

## **Отзыв**

официального оппонента Вознесенского Александра Сергеевича на диссертационную работу Морозовой Ксении Георгиевны на тему «Сейсмоакустическая эмиссия, сопровождающая различные режимы скольжения по разломам и трещинам», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 «Геофизика»

### **1. Актуальность темы**

Сейсмические наблюдения массива горных пород в настоящее время остаются одной из важных составляющих как в области прогноза землетрясений, так и в горном производстве для оценки состояния породных массивов, что определяет актуальность темы диссертации.

Эволюция состояния массивов горных пород сопровождается излучением большого количества сейсмических и акустических импульсов, несущих информацию о протекающих в них деформационных процессах. Кроме того, отклик массива пород на воздействие горных работ и сопутствующие изменения естественных и искусственных физических полей в массиве также могут служить источником информации о его строении и напряженно-деформированном состоянии. С целью получения информации о состоянии массива горных пород и протекающих в нем процессах широкое распространение приобрели сети мониторинга слабой сейсмичности. При этом высокую значимость для получения детальной информации о массиве горных пород и формирования понимания о происходящих в нем процессах имеет использование данных отклика массива на технологическое воздействие.

Для правильной интерпретации результатов акустоэмиссионных наблюдений, получаемых в том числе и в натуральных условиях, в настоящей диссертационной работе поставлена цель разработки научных основ метода сейсмоакустического контроля режима деформирования тектонических нарушений на основе анализа параметров излучения упругих волн, сопровождающих развитие скольжения по разломам и трещинам.

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.6.9 «Геофизика».

## **2. Структура и основное содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа изложена на 144 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 208 наименования. Работа построена по классическому принципу.

В первой главе автором выполнен анализ современного состояния проблемы и сделан обзор литературы по данной тематике. Описаны широко используемые методы детектирования сейсмоакустических импульсов, описано применение новых подходов к анализу сейсмических и акустических данных. Представлены основные законы, описывающие сейсмический режим. Описаны основные принципы применения алгоритмов машинного обучения, которые начинают активно использоваться при исследовании динамики деформирования горных пород как в натуре, так и в лабораторных экспериментах. Проведенный автором анализ состояния исследуемой проблемы обосновал возможность разработки единого подхода при анализе сейсмических и акустических импульсов, основанном на методологии интеллектуального анализа данных.

Вторая глава посвящена описанию методик проведения лабораторных экспериментов. Описана лабораторная установка и протокол проведения экспериментов. Представлено описание инструментального контроля механических и акустических параметров. Во время проведения серии лабораторных экспериментов были реализованы динамические подвижки различной интенсивности – реализован континуум режимов скольжения от периодических динамических срывов до медленных подвижек и крипа. Реализация различных типов динамических подвижек осуществлялась за счет изменения вещественного и гранулометрического состава центральной части модельного разлома. В зарегистрированной непрерывной записи



акустической эмиссии были выделены импульсы, на основе которых создавался единый каталог.

Третья глава посвящена детальному анализу данных акустической эмиссии и принципиально разделена на две части – анализ непрерывных данных акустической эмиссии и анализ сформированного каталога импульсов.

В первой части было введено понятие обобщенного дефицита, который включает в себя информацию о скорости скольжения модельного разлома и потоке акустической энергии. Показано, что приращение обобщенного дефицита может выступать в качестве индикатора напряженного состояния модельного разлома, контролирующего подготовку эпизодов динамического скольжения. Также было показано, что применение методов машинного обучения при анализе непрерывной акустической эмиссии позволило восстановить скорость скольжения модельного разлома и определить момент старта динамической подвижки.

Во второй части для исследования каталога импульсов акустической эмиссии был развит метод их классификации по параметру волновой формы. В потоке регистрируемых импульсов акустической эмиссии, сопровождающей скольжение модельного разлома, можно выделить две моды импульсов – импульсы с резким нарастанием и плавным снижением амплитуды, а также тремороподобные импульсы с плавным нарастанием и плавным снижением амплитуды. Для установления закономерностей развития скольжения модельного разлома была исследована эволюция статистических свойств различных мод импульсов АЭ.

Для определения времени до динамической подвижки на основе анализа каталогов импульсов акустической эмиссии был применен алгоритм машинного обучения Случайный лес. Алгоритм демонстрирует достаточную эффективность с учетом малой выборки параметров, используемых в модели обучения, при разделении всего ансамбля импульсов АЭ на две моды.

