

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора технических наук Вознесенского Александра Сергеевича на диссертацию Константина Александра Викторовича «Разработка средств интеллектуального анализа данных в системе сейсмоакустического мониторинга удароопасности массива горных пород месторождения Южное», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэrogазодинамика и горная теплофизика»

### **1 Актуальность темы диссертации**

Актуальность исследования обусловлена увеличением количества и возрастающей сложностью прогнозирования геодинамических явлений в условиях современной горнодобывающей промышленности. Углубление горных работ при добыче полезных ископаемых, освоение труднодоступных месторождений и рост техногенного воздействия на массивы горных пород приводят к увеличению неоднородности их строения и чрезмерной концентрации напряжений. Интенсификация добычи, использование высокопроизводительных технологий и увеличение объемов выработанных пространств усиливают риски внезапных проявлений горного давления, приводящих к катастрофическим последствиям. При этом традиционные методы анализа, основанные на ограниченном наборе информативных параметров мониторинга, не обеспечивают достаточной точности прогноза из-за сложной структуры геологических сред и недостаточной изученности процессов в условиях высоконапряженных массивов пород. Эти факторы требуют разработки новых подходов к геомеханическому мониторингу, способных учитывать сложные взаимодействия в породном массиве.

Достижения в области интеллектуального анализа данных открывают новые возможности для преодоления существующих ограничений. Современные сейсмоакустические системы, регистрирующие широкий спектр сигналов – от слабых предвестников разрушения до высокоэнергетических событий, генерируют огромные массивы информации. Однако их потенциал остается нераскрытым по причине малого количества адаптированных для горной отрасли алгоритмов обработки и интерпретации данных. Внедрение методов машинного обучения и искусственного интеллекта способно обеспечить автоматизацию анализа сейсмоакустических данных, выявление скрытых закономерностей и повышение точности оценки удароопасности.

Исследование автора направлено на решение актуальной научной задачи разработки интеллектуальной системы программно-методических средств обработки и интерпретации измерительных данных в процессе сейсмоакустического мониторинга удароопасного массива горных пород месторождения Южное, что позволит не только повысить надежность прогнозирования, но и обеспечить контроль за безопасностью горных работ.

## **2 Анализ содержания диссертации**

На отзыв представлена диссертация, состоящая из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 200 наименований, содержащая 140 страниц текста, 75 рисунков и 20 таблиц.

Следует отметить последовательность, логичность и четкость изложения материала в диссертации.

В **первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы горных ударов и анализ методов их прогноза и предупреждения. Кроме того, здесь приведены данные по системе сейсмоакустического мониторинга «Prognоз-ADS», эксплуатируемой на месторождении «Южное», на материале наблюдений которой строится дальнейшее изложение материала.

**Вторая глава** посвящена описанию объекта – месторождению Южное, а также описанию разработанных автором программно-методических средств для идентификации типа источника данных, регистрируемых сейсмоакустической системой контроля горного давления. Здесь автор не только показал хорошее знание методов кластеризации, но и продемонстрировал практическое владение ими при написании компьютерных программ обработки акустических сигналов. Следует также отметить важный концептуальный вывод автора о нецелесообразности разработки универсальной модели для всех данных сразу и о разработке целого ансамбля бинарных классификационных моделей, обученных определять конкретный целевой тип источника сигналов для отдельного датчика.

После описания программных средств для идентификации типа источника в **третьей главе** автор переходит к исследованию пространственных характеристик очагов акустической эмиссии в удароопасном массиве с использованием методов кластерного анализа.

Как логический вывод завершает работу **четвертая глава**, касающаяся разработки программно-методических средств для оценки и прогнозирования геомеханического состояния породного массива, более конкретно – времени возникновения горных ударов и их энергетических характеристик.

Все это свидетельствует о законченности решения автором поставленной в начале работы задачи прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления с применением сейсмоакустического метода и разработанных алгоритмов искусственного интеллекта.

## **3 Анализ научных положений**

На защиту выносятся три положения.

Первое научное положение касается типа источника регистрируемых сигналов и сейсмоакустических событий. Автором показано, что они надежно идентифицируются применением комплекса вероятностных

нейронных сетей бинарной классификации. Для условий месторождения Южное получена 95 % точность распознавания данных на тестовой выборке и более чем в 15 раз увеличен объем полезной информации о естественных процессах разрушения массива горных пород. На наш взгляд, это положение является основным.

Второе и третье положения дополняют и уточняют первое. Они касаются применяемых методов и результатов их использования для решения поставленных задач на примере месторождения Южное.

Следует отметить четкость и ясность формулировок научных положений, их логическую связность друг с другом.

#### **4 Методы исследования**

В основу исследования лег комплексный подход, объединяющий натурные сейсмоакустические шахтные наблюдения, экспертный анализ измерительных данных, методы машинного обучения, математической статистики и теории вероятностей. Для верификации результатов, полученных с применением моделей машинного обучения, используются тестовые выборки с наборами данных, не участвующих в обучении. Валидация результатов кластеризации акустически активных зон осуществляется при помощи оценки параметров кластеров и сравнения их с результатами натурных наблюдений.

Использование комплексного метода исследований может рассматриваться как одно из условий обеспечения достоверности полученных результатов.

#### **4 Научная новизна**

Автором выявлены характерные особенности акустических сигналов, имеющих техногенную и естественную природу происхождения, что позволило разработать высокоточный алгоритм выделения в потоке регистрируемых данных сигналов акустической эмиссии, вызванных естественными процессами разрушения горных пород.

