

На правах рукописи



Константинов Александр Викторович

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ДАННЫХ В СИСТЕМЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА УДАРООПАСНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ
ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЮЖНОЕ**

*Специальность 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Хабаровском Федеральном исследовательском центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН)

- Научный руководитель:** **Рассказов Игорь Юрьевич**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук
- Официальные оппоненты:** **Вознесенский Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор Кафедры физических процессов производства и геоконтроля Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)
- Шулаков Денис Юрьевич**, кандидат технических наук, заведующий Лабораторией природной и техногенной сейсмичности «Горного института Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского Федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук ("ГИ УрО РАН")
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук»

Защита диссертации состоится 25 апреля 2025 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел./факс: +7 (4212) 32-79-27, e-mail: adm@khfrc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте www.khfrc.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Несмотря на существенные достижения в изучении процессов, протекающих в напряженных геологических средах, проблема геодинамических явлений, способных вызывать катастрофические последствия, не теряет своей актуальности. Это обусловлено комплексом горно-геологических факторов, таких как значительная неоднородность горных пород, усложнение геологических условий разработки месторождений, увеличение глубины добычи полезных ископаемых и усиление техногенного воздействия на массив горных пород. Указанные причины приводят к необходимости повышения надежности прогноза опасных геодинамических явлений путем учета большего количества параметров, характеризующих геомеханическое состояние.

До недавнего времени существовали технические ограничения, не позволяющие обрабатывать и анализировать большой объем информации, регистрируемой в процессе инструментального геомеханического мониторинга. Однако, стремительное развитие научно-технического прогресса за последние десятилетия, особенно в области методов интеллектуального анализа данных, сделало возможным проведение таких исследований. Несмотря на огромное количество разработанных аналитических средств в мировой науке, их применение в горной отрасли остается довольно ограниченным, а использование для оценки и прогнозирования удароопасного состояния встречается еще реже. Для удовлетворения текущих требований к безопасности объектов горной промышленности и для повышения оперативности и достоверности прогнозирования опасных горнодинамических проявлений, необходимо совершенствование программно-методических средств (методов обработки и интерпретации данных, алгоритмов и компьютерных программ) геомеханического мониторинга с использованием современных методов интеллектуального анализа данных.

Большинство современных высокотехнологичных способов оценки, контроля и прогнозирования геомеханического состояния массива горных пород опирается на геофизические методы, основанные на физических принципах распространения акустических и сейсмических волн, изменении плотности, магнитных и электрических свойств горных пород. Одним из перспективных направлений геофизического мониторинга являются геоакустические системы. Они позволяют регистрировать не только высокоэнергетические проявления горного давления, но и более слабые сигналы, что дает возможность наблюдать весь процесс изменения геомеханического состояния – от этапа формирования очага разрушения до реализации геодинамического явления. Такой мониторинг обеспечивает масштабное и комплексное изучение геомеханических процессов благодаря анализу больших объемов сейсмоакустической информации.

На сегодняшний день разработано множество методик оценки, контроля и прогнозирования удароопасности массива горных пород на основе сейсмоакустических данных. Однако постоянное усложнение геомеханической обстановки в процессе горных работ и увеличение частоты случаев проявления удароопасности требуют постоянного совершенствования этих методик. Применение методов интеллектуального анализа на всех стадиях сейсмоакустического мониторинга представляется наиболее рациональным подходом, отвечающим современным требованиям к обработке и интерпретации данных. В представленной работе описаны исследования, направленные на разработку методов и аналитических средств для повышения достоверности получаемых в процессе сейсмоакустического мониторинга данных и повышения надежности прогнозирования опасных геодинамических явлений.

Цель диссертационной работы заключается в разработке интеллектуальной системы программно-методических средств обработки и интерпретации измерительных данных в процессе сейсмоакустического мониторинга удароопасного массива горных пород месторождения Южное.

Идея диссертации состоит в применении методов интеллектуального анализа измерительных сейсмоакустических данных для повышения надёжности выявления закономерностей формирования опасных очагов разрушений и прогноза динамических проявлений горного давления в процессе сейсмоакустического мониторинга разрабатываемого удароопасного месторождения.

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

- проанализировать признаковое пространство регистрируемых сейсмоакустических данных для определения характерных параметров сигналов, инициированных естественными геомеханическими процессами и выполнением технологических операций по разработке месторождений;
- обосновать эффективные модели машинного обучения и произвести подбор их гиперпараметров для достоверного выявления сигналов и событий естественного происхождения;
- разработать методику обнаружения и оценки очагов повышенного горного давления в удароопасном массиве горных пород;
- выполнить расчёт параметров временных рядов и сопоставить их с проявлениями горного давления, зарегистрированными на удароопасном месторождении;
- с применением сейсмоакустических данных разработать эффективные модели машинного обучения для надежного прогнозирования удароопасности.

Методы исследований. Использован комплекс методов, включающий: натурные наблюдения; анализ и обобщение опыта изучения геомеханического состояния массива горных пород обрабатываемых удароопасных рудных месторождений; сейсмоакустический метод; математическую обработку и экспертный анализ измерительных данных; методы кластерного анализа, машинного обучения, математической статистики и теории вероятностей.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Тип источника регистрируемых сигналов и сейсмоакустических событий надёжно идентифицируется применением комплекса вероятностных нейронных сетей бинарной классификации, что для условий месторождения Южное приводит к 95 % точности распознавания данных на тестовой выборке и увеличению объема полезной информации об естественных процессах разрушения массива горных пород более, чем в 15 раз.

2. Потенциально удароопасные участки массива горных пород эффективно выявляются с высокой степенью достоверности благодаря совместному применению алгоритма кластерного анализа DBSCAN и индекса Дэвиса-Болдина для определения акустически активных зон и параметрического описания динамики их развития.

3. Используемые в методах интеллектуальной обработки данных модели случайного леса и градиентного бустинга, адаптированные и обученные на измерительных данных сейсмоакустических временных рядов разного интервала, обеспечивают надежное прогнозирование опасных геодинамических явлений, и при пороговом значении вероятности 0,2 точность прогнозных оценок таких моделей в условиях месторождения Южное составляет 84 %.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечиваются корректным выбором методов и подходов для проведения комплексных исследований, достаточным объемом экспериментальных и расчетных данных, полученных по результатам сейсмоакустического мониторинга, тестированием моделей интеллектуального анализа для решения поставленных задач и апробацией разработанных средств на фактических данных, регистрируемых в массиве горных пород удароопасного месторождения.

Научная новизна выполненных исследований:

- установлены закономерности регистрации сейсмоакустических сигналов естественного и техногенного происхождения в условиях активного ведения горных работ при подготовке обучающих наборов данных для моделей нейронных сетей;
- разработаны математические модели нейронных сетей, позволяющие при их комплексном использовании с 95 % точностью определять тип источника регистрируемых сигналов и сейсмоакустических событий;
- разработана методика локализации очагов повышенного горного давления на удароопасном месторождении с оценкой пространственных и временных параметров сейсмоакустических событий и получением параметрического описания динамики их развития;
- разработаны модели машинного обучения для ретроспективного анализа и надежного прогнозирования на основе рассчитанных сейсмоакустических временных рядов проявлений удароопасности, наиболее вероятных на современном и перспективном этапах развития горного производства.

