

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИФЗ РАН,

Доктор физико-математических наук,

член-корреспондент РАН

Тихоцкий Сергей Андреевич

«04» сентября 2023 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ  
РАН) на диссертацию **МОРОЗОВОЙ Ксении Георгиевны**  
**«Сейсмоакустическая эмиссия, сопровождающая различные режимы  
скольжения по разломам и трещинам»**, представленную в  
диссертационный совет 24.1.059.01 Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени  
академика М.А. Садовского Российской академии наук на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 –  
Геофизика

### Актуальность темы диссертации

Диссертация Ксении Георгиевны Морозовой посвящена актуальной теме изучения сейсмоакустической эмиссии, сопровождающей скольжение по разломам и трещинам. Такое скольжение сопровождается различными механическими процессами, протекающими в массивах горных пород, в том числе, необратимое хрупкое разрушение, сейсмические события. Мониторинг этих процессов остается важной задачей в разных областях геофизики, однако его реализация в природных условиях затрудняется присутствием большого количества шумов, что ведет к необходимости развития методов регистрации и обработки сигналов сейсмической эмиссии, что обуславливает актуальность темы диссертационного исследования

## **Цель и задачи исследования**

Основной целью диссертационной работы является развитие методов сейсмоакустического контроля режима скольжения тектонических нарушений на основе анализа параметров излучения, сопровождающего развитие динамических подвижек. Для достижения поставленной цели автором были решены следующие задачи:

1. Проведены акустоэмиссионные лабораторные эксперименты, в которых реализуются различные режимы межблокового скольжения.
2. Выполнен статистический анализ данных лабораторных экспериментов;
3. Разработан метод классификации импульсов акустической эмиссии и установлены закономерности излучения при подготовке и реализации разных режимов скольжения;
4. Проанализирована микросейсмичность, индуцированная массовыми взрывами в окрестности тектонического разлома на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии

## **Структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех основных разделов, заключения и списка использованных источников. Содержание работы изложено на 144 страницах, в 57 рисунках и 9 таблицах.

В первом, вводном разделе представлен обзор современного состояния изученности рассматриваемой проблемы. Необходимо сразу отметить высокий уровень литературного обзора: каждая из разбираемых тематик освещена с достаточной детальностью: рассмотрены классические и передовые современные работы различных авторов. Обзорный раздел начинается с описания основных принципов реализации различных режимов скольжения по трещинам и разломам, указаны основные источники акустической эмиссии. Значительное внимание уделено существующим методам детектирования сейсмоакустических событий: методу детектирования, основанному на отношении краткосрочного среднего значения к долгосрочному среднему значению; детектированию по порогу;

информационному критерию Акаике. Далее рассмотрены закономерности излучения сейсмоакустических событий, приведены сведения об изменениях параметра *b-value* в законе повторяемости землетрясений Гутенберга-Рихтера и акустических событий, а также изменения параметра *p-value* в законе Омори. Отдельно рассмотрены практические аспекты задач мониторинга событий сейсмоакустической эмиссии. Раздел завершается обзором методов машинного обучения, которые впоследствии будут использоваться автором исследования для решения задач определения параметров событий сейсмоакустической эмиссии. По результатам обзора литературных источников заявлена возможность разработки единого подхода при анализе сейсмоакустических импульсов, основанного на методологии интеллектуального анализа данных

Во втором разделе подробно представлена методика лабораторных экспериментов, которые были проведены автором диссертационного исследования для решения поставленных задач. Описаны особенности геомеханического стенда лаборатории Деформационных процессов в земной коре Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, а также системы регистрации событий сейсмоакустической эмиссии. Далее приведена программа лабораторного эксперимента, нацеленного на реализацию различных режимов скольжения по разлому благодаря вариации вещественного и гранулометрического состава заполнителя межблокового контакта. Раздел завершается описанием методологии обработки результатов лабораторных исследований: описано, каким образом события каталогизируются, перечислены параметры, характеризующие каждое событие. Важно отметить, что события описываются достаточно детально: помимо длительности, амплитуды и энергии для каждого события рассчитывается параметр волновой формы и количество пересечений порогового уровня за время протекания события. Использование этих специальных параметров позволило в дальнейшем детально анализировать результаты лабораторных экспериментов.

