энергии АЭ для всех эпизодов скольжения был рассчитан лабораторный аналог величины сейсмического момента  $M_{lab}$ . Лабораторный сейсмический момент  $M_{lab}$  рассчитывался согласно соотношению (Адушкин и др., 2016):

$$M_{lab} = K \cdot \Delta L \cdot s, \quad (3.7)$$

где  $K$  – жесткость нагружающего элемента,  $\Delta L$  – величина смещения по модельному разлому во время эпизода динамического скольжения,  $s$  – длина подвижного блока.

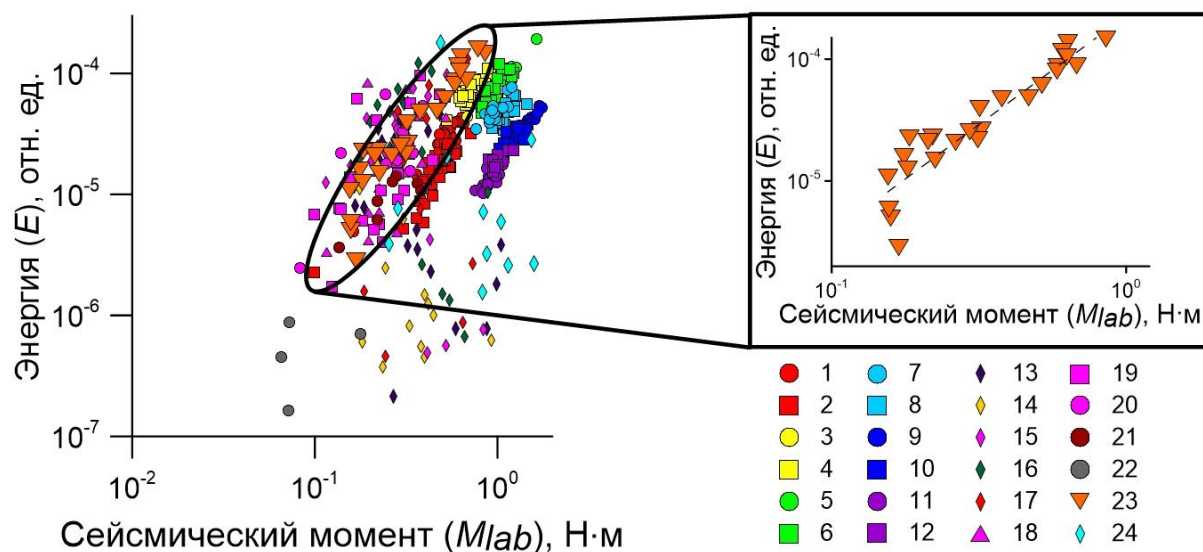


Рисунок 3.10 – Зависимость энергии излученной при динамическом событии от реализованного сейсмического момента. На вставке отдельно показана зависимость для эксперимента №23, пунктирной линией показана регрессионная зависимость:  $E = 2,3 \cdot 10^{-4} M_{lab}^{1.8}$

Можно видеть, что свойства материала заполнителя межблокового контакта и его вещественный состав оказывают сильнейшее влияние на величину излученной энергии АЭ. При одинаково реализованном лабораторном

сейсмическом моменте величина энергии АЭ может отличаться на 2 порядка величины. Также при реализации нерегулярного режима скольжения можно проследить степенную зависимость излученной энергии АЭ от сейсмического момента, которая в общем случае имеет вид:

$$E \sim M_{lab}^{\gamma} \quad (3.8)$$

При подготовке эпизодов динамического скольжения были выявлены три стадии лабораторного сейсмического цикла, которые сопровождались заметными вариациями активности АЭ (рисунок 3.11). Активность АЭ определялась как количество импульсов АЭ, произошедших в интервале времени  $t$ , нормированная на длительность интервала  $t$ . Активность АЭ определялась в скользящем окне  $t = 0,4$  с с шагом перекрытия  $t/4$ .

Сразу после эпизодов динамического скольжения наблюдается стадия ‘постсейсмического’ скольжения, которая сопровождается уменьшением активности  $n(t)$  в соответствии с законом Омори (1.6). Далее на межсейсмической стадии квазиупругое деформирование межблокового контакта сопровождается постоянным минимальным уровнем активности АЭ  $n_{min}$ . На предсейсмической стадии ускоренное скольжение приводит к степенному росту активности АЭ (обратный закон Омори (1.7)).

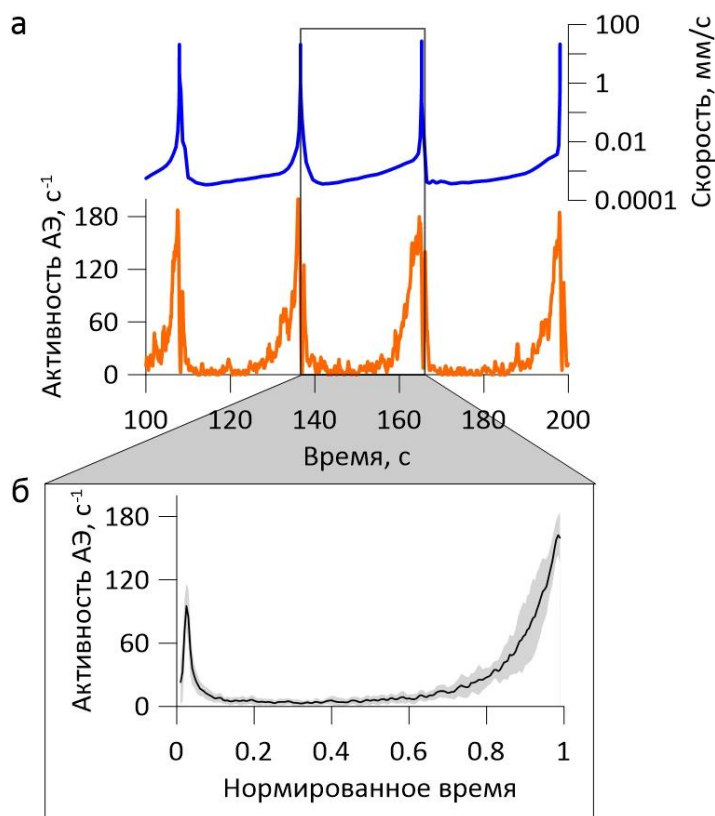


Рисунок 3.11 – Вариации скорости скольжения межблокового контакта и активности АЭ в процессе регулярного прерывистого скольжения (эксперимент №6).

На вставке показаны характерные вариации активности АЭ в ходе лабораторного сейсмического цикла. Время нормировано на рекуррентное время подготовки эпизодов быстрого скольжения. Чёрная линия показывает среднее значение, серая область соответствует стандартному отклонению

В ходе эксперимента изменение активности АЭ  $n(t)$  было вызвано изменением скорости скольжения разлома  $V(t)$ . Корреляционный анализ  $n(t)$  и  $V(t)$  показал высокую корреляцию между этими параметрами для всех реализаций регулярного прерывистого скольжения (коэффициент корреляции Пирсона составляет  $0,85 \pm 0,07$ ). Активность АЭ и скорость скольжения межблокового контакта на предсейсмической стадии лабораторного сейсмического цикла связаны степенной зависимостью типа:

$$n(V) = kV^m + n_{min}, \quad (3.9)$$

где  $n_{min}$  – минимальная активность.

Показатель степени  $m$  изменяется в диапазоне 1,0– 1,6. Выявленная функциональная связь характерна при скоростях скольжения менее 3-4 мкм/с (рисунок 3.12). При скоростях, превышающих 3-4 мкм/с, при переходе межблокового контакта в предельное состояние наблюдалось выполаживание кривой.

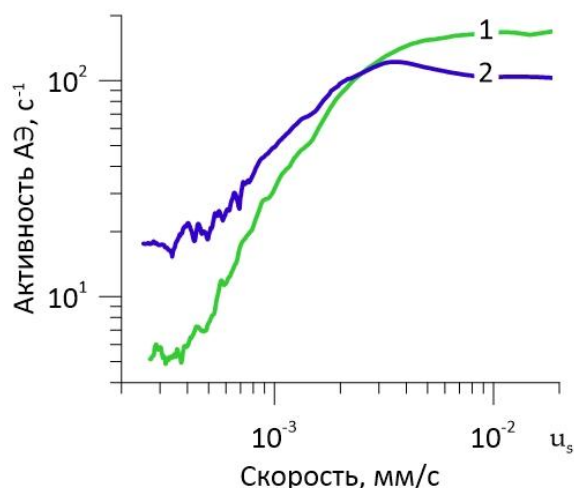


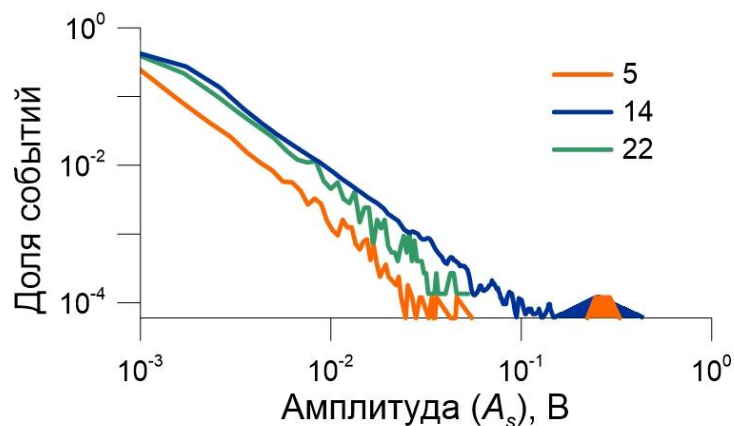
Рисунок 3.12 – Зависимость активности АЭ от скорости межблокового скольжения. 1 – эксперимент №7, 2 – эксперимент №3

В процессе межблокового скольжения статистика импульсов АЭ может быть описано степенным законом, аналогичным закону повторяемости Гутенберга-Рихтера (рисунок 3.13):

$$\lg(N) = a - b \lg(A_s), \quad (3.10)$$

где  $a$  и  $b$  – константы. Коэффициент  $b$  — скейлинговый параметр, указывающий на особенности развития динамического процесса (Лавров, 2016). Степенной закон выполняется в области низких значений амплитуд  $A_s$ , в то время как в области высоких значений формируется отдельный пик, соответствующий импульсам АЭ, излучаемым при эпизодах динамического скольжения. Для регулярного прерывистого режима скольжения наблюдается узкое пикообразное распределение в области высоких амплитуд. При реализации нерегулярного режима скольжения (синяя кривая) при высоких амплитудах пик более размытый, т.к. включает в себя события с более широкой вариацией значений амплитуд. При

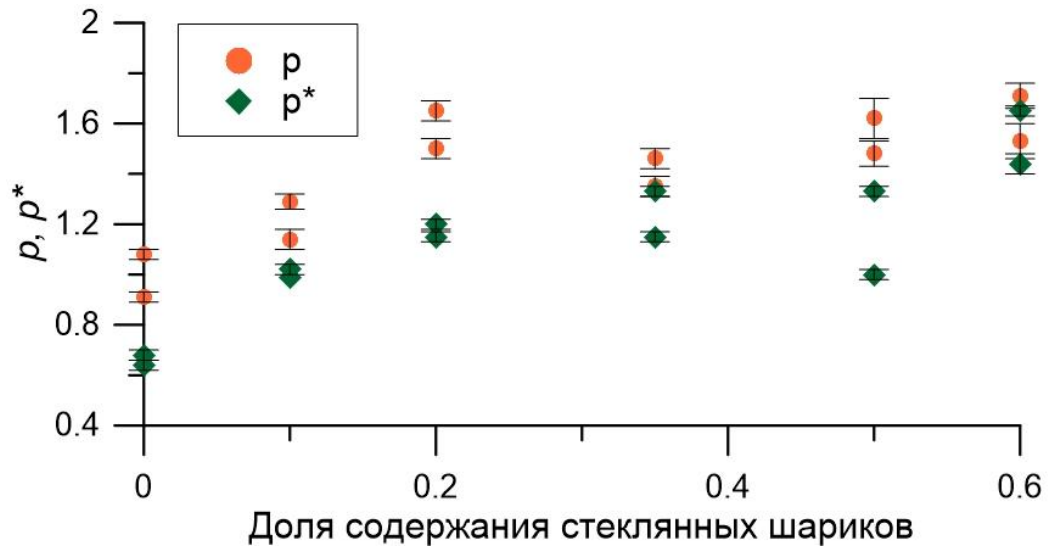
крипе (зеленая кривая) динамических событий не происходит и, как следствие, пик в этой области отсутствует.



*Рисунок 3.13 – Амплитудно-частотное распределение импульсов АЭ для разных режимов скольжения.*

*5 – регулярное прерывистое скольжения, 14 – нерегулярное скольжение, 22 – скольжение с постоянной скоростью (цифры соответствуют номеру эксперимента)*

Статистические параметры импульсов АЭ всех выполненных экспериментов приведены в Таблице 3.2. Параметры закона Омори, обратного закона Омори и рекуррентное время событий определялись только для регулярных режимов скольжения, так как только для них возможно однозначно выделить предсейсмические и постсейсмические стадии. Во всех экспериментах, для которых были определены показатели степени прямого  $p$  и обратного  $p^*$  законов Омори, справедливо следующее неравенство:  $p^* < p$ ; при этом изменение структуры заполнителя межблокового контакта сопровождается заметным изменением параметров закона Омори (рисунок 3.14).



*Рисунок 3.14 – Вариации показателей степени прямого  $p$  и обратного  $p^*$  законов Омори при изменении структуры заполнителя межблокового контакта, сложенного смесью кварцевого песка и стеклянных шариков*

Уменьшение доли кварцевого песка в заполнителе модельного разлома сопровождалось ростом показателей  $p$  и  $p^*$ . Кроме того, все значения  $p$  больше 1, что указывает на локализацию деформации в узкой полосе сдвига на постсейсмической стадии (Dyskin, Pasternak, 2019), что характерно для режима прерывистого скольжения (Reber et al., 2015).



Таблица 3.2. Статистические параметры импульсов АЭ для реализованных режимов скольжения

№	Заполнитель	Акустоэмиссионные параметры			
		<i>b-value</i>	$n_{min}, c^{-1}$	<i>p-value</i>	<i>p*-value</i>
1	Кварцевый песок (250-315мкм)	1,21±0,04	36±14	0,91±0,02	0,64±0,02
2	Кварцевый песок (250-315 мкм)	1,37±0,06	28±11	1,08 ±0,02	0,68±0,01
3	Кварцевый песок (90%) и стеклянные шарики (10%)	1,42±0,04	17±8	1,29±0,03	0,99±0,01
4	Кварцевый песок (90%) и стеклянные шарики (10%)	1,45±0,04	18±8	1,14±0,04	1,02±0,02
5	Кварцевый песок (80%) и стеклянные шарики (20%)	1,39±0,04	13±7	1,50±0,04	1,20±0,02
6	Кварцевый песок (80%) и стеклянные шарики (20%)	1,49±0,05	14±7	1,65±0,04	1,15±0,02
7	Кварцевый песок (65%) и стеклянные шарики (35%)	1,51±0,04	14±7	1,35±0,04	1,15±0,02

Продолжение таблицы 3.2

№	Заполнитель	Акустоэмиссионные параметры			
		<i>b-value</i>	$n_{min}, c^{-1}$	<i>p-value</i>	<i>p*-value</i>
8	Кварцевый песок (65%) и стеклянные шарики (35%)	1,59±0,04	11±6	1,46±0.04	1,33±0,02
9	Кварцевый песок (50%) и стеклянные шарики (50%)	1,55±0,04	10±7	1,48±0.05	1,00±0,02
10	Кварцевый песок (50%) и стеклянные шарики (50%)	1,72±0,03	8±5	1,62±0.08	1,33±0,02
11	Кварцевый песок (40%) и стеклянные шарики (60%)	1,79±0,05	6±4	1,71±0.05	1,65±0,02
12	Кварцевый песок (40%) и стеклянные шарики (60%)	1,67±0,04	5±3	1,53±0.07	1,44±0,04
13	Кварцевый песок (50-1000 мкм )	0,90±0,04	—	—	—
14	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	0,95±0,04	—	—	—
15	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	0,89±0,04	—	—	—

Продолжение таблицы 3.2

№	Заполнитель	Акустоэмиссионные параметры			
		<i>b-value</i>	$n_{min}, c^{-1}$	<i>p-value</i>	<i>p*-value</i>
16	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	0,86±0,04	–	–	–
17	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	0,95±0,04	–	–	–
18	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	0,94±0,04	–	–	–
19	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	0,94±0,04	–	–	–
20	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	0,84±0,04	–	–	–
21	Кварцевый песок (90%) и глина (10%)	0,93±0,04	–	–	–
22	Кварцевый песок (70%) глина (30%)	1,17±0,04	–	–	–
23	Кварцевый песок (50-1000 мкм)	1,09±0,01	–	–	–
24	Увлажненный кварцевый песок (50-1000 мкм)	0,96±0,04	–	–	–

Обобщение результатов выполненных экспериментов показывает высокую обратную корреляцию между скейлинговым параметром  $b$ -value и коэффициентом трения  $\mu$  (рисунок 3.15). Коэффициент корреляции Пирсона составляет -0,95.

