

*На правах рукописи*

**Морозова Ксения Георгиевна**

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

**Специальность 1.6.9 «Геофизика»**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2023

**Работа выполнена** в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер имени академика М.А.Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН)

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук

**Остапчук Алексей Андреевич**

**Научный консультант:**

доктор физико-математических наук, профессор

**Кочарян Геворг Грантович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Богомолов Леонид Михайлович**

доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Национального исследовательского технологического университета «МИСИС»

**Вознесенский Александр Сергеевич**

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН).

Защита состоится «21» сентября 2023 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.059.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте [idg.chph.ras.ru](http://idg.chph.ras.ru).

Автореферат разослан

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.059.01  
кандидат физико-математических наук

**С.З. Беккер**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

В науках о Земле все еще остается нерешенной задача дистанционного контроля деформационных процессов в окрестности тектонических разломов и крупных трещин. Эволюция напряженно-деформированного состояния массива сопровождается излучением большого количества сейсмических и акустических импульсов, несущих информацию о протекающих в нем процессах. С целью локации источников слабой сейсмичности и определения их очаговых параметров, что актуально, в том числе для горнодобывающих предприятий, широко распространены сети сейсмического мониторинга. Однако из-за высокого уровня технологических шумов происходит потеря значительной части информации. В этой связи разработка усовершенствованных методов обработки результатов регистрации сейсмических и акустических импульсов является актуальной проблемой.

**Целью работы** является разработка научных основ метода сейсмоакустического контроля режима скольжения тектонических нарушений на основе анализа параметров излучения, сопровождающего развитие динамических подвижек.

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 и теоретическая значимость результатов**, полученных в диссертации, заключается в обосновании нового метода сейсмоакустического контроля режима скольжения по тектоническим нарушениям 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 нарушения.

**Практическая значимость** заключается в разработке методики применения интеллектуального анализа к исследованию сейсмоакустических данных. Разработанные методы могут быть использованы при проведении сейсмоакустического мониторинга 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 и ансамблевых методов машинного обучения позволяет эффективно описывать деформационные процессы в зоне тектонических нарушений и осуществлять контроль их состояния на основе анализа данных, зарегистрированных в относительно короткие временные интервалы. 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 ценность.
3. Предложенный подход к анализу данных акустической эмиссии позволяет по коротким временным интервалам восстановить основные параметры динамики деформирования межблокового контакта.
4. Разработанный алгоритм КЛАСИ-k 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 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.

**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.

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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследования, сформулированы основные защищаемые положения, отражена научная новизна, описаны практическая и теоретическая значимость работы.

Разработка месторождений и интенсификация добычи полезных ископаемых приводят к появлению или активизации сейсмических процессов – техногенной сейсмичности. Техногенные землетрясения значительной магнитуды в России регистрировались на Кольском полуострове, о. Сахалин, Северном Кавказе, в Кузбассе, Республике Татарстан и других регионах, где происходит добыча полезных ископаемых (В.В. Адушкин, В.Э. Асминг, А.Ф. Еманов, А.А. Еременко, А.А. Козырев, А.В. Ловчиков, Н.Н. Мельников, В.Н. Опарин, С.Б. Турунтаев и др.). С целью получения информации о напряженном состоянии массива горных пород и деформационных процессах, происходящих в нем, широкое распространение приобрели системы сейсмологического мониторинга, установленные как в горных выработках, так и на поверхности массива. Для совершенствования методов обработки получаемой информации о процессах подготовки сильных событий актуальной задачей является разработка методов, основанных на регистрации и классификации параметров слабых сейсмических и акустических импульсов.

**Первая глава** диссертации посвящена обзору основных методов и подходов к анализу акустических и сейсмологических данных.

Спектр режимов скольжения, которые реализуются на разломах, включает нормальные землетрясения, низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения, события медленного скольжения (С.А. Борняков, В.Г. Быков, Г.Г. Кочарян, Н.М. Шапиро, R. Bürgmann, G. Gombert, S. Ide, Z. Peng, L.M. Wallace, и др.). В лабораторных экспериментах исследования различных режимов скольжения концентрировались преимущественно на анализе вариаций механических характеристик модельного разлома (Г.Г. Кочарян, В.А. Новиков, А.А. Остапчук, А.В. Пономарев, Г.А. Соболев, С. Collettini, M. Ikari, C. Marone, и др.). При изучении закономерностей акустической эмиссии (АЭ) основное внимание уделялось анализу характеристик излучения при разрушении образцов или при регулярном прерывистом скольжении, в том числе инициированном внешними факторами (Л.М. Богомолов, Е.Е. Дамаскинская, В.А. Зейгарник, В.С. Куксенко, И.А. Пантелеев, А.В. Пономарев, В.Б. Смирнов, Г.А. Соболев, P.A. Johnson, D. Lockner, C. Marone, M. Ohtsu, F. Renard, и др.).

Такие физические процессы, как разрушение образцов горных пород, фрикционное скольжение блоков горных пород, деформирование гранулированных сред статистически

описываются соотношениями, подобными тем, что используются для описания природной сейсмичности (закон Гутенберга-Рихтера, прямой и обратный закон Омори и др.).

Сейсмические и акустические методы контроля широко используются для контроля напряженного состояния массива горных пород (С.В. Баранов, А.С. Вознесенский, В.Л. Гиляров, С.А. Жукова, О.Г. Журавлева, М.М. Каган, А.В. Лавров, И.Ю. Рассказов, И.Э. Семенова, Ю.В. Федотова, В.Л. Шкуратник, S. Gibowicz, A. Kijko, G. Kwiatek, и др.). Доступные автоматизированные системы сбора акустических данных предполагают либо непрерывную запись с низкой частотой оцифровки, либо автоматическое выделение импульсов по порогу и сохранение только волновой формы импульса. Однако при существенном изменении уровня шума детектирование по порогу является неэффективным. Можно обнаружить общие принципы и подходы в методах детектирования в сейсмологии и при исследовании акустической эмиссии. В первой главе детально рассмотрены наиболее распространенные методы детектирования, показаны их преимущества, недостатки и особенности применения.

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 с целью моделирования и предсказания эволюции состояния динамической системы активно стали применяться алгоритмы машинного обучения (МО). В первой главе описаны основные принципы применения МО, которые активно используются при исследовании динамики разломных зон; как в натуральных условиях, так и в лабораторных экспериментах.

Выполненный обзор демонстрирует возможность разработки единого подхода при анализе сейсмоакустических импульсов, основанном на методах интеллектуального анализа данных. При разработке единого подхода к анализу данных сейсмоакустического мониторинга целесообразно использовать результаты лабораторных экспериментов, в которых есть возможность как контролировать деформационные характеристики объекта, так и осуществлять непрерывную регистрацию сейсмоакустических сигналов.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию постановки и проведения лабораторных экспериментов. Серия экспериментов выполнялась на геомеханическом стенде лаборатории деформационных процессов в земной коре ИДГ РАН в постановке прямого сдвига (рисунок 1). Мраморный блок 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 длиной 2,5 м и площадью поперечного сечения  $0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$ . Контакт между шероховатыми поверхностями блока и стержня заполнялся слоем мелкодисперсного гранулированного материала толщиной 3 мм. В качестве

заполнителей межблокового контакта использовались смеси различных природных и искусственных гранулированных материалов.