Личный вклад автора включает в себя:

- постановку цели, обзор и выбор средств для ее достижения, решение поставленных задач и анализ полученных результатов по совершенствованию средств сейсмоакустического мониторинга;
- анализ признаков пространства сейсмоакустических сигналов, разработку архитектуры, обучение и тестирование комплекса нейросетевых моделей для определения типа источника регистрируемых данных в условиях активного ведения горных работ;
- разработку методики идентификации акустически активных зон, характеризующих очаги повышенного горного давления в массиве горных пород, с оценкой их достоверности и расчетом параметров развития с течением времени;
- расчёт параметров временных рядов по сейсмоакустическим данным, сопоставление их с проявлениями горного давления и выбор значимых признаков для прогнозирования удароопасности;
- разработку, обучение и тестирование моделей машинного обучения для надежного предсказания динамических проявлений горного давления на удароопасном месторождении Южное.

Практическая ценность работы заключается в разработке программно-методических средств с применением методов интеллектуального анализа, обеспечивающих повышение точности обработки сейсмоакустических данных и надежное прогнозирование опасных горнодинамических явлений, что способствует безопасной и эффективной разработке удароопасных месторождений.

Реализация результатов работы. Данные, полученные по результатам исследований, 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, разрабатываемые рудниками КФ АО «Апатит», ПАО «ППГХО» и АО «ГМК «Дальполиметалл».

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы и отдельные ее положения представлялись в 2018-2024 гг. на: VII, VIII, IX международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2018, 2020, 2023 гг.); XXI и XXVI краевом конкурсе молодых ученых (г. Хабаровск, 2019, 2024 гг.); XIII, XV, XVIII всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Хабаровск, 2019, 2021, 2024 гг.); 1-й международной научной конференции «Проблемы геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов» (г. Владивосток, 2019 г.); всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», посвященной 75-летию со дня основания ИГД СО РАН (г. Новосибирск, 2019 г.); V международной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (г. Хабаровск, 2019 г.); X и XI всероссийской научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (г. Санкт-Петербург, 2020, 2024 гг.); научной конференции молодых учёных и аспирантов «Актуальные проблемы освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2023 г.); 10th Sino-Russian Joint Scientific-Technical Forum on Deep-level Rock Mechanics and Engineering (Китай, г. Харбин, 2022 г.); всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле» (г. Апатиты, 2023 г.); XIII всероссийском симпозиуме «Физика Геосфер» (г. Владивосток, 2023 г.); 12th Sino-Russian International Forum on Deep Rock Mechanics in Mines (Китай, г. Пекин, 2024 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 37 опубликованных работах, в том числе в 9 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 11 публикациях в научных изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, и 10 свидетельствах на результаты интеллектуальной деятельности.

Объем и структура работы. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение, список литературы из 200 наименований, содержит 140 страниц текста, 75 рисунков и 20 таблиц.

Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю чл.-корр. РАН, д-ру техн. наук Расказову И. Ю. за внимание к работе и помощь в ее реализации, д-ру. техн. наук Курсакину Г. А. за консультации при написании диссертационной работы. Автор считает своим долгом выразить благодарность коллегам из ИГД ДВО РАН за помощь и ценные советы при выполнении исследований, а также сотрудникам АО «ГМК «Дальполиметалл» за содействие в организации экспериментальных шахтных исследований и внедрение в производство полученных научных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Динамические проявления горного давления возникают в результате внезапных, протекающих с высокой скоростью движений горных пород, жидкостей или газов. К отдельным видам подобных проявлений относятся обрушения, выбросы, заколообразования и стреляния пород, горные и горно-тектонические удары, вызванные резким высвобождением накопленной энергии. Значительный вклад в изучение причин и условий возникновения подобных явлений внесли такие российские учёные, как С. Г. Авершин, В. В. Адушкин, А. Д. Завьялов, А. А. Еременко, А. А. Козырев, В. С. Куксенко, В. Н. Опарин, И. М. Петухов, И. Ю. Рассказов, М. В. Курленя, К. Н. Трубецкой, А. Н. Шабаров и другие. Из зарубежных учёных следует выделить Р. К. Kaiser, W. D. Ortlepp, D. F. Scott, M. He, A. J. Mendecki, A. McGarr, R. A. Lynch, L. Zhang, J. Wang, J. Feng и Z. Song.

Современный сейсмоакустический мониторинг, основанный на применении автоматизированных систем, позволяет оперативно оценивать геомеханическое состояние массива горных пород. Эти системы обеспечивают выявление и контроль очагов разрушения, а также позволяют прогнозировать возможные проявления горного давления на основе ранее установленных закономерностей и разработанных аналитических методов.

Объектом диссертационного исследования является геомеханическое состояние массива горных пород полиметаллического месторождения Южное в Приморском крае, одно из наиболее удароопасных в дальневосточном регионе, на котором горные удары начали происходить с глубины 170 м. В последние годы на месторождении наблюдаются проявления техногенной сейсмичности. Месторождение Южное отличается сложным блочным строением, потенциально удароопасными породами и рудами, значительной глубиной разработки и большим объемом непогашенного выработанного пространства. Основным рудным телом месторождения является жила № 4 (рис. 1), которая на текущий момент отработана до горизонта 480 м (глубина 520 м от поверхности по падению).

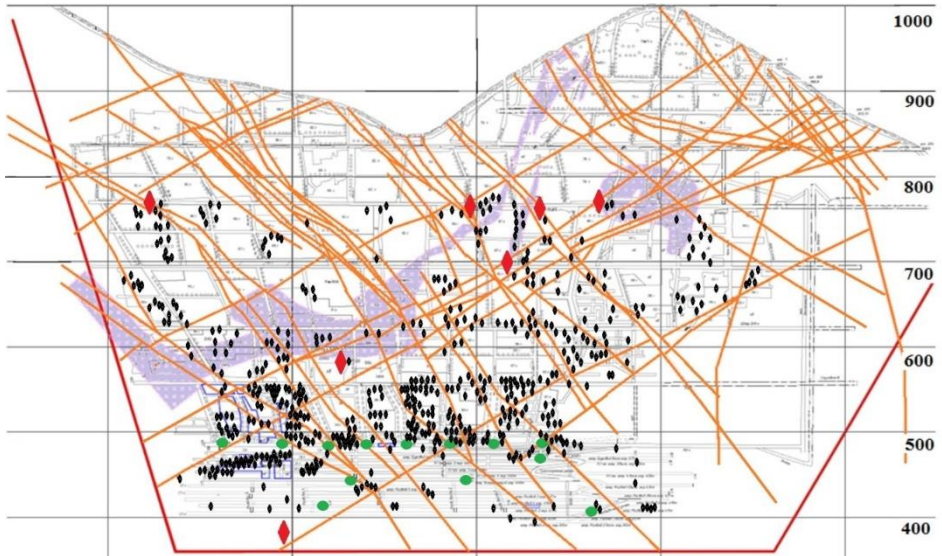


Рисунок 1 – Схема расположения основных горных выработок и разломной тектоники массива горных пород месторождения Южное (в проекции на рудную жилу № 4): цветом выделены: красный ромб – места горных ударов; черный ромб – места толчков и стреляния пород; зеленый круг – расположение датчиков АСКГД «Prognoz-ADS»

За последние 40 лет на месторождении было зарегистрировано более 2 тыс. динамических проявлений горного давления. В настоящее время, несмотря на уменьшение абсолютного числа таких проявлений, обусловленного временным снижением объемов добычи, геомеханическое состояние месторождения остается сложным и требует пристального надзора.