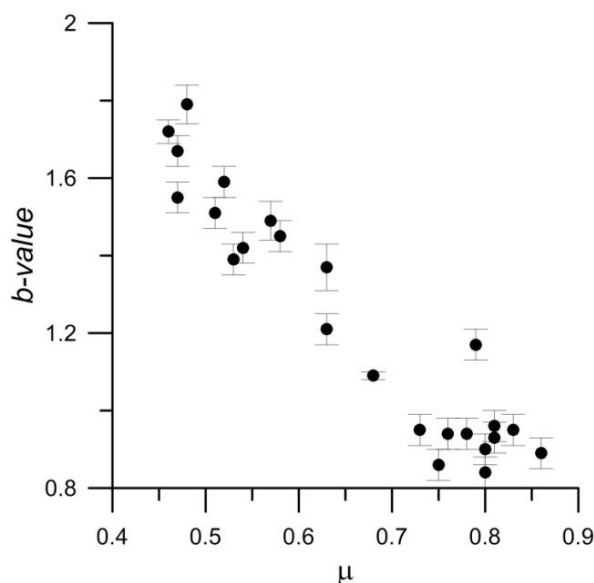


Рисунок 3.15 – Зависимость  $b$ -value от коэффициента трения  $\mu$  для всех выполненных экспериментов

Закономерности эволюции межблокового контакта на микроуровне определяют его характеристики на макроуровне. В механике грунтов признано, что кажущийся коэффициент трения  $\mu$ , который определяется отношением сдвигового напряжения  $\tau$  к нормальному  $\sigma_N$ , больше, чем фактический коэффициент трения между частицами  $\mu^*$ . Для нагруженного конгломерата в виде двумерной силовой цепочки, состоящей из частиц одинакового размера, кажущееся трение  $\mu$  может быть записано в виде:

$$\mu = \frac{\mu^* + \tan \beta}{1 - \mu^* \cdot \tan \beta} \quad (3.11)$$

где  $\beta$  – угол рассогласования. Значение  $\beta$  зависит от распределения частиц по размерам и геометрии упаковки (Biegel, Sammis, 1989). Следовательно, изменение структуры межблокового контакта вызывает изменение коэффициента трения  $\mu$ . Но структурные изменения также являются причиной изменения

параметра *b-value* частотно-амплитудного распределения (Turcotte, 1999; de Arcangelis et al., 2016).

Таким образом, выявленная высокая корреляция между коэффициентом трения  $\mu$  и *b-value* указывает на определяющую роль структуры гранулированного слоя межблокового контакта при реализации того или иного режима скольжения.

### 3.2.2. Классификация импульсов АЭ по параметру волновой формы $WI$

Деформация межблокового контакта сопровождается излучением импульсов АЭ различной волновой формы и амплитуды. Обнаруживаются как импульсы с резким нарастанием амплитуды, так и тремороподобные импульсы (рисунок 3.16). Для количественного описания волновой формы импульса АЭ использовался параметр волновой формы  $WI$  (соотношение 2.5). Чем больше значение  $WI$ , тем медленнее происходит нарастание амплитуды импульса АЭ, небольшие значения  $WI$  соответствуют резкому увеличению амплитуды.

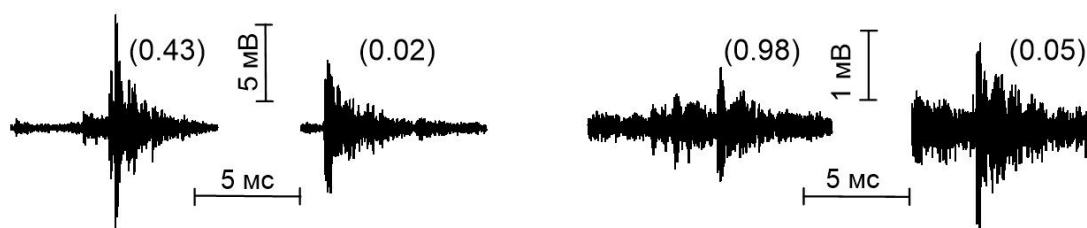


Рисунок 3.16 – Примеры зарегистрированных импульсов АЭ. В скобках указан параметр волновой формы  $WI$

Статистика импульсов АЭ по параметру волновой формы  $WI$  существенно отличается от распределений по амплитуде (рисунок 3.17). Распределение по параметру волновой формы  $WI$  демонстрирует две характерные области: при  $WI \leq 0,1$  и  $WI > 0,1$ . В области  $WI \leq 0,1$  наблюдается равномерное распределение, в то время как в область  $WI > 0,1$  характеризуется степенным спадом. Это распределение может быть описано следующим образом:

$$NN = \begin{cases} c, WI \leq 0.1 \\ d \cdot WI^{-w}, WI > 0.1 \end{cases} \quad (3.12)$$

где  $c$  и  $d$  – положительные константы, определяемые интенсивностью излучения. Характеристическим для данного распределения является показатель степени  $w$ , который определяет изменение доли импульсов при  $WI$  (0,1;1].

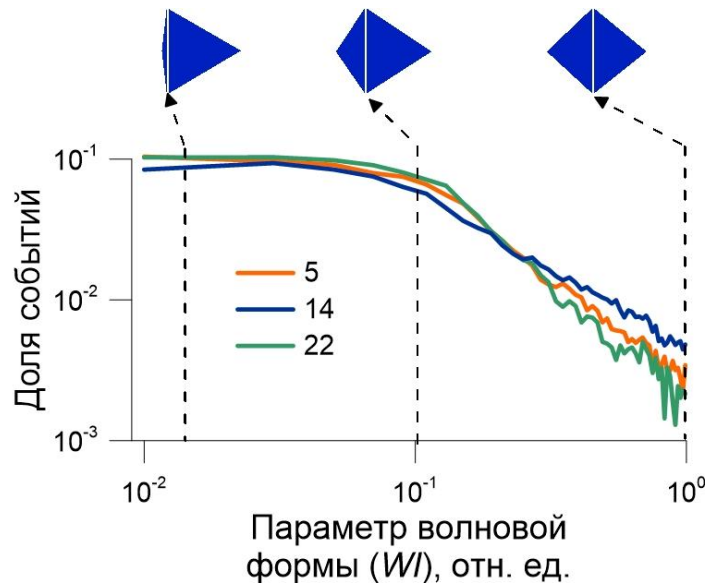


Рисунок 3.17 – Распределение импульсов АЭ по параметру волновой формы  $WI$  для разных режимов скольжения: регулярное прерывистое скольжение (эксперимент № 5), нерегулярное скольжение (эксперимент № 14), скольжение с постоянной скоростью (эксперимент № 22). Сверху схематично показана волновая форма импульсов АЭ

Анализ совокупности всех экспериментов показывает, что корреляция между коэффициентом трения  $\mu$  и скейлинговым параметром  $w$ -value не наблюдается (рисунок 3.18). Следовательно, в отличие от  $b$ -value на распределение импульсов по параметру  $WI$  структура гранулированного слоя не имеет определяющего влияния.

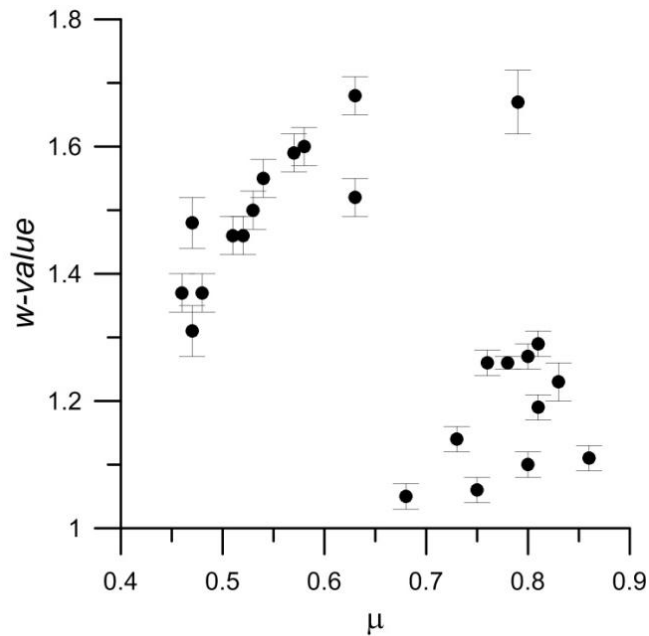


Рисунок 3.18 – Зависимость  $w$ -value от коэффициента трения  $\mu$  для всех выполненных экспериментов

Рассмотрение двумерного распределения импульсов АЭ по амплитуде  $A_s$  и параметру волновой формы  $WI$  указывает на отсутствие корреляций между параметрами  $WI$  и  $A_s$  (рисунок 3.19). Доля импульсов АЭ спадает с ростом параметров, однако имеется небольшой пик в области высоких амплитуд, который соответствует импульсам АЭ, излучаемым при эпизодах динамического скольжения.

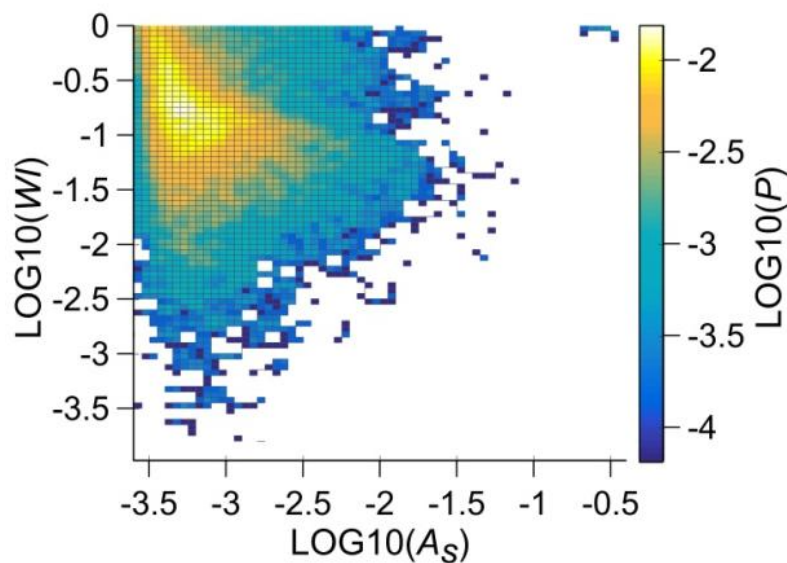


Рисунок 3.19 – Двухпараметрическое распределение импульсов АЭ по параметру волновой формы  $WI$  и амплитуде  $A_s$  (Эксперимент №5)



На основании проведенного статистического анализа импульсов АЭ для экспериментов с различными режимами скольжения можно говорить об использовании параметра волновой формы  $WI$  в качестве независимой характеристики импульсов АЭ, которая несет в себе информацию об эволюции гранулированного слоя межблокового контакта.

Наличие особой точки перегиба в распределении импульсов АЭ по параметру волновой формы побуждает проводить классификацию импульсов по величине параметра  $WI$ . Классификацию по параметру  $WI$  можно рассматривать как своего рода кластеризацию при неконтролируемом машинном обучении. Импульсы с  $WI \leq 0,1$  будут составлять моду I. Это импульсы с резким вступлением (рисунок 3.16). Спектры таких импульсов имеют максимумы в диапазоне 50-65 кГц (рисунок 3.20). Моду II составляют импульсы с  $WI > 0,1$ . Они характеризуются плавным нарастанием амплитуды. Для импульсов, относящихся к моде II, прослеживается тенденция перехода максимума спектра в низкочастотную область и наблюдается максимум на частоте около 20 кГц.

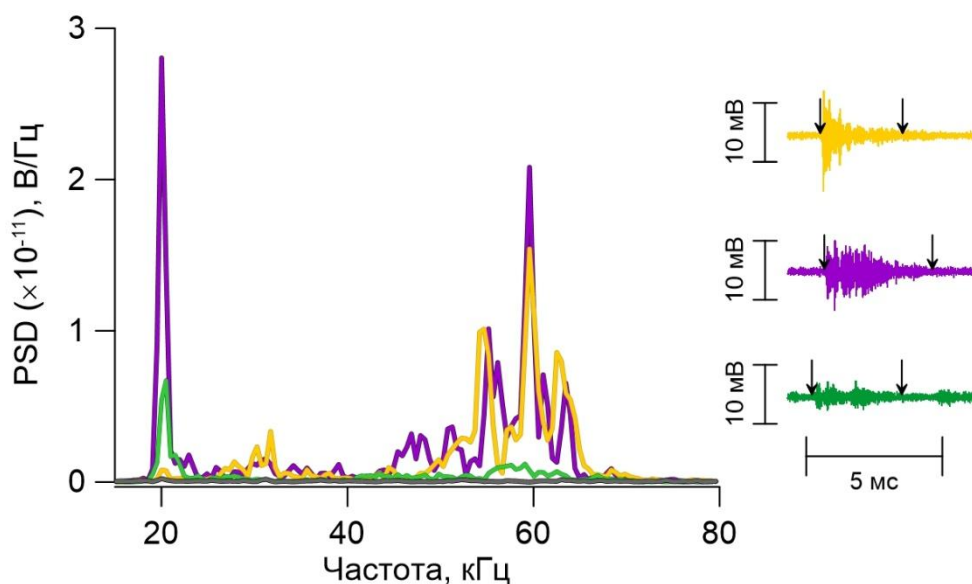


Рисунок 3.20 – Примеры спектров импульсов АЭ, детектированных в ходе экспериментов. Стрелками указаны моменты вступления и окончания импульсов

Анализ скейлинговых параметров импульсов АЭ, детектированных в ходе одного эксперимента, дают важную информацию о динамике внутренних

процессов самоорганизации межблокового контакта. На рисунке 3.21 представлены зависимости длительности и энергии импульсов АЭ от их амплитуды для двух мод.

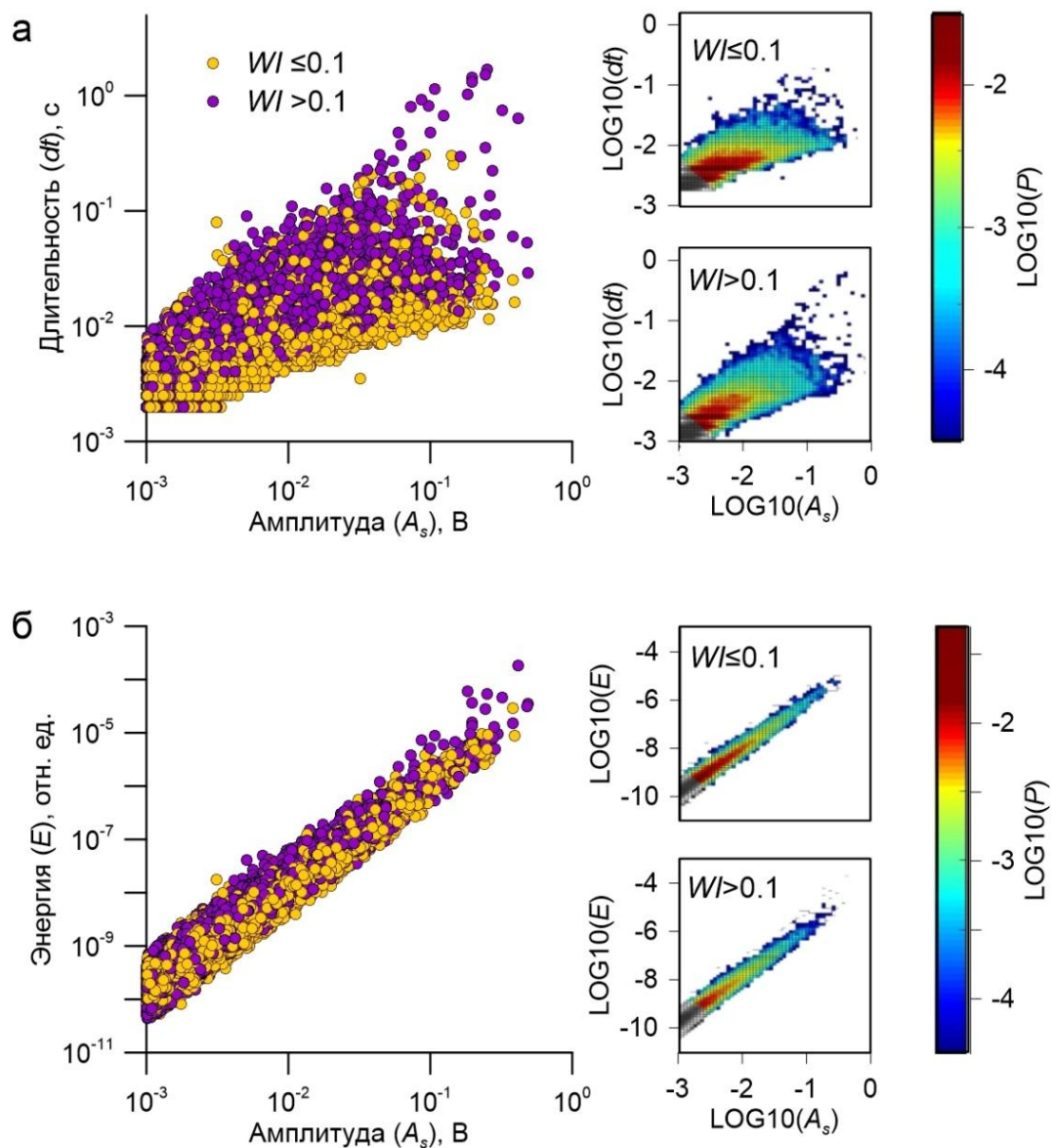


Рисунок 3.21 – Скейлинговые соотношения для импульсов АЭ (Эксперимент №13). Зависимость длительности (а) и энергии (б) импульса от его амплитуды для моды I (желтый) и моды II (фиолетовый). Графики справа показывают двумерные плотности распределения импульсов АЭ отдельно для каждой моды

Можно видеть, что импульсы, относящиеся к моде I, локализируются преимущественно в окрестности нижней границы, импульсы моды II – возле верхней. Это означает, что при одинаковых значениях амплитуды импульсы моды II будут иметь большую длительность, чем моды I.

Все детектированные импульсы АЭ образуют множество, которое находится между двумя границами:

$$\begin{aligned} dt_{upper} &\sim A_s^{1,2 \pm 0,2} \\ dt_{bottom} &\sim A_s^{0,5 \pm 0,1} \end{aligned} \quad (3.13)$$

В то же время показатель степени  $\vartheta$  зависимости  $E(A_s) \sim A_s^\vartheta$  для этих двух мод отличается незначительно (рисунок 3.22), что указывает на то, что межзерновое фрикционное скольжение является преобладающим источником энергии, т.к. разрушение зерен во время сдвигового деформирования отсутствует.