Нормальная сила составляла  $F_N = 500$  Н и создавалась с помощью набора грузов. Сдвиговая сила прикладывалась к блоку через упругий элемент с жесткостью  $K = 55$  кН/м, свободный конец которого смещался с постоянной скоростью  $u_s = 8$  мкм/с. Сдвиговое усилие контролировалось датчиком силы с точностью 1 Н. Перемещение блока относительно стержня измерялось с помощью лазерного датчика в полосе частот 0-5 кГц с точностью 0,1 мкм.

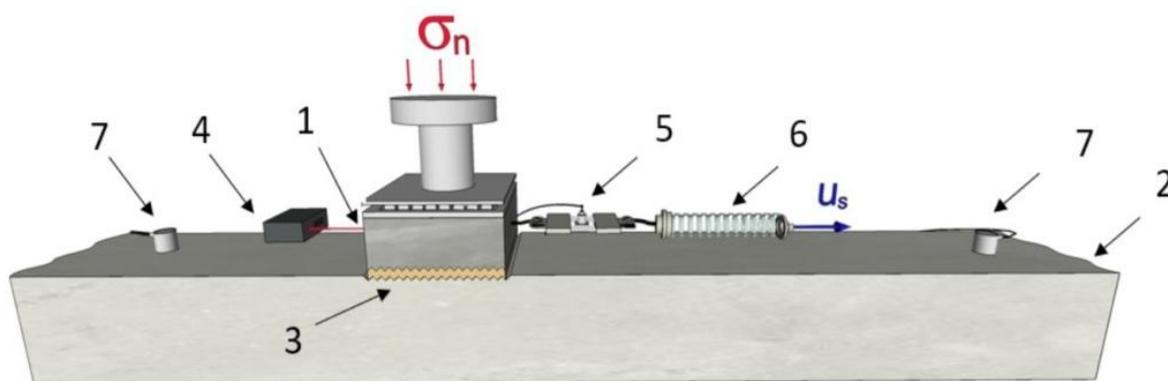


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – подвижный блок, 2 – гранитное неподвижное основание, 3 – слой заполнителя, 4 – датчик перемещения, 5 – датчик силы, 6 – пружинный элемент, 7 – преобразователь АЭ

Акустоэмиссионный сигнал, сопровождающий скольжение подвижного блока, фиксировался преобразователем АЭ VS30-V (Vallen System, Германия) с рабочим диапазоном частот 20 – 80 кГц с усилителем АЕР5 (Vallen System, Германия) с усилением 34 дБ. Преобразователи были установлены на неподвижном гранитном блоке на расстоянии 0,6 и 0,7 м от подвижного блока. В ходе экспериментов велась непрерывная регистрация сигнала АЭ с частотой дискретизации  $f_s = 1$  МГц.

Реализован алгоритм выделения импульсов АЭ из непрерывной записи. Использовались два метода детектирования импульсов АЭ – превышение порогового уровня потока энергии и информационный критерий Акаике. Предварительно перед применением алгоритма выделения импульсов АЭ сигнал был отфильтрован в рабочем диапазоне частот преобразователя (20 – 80 кГц). При выделении импульсов по потоку энергии время начала ( $t_s$ ) и окончания ( $t_e$ ) импульса АЭ определялось с точностью 250 мкс. Пример импульса АЭ представлен на рисунке 2.

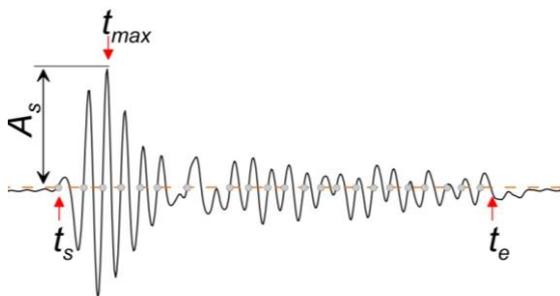


Рисунок 2 – Пример детектированного импульса АЭ.

$A_s$  – амплитуда импульса АЭ,  $t_s$  – время начала,  $t_e$  – время окончания,  $t_{max}$  – момент времени достижения максимального значения амплитуды. Серыми точками показаны моменты пересечения порога

Для выделенных импульсов АЭ были определены следующие параметры: длительность ( $dt = t_e - t_s$ ), амплитуда ( $A_s$ ), средняя частота ( $AF$ ), скорость нарастания амплитуды сигнала ( $RA = (t_{max} - t_s)/A_s$ ), энергия ( $E = 1/fs \sum_{t_s}^{t_e} A(t_i)^2$ ). Чтобы описать изменение волновой формы детектируемых импульсов АЭ, был введен параметр волновой формы  $WI$ . Значение  $WI$  рассчитывается согласно соотношению:

$$WI = \frac{t_{max} - t_s}{t_e - t_{max}}. \quad (1)$$

В результате были сформированы каталоги импульсов АЭ для всех реализованных режимов скольжения. Каталоги содержали информацию о времени, амплитуде и энергии, а также о волновой форме и средней частоте импульсов АЭ.