С 2022 г. на месторождении Южное эксплуатируется акустическая система контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS». Наблюдательная сеть системы включает 16 датчиков, установленных на 4 горизонтах рудника (см. рис. 1). В пределах контролируемого участка месторождения АСКГД «Prognoz-ADS» выполняет регистрацию сигналов акустической эмиссии в частотном диапазоне 0,5-12 кГц с определением координат, энергии и ряда других параметров сейсмоакустических событий, являющихся следствием процессов разрушения в массиве горных пород.

Для повышения эффективности геомеханического контроля удароопасности были проведены исследования по совершенствованию средств обработки, анализа и интерпретации сейсмоакустических данных. Разработанные по результатам исследований средства интеллектуального анализа экспериментальных данных базируются на применении алгоритмов кластерного анализа, нейронных сетей и других современных методов машинного обучения, используемых при работе с большим объемом данных и адаптированных для условий месторождения Южное.

Всего было выделено три наиболее важных направления развития средств сейсмоакустического мониторинга:

- автоматическая идентификация в потоке регистрируемых сейсмоакустических данных сигналов, характеризующих естественные процессы разрушения, и сигналов техногенного происхождения, инициированных активным ведением горных работ;
- формирование акустически активных зон для обнаружения очагов разрушения с оценкой их формы, взаимного расположения и динамики развития;
- прогнозирование опасных динамических проявлений горного давления на основе регистрируемых сейсмоакустических сигналов, событий и зон с применением алгоритмов машинного обучения.

Методы и алгоритмы, рассмотренные в диссертации разработаны и апробированы с применением данных, зарегистрированных на месторождении Южное за период с декабря 2022 г. по февраль 2024 г. Несмотря на индивидуальные особенности отдельных удароопасных объектов, приведенная методология, подходы и разработанные для месторождения Южное средства могут быть адаптированы для условий других месторождений, склонных и опасных по горным ударам.

I научное положение:

Тип источника регистрируемых сигналов и сейсмоакустических событий надежно идентифицируется применением комплекса вероятностных нейронных сетей бинарной классификации, что для условий месторождения Южное приводит к 95 % точности распознавания данных на тестовой выборке и увеличению объема полезной информации об естественных процессах разрушения массива горных пород более, чем в 15 раз.

Важным аспектом при анализе акустических сигналов является идентификация типа излучателя, т. е. источника, вызвавшего распространение волны по массиву горных пород. Все регистрируемые сигналы могут быть подразделены на две основные группы: естественные (полезные) сигналы, излученные в результате природных процессов разрушения из-за перераспределения напряжений в массиве горных пород, и техногенные сигналы (шум), вызванные различными технологическими операциями, сопровождающими ведение горных работ. Научную и практическую значимость в большей степени

представляют именно естественные акустические сигналы, позволяющие анализировать происходящие в горных породах геомеханические процессы.

В результате сейсмоакустического мониторинга на месторождении Южное за 1,5 года наблюдений системой «Prognos-ADS» было зарегистрировано почти 2,5 млн. сигналов, большая часть которых вызвана ведением буровзрывных работ. Для этих видов технологических операций характерными параметрами выступают: время (рис. 2) между регистрируемыми одним датчиком соседними сигналами и суточная цикличность, которые обусловлены особенностями работы бурового оборудования и регламентом проведения взрывных работ соответственно.

Выявленные характеристики сигналов различной природы происхождения совместно с методами экспертной оценки и кластерного анализа позволили выполнить разметку необходимого и достаточного объема сейсмоакустических данных для обучения модели искусственного интеллекта.

При разработке классификационной модели по определению типа источника сейсмоакустических данных было выдвинуто две гипотезы. Первая предполагала наличие уникальных особенностей у сигналов, регистрируемых каждым отдельным датчиком, что связано с влиянием среды распространения акустических волн. Вторая заключалась в различиях характеристик сигналов, обусловленных природой их источников. Эти гипотезы определили выбор архитектуры модели машинного обучения в виде комплекса нейросетей бинарной классификации. Каждая из этих моделей обучалась на данных, зарегистрированных отдельным датчиком, и предсказывала вероятность принадлежности сигналов к одному из целевых типов: естественной акустической эмиссии, взрывным или буровым работам.

Для повышения качества классификации моделей в процессе обучения применялись такие методы машинного обучения, как балансировка классов, min-max нормализация, кросс-валидация и подбор гиперпараметров с оптимизацией нескольких оценочных метрик. В результате точность классификации комплексом обученных нейросетей типа источника сигналов и событий, входящих в тестовую выборку, составила 95 % для условий месторождения Южное.

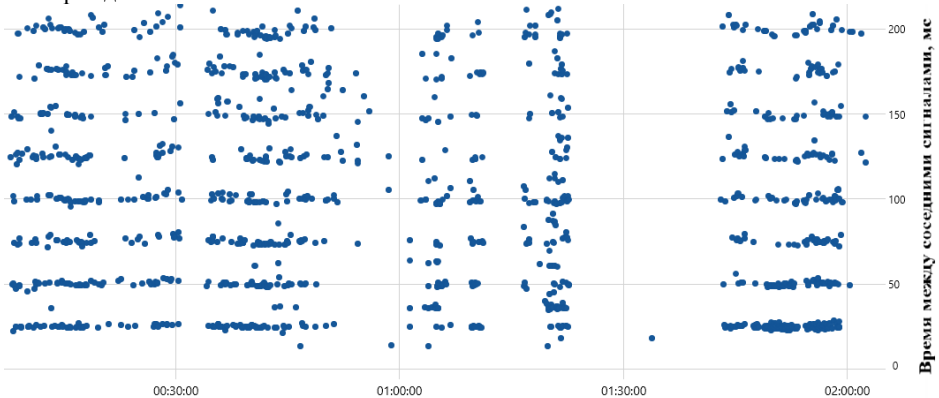


Рисунок 2 – Характерный график распределения параметра времени между соседними сигналами, зарегистрированными одним датчиком

На основе обученных нейронных сетей была разработана программа для обработки сейсмоакустических данных (рис. 3). С ее помощью было выполнено определение типа источника для неразмеченной части сигналов, составляющей почти 90 % от общего объема зарегистрированных данных. Это позволило значительно увеличить количество классифицированных сигналов: объем сигналов естественной сейсмоакустической эмиссии

(САЭ) вырос в 15,35 раза, сигналов от взрывных работ – в 3,43 раза, а сигналов от буровых операций – в 9,06 раза (табл. 1). Таким образом, удалось извлечь дополнительную ценную информацию из ранее необработанных данных.