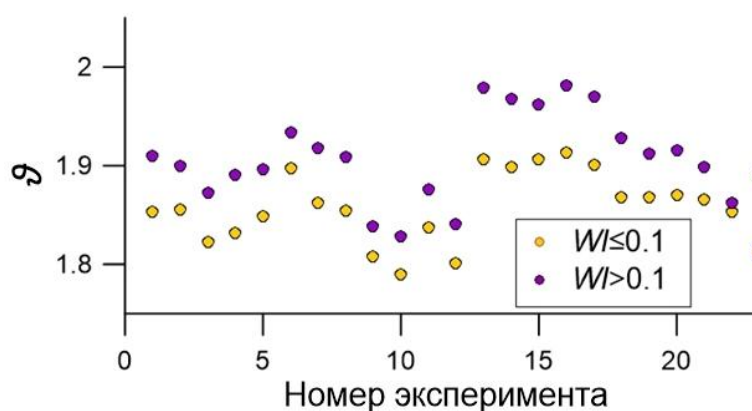


Рисунок 3.22 – Вариации показателя степени  $\vartheta$  зависимости энергии импульса АЭ от его амплитуды ( $E(A_s) \sim A_s^\vartheta$ ). Желтый – мода I, фиолетовый – мода II. Номера экспериментов соответствуют Таблице 2.1

Согласно (Lei, 2003) магнитуда импульса АЭ может быть оценена следующим образом:

$$M = \log (A_s/A_0), \quad (3.14)$$

где  $A_0$  – пороговая величина детектирования. Определенная таким образом магнитуда  $M$  соответствует локальной сейсмической магнитуде  $M_L$ . Так как для сейсмических событий в определенном диапазоне магнитуд наблюдается высокая корреляция между локальной  $M_L$  и моментной  $M_w$  магнитудой (Baruah et al., 2012; Bethmann et al., 2011), то будем полагать, что  $M \cong M_w$ . Величина моментной магнитуды связана с сейсмическим моментом через хорошо известное соотношение (Hanks, Kanamori, 1979):

$$M_W = 2/3 \log M_0 - 10,7 \quad (3.15)$$

Преобразовывая (3.13)–(3.15) и учитывая, что  $M \cong M_w$ , получаем:

$$M_0 \sim 10^{3/2 M_W} \sim A_s^{3/2} \quad (3.16)$$

При изучении скейлинговых соотношений медленных и быстрых землетрясений выделяются две характерные зависимости. Для событий медленного скольжения длительность события  $T$  пропорциональна сейсмическому моменту  $M_0$  (Ide et al., 2007):

$$T \sim M_0 \quad (3.17)$$

Для нормальных землетрясений (Houston, 2001):

$$T \sim M_0^{1/3} \quad (3.18)$$

Данные соотношения соответствуют лабораторному масштабированию ‘медленных’ импульсов АЭ:

$$dt \sim A_s^{3/2} \quad (3.19)$$

и лабораторным ‘быстрым’ импульсам:

$$dt \sim A_s^{1/2}, \quad (3.20)$$

Соотношения (3.19) и (3.20) находится в хорошем соответствии с соотношением (3.13).

### 3.2.3 Эволюция межблокового контакта по данным о параметрах импульсов АЭ

Чтобы выявить закономерности внутренних процессов самоорганизации, была исследована эволюция статистических свойств различных мод импульсов АЭ. На рисунке 3.23 показаны вариации параметров АЭ для регулярного прерывистого скольжения. Параметр *b-value* (рисунок 3.23 в) рассчитывался с использованием метода наименьших квадратов в скользящем окне шириной 100 импульсов АЭ с шагом 50 импульсов.

Для режима регулярного прерывистого скольжения параметр *b-value* для импульсов АЭ моды I ( $WI \leq 0,1$ ) постоянен, а его изменения имеют случайный характер (гистограмма распределения подчиняется нормальному распределению) (рисунок 3.23 в). В тоже время для импульсов АЭ моды II наблюдаются определенные периодические изменения значения *b-value*, и гистограмма не может быть аппроксимирована нормальным распределением. Для моды II характерна следующая картина вариаций *b-value*. Сразу после окончания эпизода динамического скольжения наблюдается относительное увеличение параметра. Затем на межсейсмической стадии, которой соответствует минимальная постоянная скорость межблокового скольжения, значение *b-value* остается постоянным. На заключительном этапе наблюдается монотонное уменьшение *b-value*.

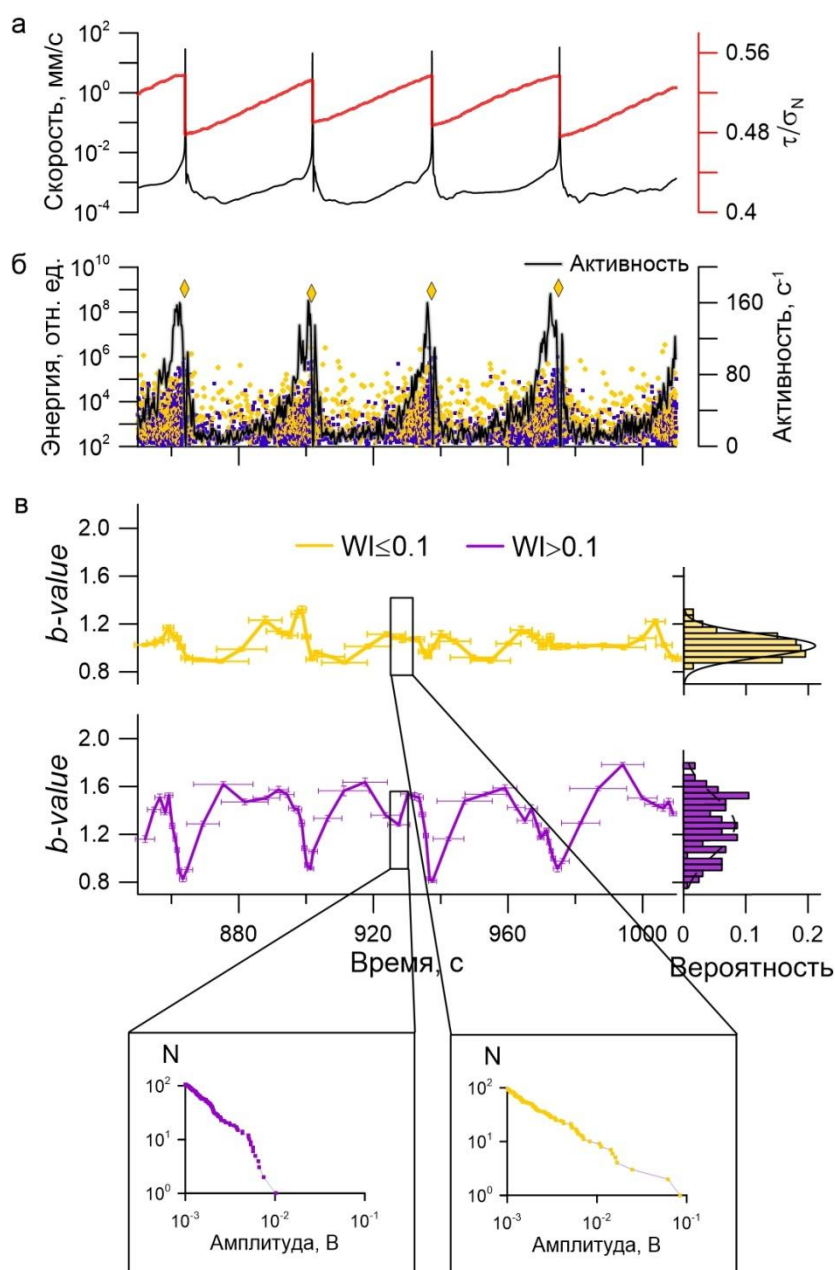


Рисунок 3.23 – Временные вариации параметров, сопровождающих эволюцию межблокового контакта при регулярном прерывистом скольжении: а) временные вариации скорости межблокового смещения и сопротивления сдвигу, нормированного на нормальную нагрузку; б) энергия импульсов АЭ: желтым цветом выделены импульсы моды I, фиолетовым – моды II, желтые ромбы – эпизоды динамического скольжения. Черной линией показана вариация активности АЭ; в) вариации значения  $b$ -value для импульсов моды I (желтый) и моды II (фиолетовый).  $B$ -value рассчитывался с использованием метода наименьших квадратов в скользящем окне шириной 100 импульсов АЭ с шагом 50 импульсов. На врезках показаны примеры амплитудно-частотных распределений импульсов АЭ пределах одного скользящего окна

При нерегулярном режиме скольжения временные изменения механических параметров межблокового контакта не имеют выраженной периодичности, а эпизоды медленного скольжения чередуются с эпизодами быстрого скольжения в случайном порядке (рисунок 3.24 а). Активность АЭ при нерегулярном режиме скольжения не имеет четкой стадийности, как наблюдается при регулярном прерывистом скольжении. Стадийность циклов подготовки и реализации эпизодов динамического скольжения позволяет выявить кластеризацию импульсов АЭ по параметру волновой формы  $WI$ . Как и при регулярном прерывистом скольжении для моды II ( $WI > 0,1$ ) обнаруживаются характерные вариации  $b$ -value (рисунок 3.24).

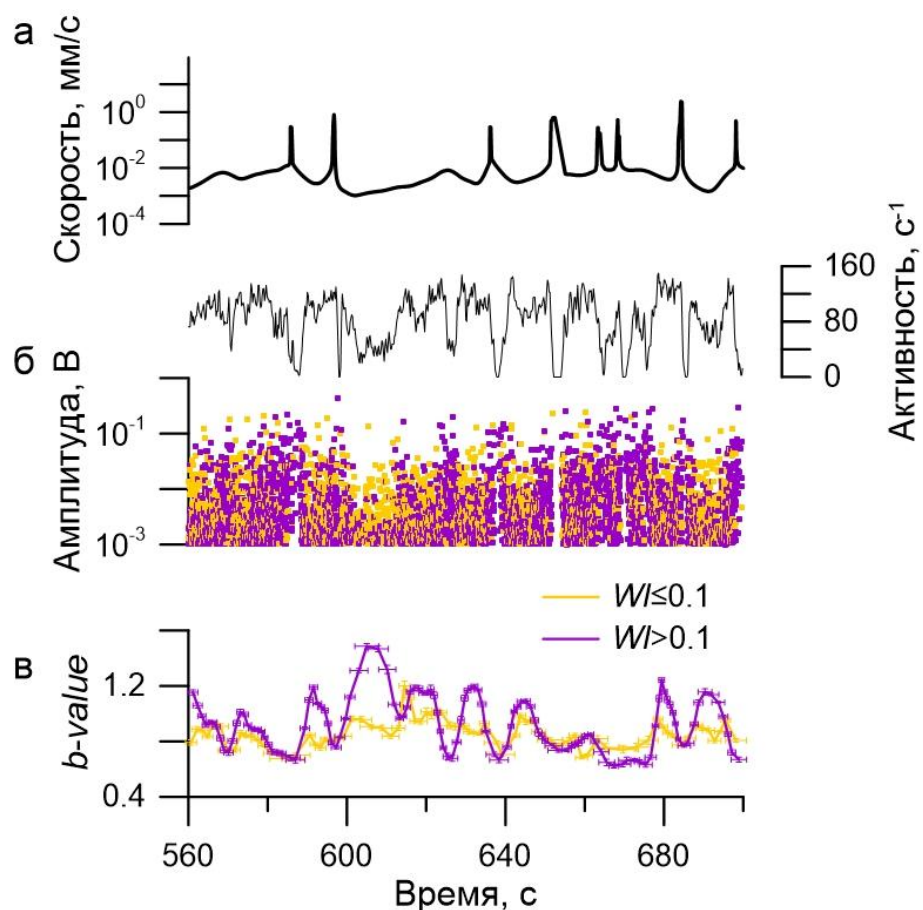


Рисунок 3.24 – Временные вариации параметров импульсов АЭ при режиме нерегулярного скольжения межблокового контакта.

а) скорость межблокового скольжения; б) амплитуды зарегистрированных импульсов АЭ и их активность (желтым цветом отмечены импульсы моды I, фиолетовым – моды II), в) вариации параметра  $b$ -value, рассчитанного в скользящем окне для моды I (желтый) и моды II (фиолетовый) отдельно



Оценим эффективность вариаций  $b$ -value в качестве критерия подготовки эпизодов динамического скольжения. На основании выделения двух мод импульсов АЭ и анализе вариаций  $b$ -value был сформулирован простой критерий «тревоги» приближения эпизода динамического скольжения. Критерий объявления тревоги определяется следующим образом: если для импульсов АЭ моды I наблюдается случайное изменение  $b$ -value, а для импульсов моды II для трех последовательных значений  $b$ -value наблюдается его монотонное уменьшение  $b_{i-2} > b_{i-1} > b_i$ , то тревога подготовки эпизода динамического скольжения объявляется в момент  $t_i$  (рисунок 3.25). Окончание «тревоги» – это либо момент, когда произошло динамическое проскальзывание («истинная» тревога), либо момент времени  $t_n$ , когда наблюдается увеличение параметра  $b_{i+n-1} < b_{i+n}$  («ложная» тревога).

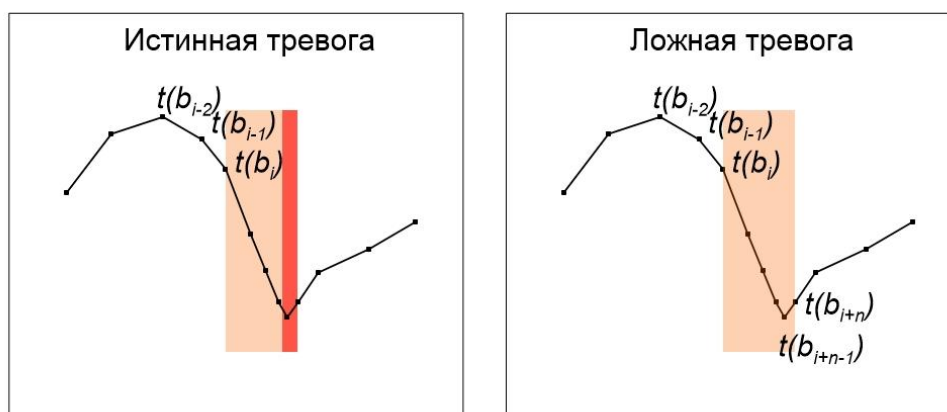


Рисунок 3.25 – Алгоритм объявления и снятия «тревоги» подготовки эпизодов динамического скольжения. Розовым цветом отмечен интервал тревоги, красным – момент срыва. Слева показана схема объявления истинной тревоги, когда после ее объявления наступает целевое событие, справа – схема объявления ложной тревоги

Для режима регулярного прерывистого скольжения время тревоги охватывает всю стадию ускоренного скольжения межблокового контакта. Например, в эксперименте № 4 (Рисунок 3.26 а) длительность сигнала тревоги составила  $3,9 \pm 1,9$  с, в то время как рекуррентное время составляло  $34,2 \pm 0,8$  с. В то же время важно отметить, что предельное напряженное состояние (когда событие может быть вызвано слабым возмущением) возникает только при напряжениях,



близких к пределу фрикционной прочности, в конце предсейсмической стадии (Kocharyan et al., 2018). Для режима нерегулярного скольжения (рисунок 3.26 б) характер изменения значения параметра  $b$ -value является более сложным, но выбранный критерий «тревоги» чувствителен и для такого режима. Более сложная картина вариаций приводит к появлению «ложных тревог».

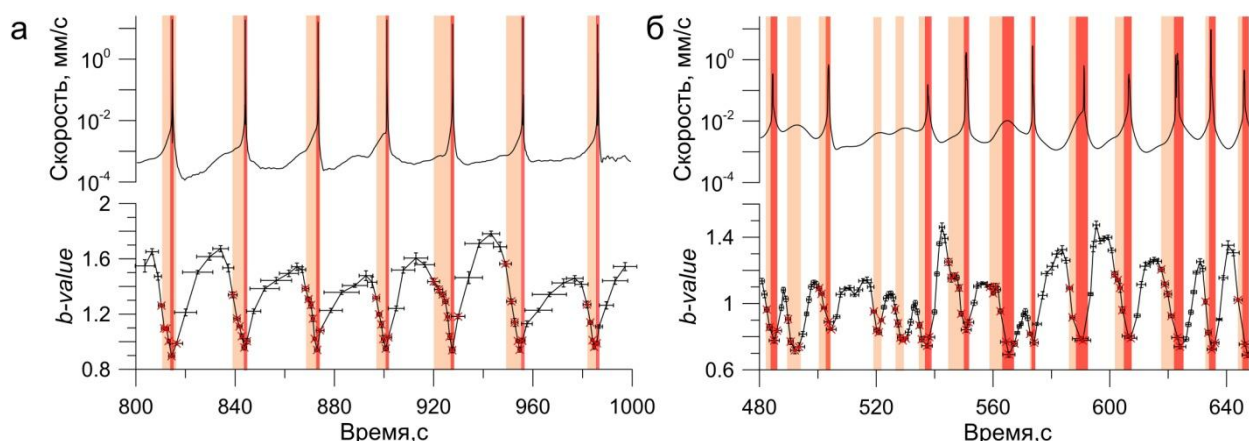


Рисунок 3.26 – Объявление тревоги в экспериментах при а) регулярном прерывистом скольжении (эксперимент №4) и б) нерегулярном режиме скольжения (эксперимент №13).

*Розовым цветом выделено время объявления тревоги, красным – моменты наступления эпизодов динамического скольжения*

Для определения эффективности ретроспективного прогноза эпизодов динамического скольжения была использована диаграмма ошибок и оценка эффективности по Молчану (Molchan, 2003, 2010). В качестве количественной характеристики эффективности метода используется величина  $J_m$ , определяемая как

$$J_m = 1 - \nu - \tau \quad (3.21)$$

$$\nu = 1 - \frac{N_+}{N}; \quad \tau = \frac{T_{тревоги}}{T},$$

где  $\tau$  – относительное время тревоги;  $\nu$  – доля пропущенных эпизодов динамического скольжения;  $N_+$  – количество случаев успешного объявления тревоги за период наблюдения  $T$ ;  $N$  – общее количество эпизодов динамического скольжения, произошедших за время  $T$ ;  $T_{тревоги}$  – общее время тревоги;  $T$  – общее

время наблюдений. Чем ближе значение  $J_m$  к 1, тем надежнее выбранный алгоритм.