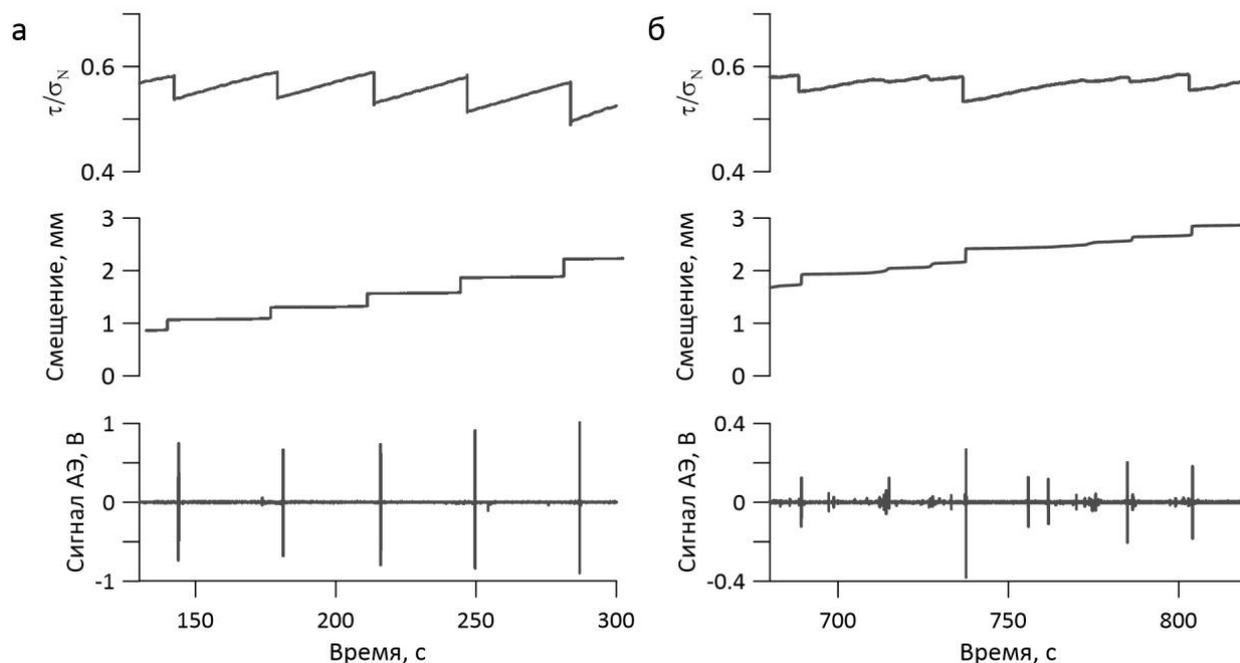


Рисунок 3 – Примеры временных вариаций характеристик межблокового контакта (сдвигового усилия к нормальному ( $\tau/\sigma_N$ ), смещения и сигнала АЭ) при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах скольжения

Отработана методика воспроизведения различных режимов межблокового скольжения. За счет вариаций вещественного и гранулометрического состава заполнителя межблокового контакта был реализован полный спектр режимов скольжения. Примеры изменения отношения сдвигового усилия к нормальному ( $\tau/\sigma_N$ ), смещения блока и сигнала

АЭ во времени при регулярном и нерегулярном режимах скольжения представлены на рисунке 3. Регулярное прерывистое скольжение (стик-слип) характеризуется квазипериодическими актами быстрого проскальзывания, сопровождающимися большой амплитудой сброса сдвигового усилия. Для нерегулярного прерывистого скольжения характерны как быстрые, так и медленные акты проскальзывания, чередующиеся случайным образом.

Предложена классификация эпизодов межблокового проскальзывания на основе максимальной скорости относительного смещения блоков  $V_{peak}$  и длительности событий. В проведенных лабораторных экспериментах все акты динамического проскальзывания классифицированы. Их удалось разделить на эпизоды быстрого скольжения с  $V_{peak} > 1000 \text{ } \mu\text{s}$  и длительностью менее 0,8 с, эпизоды медленного скольжения с максимальными скоростями  $V_{peak} = 2 \dots 5 \text{ } \mu\text{s}$  и длительностью от 2 с до 15-20 с, и на переходные эпизоды скольжения, которые заполняют пробел между быстрыми и медленными эпизодами скольжения, таким образом формируется континуум эпизодов скольжения. Различные акты динамического проскальзывания и сопровождающие их реализации сигналы АЭ представлены на рисунке 4.

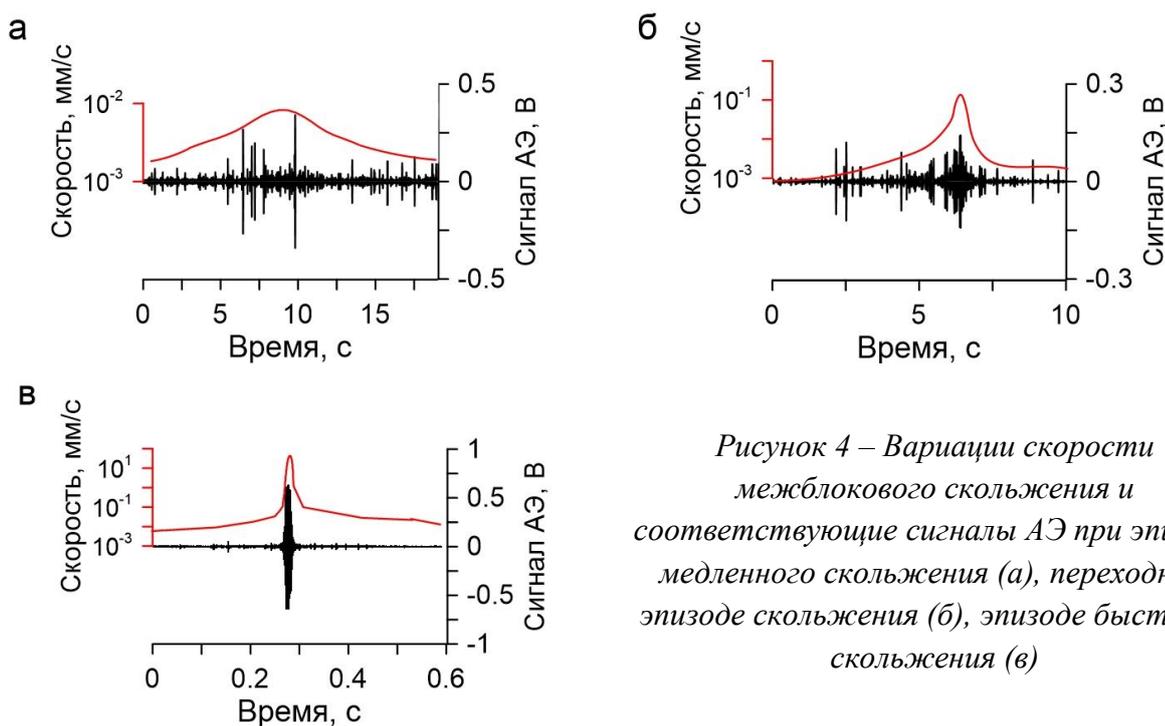


Рисунок 4 – Вариации скорости межблокового скольжения и соответствующие сигналы АЭ при эпизоде медленного скольжения (а), переходном эпизоде скольжения (б), эпизоде быстрого скольжения (в)

**Третья глава** посвящена анализу закономерностей акустической эмиссии, сопровождающей различные режимы межблокового скольжения. Первая часть работ включала анализ непрерывной записи сигнала АЭ. Установлено, что в условиях формирования актов динамического проскальзывания наблюдаются существенные отклонения кумулятивного перемещения и излученной энергии АЭ от линейного тренда, а величина отклонения может быть определена в терминах дефицита:

$$\delta X(t) = u_s t - X(t) \quad (2)$$

$$\delta E(t) = et - E_{cum}(t), \quad (3)$$

где  $\delta X$  – дефицит перемещения,  $X(t)$  – смещение подвижного блока относительно неподвижного основания,  $u_s$  – скорость, с которой смещался свободный конец упругого элемента,  $\delta E$  – дефицит излученной энергии,  $e$  – коэффициент линейной регрессии зависимости  $E_{cum}(t)$ , а  $E_{cum}(t) = \int_0^t A^2 dt$  – кумулятивная величина излученной энергии.