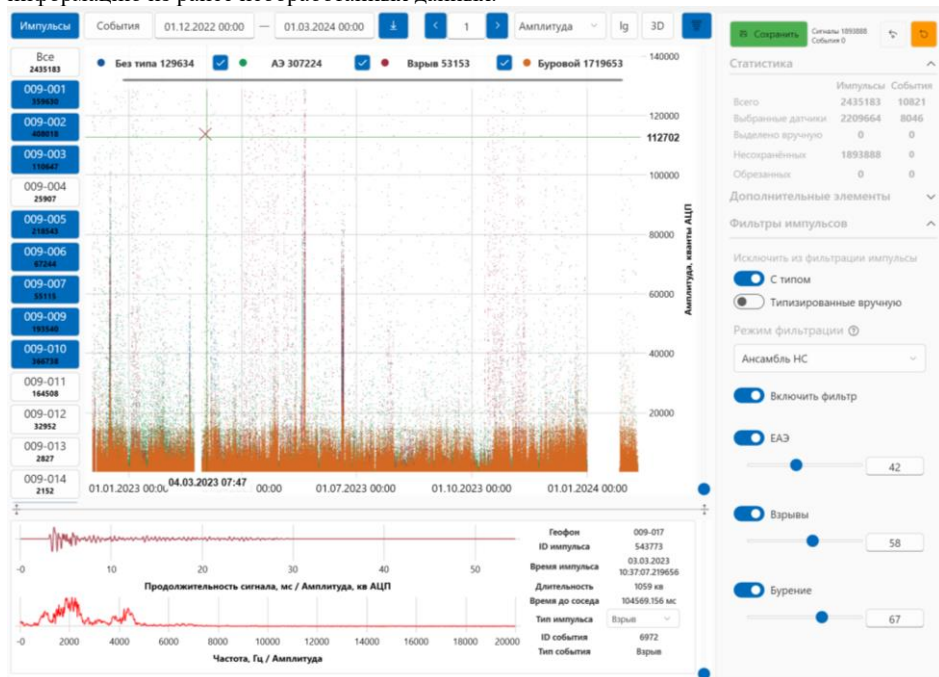


Рисунок 3 – Интерфейс программы «GeoFiltration» с алгоритмом на базе обученных нейронных сетей

Таблица 1 – Количество типизированных сигналов с применением разработанных моделей на месторождении Южное

Датчик	Естественная АЭ	Взрывы	Бурение	Без типа
009-001	40877	4241	307824	6688
009-002	25723	4197	374293	3805
009-003	34731	4181	66195	5540
009-004	7706	3875	10022	2304
009-005	22472	5847	210611	5520
009-006	20220	7181	33071	6772
009-007	6086	4765	42149	2115
009-009	36081	4769	141899	10791
009-010	39999	2923	315897	7919
009-011	13012	4637	141244	5615
009-012	9330	4337	18327	958
009-017	63665	26611	271007	65779
Всего (%)	319902 (13,04)	77564 (3,16)	1932539 (78,76)	123806 (5,05)
Прирост (раз)	299060 (15,35)	54945 (3,43)	1719242 (9,06)	-2049354 (0,06)

II научное положение:

Потенциально удароопасные участки массива горных пород эффективно выявляются с высокой степенью достоверности благодаря совместному применению алгоритма кластерного анализа DBSCAN и индекса Дэвиса-Болдина для определения акустически активных зон и параметрического описания динамики их развития.

Как показывает практика сейсмоакустического мониторинга с использованием многоканальных систем, деформационные процессы в массиве горных пород сопровождаются образованием очагов разрушения, что связано с постепенным прорастанием и объединением (кластеризацией) трещин. Данные процессы генерируют акустические волны, которые регистрируются датчиками, позволяя локализовать источники излучения. При небольших отклонениях пространственно-временных параметров источники могут быть объединены в акустически активные зоны (ААЗ), характеризующие отдельные очаги разрушения.

По результатам исследований были разработаны средства автоматического обнаружения очагов разрушения в массиве горных пород путем формирования из регистрируемых событий акустически активных зон. Для выявления областей концентрации сейсмоакустической энергии предложен комплекс методов кластерного анализа, включающий алгоритм DBSCAN и индекс Дэвиса-Болдина.

Алгоритм формирования акустически активных зон включал следующие этапы:

1. Определение начальных диапазонов параметров для кластеризации при помощи анализа средних расстояний между зарегистрированными событиями;

2. Кластеризация событий с применением алгоритма DBSCAN на основе плотности распределения событий таким образом, чтобы выполнялось следующее условие

$$|N_\varepsilon(p)| \geq n_p, \quad (1)$$

где n_p – минимальное количество связанных событий в кластере,

$N_\varepsilon(p)$ – окрестность радиусом ε события p , определяемая согласно выражению

$$N_\varepsilon(p) = \{q \in D \mid d(p, q) \leq \varepsilon\}, \quad (2)$$

где D – множество всех кластеризуемых точек;

q – произвольная точка, принадлежащая набору данных D ;

$d(p, q)$ – функция расстояния между двумя точками (евклидово расстояние).

3. Оценка качества кластеризации с помощью индекса Дэвиса-Болдина, учитывающего расстояние между событиями в одном кластере и между отдельными кластерами.

$$DBI = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max_{j \neq i} \left(\frac{\frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\| + \frac{1}{|C_j|} \sum_{y \in C_j} \|y - \mu_j\|}{\|\mu_i - \mu_j\|} \right), \quad (3)$$

где N – общее количество кластеров;

C_i, C_j – множества событий в кластерах i и j ;

μ_i, μ_j – центры кластеров C_i и C_j ;

$x - \mu_i, y - \mu_j$ – расстояния от события x до центра его кластера μ_i и от события

y до μ_j соответственно;

$\|\mu_i - \mu_j\|$ – расстояние между центрами кластеров i и j .

По результатам расчёта и анализа различных конфигураций акустически активных зон были установлены оптимальные параметры кластеризации с применением алгоритма DBSCAN для условий месторождения Южное с радиусом окрестности события, равным 7 м и минимальным количеством связанных событий в кластере, равным 13. Эффективность выявленных параметров характеризуется корректным разделением сейсмоакустических событий на кластеры с равномерным распределением одиночных событий, относящихся к категории шума. Пространственное расположение полученных кластеров сейсмоакустических событий представлено на рисунке 4. Для части кластеров на рисунке 5 показаны графики регистрации событий с течением времени.

Для получения параметрического описания динамики развития акустически активных зон были рассчитаны численные характеристики, включая смещение геометрического центра (с учетом энергии САЭ-событий как весового коэффициента), объем огибающей оболочки, среднее расстояние между событиями и другие параметры. Полученные данные, характеризующие акустически активные зоны, использовались в рамках другой части диссертационных исследований, где они выступали в качестве входных данных для обучения моделей искусственного интеллекта, направленных на прогнозирование вероятности возникновения геодинамических явлений.