При статистическом анализе был сформирован каталог импульсов, реализованных при различных режимах скольжения, показаны систематические изменения параметров основных законов сейсмичности (закон Гутенберга-Рихтера, закон Омори, обратный закон Омори) при изменении структуры центральной части модельного разлома. Была установлена высокая обратная корреляция между скейлинговым параметром *b-value* и коэффициентом трения  $\mu$  (коэффициент корреляции Пирсона составляет  $-0,95$ ). К достоинствам этой части диссертации можно отнести установленные физические связи между различными режимами скольжения по разломам и параметрами регистрируемых при этом акустических и сейсмических сигналов. Это позволяет восстанавливать процессы, происходящие внутри массива пород, путем регистрации сейсмосигналов на их поверхности.

В четвертой главе изложена адаптация предложенного метода классификации акустических импульсов, описанного в Главе 3. Выполнен переход от параметров волновой формы акустических импульсов к параметрам очага сейсмических импульсов на основе разработанного алгоритма *k*-средних (КЛАСИ-*k*). Метод КЛАСИ-*k* направлен на выделение в ансамбле микросейсмических событий подмножеств, характеризующихся различными скейлинговыми соотношениями. Выполнена апробация алгоритма КЛАСИ-*k* на данных сейсмического мониторинга серии массовых взрывов на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии. В данной главе описана методика сбора данных и определения параметров микросейсмических событий, также показана принципиальная возможность использовать в качестве целевых параметров алгоритма КЛАСИ-*k* параметры очага.

### **3. Анализ защищаемых положений**

В первом защищаемом положении показана определяющая роль структурных и фрикционных свойств зоны скольжения на закономерности излучения акустической эмиссии. Благодаря широкому спектру



реализованных режимов скольжения выявлена функциональная зависимость между прочностными, кинематическими и акустическими характеристиками разломной зоны.

Второе защищаемое положение отражает разработанный метод классификации импульсов акустической эмиссии, основанный на анализе параметра волновой формы  $WI$ . Импульсы, сопровождающие сдвиговое деформирование модельного разлома, могут быть разделены на две моды по параметру волновой формы  $WI$ . Первая мода формируется импульсами с резким вступлением и  $WI \leq 0,1$ , вторая – с медленным нарастанием амплитуды и  $WI > 0,1$ . Показано, что закономерные временные вариации скейлингового параметра  $b$ -value подмножества импульсов второй моды с  $WI > 0,1$  соответствуют циклам подготовки и реализации эпизодов динамического скольжения модельного разлома и имеют прогностическую ценность.

В третьем защищаемом положении отражен предложенный подход к анализу данных акустической эмиссии, который позволяет по коротким временным интервалам восстановить основные параметры динамики деформирования межблокового контакта. Была показана возможность по анализу непрерывной записи акустической эмиссии и каталога импульсов восстановить значение скорости смещения блоков и время до динамической подвижки различной интенсивности.

Четвертое защищаемое положение касается разработанного алгоритма КЛАСИ-k, который позволяет выделять в ансамбле индуцированных микросейсмических событий подмножества, отличающиеся по величине приведенной сейсмической энергии. Разработанный для анализа шахтной микросейсмичности, инициированной массовыми взрывами и локализованной в окрестности тектонического разлома, алгоритм КЛАСИ-k может служить источником информации о напряженно-деформированном состоянии массива. Апробация алгоритма КЛАСИ-k на данных сейсмического мониторинга серии массовых взрывов на Коробковском

железородном месторождении Курской магнитной аномалии позволило в потоке микросейсмических импульсов выделить два подмножества с различными скейлинговыми соотношениями.

#### **4. Научная новизна**

Научная новизна результатов заключается в обосновании нового метода сейсмоакустического геоконтроля напряженного состояния тектонических нарушений на основе разработанной методики выделения в ансамбле излучаемых сейсмических и акустических импульсов подмножеств, которые характеризуются различными скейлинговыми соотношениями. Закономерные вариации масштабных соотношений обусловлены изменением напряженно-деформированного состояния в окрестности структурного нарушения и являются прогностическим признаком подготовки динамических подвижек разного типа. В лабораторных экспериментах установлена связь между параметрами акустической эмиссии, кинематическими и прочностными характеристиками модельного разлома.