Анализ совокупности всех экспериментальных данных позволил установить функциональную зависимость между параметрами межблокового контакта  $\{e, u_s, \mu\}$  (рисунок 5), которая выражается следующим образом:

$$\frac{e}{u_s \cdot (\mu - \mu_0)} = (6 \pm 1) \cdot 10^{-3} \text{ отн. ед.}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения, а  $\mu_0$  – минимальное значение, при котором наблюдалось нестабильное скольжение.

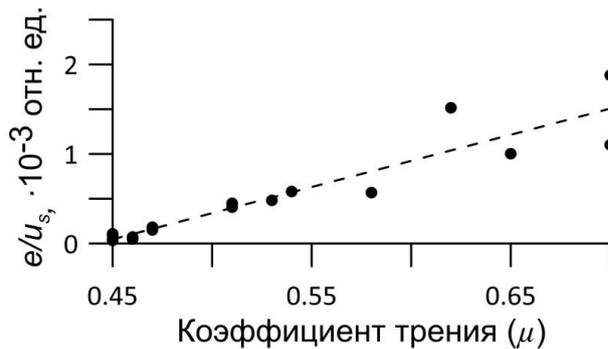


Рисунок 5 – Зависимость  $e/u_s$  от коэффициента трения  $\mu$  для проведенных экспериментов

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:

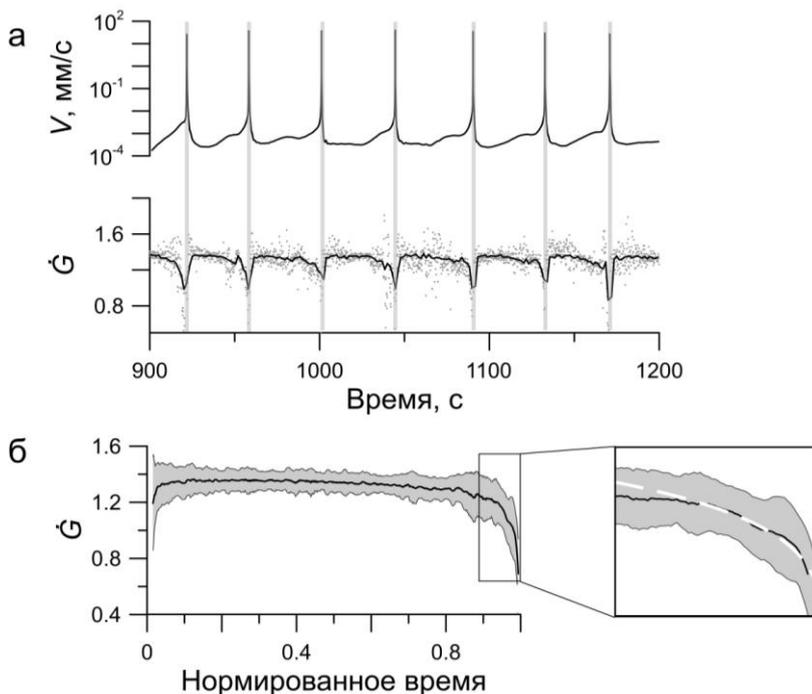
$$G = \sqrt{\left(\frac{\delta X}{u_s}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{e}\right)^2}, [c] \quad (5)$$

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. На рисунке ба представлены временные вариации относительной скорости смещения блоков и скорости приращения обобщенного дефицита  $\dot{G}$  (черной линией показана средняя величина в скользящем окне 5 мс). Наблюдается выраженная цикличность изменения с характерными

стадиями подготовки динамической неустойчивости. Выделенные стадии типичны как для периодически повторяющихся эпизодов быстрого скольжения при режиме регулярного прерывистого скольжения, так и для аperiodических эпизодов быстрого и медленного скольжения при нерегулярном режиме. Характерный вид изменения параметра  $\dot{G}$  для всех режимов скольжения представлен на рисунке бб, где черная линия соответствует среднему значению скорости приращения дефицита  $\dot{G}$ , определенной по всей совокупности экспериментов, серая область соответствует её стандартному отклонению, время нормировано на рекуррентное время подготовки соответствующего эпизода динамического скольжения. На врезке продемонстрирована аппроксимация временных вариаций  $\dot{G}$  (белая пунктирная линия) на заключительной стадии подготовки динамического скольжения, которая может быть представлена в виде степенной функции:

$$\dot{G} = \alpha(1 - t)^\beta \quad (6)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – константы.

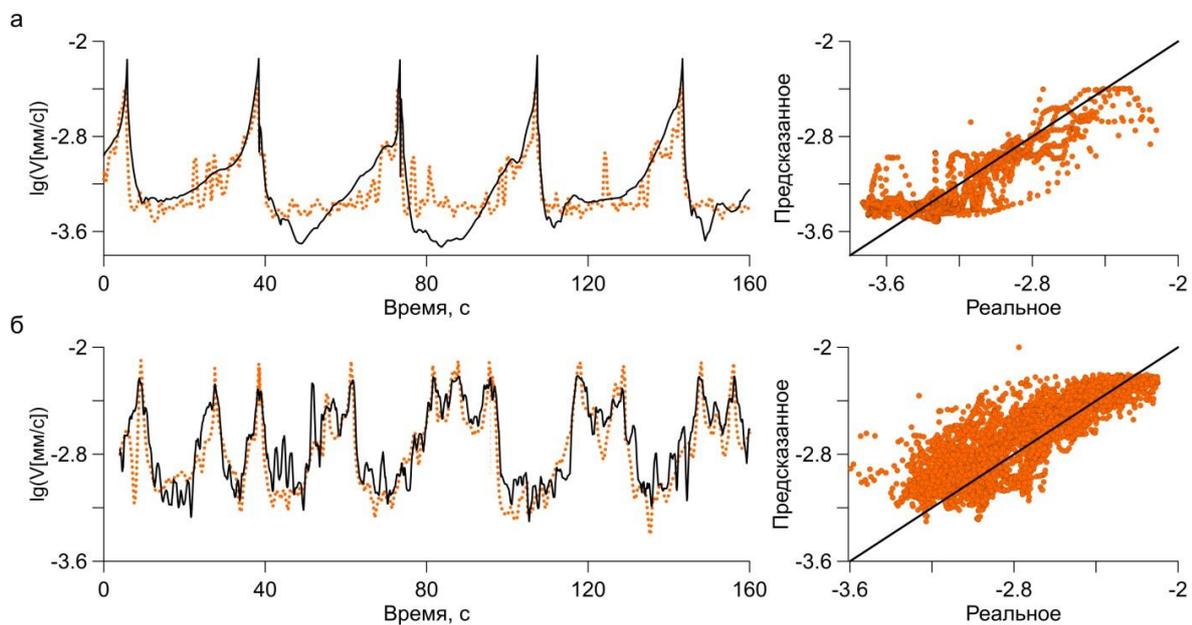


*Рисунок 6 – Изменение состояния межблокового контакта при регулярном прерывистом скольжении: а) временные вариации скорости относительного скольжения блоков (V) и скорости приращения обобщенного дефицита ( $\dot{G}$ ); б) изменение скорости приращения обобщенного дефицита  $\dot{G}$  при подготовке эпизодов динамического скольжения. Время нормировано на рекуррентное время подготовки соответствующего эпизода динамического проскальзывания*

В условиях непрерывной регистрации АЭ обобщенный дефицит  $G$  межблокового контакта позволяет объединить информацию о скорости смещения межблокового контакта и о потоке энергии АЭ. Скорость приращения дефицита  $\dot{G}$  может выступать в качестве индикатора состояния межблокового контакта, позволяющего с высокой точностью контролировать подготовку эпизодов динамического скольжения.