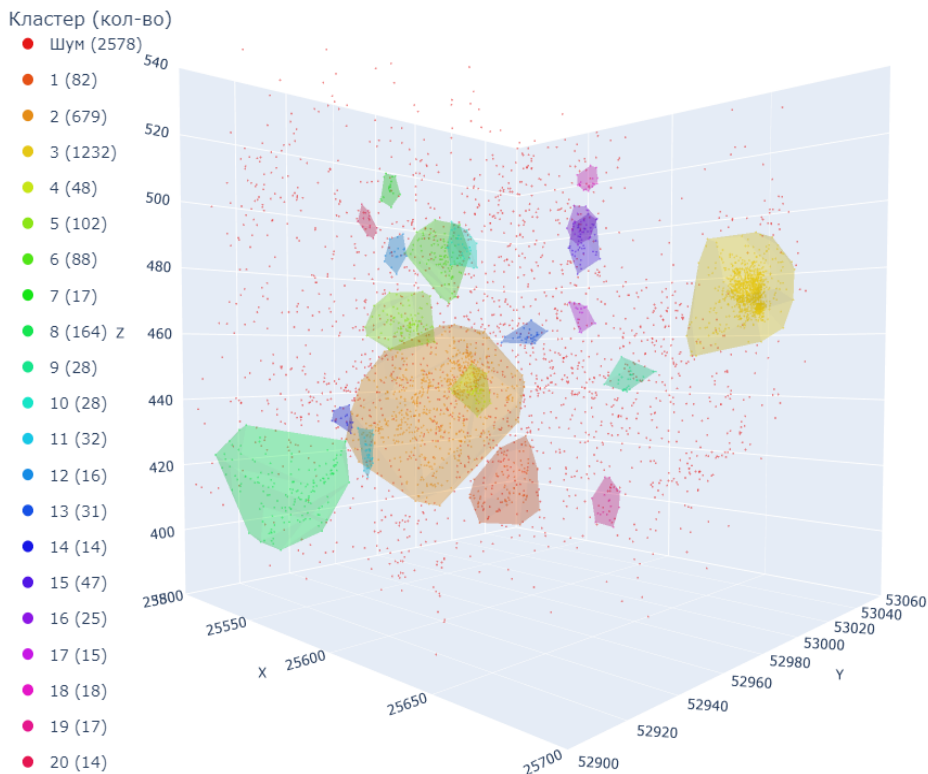


Рисунок 4 – Пространственное расположение ААЗ, выделенных в сейсмоакустических данных в условиях месторождения Южное

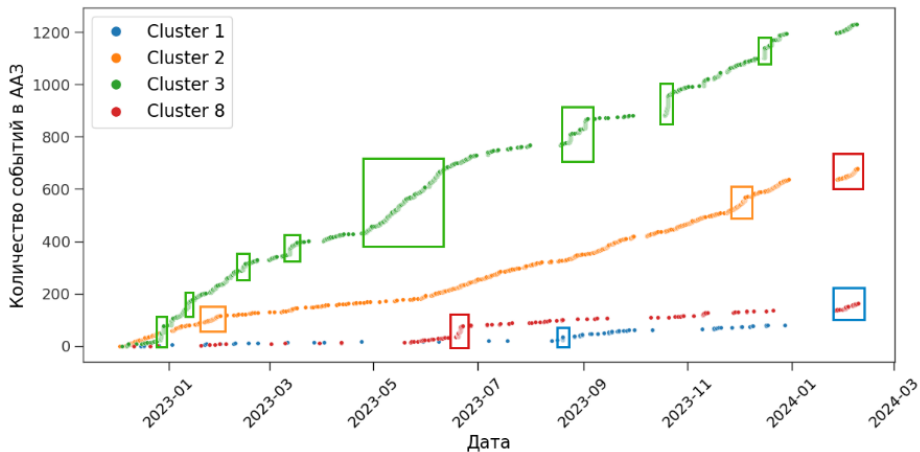


Рисунок 5 – Динамика формирования ряда кластеров с менее и более активными фазами (выделены активные фазы)

III научное положение:

Используемые в методах интеллектуальной обработки данных модели случайного леса и градиентного бустинга, адаптированные и обученные на измерительных данных сейсмоакустических временных рядов разного интервала, обеспечивают надежное прогнозирование опасных геодинамических явлений, и при пороговом значении вероятности 0,2 точность прогнозных оценок таких моделей в условиях месторождения Южное составляет 84 %.

Одной из ключевых задач исследования выступала разработка методов надежного прогнозирования динамических проявлений горного давления. За рассматриваемый период сейсмоакустического мониторинга с 3 декабря 2022 г. по 9 февраля 2024 г. на месторождении Южное было зарегистрировано 21 проявление, данные по которым приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Проявления горного давления, зарегистрированные на месторождении Южное за период мониторинга с 3 декабря 2022 г. по 9 февраля 2024 г.

№ проявления	Дата	Время	Тип проявления	Расположение
2091, 2092, 2093	13.12.2022	1:27	серия толчков	гор. 440, блок 1-440
2094, 2095, 2096	23.12.2022	5:18	серия толчков	гор. 455, блок 1-440
2097	23.12.2022	–	заколообразование	гор. 437
2098	23.01.2023	16:15	толчок	гор. 440, блок 1-440
2099	26.01.2023	14:00	щелчок	гор. 427, блок 8-411
2100	02.02.2023	18:36	толчок	гор. 482
2101	05.02.2023	18:05	толчок	гор. 426
2102	15.02.2023	2:11	щелчок	блок 1-480
2103	16.02.2023	18:19	толчок	блок 6-480
2104	18.02.2023	14:20	толчок	гор. 463, блок. 6-7-440
2105	18.02.2023	14:20	толчок	гор. 483, блок 6-480
2106	19.02.2023	11:00	шелушение	гор.427, блок 8-411
2107	27.03.2023	5:22	щелчок	блок 8-411
2108	28.09.2023	–	заколообразование	гор. 480
2109	29.10.2023	–	заколообразование	гор. 411, блок 7
2110	17.04.2023	–	вывал	нет информации
2111	12.12.2023	–	вывал	блок 6-411

По результатам анализа местоположения зарегистрированных геодинамических явлений и сопоставления их с САЭ-событиями был сделан вывод об их значительной удаленности от основной зоны контроля (лишь 4 проявления были зарегистрированы в непосредственной близости от выделенных акустически активных зон). Несмотря на то, что было зарегистрировано незначительное количество событий, непосредственно связанных с проявлениями, было выдвинуто предположение, что регистрировались отдельные сигналы, вызванные процессами разрушения в массиве горных пород, предшествующими реализации проявлений. Однако, общее количество зарегистрированных сигналов оказалось недостаточным для точного определения координат источников сейсмоакустического излучения методом триангуляции. Эта особенность привела к необходимости применения всей совокупности сейсмоакустических данных для разработки моделей, оценивающих риск возникновения удароопасного состояния.

Для разработки и обучения моделей машинного обучения, прогнозирующих вероятность возникновения геодинамических явлений, использовались рассмотренные ранее результаты, а именно классифицированные сигналы и события, относящиеся к естественной сейсмоакустической эмиссии, и сформированные акустически активные зоны. По всем группам сейсмоакустических данных были построены регулярные временные ряды с различными интервалами времени от 15 мин до 1 месяца, охватывающие в общей сложности более 450 статистических параметров. Каждый временной отсчет был помечен меткой наличия проявления.

Выбор наиболее значимых признаков выполнялся при помощи критерия Джини, реализованного в алгоритме случайного леса по формуле

$$G = 1 - \sum_{i=1}^k p_i^2, \quad (4)$$

где p_i – вероятность того, что объект из данного узла дерева принадлежит классу i ;

k – количество узлов.

При разбиении узла на основе признака j , уменьшение критерия Джини вычисляется как разница между значением критерия Джини до и после разбиения:

$$\Delta G_j = G_{parent} - \left(\frac{n_{left}}{n} G_{left} + \frac{n_{right}}{n} G_{right} \right), \quad (5)$$

где n – количество объектов в родительском узле;

n_{left} , n_{right} – количество объектов в левом и правом дочерних узлах, соответственно;

G_{parent} , G_{left} , G_{right} – значения критерия Джини для родительского и дочерних узлов.