В третьем разделе представлены результаты анализа данных, полученных в ходе лабораторных экспериментов. Открывает раздел анализ непрерывного сигнала акустической эмиссии. Благодаря вариации параметров межблокового контакта была получена важная корреляционная зависимость между фрикционной прочностью контакта, скоростью нагружения и потоком энергии акустической эмиссии. Был введен вполне оригинальный параметр обобщенного дефицита  $G$  подвижки и энергии межблокового контакта и рассмотрены изменения скорости его изменения при подготовке эпизодов динамического скольжения, а также установлен универсальный степенной закон эволюции межблокового контакта. Эксперименты показали, что введение обобщенного дефицита  $G$ , учитывающего процессы на микро- и макромасштабе, позволяет контролировать процесс подготовки актов динамической скольжения.

Скорость приращения дефицита  $G$  может рассматриваться в качестве акустоэмиссионно-деформационного индикатора состояния, позволяющего описывать подготовку эпизодов динамической неустойчивости. Это интересное и важное положение, приводящее к оценке времени ожидания ближайшего катастрофического развития процесса и тогда этот результат можно трактовать как экспериментальную иллюстрацию возможностей такого подхода, который, по-видимому, может быть верифицирован в полевых условиях.

Представляет значительный интерес использование алгоритма «случайного леса» для предсказания скорости скольжения межблокового контакта только по данным сейсмоакустической эмиссии. Во второй части раздела представлены результаты анализа каталога импульсов, в рамках которого проверено выполнение статистических законов сейсмичности, проведена классификация импульсов акустической эмиссии. Рассмотрены вариации параметра  $b$ -value в ходе эволюции межблокового контакта, рассмотрена эффективность использования этих вариаций в качестве критерия подготовки эпизодов динамического скольжения. В заключительной части раздела продемонстрировано использование

алгоритма случайного леса для определения момента начала эпизода динамического скольжения при различных режимах деформирования. В результате по данным лабораторных исследований сформулирована методика анализа и классификации импульсов акустической эмиссии, сопровождающих скольжение по разломам с различными параметрами межблокового контакта.

В четвертом разделе продемонстрировано применение разработанной методики к фактическим данным сейсмоакустической эмиссии для анализа шахтной сейсмичности. Предложен метод классификации ансамбля микросейсмических импульсов на основе алгоритма  $k$ -средних, позволяющий разделить события, соответствующие развитию трещин отрыва и трещин сдвига между собой. Предложенный метод применен для данных, полученных на Коробковском железорудном месторождении после двух техногенных взрывов, проведенных 06.07.2019 и 24.10.2020. Рассмотрены особенности наблюдаемых событий, выделены два множества импульсов, которые характеризуются различными скейлинговыми соотношениями.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования, а именно: выявленные по лабораторным данным зависимости, предложенная методика выделения в потоке импульсов акустической эмиссии двух подмножеств, различающихся по параметру волновой формы, обоснованная возможность восстановления скорости деформирования межблокового контакта и момента старта динамических подвижек различного типа, а также разработанный метод классификации микросейсмических импульсов по параметрам волновой формы.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна результатов, полученных автором в ходе выполнения диссертационного исследования в значительной степени определяется разработанными методами проведения лабораторных экспериментов и интерпретации экспериментальных результатов. Автором предложены дополнительные параметры, определяющие особенности как отдельных сигналов акустической эмиссии, так и их ансамблей. Кроме того,

использование алгоритмов интеллектуального анализа данных позволило получить принципиально новые результаты, как по данным, полученным в лабораторных условиях, так и по полевым данным. Впервые установлены специальные функциональные зависимости между параметрами акустической эмиссии, кинематическими и прочностными характеристиками структурного нарушения.

### **Практическая значимость работы**

Развитие методов контроля и мониторинга сейсмических процессов обладает несомненной практической значимостью для корректной работы с наведенной сейсмичностью, сопровождающей освоение и разработку месторождений твердых полезных ископаемых, строительные работы. Как отмечено автором диссертационного исследования, мониторинг событий сейсмоакустической эмиссии в натуральных условиях затруднен существованием значительных шумов, что обеспечивает важность развития методов мониторинга событий сейсмоакустической эмиссии.

Защищаемые положения основаны на результатах, представленных в диссертационной работе. Личный вклад соискателя указан в тексте диссертации: автор диссертации принимал активное участие в получении результатов, отражённых во всех совместных публикациях на равноправной основе.

### **Замечания**

По диссертационной работе и автореферату есть несколько замечаний.

Общее замечание к защищаемым положениям: смешение методов, алгоритмов и т.д. и результатов их применения к анализу данных. С одной стороны, это скорее вопрос стилистики. С другой, защищаемые положения 2–4 являются в представленном виде следствием разработанных методов (подходов) анализа данных. Тогда по логике исследования следовало бы вынести в защищаемые положения сначала "метод классификации импульсов ...", или "подход к анализу данных...", или "алгоритм КЛАСИ-к ...", а уже потом защищать положения ряда "метод позволяет...", "подход позволяет...", алгоритм позволяет ..." и т.п.