Разработан метод выделения акустически активных зон, на основе которого с применением алгоритмов кластерного анализа определены очаги повышенного горного давления и построено их параметрическое описание в массиве месторождения Южное.

С применением информации о реальных случаях проявлений горного давления и регистрируемых сейсмоакустических данных разработаны подходы и модели машинного обучения, позволяющие с высокой степенью достоверности выполнять оценку удароопасного состояния на рассматриваемом месторождении. Автору удалось охватить ряд актуальных проблем сейсмоакустического мониторинга, включая фильтрацию техногенных помех, выделение очагов повышенного горного давления и прогнозирование вероятности возникновения удароопасных явлений.

## **5 Практическая значимость**

По итогам проведенных исследований разработаны программные средства, обладающие научной и практической значимостью. При наличии необходимых исходных данных полученные результаты могут быть использованы для условий Южного и других месторождений, склонных к горным ударам.

Следует выделить востребованность результатов исследований на производстве. В частности, они использованы при разработке «Указаний по безопасному ведению горных работ на месторождении Южное (АО «ГМК «Дальполиметалл»), опасном по горным ударам», 2022 г., и учитываются при проектировании и ведении горных работ на удароопасных участках; отдельные результаты диссертационной работы используются в научных исследованиях Института горного дела ДВО РАН на ряде других объектов геомеханического мониторинга, включая удароопасные месторождения КФ АО «Апатит», ПАО «ППГХО» и АО «ГМК «Дальполиметалл».

Основу диссертационной работы составляют результаты исследований, полученные при непосредственном участии автора в 2018-2024 гг в процессе выполнения научно-исследовательских работ Института горного дела ДВО РАН, результаты которых внедрены на ряде месторождений Российской Федерации.

## **6 Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность научных положений работы подтверждается корректностью принятых допущений и выбранными методами исследования, представительным объемом мониторинговых данных и глубиной проведенных исследований, а также качеством их интерпретации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом экспериментальных и расчетных данных, собранных в ходе сейсмоакустического мониторинга. Удовлетворительная степень сходимости результатов, полученных с применением разработанных средств с данными сейсмоакустического мониторинга и натурных наблюдений подтверждает точность и надежность выводов.

## **7 Замечания**

1. В работе было бы целесообразно провести более полный физический анализ геомеханических процессов, приводящих к нежелательным формам динамического проявления горного давления для условий месторождения Южное. Наряду с использованием нейронных сетей это позволило бы выявить дополнительные информативные параметры для увеличения достоверности прогноза регистрируемых явлений.

2. Автор построил свою работу на исследовании и использовании нейронных сетей для решения задач распознавания вида источников акустических сигналов – естественной акустической эмиссии, бурения, взрывов, а также определения координат сейсмособытий и прогнозирования горных ударов. В то же время за предыдущие десятилетия накоплен значительный опыт использования более традиционных методов – статистических методов распознавания образов, кластеризации, регрессионного анализа и других. На наш взгляд в работе следовало бы уделить большее внимание сравнению нейросетевых методов с традиционными, показать их достоинства и недостатки.

3. На стр. 58 при анализе помеховых сигналов АЭ говорится, что «...основную часть техногенных шумов составляют сигналы от взрывных и буровых работ», в то время как в таблице 2.5 на стр. 51 взрывные работы составляют 0,93%, буровые работы 0,13%, а шум (видимо, от других источников) 0,3%, т. е. количество зарегистрированных сигналов шума больше, чем от буровых работ. Следует пояснить, почему в данном случае автор уделил большее внимание все-таки сигналам от буровых работ, а не шумам других источников, относительное количество которых больше.

4. На стр. 66 при рассмотрении схемы нейронной сети с диапазонами подбираемых гиперпараметров на рис. 2.24 автору следовало бы привести названия блоков также на русском языке, как это сделано на рис. 2.25, тем более что при описании этой модели на стр. 65 автор пользуется русскоязычной терминологией.

5. Следует пояснить, что автор подразумевает под «...энергетической характеристикой событий», какова размерность этой величины, упоминаемой на стр. 83 и на рис. 3.1.

Указанные замечания носят уточняющий характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Работа отличается четким изложением материала с использованием профессиональной терминологии, автореферат логично структурирован, доступен для восприятия и полностью отражает содержание диссертации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация Константинова Александра Викторовича «Разработка средств интеллектуального анализа данных в системе сейсмоакустического мониторинга удароопасности массива горных пород месторождения Южное» является завершенной научно-квалификационной работой, посвященной решению актуальной научно-технической задачи прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления с применением сейсмоакустического метода и разработанных алгоритмов машинного обучения. Диссертация соответствует требованиям п. 9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842,

предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Константинов Александр Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ «МИСИС»); 119049, Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1; +7 (495) 955-00-32; e-mail: [kancela@misis.ru](mailto:kancela@misis.ru), сайт - <https://misis.ru/>.

Официальный оппонент, доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов производства и геоконтроля Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

А. С. Вознесенский

12.03.2025.

Тел.: +7-499-230-25-70

Эл. почта: [asvoznesenskii@misis.ru](mailto:asvoznesenskii@misis.ru)

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

А. С. Вознесенский

12.03.2025

Подпись заверяю:

Проректор по науке и инновациям НИТУ МИСИС

М. Р. Филонов

12.03.2025.