Это позволило выделить по 20 наиболее информативных параметров для каждого временного ряда. В качестве моделей машинного обучения применялось три алгоритма: случайный лес, градиентный бустинг и рекуррентные нейронные сети. По причине значительного дисбаланса данных, вызванного малым количеством проявлений, в моделях случайного леса и градиентного бустинга применялись взвешенные функции потерь, а в нейронных сетях – фокальная функция потерь.

Исследование по прогнозированию горнодинамических проявлений включало три подхода. В рамках первого подхода модели обучались на всем объеме данных и успешно предсказали все проявления. Второй подход подразумевал разделение данных на обучающую и тестовую выборки. Модели, обученные таким образом, при пороговом значении вероятности 0,2 предсказали всё 21 проявление, допустив 4 ложных срабатывания, что соответствует 84 % точности для совокупного объема обучающих и тестовых данных. Пример усредненных прогнозных значений представлен на рисунке 6.

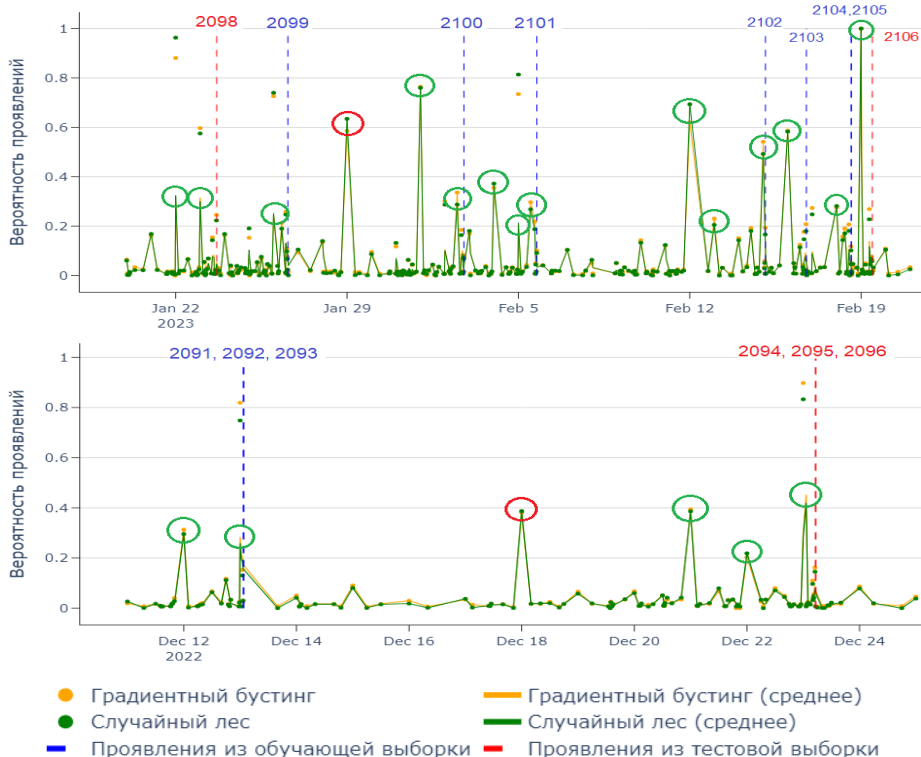


Рисунок 6 – Усредненные вероятности возникновения проявлений горного давления со скользящим окном в 2 ч на обучающих и тестовых данных

На третьем этапе рассматривался подход к прогнозированию горнодинамических проявлений в режиме реального времени. Этот метод включал последовательное дообучение рекуррентных сетей и переобучение моделей случайного леса и градиентного бустинга с добавлением новых данных на каждом временном шаге. После каждой итерации модели предсказывали вероятность проявления для следующего временного интервала. Данный способ к прогнозированию удароопасности является менее точным по сравнению с предыдущими подходами, но в наибольшей степени соотносится с концепцией временных рядов и имеет более высокую практическую ценность. Часть усредненных прогнозных оценок моделей при таком подходе представлена на рисунке 7.

На основе анализа полученных результатов были сделаны следующие ключевые выводы по применению разработанных моделей:

- при оценке опасности возникновения геодинамических явлений, следует учитывать предыдущие значения вероятностей и брать во внимание локальные максимумы;
- следует комплексно оценивать предсказания моделей различных типов, потому что суммарная вероятность возникновения проявлений оказывается более достоверной;
- на интервалах времени, где наблюдается частая или наоборот редкая регистрация проявлений, более чувствительные модели рекуррентных сетей срабатывают лучшим образом, поэтому в таких случаях следует в большей степени ориентироваться на них.

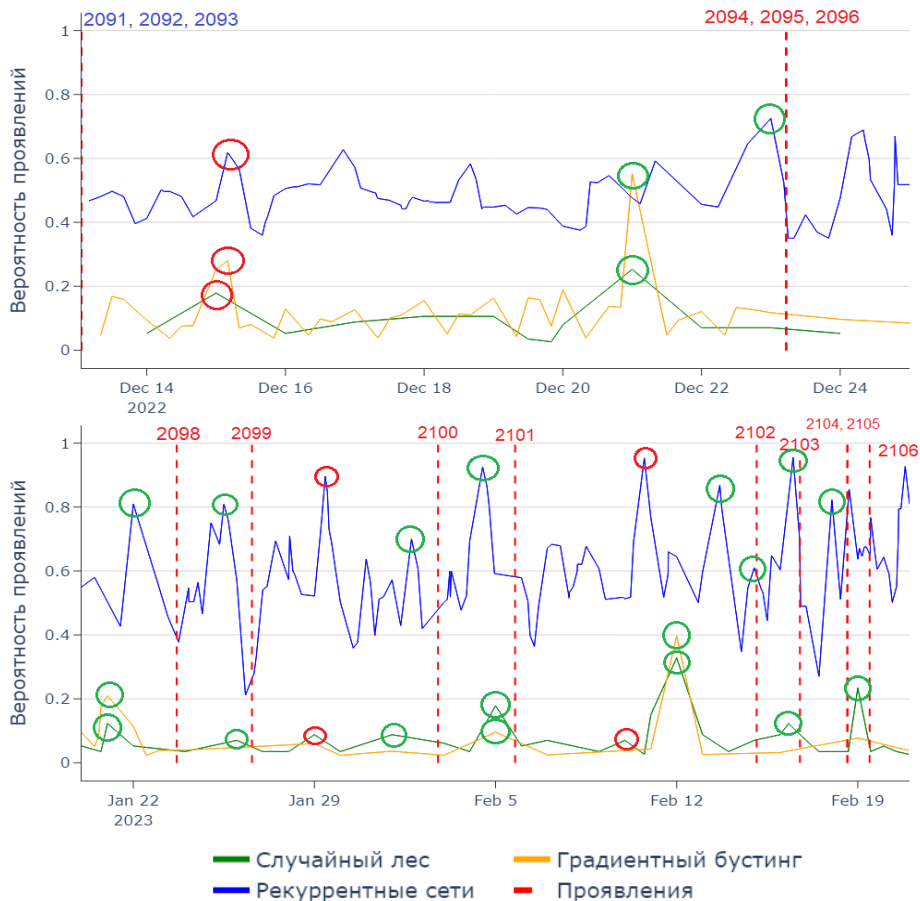


Рисунок 7 – Усредненные вероятности возникновения горнодинамических проявлений, полученные при помощи последовательных предсказаний моделями случайного леса, градиентного бустинга и рекуррентных сетей

Таким образом, было разработано три различных подхода к обучению моделей искусственного интеллекта и их применению для оценки риска удароопасности. Использование вероятностного подхода в разработанных моделях позволило гибко настроить пороговые значения для разных типов моделей, учитывая их чувствительность к входным сейсмоакустическим данным. На основе анализа зарегистрированных случаев проявлений горного давления, использования комплекса методов интеллектуального анализа и разработанных моделей машинного обучения были получены надежные прогнозные оценки динамических проявлений горного давления на месторождении Южное.