Диаграмма ошибок представлена на рисунке 3.27. На оси абсцисс диаграммы отложено относительное время тревоги, а на оси ординат – доля пропущенных эпизодов динамического скольжения. Точка (1;0) соответствует так называемой стратегии «пессимиста», при которой всегда включена тревога и нет пропусков цели, а точка (0;1) – стратегия «оптимиста», при которой наоборот тревога всегда выключена, но все цели пропущены. Точка (0;0) является недостижимой идеальной стратегией, когда при полностью отключенной тревоге отсутствуют пропуски цели.

Эффективность алгоритма прогноза эпизодов динамического скольжения в течение времени наблюдения определяется определенными значениями  $[\tau; \nu]$ . В случае если эта точка располагается на диагонали, либо внутри доверительного интервала, рассчитанного как биномиальное распределение с уровнем значимости  $\alpha = 10^{-5}$  (рисунок 3.27), то такая стратегия является случайным угадыванием. Чем дальше от этой кривой находится точка, тем более неслучайной является выбранная стратегия. Для всех реализованных регулярных режимов скольжения  $J_m$  находится в диапазоне 0,59–0,83, в то время как для нерегулярного режима  $J_m = 0,4 - 0,65$ . Значения эффективности прогноза для всех реализованных режимов скольжения приведены в Таблице 3.3.

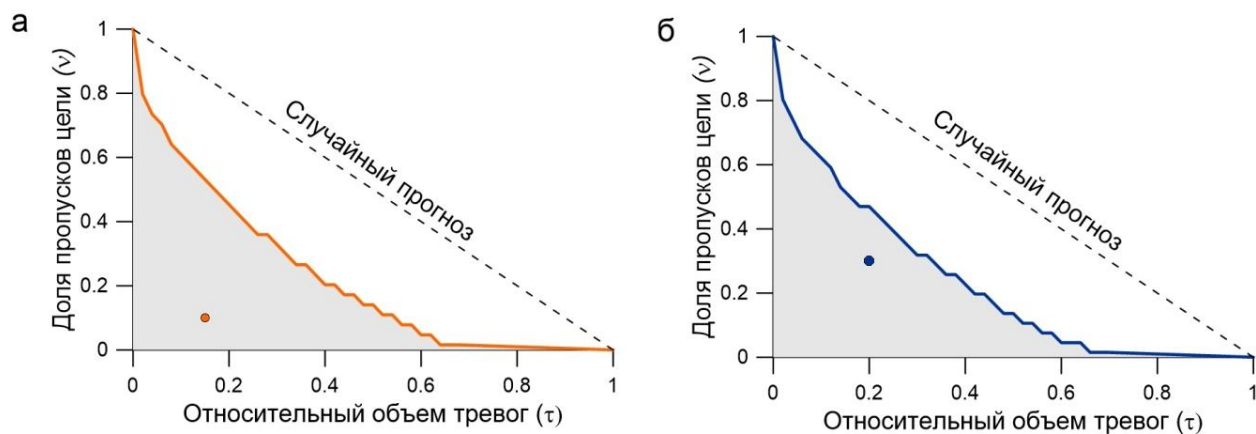


Рисунок 3.27 – Диаграмма Молчана оценки эффективности алгоритма прогноза подготовки эпизодов динамического скольжения для а) регулярного прерывистого скольжения (Эксперимент №4) и б) режима нерегулярного скольжения (Эксперимент № 13). Сплошной линией отмечен доверительный интервал на уровне  $\alpha = 10^{-5}$

Таблица 3.3. Эффективность алгоритма прогноза подготовки динамического скольжения по Молчану на основе кластеризации импульсов АЭ.

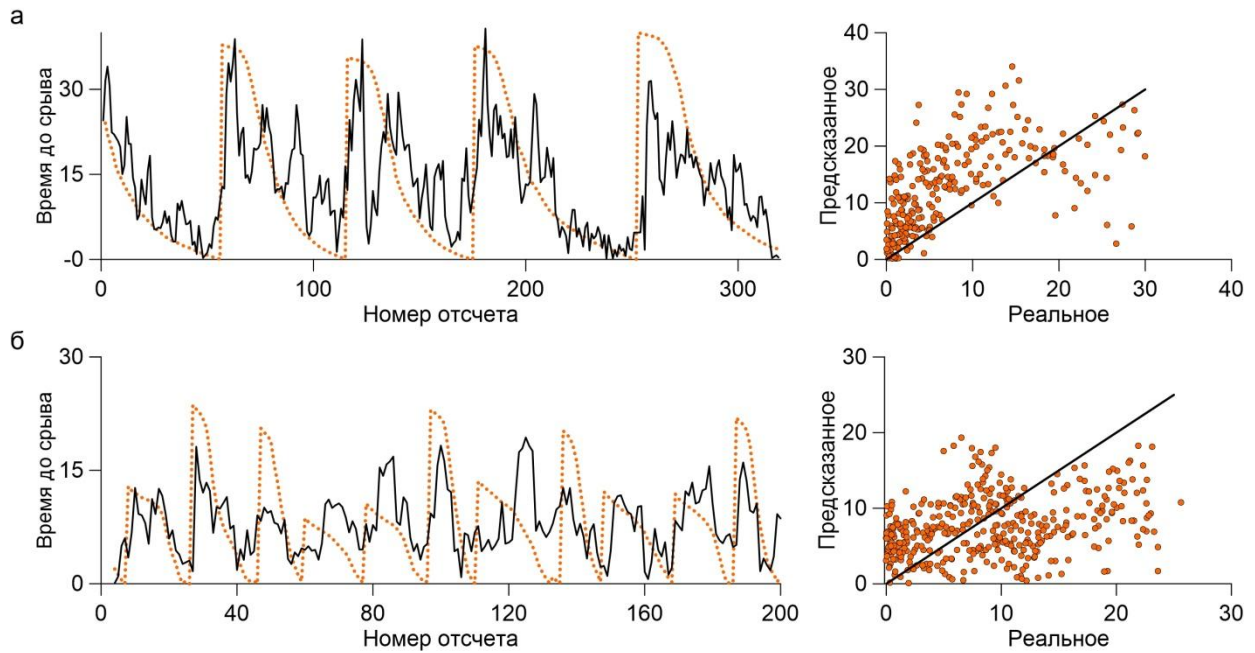
№.	Заполнитель	Режим скольжения	Эффективность ( $J_m$ )
1	Кварцевый песок (250-315мкм)	Регулярный	0,81
2	Кварцевый песок (250-315мкм)	Регулярный	0,82
3	Кварцевый песок (90%) и стеклянные шарики (10%)	Регулярный	0,77
4	Кварцевый песок (90%) и стеклянные шарики (10%)	Регулярный	0,85
5	Кварцевый песок (80%) и стеклянные шарики (20%)	Регулярный	0,76
6	Кварцевый песок (80%) и стеклянные шарики (20%)	Регулярный	0,80
7	Кварцевый песок (65%) и стеклянные шарики (35%)	Регулярный	0,63
8	Кварцевый песок (65%) и стеклянные шарики (35%)	Регулярный	0,59
9	Кварцевый песок (50%) и стеклянные шарики (50%)	Регулярный	0,47
10	Кварцевый песок (50%) и стеклянные шарики (50%)	Регулярный	0,83
11	Кварцевый песок (40%) и стеклянные шарики (60%)	Регулярный	0,74

Продолжение таблицы 3.3

№.	Заполнитель	Режим скольжения	Эффективность ( $J_m$ )
12	Кварцевый песок (40%) и стеклянные шарики (60%)	Регулярный	0,80
13	Кварцевый песок (50- 1000мкм)	Нерегулярный	0,62
14	Кварцевый песок (50- 1000мкм)	Нерегулярный	0,49
15	Кварцевый песок (50- 1000мкм)	Нерегулярный	0,65
16	Кварцевый песок (50- 1000мкм)	Нерегулярный	0,50
17	Кварцевый песок (50- 1000мкм)	Нерегулярный	0,48
18	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	Нерегулярный	0,41
19	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	Нерегулярный	0,46
20	Кварцевый песок (95%) и глина (5%)	Нерегулярный	0,39
21	Кварцевый песок (90%) и глина (10%)	Нерегулярный	0,40
22	Кварцевый песок (70%) глина (30%)	Стабильное скольжение	—
23	Кварцевый песок (50- 1000мкм)	Нерегулярный	0,82
24	Увлажненный кварцевый песок (50-1000 мкм)	Регулярный	0,72

### 3.2.4. Применение алгоритма случайный лес для определения времени до эпизода динамического скольжения

Для определения времени до эпизодов динамического скольжения был применен алгоритм МО Случайный лес, в котором в качестве входных данных использовались данные сформированного каталога импульсов АЭ. Статистические параметры, которые характеризуют поток импульсов АЭ, сопровождающих процесс скольжения межблокового контакта, были рассчитаны в скользящем окне шириной 100 импульсов АЭ с шагом 50 импульсов. В качестве параметров были использованы среднее, дисперсия, асимметрия, эксцесс, максимальные и минимальные значения амплитуды в выборке, активность АЭ, *b-value*, а также все представленные параметры для двух мод АЭ ( $WI \leq 0,1$  и  $WI > 0,1$ ). На рисунке 3.28 представлены результаты определения времени до начала эпизода динамического скольжения. Для режима регулярного прерывистого скольжения алгоритм демонстрирует достаточную эффективность с учетом малой выборки параметров, используемых в модели. Наиболее вероятное значение ошибки определения времени до динамического события составляет 0,4 с (без деления на кластеры) и 0,2 с (с делением), при этом коэффициент детерминации  $R^2 = 0,45$ . В условиях нерегулярного режима скольжения определение времени наступления эпизодов динамического скольжения является возможным только при разделении всего ансамбля импульсов АЭ на две моды. Коэффициент детерминации алгоритма  $R^2 = 0,33$ , а наиболее вероятное значение ошибки определения времени до эпизода динамического скольжения составляет 1,5 с.



*Рисунок 3.28 – Определение времени до эпизодов динамического скольжения на основе алгоритма МО «случайный лес» при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах межблокового скольжения.*

*Пунктирная линия – реальное время до срыва, сплошная – предсказанное значение. При регулярном режиме точность алгоритма составляет  $R^2=0,45$ , при нерегулярном –  $R^2=0,33$*

*Справа представлено сравнение истинных и предсказанных значений. Прямая линия соответствует точному определению скорости*

Имплементация алгоритма МО Случайный лес демонстрирует потенциальную возможность определения момента начала эпизода динамического скольжения при различных режимах деформирования. В проведенных экспериментах обучение алгоритма на относительно коротких временных интервалах позволяет осуществлять успешный прогноз поведения системы.

### Выводы к главе 3

- Для межблокового контакта, сложенного гранулированным слоем, экспериментально выявлена функциональная зависимость между фрикционной прочностью, скоростью нагружения и потоком энергии АЭ, что указывает на определяющую роль структуры гранулированного слоя в процессе эволюции состояния трещины.
- В условиях регистрации непрерывной АЭ обобщенный дефицит  $G$  межблокового контакта позволяет объединить информацию о скорости смещения межблокового контакта и потоке энергии АЭ. Скорость приращения дефицита  $\dot{G}$  может выступать в качестве акустоэмиссионно-деформационного индикатора состояния межблокового контакта, позволяющего с высокой точностью контролировать подготовку эпизодов динамического скольжения.
- В лабораторных экспериментах выявлена определяющая роль структуры гранулированного слоя межблокового контакта на закономерности излучения импульсов АЭ при реализации различных режимов скольжения. Наблюдаются систематические изменения параметров основных законов сейсмичности (закон Гутенберга-Рихтера, закон Омори, обратный закон Омори) при изменении структуры межблокового контакта. Выявлена высокая обратная корреляция (-0,95) между параметрами *b-value* закона Гутенберга-Рихтера и коэффициентом трения  $\mu$ .
- Применение методов машинного обучения на данных АЭ позволило восстановить скорость смещения блока, и была продемонстрирована возможность определения момента начала эпизода динамического скольжения при различных режимах деформирования.
- Развита метод классификации импульсов АЭ по параметру волновой формы  $WI$ . В ансамбле импульсов АЭ, сопровождающем скольжение межблокового контакта, выделяются две моды: импульсы АЭ с  $WI \leq 0,1$  и  $WI > 0,1$ . Если



для импульсов АЭ с  $WI \leq 0,1$  наблюдается случайное изменение *b-value*, то для импульсов АЭ с  $WI > 0,1$  наблюдаются вариации *b-value*, соответствующие циклам подготовки и реализации эпизодов динамического скольжения. Подготовка эпизодов динамического скольжения сопровождается снижением *b-value* для всех реализованных режимов скольжения.

## ГЛАВА 4. АДАПТАЦИЯ МЕТОДА КЛАССИФИКАЦИИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ВОЛНОВОЙ ФОРМЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Разработка месторождений минерального сырья сопровождается значительными объемами извлекаемой и перемещаемой горной породы, откачки и закачки флюидов. Интенсификация техногенного воздействия на массив горных пород вызывает рост сейсмической активности и может привести к возникновению катастроф природно-техногенного характера – инициированных и индуцированных землетрясений, крупных горно-тектонических ударов и др. (Адушкин, Турунтаев, 2015; Kubacki et al., 2014; Foulger et al., 2018; Emanov et al., 2020). В условиях подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых для получения информации о динамике массива горных пород, создаются подземные многоуровневые системы сейсмического мониторинга и применяются современные алгоритмы обработки (Kremenetskaya, Trjapitsin, 1995; Рассказов, 2018), что в некоторых случаях позволяет проводить локацию микросейсмических событий с магнитудой до  $-4$  (Kwiatek et al., 2010, 2011).

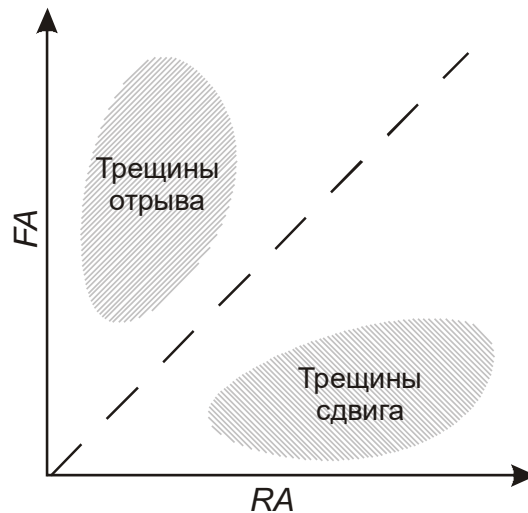
В данной главе предложен метод **К**лассификации **А**нсамбля **м**икро**С**ейсмических **И**мпульсов на основе алгоритма  $k$ -средних (КЛАСИ- $k$ ), направленный на выделение в ансамбле микросейсмических событий подмножеств, характеризующихся различными скейлинговыми соотношениями ( $E_s(M_0)$  и  $T(M_0)$ ). Апробация метода КЛАСИ- $k$  проводилась на данных сейсмического мониторинга серии массовых взрывов на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии.

#### **4.1. Метод классификации ансамбля микросейсмических импульсов на основе алгоритма $k$ -средних**

В основе метода КЛАСИ- $k$  лежат результаты классификации, представленные в Главе 3, классификация по  $RA-AF$  диаграмме (Ohno, Ohtsu, 2010) и алгоритм кластеризации  $k$ -средних (Hartigan, Wong, 1979).

##### **$RA-AF$ диаграмма**

Для классификации механизма трещинообразования твердых тел активно применяется диаграмма  $RA-AF$  (Ohno, Ohtsu, 2010). Классификация основана на оценке двух параметров волновой формы импульсов АЭ, а именно, скорости нарастания амплитуд  $RA$  и средней частоты  $AF$ . В зависимости от расположения точки, характеризующей импульс АЭ, на диаграмме  $RA-AF$  выделяют трещины отрыва или трещины сдвига (рисунок 4.1). В окрестности границы, разделяющей трещины сдвига и трещины отрыва, локализуется смешанный тип трещинообразования, механизм которого может быть определен, например, с помощью диаграммы Хадсона (Hudson et al., 1989; Пантелеев, 2020). В экспериментах по разрушению твердых тел показано, что по мере приближения момента макроразрушения увеличивается доля трещин сдвига (Shiotani et al., 2001).



*Рисунок 4.1 – RA-AF диаграмма. Схематично показаны области, соответствующие импульсам АЭ, излучаемым при образовании трещин отрыва и трещин сдвига. Пунктирной линией обозначена условная граница между двумя типами трещин*

В условиях зарождения динамической подвижки в тонком слое гранулированной среды, когда излучение обусловлено не разрушением зерен, а межзерновым проскальзыванием, высокую информативность, как показано в Главе 3 имеет индекс волновой формы  $WI$ . С учетом того, что в процессе поствзрывных релаксаций в массиве может происходить как формирование трещин, так и смещение по существующим трещинам, для классификации шахтной сейсмичности целесообразно использовать три параметра волновой формы, а именно –  $RA$ ,  $AF$  и  $WI$ .

#### **Алгоритм $k$ -средних ( $k$ -means)**

Алгоритм  $k$ -средних является одним из самых простых и наиболее распространенных алгоритмов решения задачи разбиения множества объектов на группы, называемые кластерами. Внутри каждой группы должны оказаться «похожие» объекты, а объекты разных групп должны быть как можно более отличны. В общем случае алгоритм  $k$ -средних заключается в разделении генеральной выборки изначально имеющих  $N$  наблюдений, характеризующихся  $m$  количественными признаками, на  $k$  взаимоисключающих групп. Данные

фактически представляются в виде множества, состоящего из  $N$  векторов с  $m$  компонентами:  $X_i(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m)$ ,  $i = 1, \dots, N$ . В качестве меры близости точек множества используется квадрат Евклидова расстояния:

$$\rho(X_i, X_j) = \sum_{l=1}^m (x_i^l - x_j^l)^2. \quad (4.1)$$

На первом этапе алгоритма из  $N$  точек выбираются случайным образом  $k$  точек, которые принимаются за центры кластеров  $\{\mu\}$ . Затем, для каждой из оставшихся  $N-k$  точек  $X_i$  вычисляется мера близости к центрам кластеров и определяется, к какому из центров кластеров она ближе всего и, следовательно, какому кластеру она принадлежит. На втором этапе для каждого из кластеров определяется его центр тяжести  $M_k$ . В качестве центра тяжести  $k$ -го кластера берется одна из его точек, удовлетворяющая условию минимума суммарного квадратичного внутрикластерного отклонения  $a$ :

$$a = \sum \rho(M_k, X_i) \rightarrow \min. \quad (4.2)$$

Алгоритм начинается с разбиения входных точек на  $k$  начальных кластеров произвольно или с использованием некоторого правила. После того, как определены центры тяжести всех кластеров, случайным образом происходит переопределение центров кластеров  $\{\mu^*\}$ , и этапы 1–2 повторяются. Если для новой выборки разбиение на кластеры и их центры тяжести не изменяются по сравнению с предыдущими, то процедура алгоритма завершается и считается, что кластеры имеют центры тяжести  $M_1^*, M_2^*, \dots, M_k^*$ .