Для определения ожидаемой относительной скорости скольжения блоков и момента старта динамического события только на основе непрерывных акустоэмиссионных данных был применен алгоритм Случайный лес. Обучение алгоритма проводилось на данных двух

экспериментов, в которых были реализованы регулярный и нерегулярный режимы скольжения. При обучении алгоритма определению 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, проценти от 1-го до 9-го и от 91-го до 99-го с шагом 1 %, максимальные и минимальные значения амплитуды сигнала. На рисунке 7 показан результат применения алгоритма восстановления скорости скольжения блока по данным регистрации сигнала АЭ для данных, 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, например для экспериментов, представленных на рисунке 7, при регулярном режиме точность (коэффициент детерминации) алгоритма составляет  $R^2=0,69$ , при нерегулярном –  $R^2=0,54$ .



*Рисунок 7 – Определение скорости межблокового скольжения на основе алгоритма машинного обучения Случайный лес при регулярном (а) и нерегулярном (б) режимах скольжения. Сплошная линия – реальные значения, пунктирная линия – значения, предсказанные моделью. Справа представлено сравнение истинных и предсказанных значений  $\lg(V)$ . Прямая линия соответствует точному определению скорости*

Применение методов машинного обучения на данных АЭ позволило восстановить скорость смещения блока, и продемонстрировать возможность определения моментов начала эпизодов проскальзывания при различных режимах скольжения.

Вторая часть исследований, представленных в главе 3, сконцентрирована на анализе каталогов импульсов АЭ, зарегистрированных при реализации различных режимов межблокового скольжения. Каталог импульсов АЭ содержит информацию об импульсах, которые характеризуются различными волновыми формами и значениями амплитуд. В

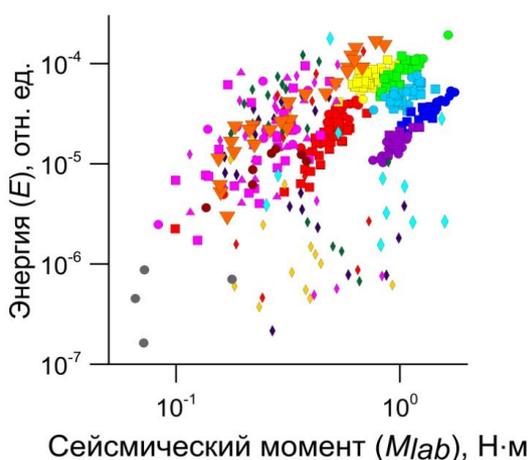
зависимости от режима скольжения активность импульсов АЭ варьировалась от одиночных “щелчков” с интервалом в несколько секунд до регулярно повторяющихся импульсов с интервалом в 1-2 мс. Стоит разделять импульсы АЭ, которые сопровождают эпизоды динамического скольжения, и импульсы, излучаемые при подготовке таких эпизодов.

Для сравнения величин излученной энергии АЭ для всех эпизодов скольжения был рассчитан лабораторный аналог сейсмического момента  $M_{lab}$ :

$$M_{lab} = K \cdot \Delta L \cdot s, \quad (7)$$

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

На рисунке 8 представлена величина энергии АЭ эпизодов динамического скольжения в зависимости от рассчитанного значения  $M_{lab}$ .



*Рисунок 8 – Зависимость энергии АЭ, излученной при динамическом проскальзывании, от реализованного сейсмического момента. Символами отмечены различные эксперименты*

Эпизоды скольжения демонстрируют сильную (до 2 порядков величины) вариацию излучаемой энергии АЭ при одном и том же реализованном моменте. Можно видеть, что свойства материала заполнителя контакта между блоками и его вещественный состав оказывают сильнейшее влияние на величину излученной энергии АЭ.

В процессе межблокового скольжения статистика импульсов АЭ описывается степенным законом, аналогичным закону повторяемости Гутенберга-Рихтера:

$$\lg(N) = a - b \lg(A_s), \quad (8)$$

где  $a$  и  $b$  – константы. Коэффициент  $b$  — скейлинговый параметр.

В лабораторных экспериментах выявлена определяющее влияние 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. Обобщение результатов реализации различных режимов скольжения показывает высокую обратную

корреляцию между скейлинговым параметром  $b$ -value и коэффициентом трения  $\mu$  (рисунок 9). Коэффициент корреляции Пирсона составляет -0,95.

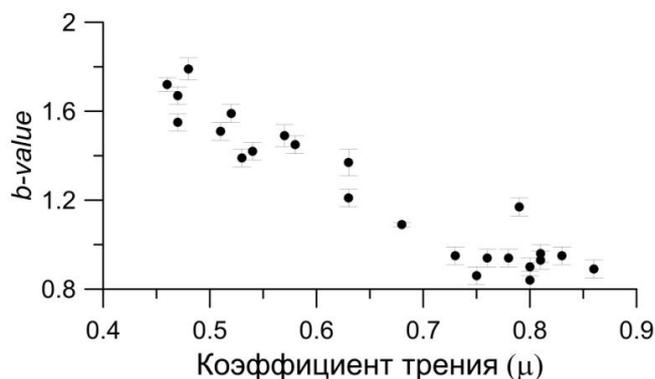


Рисунок 9 – Зависимость параметра  $b$ -value в законе повторяемости от коэффициента трения  $\mu$  для всех реализованных режимов скольжения

Межблоковое скольжение сопровождается излучением импульсов АЭ различной волновой формы и амплитуды. Обнаруживаются как импульсы с резким нарастанием амплитуды, так и тремороподобные импульсы. Наблюдается существенное отличие в распределении импульсов по амплитуде  $A_s$  и по параметру волновой формы  $WI$ . Распределение импульсов по параметру  $WI$  (рисунок 10 б) демонстрирует две характерные области:  $WI \leq 0,1$  и  $WI > 0,1$ . В области  $WI \leq 0,1$  наблюдается равномерное распределение, в то время как область  $WI > 0,1$  характеризуется степенным снижением. Распределение может быть описано следующим образом:

$$N = \begin{cases} c, & WI \leq 0,1 \\ d \cdot WI^{-w}, & WI > 0,1 \end{cases}, \quad (9)$$

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].