Дальнейшее развитие системы прогнозирования опасных проявлений горного давления будет направлено на повышение точности разработанных средств, реализацию авторегрессионного подхода с возможностью выбора временного интервала прогнозирования, а также разработку методик по раннему предупреждению опасных геодинамических явлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение научно-технической задачи по прогнозированию опасных динамических проявлений горного давления с применением сейсмоакустического метода и разработанных алгоритмов машинного обучения, что имеет существенное научно-практическое значение для управления горным давлением и для повышения эффективности и безопасности обработки удароопасного месторождения Южное.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. В процессе сейсмоакустического мониторинга обработки месторождения Южное установлены отделяемые разработанными алгоритмами характерные особенности помеховых сигналов техногенного происхождения, проявляющиеся в повторяющихся временных интервалах между соседними буровыми сигналами, регистрируемыми одним датчиком, а также проявляющиеся в суточных циклах активности взрывных работ. Отделение их от функциональных сигналов разрушения массива горных пород рекомендуется по результатам анализа признакового пространства сейсмоакустических сигналов с использованием алгоритмов понижения размерности.

2. Подготовлены наборы сейсмоакустических сигналов, необходимые и достаточные для реализации интеллектуальной системы обучения классификационных нейросетевых моделей, обеспечивающих использование выявленных закономерностей в амплитудно-частотных характеристиках сигналов различных типов и разработанного алгоритма их кластеризации.

3. На основе нормализации признакового пространства и балансировки количественного состава групп сигналов, применения ансамблевого подхода и подбора гиперпараметров разработан и обучен комплекс вероятностных нейросетевых бинарных классификаторов для эффективного автоматического определения типа источника регистрируемых сигналов и сейсмоакустических событий. Данный метод применен в акустической системе контроля горного давления «Prognoz-ADS» на уровне разработанных программных средств.

4. Применение для сейсмоакустического мониторинга на удароопасном месторождении Южное разработанных моделей машинного обучения для классификации регистрируемых сейсмоакустических данных позволило добиться точности определения типа источника на тестовой выборке, равной 95 %, и привело к увеличению более, чем в 15 раз количества полезных сигналов естественного происхождения, что способствует повышению достоверности выявления акустически активных зон и надежности средств прогнозирования удароопасности.

5. Надежность выделения акустически активных зон обеспечивается также разработанными программно-методическими средствами (с использованием алгоритма DBSCAN и индекса Дэвиса-Болдина), благодаря которым для условий месторождения Южное установлены оптимальные параметры кластеризации серий акустических сигналов с количеством ближайших событий в кластере – 13 и радиусом окрестности, равным 7 м. Таким образом на обрабатываемом месторождении определены 20 участков в массиве горных пород, характеризующихся повышенным риском удароопасности.

6. В целях начального решения проблемы предсказания редких проявлений горного давления разработан и предложен комплексный метод интеллектуального анализа данных, включающий применение фокальной функции и весовых коэффициентов для настройки обучающих алгоритмов, а также использование ансамблевого подхода, основанного на множестве вероятностных моделей, обученных на разномасштабных временных рядах с обобщением их результатов. На этой научной основе ожидается в перспективе повышение точности прогнозирования удароопасности, благодаря использованию большого объема

данных, регистрируемых в процессе сейсмоакустического мониторинга, для обучения моделей машинного обучения.

7. Разработаны модели интеллектуального анализа измерительных данных на основе алгоритмов случайного леса и градиентного бустинга; при выборе порогового значения вероятности 0,2 и усреднении прогнозных оценок использование моделей в процессе мониторинга отработки месторождения Южное позволило определить с 84 % точностью параметры риска возникновения опасных динамических проявлений горного давления, что способствует повышению эффективности и безопасности ведения горных работ.

8. Для эффективного прогнозирования удароопасности в режиме реального времени выполнено обоснование и предложен методический подход на основе инкрементного обучения и переобучения моделей искусственного интеллекта, а также разработаны рекомендации по оперативной оценке результатов их применения, заключающиеся в комплексном анализе предсказаний алгоритмов разных типов с учетом прошлых значений вероятностей и чувствительности отдельных моделей в зависимости от частоты регистрации проявлений. Данный подход является развитием сейсмоакустического мониторинга и может быть реализован в дальнейшем, особенно с возможным усложнением геомеханической обстановки на месторождении Южное и на аналогичных ему объектах горных работ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Константинов, А. В. Проектирование универсальной измерительно-аналитической платформы для исследования состояния породного массива / А. В. Константинов, А. В. Гладырь // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 4. – С. 24–32. – DOI 10.21440/0536-1028-2019-4-24-32.

2. Сравнительный анализ результатов тестирования геофонов системы «Prognoz ADS» в шахтных условиях / А. В. Гладырь, А. В. Сидляр, А. В. Константинов, М. А. Ломов // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 8. – С. 38–46. – DOI 10.21440/0536-1028-2019-8-38-46.

3. Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений / А. В. Гладырь, Г. А. Курсакин, М. И. Рассказов, А. В. Константинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 21–32. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32.

4. Константинов, А. В. Математические и программные средства оценки распределенной сети геофонов системы геомеханического мониторинга Prognoz-ADS / А. В. Константинов, М. И. Рассказов, Д. И. Цой // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 2. – С. 26–33. – DOI 10.21440/0536-1028-2021-2-26-33.

5. Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях / М. И. Рассказов, А. А. Терешкин, Д. И. Цой [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 12-1. – С. 167-182. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167.

6. Исследование конфигураций приёмных антенн наблюдательной сети геофонов системы «Prognoz-ADS» / А. В. Константинов, М. А. Ломов, А. А. Терешкин [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5-2. – С. 93–102. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_52_0_93.

7. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий / И. Ю. Рассказов, Ю. В. Федотова, П. А. Аникин [и др.] // Горная промышленность. – 2023. – № S5. – С. 18-24. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-S5-18-24.

8. Геомеханические проблемы отработки нижних горизонтов месторождения Южное (Приморский край) / М. А. Ломов, А. В. Сидляр, А. В. Константинов, А. П. Грунин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-2. – С. 87–99. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_122_0_87.

9. Константинов, А. В. Разработка комплекса нейросетевых моделей для идентификации типа источника акустического излучения на удароопасном месторождении / А. В. Константинов, И. Ю. Рассказов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 23–36. – DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_23.

В прочих изданиях:

10. Gladyr, A. V. Software and Hardware Improvement for the Streltsov Ore Field Geodynamic Testing Area / A. V. Gladyr, V. I. Miroshnikov, A. V. Konstantinov // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 56. – P. 02012. – DOI 10.1051/e3sconf/20185602012.