Так как используемые признаки точек наблюдений могут иметь различные порядки величин, предварительно перед выполнением кластеризации все признаки нормируются средним  $x_{i, \text{норм}}^l = \frac{x_i^l - \bar{x}^l}{\sigma_{x^l}}$ , где  $x_i^l$  – исходное значение  $l$ -го признака  $i$ -й точки наблюдения;  $\bar{x}^l$  и  $\sigma_{x^l}$  – среднее значение и дисперсия, определяемые соотношениями:

$$\bar{x}^l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^l; \quad (4.3)$$

$$\sigma_{x^l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i^l - \bar{x}^l|^2. \quad (4.4)$$

На основе метода главных компонент было показано, что параметры волновой формы  $RA$ ,  $FA$  и  $WI$  могут объяснить 95% вариаций данных.

### Определение оптимального количества кластеров

При использовании алгоритма кластеризации, необходимо определить количество кластеров, на которое будут разделены данные. Для поиска оптимального значения количества кластеров используются метрики, предназначенные для оценки качества алгоритмов четкой кластеризации. Стоит отметить, что не существует универсального решения, и наилучшим вариантом является использование комбинированного подхода. Для определения количества кластеров использовался индекс Calinski-Harabasz (индекс  $VRC$ ) (Calinski, Harabasz, 1974). Этот параметр учитывает соотношение между средним квадратом расстояния  $\bar{d}^2$  между элементами в кластеризуемом множестве и средний квадрат расстояния между элементами в выделенных кластерах  $\bar{d}_{ki}^2$  и определяется согласно следующему соотношению:

$$VRC = \frac{\frac{BGSS}{k-1}}{\frac{WGSS}{N-k}}. \quad (4.5)$$

Сумма расстояний внутри кластеров  $WGSS$  и между кластерами  $BGSS$  вычисляется согласно соотношениям:

$$WGSS = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (n_{ki} - 1) \bar{d}_{ki}^2 \quad (4.6)$$

$$BGSS = \frac{1}{2} ((k-1) \bar{d}^2 + (N-k) A_k) \quad (4.7)$$

где  $A_k = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^k (n_{ki} - 1)(\bar{d}^2 - \bar{d}_{ki}^2)$  – взвешенная средняя разница расстояний между центрами кластеров и общим центром множества, а  $n_{ki}$  – число элементов в кластере  $k_i$ . Индекс *VRC* рассчитывается для разного количества кластеров, и максимальное значение индекса соответствует оптимальному количеству кластеров (Calinski, Harabasz, 1974; Сивоголовко, 2011).

## 4.2. Объект исследования и используемый каталог индуцированных микросейсмических импульсов

Коробковское железорудное месторождение сложено из 8 крутопадающих залежей железистых кварцитов длиной 380–3500 м и горизонтальной мощностью 50–1050 м (Адушкин и др., 2017). Разработка Коробковского железорудного месторождения ведется подземным способом. Согласно результатам измерений, горизонтальные напряжения на глубине 300 м от поверхности составляют 13–15 МПа, превышая примерно в 1.5 раза вертикальные (Адушкин и др., 2017; Кочарян и др., 2018). Средние значения физико-механических характеристик образцов горных пород разрабатываемого массива, отобранных в горных выработках, приведены в таблице 4.1.

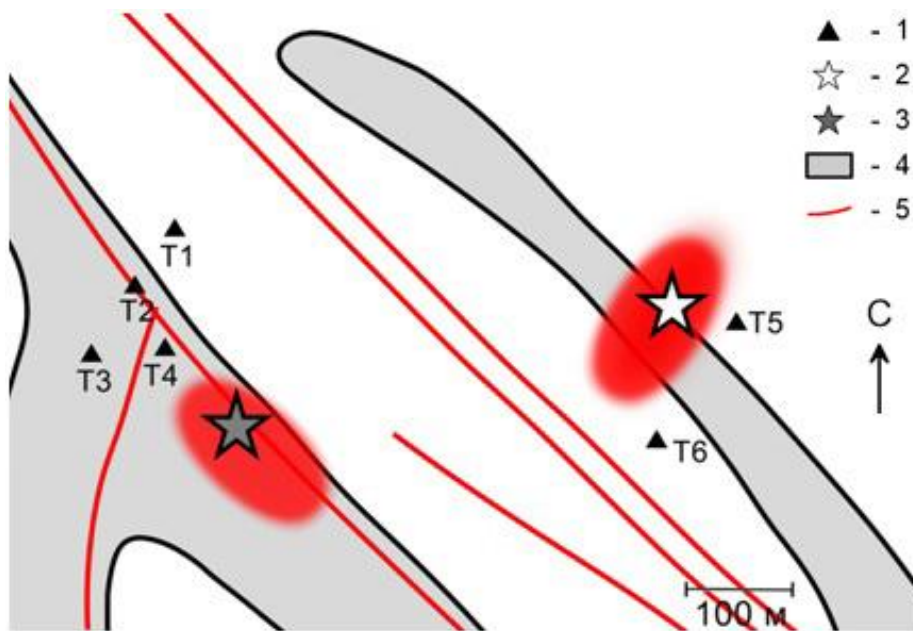
Таблица 4.1. Физико-механические характеристики разрабатываемых кварцитов (Беседина и др., 2021).

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\nu$	$\mu$ , ГПа	$C_{\alpha}$ , м/с	$C_{\beta}$ , м/с
3400-3700	0,65-1,16	0,13-0,33	29-48	4400-6300	2900-3600

Регистрация микросейсмических событий выполнялась сейсмической группой, размещенной на глубине 300 м и состоящей из 6 измерительных точек Т1–Т6, оборудованных акселерометрами Bruel & Kjaer 8306 (Беседина и др., 2021). Акселерометры с рабочим диапазоном частот от 0,08 Гц до 1 кГц располагались на вертикальных стенках выработки: датчики в измерительных точках Т1–Т4, Т6 – перпендикулярно стенке выработки, точка Т5 – трёхкомпонентная. Частота дискретизации составляла 10 кГц, чувствительность измерительного канала – 7,8 (мкм/с<sup>2</sup>)/отсчет. Анализируемые события были зарегистрированы после массовых взрывов в период прекращения горных и строительно-монтажных работ. Для анализа использовались данные двух взрывов, произведенных 06.07.2019 г. и 24.10.2020 г. Расположение датчиков, взрывная камера и область локализации индуцированных событий представлены на рисунке 4.2. При взрыве 06.07.2019 г. сейсмическая группа включала датчики



T1–T4, при взрыве от 24.10.2020 г. – T1, T2, T5 и T6. Примеры зарегистрированных сейсмических событий и их спектры приведены на рисунке 4.3.



*Рисунок 4.2 – Схема исследуемого участка Коробковского железорудного месторождения: 1 – акселерометры T1–T6; 2,3 – области взрывов, произведенных 06.07.2019 г. (3) и 24.10.2020 г. (2); 4 – рудные поля; 5 – зоны тектонических нарушений*

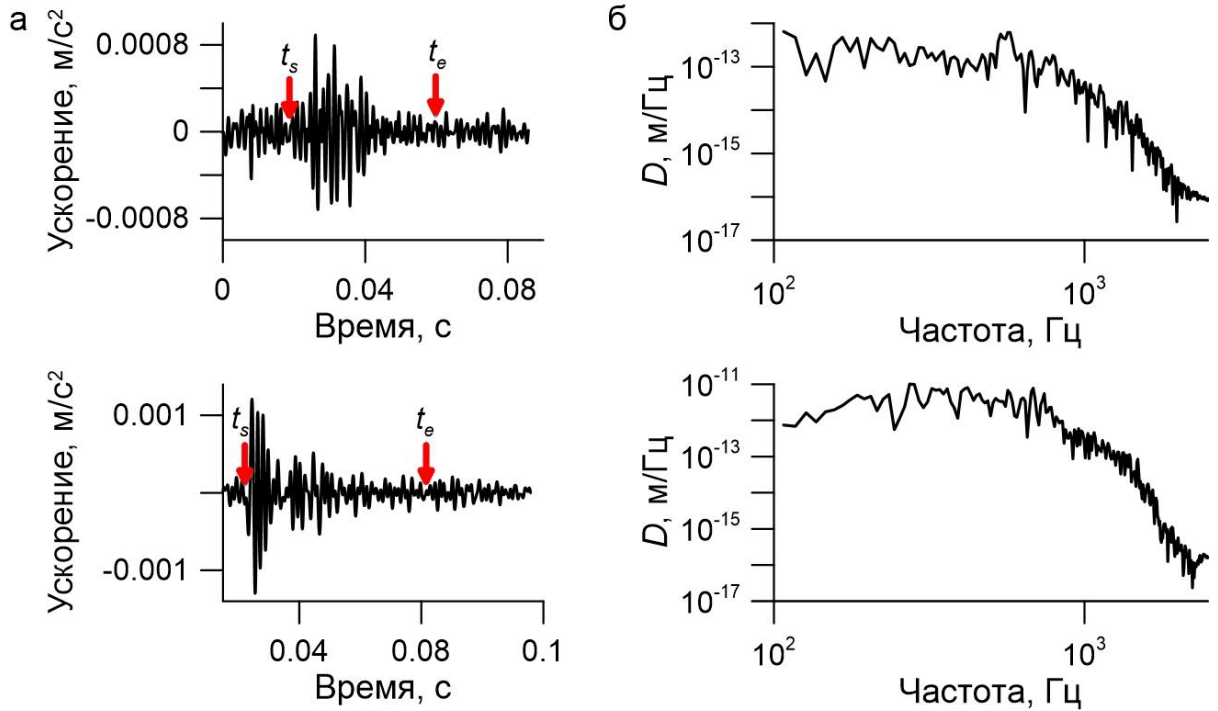


Рисунок 4.3 – Примеры зарегистрированных микросейсмических импульсов (а) и их амплитудные спектры смещения (б). Стрелками указаны моменты вступления и окончания импульсов

Для определения момента вступления сейсмических событий применялся информационный критерий Акаике  $AIC$  (1.4). Момент окончания события определялся по пересечению потоком энергии  $E = \int_{t_1}^{t_2} A^2 dt$  порогового значения.

#### 4.2.1. Определение параметров микросейсмических событий

Для детектированных событий определялись параметры волновой формы  $WI$ ,  $RA$  и  $AF$ , а также очаговые параметры: сейсмический момент  $M_0$ , угловая частота  $f_0$  и сейсмическая энергия  $E_s$ . Скалярный сейсмический момент может быть рассчитан согласно соотношению (Кейлис-Борок, 1957) в модификации (Gibowicz, Kijko, 1994):

$$M_0 = \frac{4\pi\rho C^3 R \Omega_0}{F_c R_c S_c}, \quad (4.8)$$

где  $\rho$  – плотность массива ( $\rho=3400$  кг/м<sup>3</sup>);  $C$  – скорость распространения волн;  $R$  – расстояние от источника до точки наблюдения;  $\Omega_0$  – амплитуда “полки” в низкочастотной части спектра смещения;  $F_c$  – коэффициент, учитывающий направленность излучения;  $R_c$  – коэффициент, определяемый углом выхода луча на свободную поверхность;  $S_c$  – стационарная поправка. Как отмечено в (Gibowicz, Kijko, 1994), если механизм источника не определен, оценку сейсмического момента можно производить по среднеквадратичному значению коэффициента  $F_c$ , рассчитанному исходя из сферической формы источника, используя значения  $F_\alpha=0.52$  и  $F_\beta=0.63$  (Boore, Boatwright, 1984). Следуя (Gibowicz, Kijko, 1994), для датчиков, расположенных в подземных выработках, можно пренебречь стационарной поправкой и коэффициентом, который учитывает угол выхода луча на свободную поверхность (т.е. принимается  $R_c = 1$ ).

Угловая частота  $f_0$  определялась согласно модели Брюна (Brune, 1970), для которой спектр смещения описывается функцией:

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1+f^2/f_0^2}. \quad (4.9)$$

Излученная сейсмическая энергия  $E_s$  оценивалась через интегрирование спектра скорости  $|V(f)|$  с учетом регистрации  $n$  измерительными станциями:

$$E_s = 4\pi\rho C \frac{\sum_n J_n R_n^2}{n} \quad (4.10)$$

$$J_n = 3 \times 2 \int_{f_1}^{f_2} |V(f)|^2 df \quad (4.11)$$

где  $n$  – количество точек измерения;  $R_n$  – расстояние между источником и  $n$ -й измерительной станцией;  $J_n$  – поток энергии (Gibowicz, Kijko, 1994).

### 4.3. Результаты применения метода КЛАСИ-к

После взрыва 24.10.2020 г. были детектированы 259 импульсов, после взрыва 06.07.2019 г. – 77 импульсов. Кластеризация импульсов проводилась по параметрам, описывающим волновую форму  $\{RA, AF, WI\}$ . Взаимная корреляция между параметрами не превышала 0,5. Результаты применения метода КЛАСИ-к к данным индуцированной сейсмичности представлены на рисунке 4.4 и в таблице 4.2. При выделении подмножеств микросейсмических событий основное внимание уделялось отличию именно скейлинговых соотношений. Рассматривалось вариации величины приведенной сейсмической энергии (отношения  $E_s/M_0$ ) и длительности  $T$  зарегистрированных сейсмических событий при изменении сейсмического момента  $M_0$ .

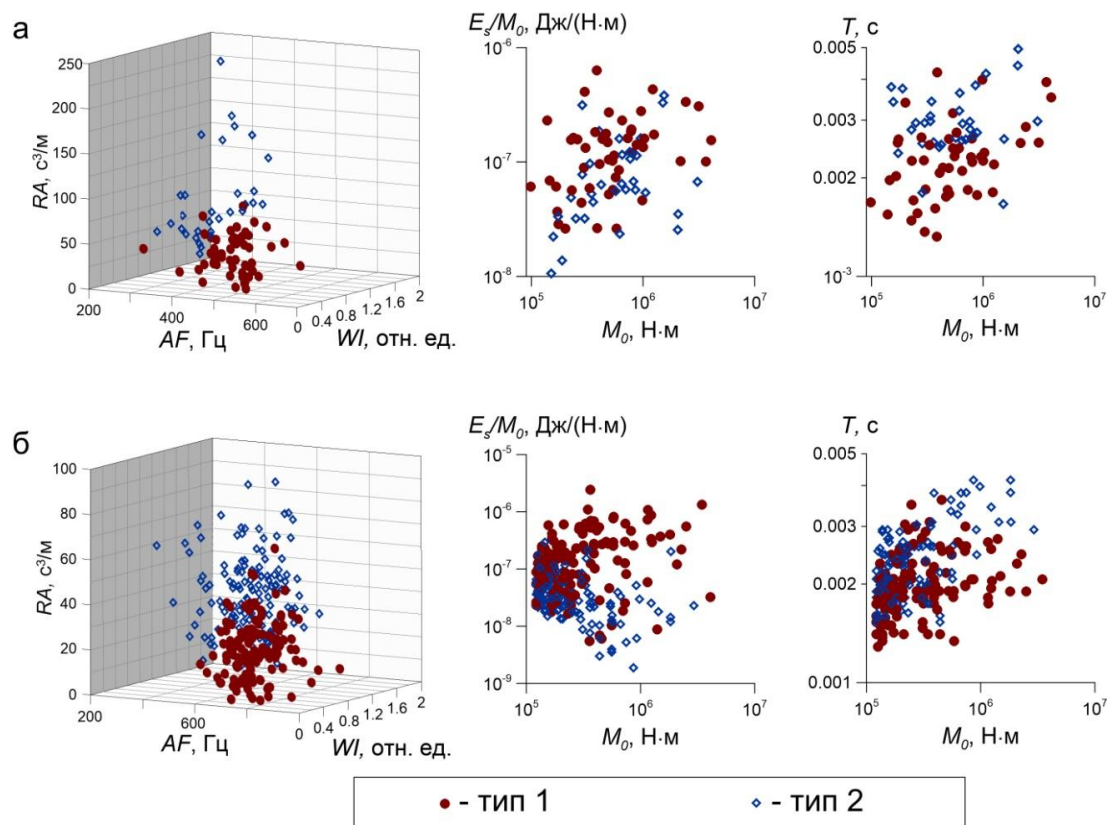


Рисунок 4.4 – Классификация импульсов микросейсмических событий с использованием метода КЛАСИ-к по параметрам  $\{AF, RA, WI\}$ .

а – взрыв 06.07.2019 г.; б – взрыв 24.10.2020 г.

Справа приведены зависимости приведенной сейсмической энергии  $E_s/M_0$  и длительности импульсов  $T$  от скалярного сейсмического момента  $M_0$

Таблица 4.2. Приведенная сейсмическая энергия для подмножеств, выделенных методом КЛАСИ-к на основе анализа параметров волновой формы  $\{AF, RA, WI\}$ .

Группа событий	Взрыв 06.07.2019 г.	Взрыв 24.10.2020 г.
	$\langle E_s/M_0 \rangle$ , Дж/(Н·м)	$\langle E_s/M_0 \rangle$ , Дж/(Н·м)
Тип 1	$(1,5 \pm 1,1) \cdot 10^{-7}$	$(2,3 \pm 3,0) \cdot 10^{-7}$
Тип 2	$(9,4 \pm 9,1) \cdot 10^{-8}$	$(4,8 \pm 4,6) \cdot 10^{-8}$

Для взрыва 24.10.2020 г. для группы событий типа 1 среднее значение  $E_s/M_0$  составляет  $2,3 \cdot 10^{-7}$  Дж/(Н·м), в то время как для второй значение  $E_s/M_0$  существенно ниже и составляет  $4,8 \cdot 10^{-8}$  Дж/(Н·м). Можно видеть, что события первого типа характеризуются, как правило, большей длительностью, чем события второго типа с таким же сейсмическим моментом.