Рассмотрение двумерного распределения импульсов АЭ по амплитуде  $A_s$  и параметру волновой формы  $WI$  указывает на отсутствие корреляций между параметрами  $WI$  и  $A_s$ . 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  $WI$  (рисунок 10 б) обосновывает проведение классификации импульсов АЭ 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. Моду II составляют импульсы с  $WI > 0,1$ .

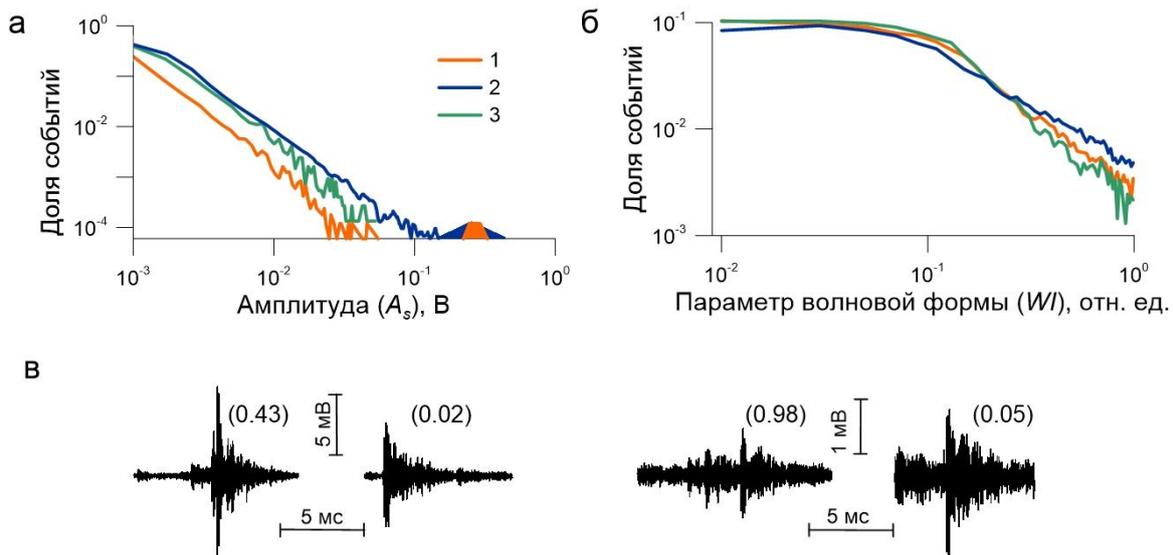


Рисунок 10 – Распределение импульсов АЭ по амплитуде  $A_s$  (а) и параметру волновой формы  $WI$  (б) для различных режимов скольжения. 1 – регулярное прерывистое скольжение, 2 – нерегулярное скольжение, 3 – скольжение с постоянной скоростью; снизу (в) представлены примеры зарегистрированных импульсов АЭ с различными значениями  $WI$  (указан в скобках)

Чтобы выявить закономерности эволюции внутренних процессов самоорганизации, была исследована эволюция статистических свойств различных мод импульсов АЭ. На рисунке 11 показаны вариации параметров АЭ для регулярного прерывистого скольжения. Параметр  $b$ -value 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 11 в). В то же время для импульсов АЭ моды II наблюдаются закономерные 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. Причем при нерегулярном режиме скольжения, как и при регулярном прерывистом скольжении, для моды II ( $WI > 0,1$ ) обнаруживаются характерные вариации  $b$ -value.

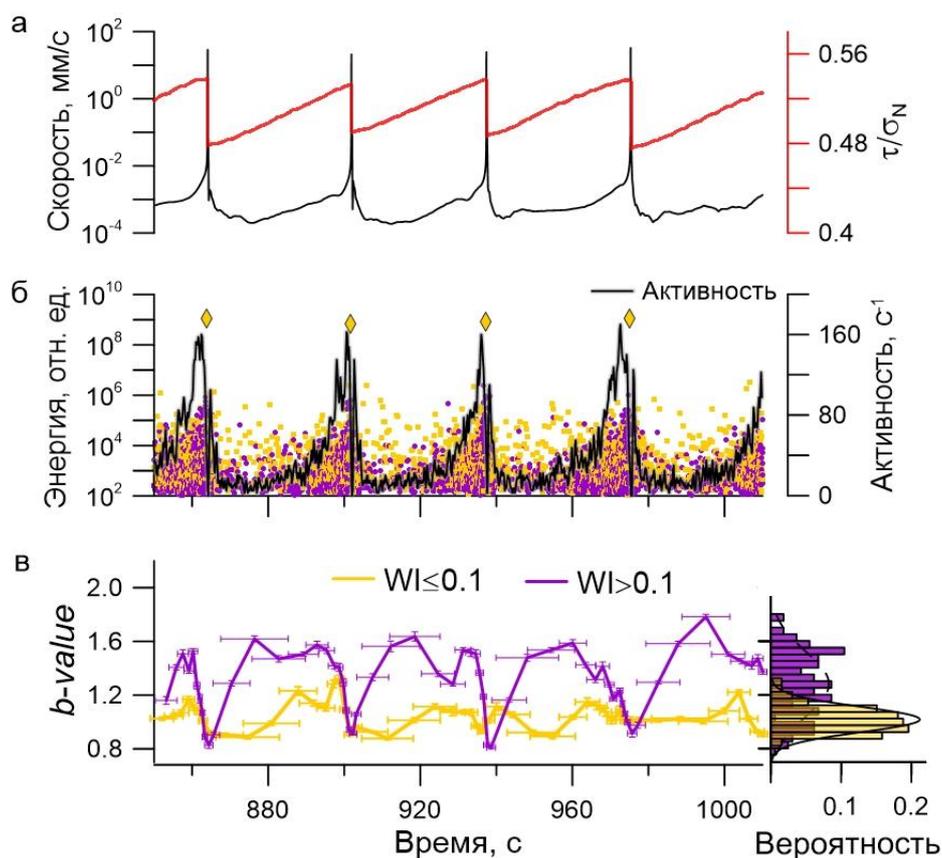


Рисунок 11 – Временные вариации параметров, сопровождающих эволюцию межблокового контакта, при регулярном прерывистом скольжении.

(а) временные вариации скорости межблокового смещения и отношения сдвигового усилия к нормальному ( $\tau/\sigma_N$ ), (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)

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  $t_i$ .