11. Konstantinov, A. Development of multi-channel portable impact control device for local assessment of the state of the edge parts of the rock massif / A. Konstantinov // Problems of Complex Development of Georesources : electronic resource, Khabarovsk, September 25–27, 2018. – Khabarovsk: EDP Sciences, 2018. – P. 02024. – DOI 10.1051/e3sconf/20185602024.

12. Gladyr, A. V. The calculation parameters for the effective seismic sensors placements to monitor burst-hazard rock massif / A. V. Gladyr, I. Yu. Rasskazov, A. V. Konstantinov // CEUR Workshop Proceedings : ITHPC 2019 - Short Paper Proceedings of the 5th International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing, Khabarovsk, September 16–19, 2019. – Khabarovsk, 2019. – Vol. 2426. – P. 90-96.

13. Константинов, А. В. Разработка алгоритма автоматической идентификации сейсмоакустических сигналов средствами локального мониторинга / А. В. Константинов, А. В. Гладырь, М. А. Ломов // Проблемы недропользования. – 2019. – № 2. – С. 43–51. – DOI 10.25635/2313-1586.2019.02.043.

14. Ломов, А. В. Перспективные методы оценки и контроля геомеханического состояния массивов пород / А. В. Ломов, А. В. Константинов, А. А. Терёшкин // Проблемы недропользования. – 2019. – № 4 (23). – С. 83–90. – DOI 10.25635/2313-1586.2019.04.083.

15. Гладырь, А. В. Разработка алгоритма оптимальной конфигурации наблюдательной сети системы геомеханического мониторинга / А. В. Гладырь, А. В. Константинов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 1. – С. 71–77. – DOI 10.15372/FPVGN2019060112.

16. Опытное исследование точности локации автоматизированной системы геомеханического мониторинга в условиях анизотропии горных пород / А. В. Гладырь, М. И. Рассказов, А. А. Терёшкин, А. В. Константинов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 78–83. – DOI 10.15372/FPVGN2019060113.

17. Algorithm for calculating hazard areas of a rock massif based on geomechanical data / A. Gladyr, M. Rasskazov, A. Konstantinov, A. Tereshkin // E3S Web of Conferences. 2019. – Vol. 129. – P. 01002. – DOI 10.1051/e3sconf/201912901002.

18. Development of Mathematical Algorithm for Seismoacoustic Signals Identification Using Local Geomechanical Control Means / A. Gladyr, A. Konstantinov, A. Tereshkin, V. Miroshnikov // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 129. – P. 01014. – DOI 10.1051/e3sconf/201912901014.

19. The research of burst hazard of the rocks massif of Rasvumchorr mineral deposit according to seismoacoustic monitoring / M. Rasskazov, A. Gladyr, A. Tereshkin [et al.] // E3S Web of Conferences. 2019. – Vol. 129. – P. 01022. – DOI 10.1051/e3sconf/201912901022.

20. Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula / M. Rasskazov, A. Tereshkin, D. Tsoi [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 192. – P. 01009. – DOI 10.1051/e3sconf/202019201009.

21. Konstantinov, A. Designing an improved geoacoustic event location algorithm in the "Prognoz-ADS" system / A. Konstantinov, A. Gladyr, M. Rasskazov // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 192. – P. 04013. – DOI 10.1051/e3sconf/202019204013.

22. Application of probabilistic clustering analysis to rockburst hazard assessment of rock mass / A. V. Gladyr, A. A. Tereshkin, M. I. Rasskazov, A. V. Konstantinov // IOP Conference series. – 2019. – Vol. 773. – P. 012061. – DOI 10.1088/1755-1315/773/1/012061.

23. Константинов, А. В. Методы машинного обучения для прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления / А. В. Константинов // Актуальные проблемы освоения георесурсов : материалы I Всероссийской научной конференции молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 18–19 мая 2022 года. – Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН, 2022. – С. 83-87.

24. Ломов, М. А. Анализ результатов сейсмического мониторинга Кукисвумчоррского месторождения / М. А. Ломов, А. В. Константинов // Проблемы недропользования. – 2022. – № 1(32). – С. 38–44. – DOI 10.25635/2313-1586.2022.01.038.

25. Совершенствование программно-аналитических средств системы сейсмоакустического мониторинга удароопасности «PROGNOZ-ADS» / А. В. Константинов, А. П. Грунин, А. В. Сидляр, М. А. Ломов // Цифровые технологии в горном деле : тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, Апатиты, 13–16 июня 2023 года. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2023. – С. 26.

26. Применение цифровых технологий для организации сейсмоакустического мониторинга удароопасности на месторождении «Южное» / М. А. Ломов, А. В. Сидляр, А. В. Константинов, А. П. Грунин // Цифровые технологии в горном деле : тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, Апатиты, 13–16 июня 2023 года. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2023. – С. 29-31.

27. Константинов, А. В. Анализ сейсмоакустических данных системы PROGNOZ-ADS на руднике Николаевский / А. В. Константинов, В. С. Лештаев, А. П. Грунин // Физика геосфер : материалы докладов, Владивосток, 11–15 сентября 2023 года. – Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2023. – С. 348-350. – DOI 10.34906/9785604968383.348.

Свидетельства на результаты интеллектуальной деятельности:

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665941 Российская Федерация. AcousticGroupsVisualization : № 2018662768 : заявл. 14.11.2018 : опубл. 11.12.2018 / А. В. Константинов, А. В. Гладырь, А. В. Сидляр ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665942 Российская Федерация. AcousticEventGroups : № 2018662769 : заявл. 14.11.2018 : опубл. 11.12.2018 / А. В. Сидляр, А. В. Константинов, А. В. Гладырь ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук.

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617829 Российская Федерация. SensorSensitivity : № 2019616530 : заявл. 11.06.2019 : опубл. 20.06.2019 / А. В. Гладырь, А. В. Константинов, М. А. Ломов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613068 Российская Федерация. Geoacoustics3DView : № 2020610487 : заявл. 23.01.2020 : опубл. 10.03.2020 / А. В. Гладырь, М. А. Ломов, А. В. Константинов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664641 Российская Федерация. AntennaCalc : № 2021663673 : заявл. 01.09.2021 : опубл. 10.09.2021 / А. В. Сидляр, П. А. Аникин, М. А. Ломов, А. В. Константинов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы № 2022680765 Российская Федерация. OnsetTimeCorrection : № 2022665799: заявл. 25.08.2022 : опубл. 07.11.2022 / А. П. Грунин, А. В. Констанитнов, А. В. Сидляр ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023667159 Российская Федерация. GeoFiltration : № 2023665959 : заявл. 28.07.2023 : опубл. 10.08.2023 / А. В. Константинов, А. П. Грунин, А. В. Сидляр ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

35. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624340 Российская Федерация. База данных South-Dalpolimetall системы геомеханического мониторинга Prognoz-ADS : № 2023624027 : заявл. 17.11.2023 : опубл. 04.12.2023 / П. А. Аникин, А. А. Терешкин, А. В. Сидляр [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686072 Российская Федерация. PulsesFilterObserver : № 2023684625 : заявл. 17.11.2023 : опубл. 04.12.2023 / А. П. Грунин, А. В. Сидляр, А. В. Константинов, М. А. Ломов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

37. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686152 Российская Федерация. ActiveZonesClustering : № 2023684655 : заявл. 17.11.2023 : опубл. 04.12.2023 / А. П. Грунин, А. В. Сидляр, А. В. Константинов, М. И. Потапчук ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.