#### 4.3.1. Классификация сейсмических событий методом КЛАСИ-к на основе очаговых параметров

Проведение стандартного сейсмического мониторинга предполагает определение очаговых параметров сейсмических событий:  $M_0$ ,  $f_0$  и  $E_s$ . В этой связи в качестве альтернативных целевых параметров метода КЛАСИ-к были использованы  $E_s$ ,  $M_0$ ,  $f_0$ ,  $E_s/M_0$ . Согласно (Aki, 1967), для сейсмических событий при динамической подвижке угловая частота источника связана с длительностью  $T$  излученного импульса в очаге:  $T \sim 1/f_0$ . Несмотря на то, что не все выбранные параметры являются независимыми, использовать их в качестве целевых при кластеризации можно, но при условии низкой корреляции между ними. Для рассматриваемых данных взаимная корреляция очаговых параметров не превышает 0,6. На рисунке 4.5 и в таблице 4.3 показаны результаты применения метода КЛАСИ-к с использованием очаговых параметров в качестве целевых параметров метода.

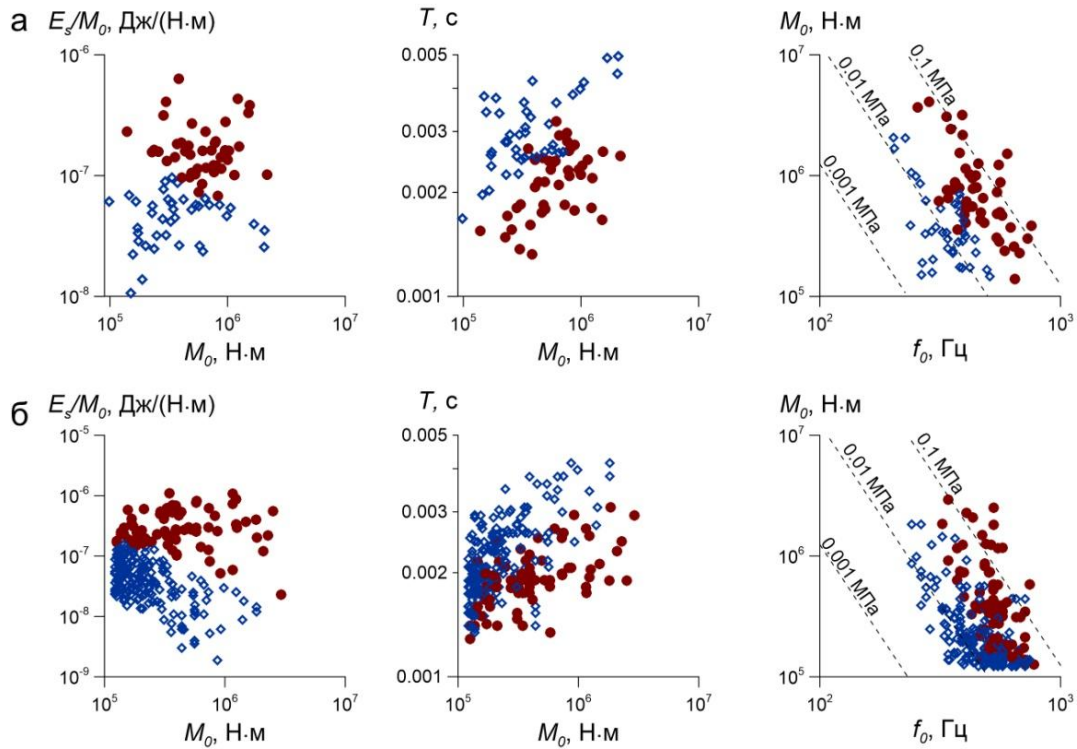


Рисунок 4.5 – Классификация импульсов микросейсмических событий с использованием метода КЛАСИ-к по параметрам  $\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$ : а – взрыв 06.07.2019 г.; б – взрыв 24.10.2020 г.

Представлены зависимости приведенной сейсмической энергии  $E_s/M_0$  и длительности  $T$  от скалярного сейсмического момента  $M_0$ , а также зависимость  $M_0$  от частоты  $f_0$ , пунктиром показаны линии постоянного сброса напряжения (Madariaga, 1976)

Таблица 4.3. Приведенная сейсмическая энергия для подмножеств, выделенных методом КЛАСИ-к на основе очаговых параметров сейсмических событий  $\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$ .

Группа событий	Взрыв 06.07.2019 г.	Взрыв 24.10.2020 г.
	$\langle E_s/M_0 \rangle$ , Дж/(Н·м)	$\langle E_s/M_0 \rangle$ , Дж/(Н·м)
Тип 1	$(1,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-7}$	$(3,4 \pm 2,3) \cdot 10^{-7}$
Тип 2	$(4,7 \pm 2,0) \cdot 10^{-8}$	$(4,8 \pm 3,4) \cdot 10^{-8}$

Выделяются два типа сейсмических событий, для которых наблюдаются различия величины приведенной сейсмической энергии  $E_s/M_0$ . Если для событий типа 1 характерная величина приведенной энергии  $E_s/M_0 > 10^{-7}$  Дж/(Н·м), то для событий типа 2 –  $E_s/M_0 < 10^{-7}$  Дж/(Н·м). Существенно различается и характерное время в очаге  $T$ . События первого типа характеризуются существенно меньшей длительностью при одинаковом реализованном сейсмическом моменте. При этом для обоих выделенных типов зависимость времени в очаге от сейсмического момента близка к закону самоподобия  $T \sim M_0^{1/3}$ .

Оценка эффективности классификации методом КЛАСИ-к при переходе от параметров волновой формы  $\{AF, RA, WI\}$  к параметрам очага  $\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$  осуществлялась с использованием ROC-анализа (Fawcett, 2006). Такой подход наиболее часто используется для представления бинарной классификации. Для оценки эффективности необходимо определить количество «верно» и «неверно» классифицированных событий. В данном случае «верной» считается классификация на основе параметров волновой формы  $\{AF, RA, WI\}$ . Мерой формальной оценки эффективности классификатора выступает показатель  $AUC$ , который может быть вычислен согласно соотношению:

$$AUC = \frac{1}{2} \left( TPR \cdot FPR + \frac{1 + TPR}{1 - FPR} \right), \quad (4.12)$$

где  $TPR$  – доля верно классифицированных событий типа 1,  $FPR$  – доля верно классифицированных событий типа 2.

В таблице 4.4 приведены результаты сравнения двух классификаций. Например, при взрыве 24.10.2020 г. метод КЛАСИ-к с целевыми параметрами  $\{AF, RA, WI\}$  относит 126 событий к типу 1, 133 события – к типу 2. В то же время при классификации на основе очаговых параметров  $\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$  к типу 1 было отнесено 184 события, из которых 117 классифицированы верно и 67 – неверно, а к типу 2 – 75 событий, из которых верно классифицированы 66. Для данных, полученных от взрывов 24.10.2020 г. и 06.07.2019 г., величины  $AUC$

составляют 0,72 и 0,67, что может быть интерпретировано как хорошее и среднее качество модели соответственно.

Таблица 4.4. Соответствие подмножеств сейсмических событий, выделенных методом КЛАСИ-к на основе параметров волновой формы  $\{AF, RA, WI\}$  и параметров очага  $\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$ . Пояснения символов см. в тексте.

Взрыв 24.10.2020 г.				Взрыв 06.07.2019 г.			
		$\{AF, RA, WI\}$				$\{AF, RA, WI\}$	
		Тип 1	Тип 2			Тип 1	Тип 2
$\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$	Тип 1	117	67	$\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$	Тип 1	30	11
	Тип 2	9	66		Тип 2	15	21



#### Выводы к Главе 4

- Предложен метод классификации акустических/ микросейсмических импульсов по параметрам волновой формы. Метод разработан на данных АЭ лабораторных экспериментов и апробирован на данных шахтной микросейсмичности, инициированной двумя массовыми взрывами при разработке железорудного месторождения «КМАруда». Показана принципиальная возможность использования в качестве целевых параметров метода КЛАСИ-k параметров очага  $\{E_s, M_0, f_0\}$ .
- В потоке индуцированных промышленным взрывом сейсмических событий выделяются два множества импульсов, которые характеризуются различными скейлинговыми соотношениями. События с более высокими значениями приведенной сейсмической энергии  $E_s/M_0$  характеризуются меньшими временами в очаге при одинаковой величине сейсмического момента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе детально исследованы закономерности излучения сейсмоакустических импульсов при различных режимах деформирования разломов и трещин. Наиболее существенные выводы сформулированы в конце каждой главы диссертации. Ниже кратко представлены основные полученные результаты:

- В лабораторных экспериментах выявлена определяющая роль влияния структурных характеристик межблокового контакта на закономерности излучения импульсов АЭ при реализации различных режимов скольжения. Экспериментально выявлена функциональная зависимость между коэффициентом трения межблокового контакта, скоростью его деформирования и потоком излучаемой энергии АЭ, а также установлена высокая обратная корреляция между скейлинговым параметром *b-value* закона Гутенберга-Рихтера и коэффициентом трения  $\mu$ .
- Предложена методика выделения в потоке импульсов АЭ, сопровождающих процесс развития скольжения, двух подмножеств, различающихся по параметру волновой формы  $WI$ . Первое подмножество формируется импульсами с резким вступлением и  $WI \leq 0,1$ , второе подмножество формируют импульсы с медленным нарастанием амплитуды во времени и  $WI > 0,1$ . В процессе сдвигового деформирования межблокового контакта для подмножества импульсов с  $WI > 0,1$  наблюдаются закономерные вариации скейлингового параметра *b-value* закона Гутенберга-Рихтера, которые соответствуют этапам развития процесса скольжения и могут являться прогностическим признаком динамических подвижек разного типа.
- Показано, что выделение двух подмножеств импульсов АЭ, сопровождающих развитие скольжения, в совокупности с применением ансамблевого метода машинного обучения Случайный лес позволяет по коротким временным интервалам восстановить скорость деформирования

межблокового контакта и момент старта динамических подвижек различного типа.

- Для анализа данных шахтной микросейсмичности, локализованной в окрестности тектонического разлома и инициированной массовыми взрывами, был разработан метод классификации микросейсмических импульсов по параметрам волновой формы КЛАСИ-k. Показана принципиальная возможность использования в качестве целевых параметров метода КЛАСИ-k параметров очага  $\{E_s, M_0, f_0\}$ . Применение разработанного метода КЛАСИ-k позволило в потоке микросейсмических событий, индуцированных промышленными взрывами, выделить два подмножества, для которых наблюдаются различия величины приведенной сейсмической энергии  $E_s/M_0$ . Граничное значение величины приведенной сейсмической энергии составляет  $E_s/M_0 = 10^{-7}$ .

В результате выполнения диссертационного исследования были разработаны научные основы метода сейсмоакустического контроля процесса развития скольжения по разломам и трещинам. Результаты лабораторных и полевых исследований дают основание полагать, что совместное использование разработанного метода КЛАСИ-k в совокупности с ансамблевыми методами машинного обучения может позволить контролировать эволюцию деформационных процессов в зоне тектонических разломов и трещин на основе анализа относительно коротких временных интервалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В. В. Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений / В. В. Адушкин, С. Б. Кишкина, Г. Г. Кочарян // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. – №1. – С. 1-12.

Адушкин, В. В. О параметрах, определяющих долю энергии, излучаемой при динамической разгрузке участка массива горных пород / В. В. Адушкин, Г. Г. Кочарян, А. А. Остапчук // Доклады Академии Наук. – 2016. – Т. 467, № 1. – С. 86–90.

Адушкин, В. В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. – М.: ИДГ РАН, 2015. –364 с.

Адушкин, В. В. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы) / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. - М.: ИНЭК, 2005. –254 с.

Беседина, А. Н. Влияние деформационных характеристик нарушений сплошности породного массива на эффективность излучения очагов индуцированной сейсмичности. Ч. I. Результаты натурных наблюдений / А.Н. Беседина, С.Б. Кишкина, Г.Г. Кочарян // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2015. - №4. - Р. 83–95.

Беседина, А. Н. Новый подход к снижению риска крупных техногенных землетрясений, основанный на результатах микросейсмического мониторинга / Беседина А.Н., Кочарян Г.Г. // Горная промышленность. – 2023. – V.S1.

Беседина, А. Н. Параметры источников роя микросейсмических событий, инициированных взрывом на Коробковском железорудном месторождении / А.Н. Беседина, С.Б. Кишкина, Г.Г. Кочарян // Физика Земли. – 2021. –№ 3. – С.63–81.

Ботвина, Л. Р. Механизм временных вариаций сейсмичности и акустической эмиссии перед макроразрушением / Л.Р. Ботвина, П.Н. Шебалин, И.Б. Опарина // Доклады Академии Наук. – 2001. – Т.376. – №4. – С.480-484.

Виноградов, С. Д. Об изменениях сейсмического режима при подготовке разрушения. Моделирование предвестников землетрясений / С. Д. Виноградов. М.: Наука, 1980. – С. 169–178.

Вознесенский А. С. Пространственно-временная корреляция параметров акустической эмиссии на различных стадиях деформирования горных пород / А. С. Вознесенский, Д. А. Нарышкин, М. Н. Тавостин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 7. – С. 92-100.

Вознесенский, А. С. Акустическая эмиссия угля в состоянии запредельного деформирования / А.С. Вознесенский, М.Н. Тавостин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –2005. – № 4. –С. 3-10.

Гиляров, В. Л. Анализ статистических параметров данных геоакустического мониторинга на месторождении “Антей” / В. Л. Гиляров, Е. Е. Дамаскинская, А. Г. Кадомцев, И. Ю. Рассказов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 3. – С. 40-45.

Грешников, В. А. Акустическая эмиссия / В. А. Грешников, Ю.Б. Дробот – М.: Издательство стандартов, 1976. – 272 с.

Дамаскинская, Е. Е. Влияние состояния внутренних границ раздела на характер разрушения гранита при квазистатическом сжатию / Е. Е. Дамаскинская, И. А. Пантелеев, А. Г. Кадомцев, О. Б. Наймарк // Физика твердого тела. –2017. – Т. 59. № 5. – С. 920–930.

Дамаскинская, Е. Е. Идентификация критического состояния деформированных горных пород / Е.Е. Дамаскинская, И.А. Пантелеев, Д.Р. Гафурова, Д.И. Фролов // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2018. – № 1(34). – С.116-123

Дамаскинская, Е. Е. Статистические закономерности формирования магистральной трещины в структурно-неоднородном материале при различных условиях деформирования /Е. Е. Дамаскинская, В. Л. Гиляров, И. А. Пантелеев, Д. Р. Гафурова, Д. И. Фролов // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, вып. 9.

Захаров, В. Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений / В. Н. Захаров. М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 2002. — 172 с.

Касахара, К. Механика землетрясений / К. Касахара. М.: Мир. 1985. – 264 с.

Кейлис-Борок, В. И. Исследование механизма землетрясений / В.И. Кейлис-Борок М.: АН СССР, 1957. – 148 с.

Козырев, А. А. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений / А. А. Козырев, В. И. Панин, И. Э. Семенова, О. Г. Журавлева // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 5. – С. 33–44.

Кочарян, Г. Г. Геомеханика разломов / Г.Г. Кочарян. – М.: ГЕОС, 2016. – С. 424.

Кочарян, Г. Г. Масштабный эффект в сейсмотектонике / Г.Г. Кочарян // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 2. – С.353–385.

Кочарян, Г. Г. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований / Г. Г. Кочарян, С. Б. Кишкина, В. А. Новиков, А. А. Остапчук // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5. – № 4. – С. 863-891.

Кочарян, Г. Г. Медленные перемещения по разломам: параметры, условия возникновения, перспективы исследований / Г.Г. Кочарян, С.Б. Кишкина, В.А. Новиков, А.А. Остапчук // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 4. – С.863–891.

Кочарян, Г. Г. Мезомеханика сопротивления сдвигу по трещине с заполнителем / Г.Г. Кочарян, В.К. Марков, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т.16 № 5. – С. 5-15.

Кочарян, Г. Г. Физическая мезомеханика очага землетрясения / Г.Г. Кочарян, С.Б. Кишкина // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23. № 6. – С. 9–24.

Кочарян, Г. Г. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. Часть 1. Лабораторные эксперименты / Г. Г. Кочарян, В. А. Новиков // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18. № 4. – С.94–104.

Куксенко, В. С. Связь между размерами образующихся под нагрузкой трещин и длительностью выделения упругой энергии / В.С. Куксенко, А.И. Ляшков, К.М. Мирзоев, С.Х. Негматуллин, С.А. Станчиц, Д.И. Фролов // Доклады Академии наук СССР. – 1982. – Т. 264, № 4. – С. 846.

Куксенко, В. С. Оценка размеров растущих трещин в области разгрузки по параметрам акустических сигналов / В. С. Куксенко, С. А. Станчиц, Н. Г. Томилин // Механика композитных материалов. – 1983. – № 3. – С. 23–28

Лавров, А. В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) / А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник // Акуст. журн. – 2005. – Т.51. Приложение. - С. 6–18.

Маловичко, А. А. Оценка силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов: Т. 2 / А.А. Маловичко, Д.А. Маловичко. – Отв. ред. Мельников Н.Н. Новосибирск. – 2010.

Метелёв, И. С. Исследование акустических шумов при фильтрации газа через пористую среду / И.С.Метелёв, М.Н. Овчинников, Е.А. Марфин, Р.Р. Гайфутдинов, Р.Н. Сагиров // Акуст. журн. – 2019. – Т. 65, № 2. – С. 214–222.

Мубассарова, В. А. Вариации акустической эмиссии и деформации горных пород при триггерных воздействиях электромагнитных полей (обзор). Часть 1 / В.А. Мубассарова, Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, И.А. Пантелеев // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 155-174.

Опарин, В. Н. О некоторых особенностях эволюции напряженно-деформированного состояния образцов горных пород со структурой при их одноосном нагружении / В. Н. Опарин, О. М. Усольцева, В. Н.Семенов, П. А. Цой // ФТПРПИ. – 2013. – № 5. – С. 3 – 19.