Для режима регулярного прерывистого скольжения время тревоги охватывает всю стадию ускоренного скольжения межблокового контакта. 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. Для режима нерегулярного скольжения

характер изменения значения параметра *b-value* является более сложным, что приводит к появлению “ложных тревог”. Для определения эффективности ретроспективного прогноза эпизодов динамического скольжения была использована диаграмма ошибок и оценка эффективности по Г. М. Молчану. Для всех реализованных регулярных режимов скольжения  $J_m$  находится в диапазоне 0,59–0,83, в то время как для нерегулярного режима  $J_m = 0,40 - 0,65$ .

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.

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 моды) 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.

**Четвертая глава** посвящена анализу микросейсмических событий, инициированных взрывами в шахте на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии. 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  $T(M_0)$ ). В основе метода КЛАСИ-*k* лежат результаты классификации, представленные в Главе 3, классификация АЭ по *RA-AF* диаграмме и алгоритм кластеризации *k*-средних.

Апробация разработанного метода КЛАСИ-*k* выполнялась на данных шахтной микросейсмичности, инициированной двумя массовыми взрывами при разработке железорудного месторождения «КМАруда».

Для анализа использовались данные регистрации двух взрывов, произведенных 06.07.2019 г. и 24.10.2020 г. Регистрация микросейсмических событий выполнялась сейсмической группой, размещенной на глубине 300 м и состоящей из 6 измерительных точек Т1–Т6, оборудованных акселерометрами Bruel & Kjaer 8306 с рабочим диапазоном

частот от 0,08 Гц до 1 кГц (рисунок 12). Частота дискретизации составляла 10 кГц, чувствительность измерительного канала – 7,8 (мкм/с<sup>2</sup>)/отсчет.

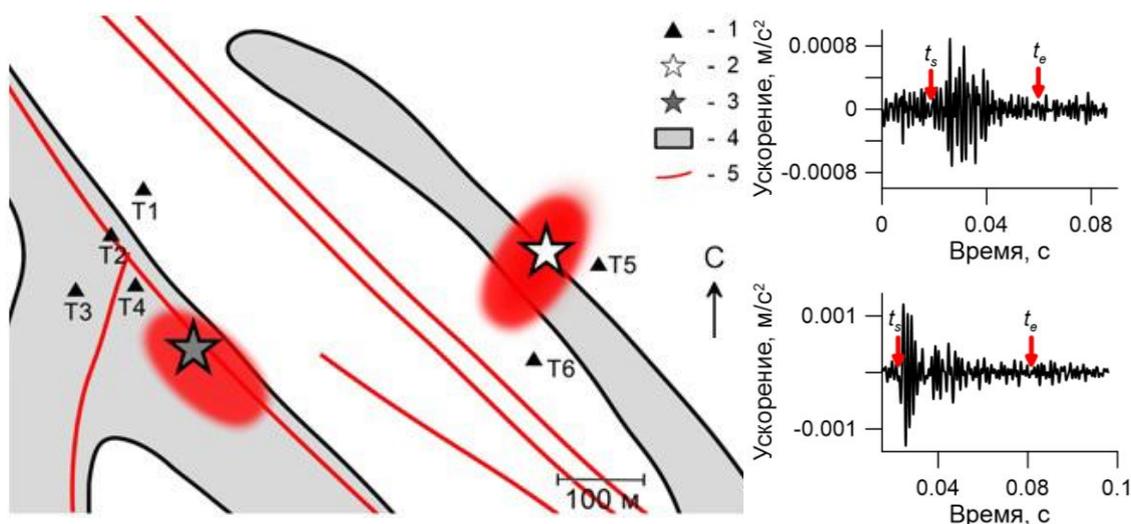


Рисунок 12 – Принципиальная схема расположения измерительных точек (слева) и примеры зарегистрированного сигнала (справа). На схеме исследуемого участка Коробковского железорудного месторождения: 1 – акселерометры; 2, 3 – локализация взрывов, произведенных 06.07.2019 г. и 24.10.2020 г., соответственно; 4 – рудные поля; 5 – тектонические нарушения. Справа представлены примеры зарегистрированных микросейсмических импульсов.

Анализируемые события были зарегистрированы после массовых взрывов в период прекращения горных и строительно-монтажных работ. 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  $E_s$ .

Изначально классификация методом КЛАСИ-к была проведена на основе параметров волновой формы  $\{RA, AF, WI\}$ . 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 группы значение  $E_s/M_0$  существенно ниже и составляет  $4.8 \cdot 10^{-8}$  Дж/(Н·м). События первого типа характеризуются, как правило, меньшей длительностью, чем события второго типа с таким же сейсмическим моментом. На рисунке 13 показаны результаты применения метода КЛАСИ-к с использованием очаговых параметров очага  $\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$  в качестве целевых параметров. В таблице 1 приведены результаты сравнения двух классификаций. Так для взрыва, проведенного 24.10.2020 г., 117 событий были отнесены двумя методами классификации к типу 1, а 66 к типу 2, а 67 событий при классификации по параметрам волновой формы были отнесены к типу 2, а по параметрам очага – к типу 1. Для данных, полученных от взрывов 24.10.2020 г. и 06.07.2019 г., величины параметра  $AUC$ , который оценивает эффективность классификатора, составляют 0,72 и 0,67, что может быть интерпретировано как хорошее и среднее качество модели соответственно.