**5. Практическая значимость** заключается в разработке методики применения интеллектуального анализа к исследованию сейсмоакустических данных. Предложенная методика может быть использована при описании деформационных процессов, протекающих в массиве горных пород в окрестности тектонических нарушений. Подход, основанный на комплексировании метода классификации сейсмоакустических импульсов КЛАСИ-к и ансамблевых методов машинного обучения, может быть применен на практике для геоакустического контроля состояния тектонических нарушений в условиях доступности относительно коротких временных рядов мониторинга.

#### **6. Обоснованность и достоверность**

Обоснованность и достоверность всех научных положений, выводов и рекомендаций сомнения не вызывают, поскольку подтверждены большим объемом проведенных экспериментальных исследований и данных, которые были получены с использованием современных методик измерения и



обработки данных. Полученные результаты согласуются с результатами других ученых, ведущих исследования в данной области, и не противоречат общим законам физики.

## **7. Публикации и апробация результатов работы**

Положения и результаты диссертационного исследования были представлены автором на научно-практических 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). Основное содержание работы опубликовано в 16 научных работах, в том числе 7 работ опубликованы в журналах из списка ВАК РФ.

В автореферате диссертации в достаточной для ознакомления степени изложено содержание всех материалов работы. Все материалы, привлеченные автором из других источников, сопровождаются корректными ссылками.

## **8. Вопросы и замечания**

1. Стр. 48. Подпись к рис. 2.8. Было бы правильнее вместо «Скорость нагружения  $u_s = 8$  мкм/с» написать «Скорость деформирования...».

2. Стр. 72. Рисунок 3.8. «При регулярном режиме точность (коэффициент детерминации) алгоритма составляет  $R^2=0,69$ , при нерегулярном –  $R^2=0,54$ ». Поскольку на рис. 3.8 рассматривается линейная зависимость между реальными и предсказанными величинами, можно было бы оценивать тесноту связи коэффициентами корреляции.

3. Стр. 73. Таблица 3.1. Не совсем понятно, в каких единицах оценивается «Наиболее вероятная ошибка определения момента динамического события», тем более что название таблицы «Точность предсказания скорости скольжения межблокового контакта». Если имеется в виду точность «определения момента» в относительных единицах, то не сказано, по отношению к каким величинам она оценивается, если в абсолютных, например, в секундах, то следовало бы указать единицы измерения.

4. Стр. 112. Следовало бы привести описание обозначений свойств железистых кварцитов, указанных в Таблице 4.1. «Физико-механические характеристики разрабатываемых кварцитов». Вызывают сомнения значения модуля упругости  $E$  железистых кварцитов 0,65–1,16 ГПа, приведенные в 3 колонке.

5. Стр. 116. Рис. 4.4. На этом рисунке и в тексте в качестве характеристик сеймосигналов фигурируют Тип 1 и Тип 2, а ранее (2 и 3 главы) употреблялись названия Мода 1 и Мода 2. Соответствуют ли они друг другу или это разные величины?

Указанные замечания носят редакционный характер и не снижают общей положительной оценки научных результатов и практической значимости диссертационной работы.

## **9. Общее заключение по диссертации**

В диссертации автором решена актуальная научная задача разработки и обоснования метода сейсмоакустического контроля режима деформирования тектонических нарушений. Высокую значимость имеет возможность получения информации об эволюции массива горных пород в окрестности тектонического нарушения при регистрации и анализе коротких временных интервалов регистрации отклика массива на технологическое взрывное воздействие, а именно – потока индуцированных микросейсмических событий. Рассматриваемая диссертация отвечает квалификационным требованиям пункта 9 Положения ВАК.



Считаю, что диссертация, выносимая на защиту, по критериям актуальности, научной и практической значимости, обоснованности и достоверности, а также по объему личного вклада автора, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, а ее автор, Морозова Ксения Георгиевна, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.9 «Геофизика».

Я, Вознесенский Александр Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Доктор технических наук, профессор кафедры Физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС

А.С. Вознесенский

23.08.2023

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, дом 4, стр. 1

Телефон.: +7 (910) 409 94 93; e-mail: [asvoznenskiy@misis.ru](mailto:asvoznenskiy@misis.ru)

Подпись А.С. Вознесенского заверяю.

Проректор по науке и инновациям Университета науки и технологий МИСИС



М.Р. Филонов