Остапчук, А. А. Исследование сигналов акустической эмиссии при сдвиговом деформировании трещины / А.А. Остапчук, Д.В. Павлов, В.К. Марков, А.В. Крашенинников // Акуст. журн. – 2016. – Т. 62, № 4. – С. 503–512.

Пантелеев, И. А. Анализ тензора сейсмического момента акустической эмиссии: микромеханизмы разрушения гранита при трехточечном изгибе / И.А. Пантелеев // Акустический журнал. – 2020. – Т. 66. № 6. – С. 654-668.

Патонин, А. В. Модульная система непрерывной регистрации акустической эмиссии для лабораторных исследований разрушения горных пород / А.В. Патонин, Н.М. Шихова, А.В. Пономарев, В.Б. Смирнов // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54. № 3. – С. 35-55.

Попов, В. Л. Ускоренная ползучесть как предвестник фрикционной неустойчивости и проблема предсказания землетрясений / В.Л. Попов, В.Grzempa, J. Starcevic, С. Fabry // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. № 5. – С. 85–95.

Потанина, М. Г. Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования / М. Г. Потанина, В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев, П. Бернар, А. А. Любушин, Ш. П. Шозиёв // Физика Земли. – 2015. – № 2. – С. 126–138.

Рассказов, И. Ю. Исследования удароопасности на подземных рудниках Дальнего Востока и Забайкалья / И.Ю. Рассказов // Проблемы недропользования. – 2018. – № 3. – С. 128-139.

Рашка, С. Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow / С. Рашка, В. Мирджалили. - 2, 3-е изд.: Пер. с англ. - СПб. : ООО "Диалектика", 2020. - 848 с.

Садовский, М. А. О механике блочного горного массива / М. А. Садовский, Г. Г. Кочарян, В. Н. Родионов // Докл. АН СССР. – 1988. – Т. 302. – № 2. – С. 306-307.

Сивоголовко, Е. В. Методы оценки качества четкой кластеризации / Е.В. Сивоголовко // Компьютерные инструменты в образовании. – 2011. – №4. – С.14-31.

Смирнов, В. Б. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга–Рихтера от напряжений / В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев, С. А. Станчиц, М. Г. Потанина, А.



В. Патонин, G. Dresen, C. Narteau, P. Bernard, С. М. Строганова // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 149–165.

Смирнов, В. Б. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурального моделирования / В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев, П. Бернар, А. В. Патонин // Физика Земли. – 2010. – № 2. – С. 17–49.

Смирнов, В. Б. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным / В.Б. Смирнов, А.В. Пономарев // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 26–36.

Смирнов, В. Б. Лабораторное моделирование афтершоковых последовательностей: зависимость параметров Омори и Гутенберга-Рихтера от напряжений / В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев, С. А. Станчиц, М. Г. Потанина, А. В. Патонин, G. Dresen, C. Narteau, P. Bernard, С. М. Строганова // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 149-165.

Смирнов, В. Б. Структура акустического режима в образцах горных пород и сейсмический режим / В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев, А. Д. Завьялов // Физика Земли. –1995. – № 1. – С. 38-58.

Соболев Г. А., Пономарев А.В. Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте / А. Соболев, А.В. Пономарев // Вулканонология и сейсмология. –1999. – № 4–5. – С. 50–62.

Соболев, Г. А. Инициирование неустойчивых подвижек – микроземлетрясений упругими импульсами / Г. А. Соболев, А. В. Пономарев, Ю. Я. Майбук // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 51–69

Соболев, Г. А. Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений / Г. А. Соболев, А. В. Кольцов. – М.: Наука, 1988. – 203 с.

Соболев, Г. А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ / Г. А. Соболев // Физика Земли. – 2019. –№ 1. – С. 166–179.

Соболев, Г. А. Физика землетрясений и предвестники / Г. А. Соболев, А. В. Пономарев. – М.: Наука, 2003. – 270 с.

Соболев, Г. А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев.– М.: Наука, 2003. –270 с.

Сырников, Н. М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах / Н. М. Сырников, В. М. Тряпицын // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 314:4. – С.830–833.

Турунтаев, С. Б. Выявление техногенных изменений сейсмического режима при помощи методов нелинейной динамики /С. Б. Турунтаев, С. В. Ворохобина, О. Ю. Мельчаева // Физика Земли. – 2012. – № 3. – С. 52–65

Шебалин, П. Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями / П.Н. Шебалин // Вулканология и сейсмология. – 2005. – № 1. – С. 3-15.

Шкуратник, В. Л. Акустическая эмиссия ультразвукового диапазона частот как инструмент решения задач горной геофизики / В. Л. Шкуратник, А. С. Вознесенский // Горный журнал. – 2009. – № 1. – С. 54-57.

Aki, K. Scaling law of seismic spectrum / K. Aki // J. Geophys. Res. - 1967. - V. 72, Iss. 4. - P.1217–1231.

Allen, R. Automatic earthquake recognition and timing from single traces / R. Allen // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1978. – Т. 68. – P. 1521-1532.

Anant K. S. Wavelet transform methods for phaseidentification in three-component seismograms / K. S. Anant and F. U. Dowla // Bull. Seismol. Soc.Amer. – 1997. – V. 87. – P. 1598–1612.

Anderson, S. Analysis of a polarized seismic wave model / S. Anderson, A. Nehorai // IEEE Trans. Signal Processing. – 1996. – V. 44. – P. 379–386.

Anthony, J. L. Influence of particle characteristics on granular friction / J. L. Anthony, C. Marone // J. Geophys. Res. -2005. - V. 110. - P. B08409.

Arrowsmith, S.J. Discrimination of delay-fired mine blasts in Wyoming using an automatic time-frequency discriminant / S.J. Arrowsmith, M.D. Arrowsmith, M.A.H. Hedlin, B. Stump // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2006. – V. 96, N 6. – P.2368–2382.

Bai, F. Comparison of alternatives to amplitude thresholding for onset detection of acoustic emission signals / F. Bai, D. Gagar, P. Foote, Y. Zhao // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2017. – T. 84. – P. 717-730.

Bak, P. Self-organized criticality / P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld // *Physical Review A*. – 1988. – V. 38. № 1. – P. 364–374.

Baruah, S. Moment magnitude – local magnitude relationship for the earthquakes of the Shillong-Mikir plateau, Northeastern India Region: a new perspective / S. Baruah, S. Baruah, A. Kalita, R. Biswas, N. Gogoi, J.L. Gautam, et al. // *Geomatics. Natural Hazards and Risk*. – 2012. – V. 3:4. – P. 365-375.

Bedford, J.D. Fault rock heterogeneity can produce fault weakness and reduce fault stability / J.D. Bedford, D.R. Faulkner, N. Lapusta // *Nat Commun*. – 2022. – V.13. – P. 326.

Bergen, K.J. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience / K. J. Bergen, P. A. Johnson, M. V. de Hoop, G. C. Beroza // *Science*. – 2019. – V. 363. – P. eaau0323.

Besedina, A.N. Weak induced seismicity in the Korobkov iron ore field of the Kursk magnetic anomaly / A.N. Besedina, S.B. Kishkina, G.G. Kocharyan, V.I. Kulikov, D.V. Pavlov // *J. Mining Sci*. – 2020. – V. 56, Iss. 3. – P.339–350.

Bethmann, F. Scaling Relations of Local Magnitude versus Moment Magnitude for Sequences of Similar Earthquakes in Switzerland. 2011 / F. Bethmann, N. Deichmann, P. M. Mai // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2011. – V. 101(2). – P. 515-534.

Biegel, R. L. The frictional properties of a simulated gouge having a fractal particle distribution / R. L. Biegel, C. Sammis // *J. Structural. Geol*. – 1989. – V. 11. – P. 827–846.

Bolton, D. C. Characterizing acoustic signals and searching for precursors during the laboratory seismic cycle using unsupervised machine learning / D. C. Bolton, P. Shokouhi, B. Rouet-Leduc, C. Hulbert, J. Riviere, C. Marone, P. A. Johnson // *Seismological Research Letters*. – 2019. – V. 90(3). – P. 1088–1098.

Bolton, D. C. The high-frequency signature of slow and fast laboratory earthquakes / D. C. Bolton, S. Shreedharan, G. C. McLaskey, J. Rivière, P. Shokouhi, D. T. Trugman, C. Marone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2022. – V.127. – P. e2022JB024170.

Boore, D.M. Average body-wave radiation coefficients / D.M. Boore, J. Boatwright // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* - 1984. - V. 74, N 5. - P.1615–1621.

Brace, W. F. Stick-slip as a mechanism for earthquakes / W. F. Brace, J. D. Byerlee // *Science*. – 1966. – V. 153. – P. 990-992.

Breiman, L. Random Forests / L. Breiman // *Machine Learning*. – 2001. – V. 45. – P. 5–32.

Brodsky, E. E. The state of stress on the fault before, during, and after a major earthquake / E. E. Brodsky, J. J. Mori, L. Anderson, F. M. Chester, M. Conin, E. M. Dunham, et al. // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* – 2020. – V. 4. – P. 49–74.

Brune, J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes / J. Brune // *J. Geophys. Res.* – 1970. – V. 75, Iss. 26. – P.4997–5009.

Burgmann, R. The geophysics, geology and mechanics of slow fault slip / R. Burgmann // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2018. – V.495. – P. 112–134.

Byerlee, J.D. Frictional characteristics of granite under high confining pressure / J.D. Byerlee // *J. Geophys. Res.* – 1967. – V.72 (14). – P. 3639e3648.

Calinski, T. A dendrite method for cluster analysis / T. Calinski, J. Harabasz // *Comm. in Statistics*. – 1974. – V. 3. – P.1 – 27.

Carpinteri, A. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures / A. Carpinteri, J. Xu, G. Lacidogna, A. Manuello // *Cement and Concrete Composites*. – 2012. – V. 34, Iss. 4. – P.529–537.

Cebry, S.B.L. Seismic swarms produced by rapid fluid injection into a low permeability laboratory fault / S.B.L. Cebry, G.C. McLaskey // *Earth Planet Sci. Lett.* - 2021. – V.557. – P. 116726.

Chu, C.-K. First break refraction event picking using fuzzy logic systems / C.-K. Chu and J. Mendel // *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* – 1994. – V. 2. – P. 255–266.

Di Toro, G. From field geology to earthquake simulation: a new state-of-the-art tool to investigate rock friction during the seismic cycle (SHIVA) / G. Di Toro, A. Niemeijer, A. Tripoli, S. Nielsen, F. Di Felice, P. Scarlato, S. Mariano et al.// *RENDICONTI LINCEI*. – 2010. – V. 21(S1). – P. 95–114.

Dieterich, J.H. Time-dependent friction in rocks / J.H. Dieterich // *J. Geophys. Res.* – 1972 -V.77 (20). – P.3690e3697.

Dixon, N. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries / N.Dixon, A.Smith, J. A.Flint, R. Khanna, B. Clark, M. Andjelkovic // *Landslides*. – 2018. – V. 15. – P. 1631–1644.

Dowla, F. Seismic discrimination with artificial neural networks: Preliminary results with regional spectral data / F. Dowla, S.Taylor, A. Russell // *Bulletin of The Seismological Society of America*. – 1990. – V.80. – P. 1346-1373.

Dyskin, A. V. Residual strain mechanism of aftershocks and exponents of the modified Omoris law / A. V. Dyskin, E. Pasternak// *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2019. – V. 124. -P. 175–194.

Earle, P. Characterization of global seismograms using an automatic picking algorithm / P. Earle, P. Shearer // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 1994. –Vol. 84(2). – P 366–376.

Ellsworth, W. L. Injection-Induced Earthquakes/ W. L. Ellsworth // *Science*. – 2013. – V. 341. – P. 1225942.

Emanov, A. A. Monitoring of Seismic Activation in the Area of the Kaltan Open Pit and Alardinskaya Mine (Kuzbass) / A. A. Emanov, A. F. Emanov, A. V. Fateev // *Seismic Instruments*. -2020. – V. 56(1). – V. 82–92.

Faoro, I. Influence of shear and deviatoric stress on the evolution of permeability in fractured rock / I. Faoro, A. Niemeijer, C. Marone, D. Elsworth// *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2009. – V.114(B1). -B01201.

Fawcett, T. An introduction to ROC analysis / T. Fawcett // *Pattern Recogn. Lett.* - 2006. - V. 27, Iss. 8. - P.861–874.

Foulger, G.R. Global review of human-induced earthquakes / G.R.Foulger, M.P. Wilson, J.G. Gluyas, B.R. Julian, R.J. Davies // *Earth-Sci. Rev.* - 2018. - V. 178. - P.438–514.

Frank, W. The evolving interaction of lowfrequency earthquakes during transient slip / W. Frank, N. M. Shapiro, A. Husker, V. Kostoglodov, A. A. Gusev, M. Campillo// *Sci. Adv.* – 2016. – V.2(4). – P.e1501616–e1501616.

Frank, W.B. The evolving interaction of low-frequency earthquakes during transient slip / W.B. Frank, N.M. Shapiro, A.L. Husker, V. Kostoglodov, A.A. Gusev, M. Campillo // *Science Advances.* - 2016. - V. 2, Iss. 4. -P.e1501616.

Gao, K. From stress chains to acoustic emission / K. Gao, R. Guyer, E. Rougier, C. X. Ren, P. A. Johnson // *Phys. Rev. Lett.* – 2019. - 123:048003.

Gerasimova, T. I. Modeling features of shear deformation of fissures containing filler / T. I. Gerasimova, V. N. Kondratev, G. G. Kocharyan // *J. Mining Sci.* – 1995. – V.31. – P. 288– 295.

Gibowicz, S. *An Introduction to Mining Seismology* / S. Gibowicz, A. Kijko // Elsevier Science, 1994. - 399 p.

Gibowicz, S. Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for events with moment magnitude smaller than 2 / S. Gibowicz, R. Young, S. Talebi, D. Rawlence // *BSSA.* – 1991. – V. 81. – № 4. – P. 1157–1182.

Goebel, T. H. W. Acoustic emissions document stress changes over many seismic cycles in stick-slip experiments / T. H. W. Goebel, D. Schorlemmer, T. W. Becker, G. Dresen, C. G. Sammis// *Geophys. Res. Lett.* – 2013. – V.40. – P. 2049–2054.

Goebel, T. H. W. Identifying fault heterogeneity through mapping spatial anomalies in acoustic emission statistics / T. H. W. Goebel, T. W. Becker, D. Schorlemmer, S. Stanchits, C. Sammis, E. Rybacki, G. Dresen // *J. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117. – P. B03310.

Goodfellow, S.D. 2014. A laboratory acoustic emission experiment under in situ conditions / S. D. Goodfellow, R. P. Young// *Geophys Res Lett.* – 2014. – V.41. – P.3422–3430.

Gutenberg, B. Seismicity of the Earth and its associated phenomena / B. Gutenberg, C. F. Richter // NJ, Princeton, Princeton University Press, 1949. – 273 p.

Hadda, N. Microstructural selforganization in granular materials during failure / N.Hadda, F. Nicot, R. Wan, F. Darve // C. R. Mecanique. – 2015. – V. 343. – P. 143–154.

Hammerstrom, D. Neural networks at work / D. Hammerstrom // IEEE Spectrum. – 1993. – V. 30(6). – P. 26–32.

Hanks, T. A moment magnitude scale / T. Hanks, H. Kanamori // J. Geophys. Res. – 1979. – V. 84. – P. 2348–2350.

Hartigan, J.A. A K-means clustering algorithm / J.A. Hartigan, M.A. Wong // J. Royal Statist. Soc. Series C (Applied Statistics). - 1979. - V. 28, Iss. 1. – P.100–108.

Hirata, T. Omori's Power Law aftershock sequences of microfracturing in rock fracture experiment / T. Hirata // Journal of Geophysical Research. – 1987. –V.92(B7), 6215.

Houston, H. Influence of depth, focal mechanism, and tectonic setting on the shape and duration of earthquake source time functions / H. Houston // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2001. – V.106(B6). - P.11137–11150.

Hua, W. Source parameters and scaling relations for reservoir induced seismicity in the longtan reservoir area / W. Hua, Z. Chen, S. Zheng // Pure Appl. Geophys. – 2013. – V. 170. – P. 767–783.

Hudson, J.A. Source type plot for inversion of the moment tensor / J.A. Hudson, R.G. Pearce, R.M. Rogers // J. Geophys.Res. – 1989. – V. 94, Iss. B1. – P.765–774.

Hulbert, C. Similarity of fast and slow earthquakes illuminated by machine learning / C. Hulbert, B. Rouet-Leduc, P. A. Johnson, C. X. Ren, J. Rivière, D. C. Bolton, C. Marone // Nature Geoscience. – 2018. – V.12. – P. 69–74.

Ide, S. A scaling law for slow earthquakes / S. Ide, G. C. Beroza, D. R. Shelly, T. Uchide // Nature. – 2007. – Vol. 447. – P. 76-79.

Ide, S. Does apparent stress vary with earthquake size? / S. Ide, G. Beroza // Geophys. Res. Lett. – 2001. – V. 28. № 17. – P. 3349– 3352.

Ide, S. Mechanism of deep low frequency earthquakes: Further evidence that deep non-volcanic tremor is generated by shear slip on the plate interface / S. Ide, D. R. Shelly, G. C. Beroza // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – V. 34(3). – P.L03308.

Ikari, M.J. On the relation between fault strength and frictional stability / M.J. Ikari, C. Marone, D.M. Saffer// *Geology*. – 2011. – V. 39. № 1. – P. 83–86.

Johnson, P. A. Acoustic emission and microslip precursors to stick-slip failure in sheared granular material / P. A. Johnson, B. Ferdowsi, B. M. Kaproth, M. Scuderi, M. Griffa, J. Carmeliet, R. A. Guyer, P.-Y. Le Bas, D.T. Trugman, C. Marone // *Geophysical Research Letters*. – 2013. – 40. – P. 5627–5631.

Jost, M.L. Source parameters of injection-induced microearthquakes at 9 km depth at the KTB DEEP Drilling site, Germany / M.L. Jost, T. Busselberg, O. Jost, H.-P. Harjes // *BSSA*. - 1998. - V. 88. - № 3. - P. 815–832.