1. Защищаемое положение 1 сформулировано не совсем удачно: то, что закономерности излучения акустической эмиссии при деформировании определяются структурными и фрикционными свойствами зоны скольжения, известно (как минимум на качественном уровне) достаточно давно.

2. В автореферате без подтверждения приводится утверждение «Рассмотрение двумерного распределения импульсов АЭ по амплитуде  $A_s$  и параметру волновой формы  $WI$  указывает на отсутствие корреляций между параметрами  $WI$  и  $A_s$ ». В тексте диссертации это утверждение подкреплено рис. 3.19. Тем не менее, достаточно сложно говорить об отсутствии корреляции только исходя из рисунка: в работе отсутствует численный расчет коэффициента корреляции между двумя параметрами.

3. Использование метода кластеризации  $k$ -средних часто оказывается очень чувствительным к начальному разбиению и количеству классов. Хотя в тексте диссертации (но не автореферата) отмечена проблема выбора количества кластеров (выражение (4.5)), нет указаний на то, каким образом это соотношение было использовано для выбора количества кластеров, отсутствуют результаты по расчету индекса Calinski-Narabasz для фактических данных, не представлены зависимости значений этого индекса от количества кластеров. Если же количество кластеров заранее приравнивалось к двум в соответствии с физическими представлениями (рис. 4.1 диссертации), неясно, зачем упоминать проблему оптимального количества кластеров. Вопрос влияния начального разбиения на кластеры на результат кластеризации в тексте диссертации опущен.

4. Есть небрежности изложения. Так, в диссертации на рис. 1.1 написано «Угловая частота», а указаны единицы размерности для циклической частоты («МГц»). В работе параметр  $RA$  не очень удачно назван скоростью нарастания амплитуды сигнала, поскольку его размерность – обратная:  $RA = ((t_{max} - t_s) / A_s) = [с / В]$ . В диссертации на стр. 21 в нижнем абзаце приводится не совсем верное утверждение, что «... выбор слишком высокого значения» порога «может привести к пропуску времени фактического начала импульса...», но выбор слишком высокого значения

порога может привести, прежде всего, к пропуску импульса. Определение начала импульса по превышению порога – слишком грубый критерий, в самой диссертации для этого используется критерий Акаике. В формуле 1.7. параметр  $R$  назван форшоковой активностью, и тут же на соседней строчке назван продуктивностью.

### **Оценка работы в целом**

Несмотря на отмеченные замечания, работа оставляет весьма положительное впечатление, корректно структурирована, выводы в большинстве случаев достаточно обоснованы. В качестве важного результата работы можно отметить создание нового метода мониторинга событий сейсмоакустической эмиссии, позволяющего с высокой степенью достоверности проводить их классификацию с использованием методов машинного обучения. Предложенный метод сформулирован в ходе проведения серии технически сложных лабораторных экспериментов и детальном анализе их результатов, после чего был опробован на фактических данных. Такая цельность свидетельствует о том, что предложенный метод действительно может быть использован для решения практических задач, а также о высокой квалификации автора диссертационного исследования как ученого.

Тема диссертации соответствует заявленной специальности. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 публикациях, в том числе в 7 статьях, входящих в перечень изданий ВАК. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой.

Диссертационная работа Морозовой Ксении Георгиевны несомненно удовлетворяет критериям, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 - Геофизика.



Диссертационная работа и отзыв обсуждены 18 июля 2023 г. на заседании объединённого семинара лабораторий 301, 302, 201, 202, 205 Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, на котором был заслушан доклад Морозовой К.Г (протокол № 1 от 18.07.2023). Отзыв семинара одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Адрес: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Телефон: +7(499)766-2656

Электронный адрес: [direction@ifz.ru](mailto:direction@ifz.ru)

Сайт: <http://www.ifz.ru>

Руководитель научного направления

«Физика сейсмического процесса и горных пород»

Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией

физики землетрясений и неустойчивости горных пород

Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Российской академии наук (ИФЗ РАН)

доктор физико-математических наук



Пономарев Александр Вениаминович

Ведущий научный сотрудник лаборатории

фундаментальных проблем нефтегазовой

геофизики и геофизического мониторинга

Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Российской академии наук (ИФЗ РАН),

кандидат физико-математических наук



Дубиня Никита Владиславович