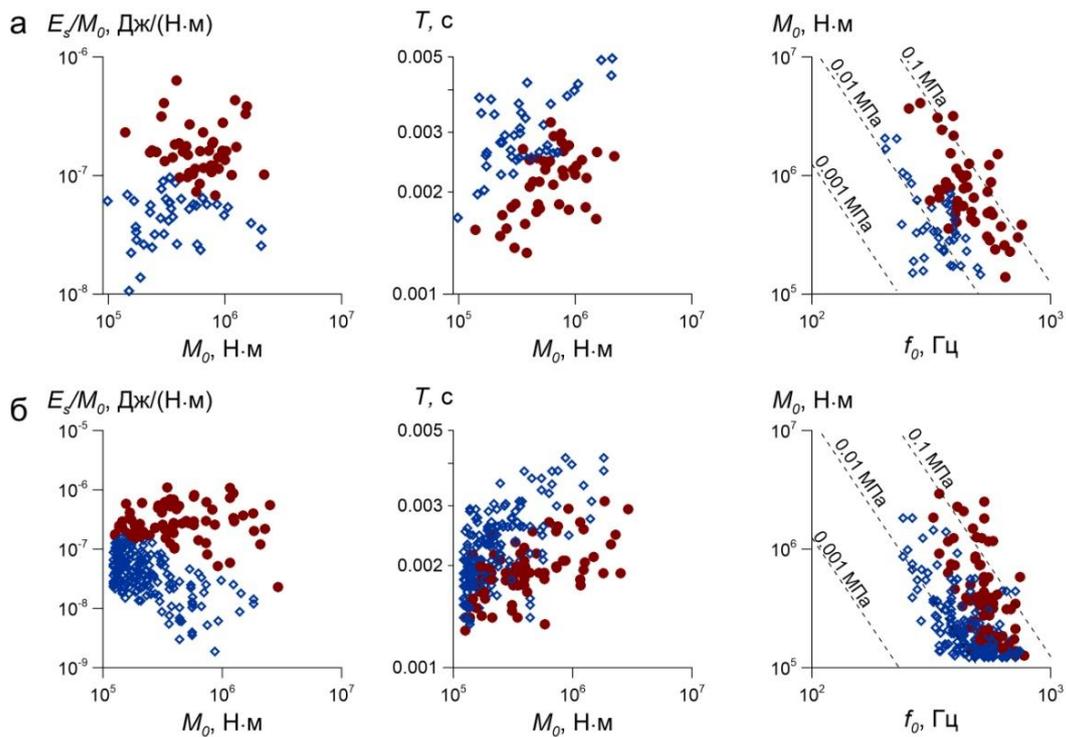


Рисунок 13 – Классификация импульсов микросейсмических событий с использованием метода КЛАСИ-к по параметрам  $\{E_s, M_0, f_0, E_s/M_0\}$ : а – взрыв 06.07.2019 г.; б – взрыв 24.10.2020 г. Представлены зависимости приведенной сейсмической энергии  $E_s/M_0$  и длительности  $T$  от скалярного сейсмического момента  $M_0$ , а также зависимость  $M_0$  от частоты  $f_0$ , пунктиром показаны линии постоянного сброса напряжения

Таблица 1. Соответствие подмножеств сейсмических событий, выделенных методом КЛАСИ-к на основе параметров волновой формы и параметров очага.

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

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. Показана принципиальная возможность использования в качестве целевых параметров метода КЛАСИ-к параметров очага  $\{E_s, M_0, f_0\}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе детально исследованы закономерности излучения сейсмоакустических импульсов при различных режимах скольжения по разломам и трещинам.

Основные полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

- В лабораторных экспериментах установлено определяющее влияние 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 скольжения и потоком излучаемой энергии АЭ, а также продемонстрирована 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 в лабораторных опытах являются характерным признаком динамических подвижек разного типа. Этот признак может быть использован при прогнозировании режима развития скольжения.
- 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 межблокового скольжения 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-к. Показана принципиальная возможность использования в качестве целевых параметров метода КЛАСИ-к параметров очага  $\{E_s, M_0, f_0\}$ . Применение разработанного метода позволило в потоке микросейсмических событий, индуцированных промышленными взрывами, выделить два подмножества, которые относятся к разным диапазонам величины приведенной сейсмической энергии  $E_s/M_0$ . Граничное значение величины этого отношения 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-к в совокупности с ансамблевыми методами машинного обучения могут позволить контролировать эволюцию деформационных процессов в зоне тектонических разломов и трещин на основе анализа результатов сейсмической регистрации в относительно коротких временных интервалах.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК*

1. Ostapchuk A., **Morozova K.**, Pavlov D. Influence of the Structure of a Gouge-Filled Fault on the Parameters of Acoustic Emission // Acta Acustica United With Acustica. – 2019. – Vol. 105. – P.759 – 765.
2. Кочарян Г. Г., **Морозова К. Г.**, Остапчук А. А. Исследование акустической эмиссии слоя геоматериала при сдвиговом деформировании // ФТПРПИ. – 2019. – №3. – С. 15 - 22.
3. Ostapchuk A., **Morozova K.** On the Mechanism of Laboratory Earthquake Nucleation Highlighted by Acoustic Emission // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 7245.
4. Ostapchuk A., **Morozova K.**, Markov V., Pavlov D., Popov M. Acoustic Emission Reveals Multiple Slip Modes on a Frictional Fault // Frontiers in Earth Science. – 2021. – P.9:657487.
5. Остапчук А. А., Кочарян Г. Г., **Морозова К. Г.**, Павлов Д. В., Гридин Г.А. Особенности формирования динамического сдвига в тонком слое гранулированного материала // Физика Земли. – 2021. – № 5. – С. 91–103.
6. **Морозова К. Г.**, Остапчук А. А. Связь состояния сдвиговой трещины в гранулированном материале и акустоэмиссионных и деформационных данных // Акустический журнал. – 2022. – Т.68 – № 5. – С. 543–549.
7. **Морозова К. Г.**, Остапчук А. А., Беседина А.Н., Павлов Д. В. Классификация сейсмических событий, сопровождающих взрывной способ разработки массива горных пород // Сейсмические приборы. – 2022. – Т. 58. – № 4. – С.97–110.

1. **Морозова К. Г.**, Остапчук А. А. Статистические закономерности излучения сигналов акустической эмиссии при фрикционном скольжении разлома: лабораторный эксперимент // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы V Международной конференции / под редакцией В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2019. С.316-322.
2. Остапчук А.А., Горбунова Э.М., Григорьева А.В., Павлов Д.В., Ружич В.В., Беседина А.Н., **Морозова К.Г.**, Шарафиев З.З. Комплексное изучение глубинного разлома по данным наземных наблюдений // Динамические процессы в геосферах. - 2019. - №11. - С.63-70.
3. **Морозова К. Г.**, Остапчук А. А. Определение внутренней структуры модельного разлома по данным акустической эмиссии // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы шестой молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ РАН, 2019. – С163 -165.
4. **Морозова К. Г.**, Остапчук А. А. Закономерности акустоэмиссионного излучения при сдвиговом деформировании модельного разлома // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: Труды 8-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2021. С. 368 -371.
5. **Морозова К. Г.**, Остапчук А. А. Акустико-деформационный индикатор состояния модельного разлома // ДОБРЕЦОВСКИЕ ЧТЕНИЯ: НАУКА ИЗ ПЕРВЫХ РУК: материалы Первой Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающего ученого и организатора науки академика РАН Николая Леонтьевича Добрецова. Новосибирск. 2022. С.215-217.
6. Остапчук А.А., **Морозова К.Г.** Информативность анализа волновой формы акустической эмиссии при деформировании модельного разлома. // Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 18-24 ноября 2019 года. Аэрокосмические технологии. — М.: МФТИ, 2019. С. 218.
7. **Морозова К.Г.** Использование машинного обучения на данных акустической эмиссии при прогнозе динамической неустойчивости в лабораторном эксперименте // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ 23–29 ноября 2020 года. Аэрокосмические технологии. — Москва: МФТИ, 2020. С.253-254.
8. **Морозова К.Г.** Пространственные закономерности излучения акустической эмиссии при сдвиговом деформировании модельного разлома // XXIII Уральская молодежная научная школа по геофизике (г. Екатеринбург, 21-25 марта): сборник научных материалов. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2022. С.123 -126.
9. **Морозова К.Г.**, Беседина А.Н., Остапчук А.А. Классификация сейсмических событий, сопровождающих взрывной способ разработки массива горных пород // XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред (Пермь, 13 – 17 февраля 2023г.) Тезисы докладов. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2023г. С. 219.