Jurkevic, A. Polarization analysis of three component array data / A. Jurkevic // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 1988. –V. 78. –P. 1725–1743.

Kanamori, H. A slow earthquake in the Santa Maria basin, California / H. Kanamori, E. Hauksson // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1992. –V. 82, No. 5. – P. 2087-2096

Kocharyan, G. G. The effects of weak dynamic pulses on the slip dynamics of a laboratory fault / G. G. Kocharyan, A. A. Ostapchuk, D. V. Pavlov, V. K. Markov // *Bull. Seismol. Soc.* – 2018. – V. 108. - P. 2983–2992.

Kocharyan, G.G. A study of different fault slip modes governed by the gouge material composition in laboratory experiments / G.G. Kocharyan, V.A. Novikov, A.A. Ostapchuk, D.V. Pavlov // *Geophysical J. International*. 2017. - V. 208. № 1. - P. 521–528.

Kong, Q. Machine Learning in Seismology: Turning Data into Insights / Q. Kong, D. T. Trugman, Z. E. Ross, M. J. Bianco, B. J. Meade, P. Gerstoft // *Seismological Research Letters*. – 2018. – V. 90(1). – P. 3–14.



Kremenetskaya, E. O. Induced seismicity in the Khibiny Massif (Kola Peninsula) / E. O. Kremenetskaya, V. M. Trjapitsin // Pure and Applied Geophysics PAGEOPH. – 1995. – V. 145(1). – P.29–37.

Kubacki, T. Changes in mining-induced seismicity before and after the 2007 Crandall Canyon Mine collapse / T. Kubacki, K.D.Koper, K.L. Pankow, M.K. McCarter // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2014. – V. 119, Iss. 6. – P.4876–4889.

Kwiatek, G. Frequency-magnitude characteristics down to magnitude  $-4.4$  for induced seismicity recorded at Mponeng gold mine, South Africa / G. Kwiatek, K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, JAGUARS Group // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2010. – V. 100, N 3. – P.1165–1173.

Kwiatek, G. Source parameters of picoseismicity recorded at Mponeng deep gold mine, South Africa: Implications for scaling relations / G. Kwiatek, K. Plenkers, G. Dresen, JAGUARS Research Group // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 2011. – V. 101, N 6. – P.2592–2608.

Leeman, J. R. Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes / J. R. Leeman, D. M. Saffer, M. M. Scuderi, C. Marone // Nature Communications. – 2016. – V.7. –P.11104.

Lei, X. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rock/ X. Lei, K. Masuda, O. Nishizawa, L. Jouniaux, L. Liu, W. Ma, T.Satoh // J Struct Geol. – 2004. – V. 26. – P. 247–258.

Lei, X. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of AE in two granites of different grain size / X. Lei, O. Nishizawa, K. Kusunose, T. Satoh // J. Phys. Earth. – 1992. – V.40. – P. 617-634.

Lei, X. How does asperities fracture? An experimental study of unbroken asperities / X. Lei // Earth Planet. Sci. Lett. – 2003. – V. 213. – P. 347–359.

Lei, X. Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process / X. Lei, S. Ma // Earthquake Science. – 2014. – V.27(6). – P. 627–646.

Lei, X. Seismic b-Value for Foreshock AE Events Preceding Repeated Stick-Slips of Pre-Cut Faults in Granite / X. Lei, S. Li, L. Liu // Applied Sciences. – 2018. – V. 8(12). - P. 2361.

Lherminier, S. Continuously Sheared Granular Matter Reproduces in Detail Seismicity Laws / S. Lherminier, R. Planet, V. Levy dit Vehel, G. Simon, L. Vanel, K. J. Måløy, et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 2019. 122:218501.

Li, B. Discriminant model of coal mining microseismic and blasting signals based on waveform characteristics / B. Li, N. Li, E. Wang, X. Li, Zh. Zhang, X. Zhang, Y. Niu // *Shock and Vibration.* – 2017. – P.1-13.

Liu, J. Analysis of rock mass stability based on mining-induced seismicity: A case study at the Hongtoushan copper mine in China / J. Liu, S. Xu, Y. Li, G. Lei // *Rock Mech. Rock Eng.* - 2019. - V. 52, Iss. 1. - P.265–276.

Lockner, D. A. Acoustic emission and creep in rock at high confining pressure and differential stress / D. A. Lockner, J. D. Byerlee // *Bull. of the Seismological Society of Amcr.* –1977. – V.67. – P. 247-258.

Lockner, D. A. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite / D. A. Lockner, J. D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev, A. Sidorin // *Nature.* –1991. – V. 350. – P.39–42.

Lockner, D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture / D. Lockner // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.* – 1993. – V. 30(7). – P.883–899.

Ma, J. A comparison of mine seismic discriminators based on features of source parameters to waveform characteristics / J. Ma, G. Zhao, L. Dong, G. Chen, Ch. Zhang // *Shock and Vibration.* - 2015. – P.1– 10.

Madariaga, R. Dynamics of an expanding circular fault / R. Madariaga // *BSSA.* – 1976. – V. 66. –P. 639–666.

Maeda, N. A method for reading and checking phase times in autoprocessing system of seismic wave data / N. Maeda // *Zisin=Jishin.* – 1985. – V. 38. – P. 365-379.

Magotra, N. Single-station seismic event detection and location / N. Magotra, N. Ahmed, E. Chael // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* – 1989. – V. 27. – P. 15–23.

Mair, K. Influence of grain characteristics on the friction of granular shear zones / K. Mair, K.M. Frye, C. Marone // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107. № 10. – P. 2219.

Marone, C. Laboratory derived friction laws and their application to seismic faulting / C. Marone // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 1998. – V. 26. – P. 643–696.

Matsuzawa, T.A. S-wave energy estimation of small-earthquakes in the western Nagano region, Japan / T.A. Matsuzawa, T.M. Takeo, S. Ide, Y. Iio, H. Ito, K. Imanishi, S. Horiuchi // *Geophys. Res. Lett.* - 2004. - V. 1. - P. L03602.

Mcevilly T.V., Majer E.L. An automated seismic processor for micro-earthquake networks // *Bull. Seism. Soc. Am.* –1982. – Vol.72. P. 303 –325.

McLaskey, G. C. Preslip and cascade processes initiating laboratory stick slip / McLaskey, G. C., D. A. Lockner // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. –2014. – V. 119.

McLaskey, G. C. Shear failure of a granite pin traversing a sawcut fault / G. C. McLaskey, D. A. Lockner // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. - 2018. – V.110. – P. 97–110.

Michel, S. Similar scaling laws for earthquakes and Cascadia slow-slip events / S. Michel, A. Gualandi, J.P. Avouac // *Nature*. - 2019. - V. 574. - P.522–526.

Michlmayr, G. Shear-induced force fluctuations and acoustic emissions in granular material / G. Michlmayr, D. Cohen, D.Or // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. – 2013. – V. 118. – P. 6086–6098.

Mogi, K. Magnitude frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes / K. Mogi // *Bul. Earthquake Res. Inst.* – 1962. –V.40. – P.831-853.

Mogi, K. Study of the elastic shocks caused by the fracture of a heterogeneous material and its relation to earthquake phenomena / K. Mogi // *Bul. Earthquake Res. Inst.* – 1962. – V.40. – P. 125-173.

Molchan, G. M. Earthquake Prediction Strategies: A Theoretical Analysis / G. M. Molchan // *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. – 2003.- P.209–237.

Molchan, G. Space–time earthquake prediction: the error diagrams / G. Molchan // *Pure Appl. Geophys.* – 2010. – V.167. – P. 907–917.

Mousavi, S. M. Seismic features and automatic discrimination of deep and shallow induced-microearthquakes using neural network and logistic regression / S. M. Mousavi, S. P. Horton, C. A. Langston, B. Samei // *Geophysical Journal International*. – 2016. – V. 207(1). – P. 29–46.

Mousavi, S.M. Hybrid seismic denoising using higher-order statistics and improved wavelet block thresholding / S.M. Mousavi, C.A. Langston // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* - 2016. - V. 106, N 4. - P.1380–1393.

Nicholson, C. Triggered earthquakes and deep well activities / C. Nicholson, R. L. Wesson // *PAGEOPH.* – 1992. – V. 139. – P. 561–578.

Nishikawa, T. A review on slow earthquakes in the Japan Trench / T. Nishikawa, S. Ide, T. Nishimura // *Progress in Earth and Planetary Science*. – 2023. – V.10, 1.

Ohno K., Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission / K. Ohno, M. Ohtsu// *Construct. Build. Mater.* - 2010. - V. 24, Iss. 12. - P.2339–2346.

Ostapchuk, A. Acoustic emission reveals multiple slip modes on a frictional fault / A. Ostapchuk, K. Morozova, V. Markov, D. Pavlov, M. Popov // *Front. Earth Sci.* - 2021. – P. 9:657487.

Ostapchuk, A.A. On the mechanism of laboratory earthquake nucleation highlighted by acoustic emission / A.A. Ostapchuk, K.G Morozova // *Sci. Rep.* - 2020. - V. 10. - P. 7245.

Ostapchuk, A.A. Seismic-Acoustics of a Block Sliding Along a Fault / A.A. Ostapchuk, D.V. Pavlov, V. V. Ruzhich, et al // *Pure Appl. Geophys.* – 2020. – V. 177. – P. 2641–2651.

Oye, V. Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi ore mine, Finland / V. Oye, H. Bungum, M. Roth// *Bull. Seismol. Soc. Amer.* - 2005. - V. 95, N 3. - P.1011–1026.

Peng, Z. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena / Z. Peng, G. Gombert // *Nat. Geosci.* – 2010. – V. 3. – P. 599–607.

Provost, F. Automatic classification of endogenous landslide seismicity using the Random Forest supervised classifier / F. Provost, C. Hibert, J.-P. Malet // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – V. 44, Iss. 1. – P.113–120.

Pu, Y. Applying Machine Learning Approaches to Evaluating Rockburst Liability: A Comparison of Generative and Discriminative Models / Y. Pu, D. B. Apel, C. Wei // *Pure and Applied Geophysics.* – 2019. – V. 176. – P. 4503–4517

Rao, D. An expert artificial intelligence model for discriminating microseismic events and mine blasts / D. Rao, X. Shi, J. Zhou, Z. Yu, Y. Gou, Z. Dong, J. Zhang // *Appl. Sci.* – 2021. – V. 11, Iss. 14. – P. 6474.

Reber, J. Experimental demonstration of a semi-brittle origin for crustal strain transients / J. Reber, L. Lavier, N. Hayman // *Nat. Geosci.* – 2015. – V. 8. -P. 712–715.

Rebetsky, Y. L. The state of stress in the Earth's crust along the northwestern flank of the Pacific seismic focal zone before the Tohoku earthquake of 11 March 2011 / Y. L. Rebetsky, A. Y. Polets, T. K. Zlobin, // *Tectonophysics.* – 2016. – V. 685. – P. 60–76.

Ren, C. X. Machine learning reveals the state of intermittent frictional dynamics in a sheared granular fault / C. X. Ren, O. Dorostkar, B. Rouet-Leduc, C. Hulbert, D. Strebel, R. A. Guyer, et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2019. – V.46. – P. 7395–7403.

Ren, C.X. Machine learning and fault rupture: a review / C.X. Ren, C.Hulbert, P. A. Johnson, B. Rouet-Leduc // *Adv. Geophys.* – 2020. – V. 61. – P. 57–107.

Renard, F. Microscale characterization of rupture nucleation unravels precursors to faulting in rocks / F. Renard, B. Cordonnier, M. Kobchenko, N. Kandula, J. Weiss, W. Zhu // *Earth and Planetary Science Letters.* – 2017. – V. 476. – P. 69-78.

Richardson, E. Seismicity in deep gold mines of South Africa: Implications for tectonic earthquakes / E. Richardson, H. Jordan // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* - 2002. - V. 92, N 5. - P.1766–1782.

Rivière, J. Evolution of  $b$  -value during the seismic cycle: Insights from laboratory experiments on simulated faults / J. Rivière, Z. Lv, P. A. Johnson, C. Marone // *Earth and Planetary Science Letters.* – 2018. V.482. – P. 407–413.

Rouet-Leduc, B. Machine Learning Predicts Laboratory Earthquakes / B. Rouet-Leduc, C. Hulbert, N. Lubbers, K. Barros, C. J. Humphreys, P. A. Johnson // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – V. 44(18). – P. 9276–9282.

Scarpetta, S. Automatic classification of seismic signals at Mt. Vesuvius Volcano, Italy, using neural networks / S. Scarpetta, F. Giudicepietro, E. Ezin, S. Petrosino, E. Del Pezzo, M. Martini, M. Marinaro // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* - 2005. - V. 95, N 1. - P.185–196.

Scholz, C. H. Experimental study of the fracturing process in brittle rocks / C. H. Scholz // *Journal of Geophysical Research*. – 1968. – V.73. –P.1447-1454.

Scholz, C. H. Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression / C. H. Scholz // *J. Geophys. Res.* – 1968. – V.73. – P. 1417– 1432.

Scholz, C. H. The mechanics of earthquakes and faulting / C.H. Scholz. — 3rd edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019. — P. 517.

Scuderi, M. M. Evolution of shear fabric in granular fault gouge from stable sliding to stick slip and implications for fault slip mode/ M. M.Scuderi, C.Collettini, C. Vinti, C. Marone // *Geology*. – 2017. – V. 45. – P. 731–734.

Scuderi, M.M. Fluid injection and the mechanics of frictional stability of shale-bearing faults / M.M. Scuderi, C. Collettini // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. - 2018. -V. 123 (10). - P.8364e8384.

Sharma, M. Prediction of seismicity cycles in the Himalayas using artificial neural network / M. Sharma, M. Arora // *Acta Geophysica Polonica*. – 2005. – V. 53. – P. 299-309.

Shebalin, P.N . Phenomenon of local ‘seismic reversal’ before strong earthquakes / P. N. Shebalin, V. I .Keilis-Borok// *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1999. – 111(3-4), P.215–227.

Shiotani, T. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation / T. Shiotani, M. Ohtsu, K. Ikeda // *Construction and Building Materials*. – 2001. – V. 15. – P. 235–246.

Sleeman, R. Robust automatic P-Phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings / R. Sleeman, T.V. Eck // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. - 1999. - V. 113. № 1–4. - P. 265–275.

Sobolev, G. A. Simulation of triggered earthquakes in the laboratory / G. A. Sobolev, A. V. Ponomarev, A. V. Koltsov, V. B. Smirnov // *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*. –1996. – V. 147(2). – P. 345–355.

Trnkoczy, A. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm / A. Trnkoczy // *Iaspei New Manual of Seismological Observatory Practice*. – 2002. – Vol.2. – P. 1 –20.

Trugman, D. T . The spatiotemporal evolution of granular microslip precursors to laboratory earthquakes / Trugman, D. T., McBrearty, I. W., Bolton, D. C., Guyer, R. A., Marone, C., & Johnson, P. A. // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – V. 47. P.e2020GL088404.

Urbancic, T.I. Space-time variations in source parameters of mining-induced seismic events with  $M < 0$  / T.I. Urbancic, R.P. Young // *BSSA*. - 1993. - V. 83. - P. 378–397.

Utsu, T. A. Statistical study on the occurrence of aftershocks / T. A. Utsu // *Geophys. Mag*. – 1961. – V. 30. – P. 521–605.

Utsu, T. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity / T. Utsu, Y. Ogata, R.S. Matsu'ura // *J. Phys. Earth*. – 1995. – V. 43. – P. 1–33.

Veedu, D. M. The Parkfield tremors reveal slow and fast ruptures on the same asperity / D. M. Veedu, S.Barbor // *Nature*. – 2016. –V. 532. – P. 361–365.

Veedu, D.M. Bifurcations at the stability transition of earthquake faulting / D.M. Veedu, C. Giorgetti, M. Scuderi et al. // *Geophys. Res. Lett*. - 2020. - V. 47. - P. e2020GL087985.

Voisin, C. Evolution of seismic signals and slip patterns along subduction zones: Insights from a friction lab scale experiment / C. Voisin, J.-R. Grasso, E. Larose , F. Renard // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35(8). –L08302

Wang, J. Artificial neural network-based seismic detector / J. Wang, T. Teng // *Bull. Seismol. Soc. Amer*. – 1995. – V. 85. – P. 308–319.

Wu, W. Permeability evolution of slowly slipping faults in shale reservoirs / W. Wu, J.S. Reece, Y. Gensterblum, M.D. Zoback // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – V.44 (22). – P.11368e11375.

Yanagidani, T. Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress / T. Yanagidani, S. Ehara, O. Nishizawa, K. Kusunose, M. Terada // *J. Geophys. Res.* – 1985. – V.90. – P. 6840-6858.

Yu, H. Fluid-injection-induced earthquakes characterized by hybrid-frequency waveforms manifest the transition from aseismic to seismic slip / H. Yu, R. M. Harrington, H. Kao, et al. // *Nat Commun.* – 2021. – V.12. – P.6862.

Yung, S.K. An example of seismic time picking by third-order bicoherence / S.K. Yung, L.T. Ikelle // *Geophysics.* – 1997. – Vol. 62. – P. 1947-1952.

Zao, Y. An artificial neural network approach for broadband seismic phase picking / Y. Zao, K. Takano // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 1999. – V. 77, 89. – P.670–680.

Zhao, Z. Characteristics of shear-induced asperity degradation of rock fractures and implications for solute retardation / Z. Zhao, H. Peng, W. Wu, Y.-F. Chen // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* - 2018. – V.105. – P. 53–61.

Zhong, Z. Experimental investigation on frictional properties of stressed basalt fractures / Z. Zhong, C. Xu, L. Wang, Y. Hu, F. Zhang // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* – 2023.

Zigone, D. Slip acceleration generates seismic tremor like signals in friction experiments / D. Zigone, C. Voisin, E. Larose, F. Renard, M. Campillo, // *Geophysical Research Letters.* – 2011. – Vol. 38(1) . L01315.

Zmushko, T. Mine seismicity of Vorkuta coal mines / T. Zmushko, S. Turuntaev, V. Kulikov // *Rock Dynamics and Applications - State of the Art.* – 2013. – P.585–590.