

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14, тел.: 8 (81555) 7-53-50; 79-5-95 , e-mail: ksc@ksc.ru

«УТВЕРЖДАЮ»



Генеральный директор ФИЦ КНЦ РАН
академик РАН

А.В. Кривовичев

марта

2025 г.

ОТЗЫВ
ведущей организации

на диссертационную работу Константинова 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»

Представленная диссертационная работа Константинова Александра Викторовича «Разработка средств интеллектуального анализа данных в системе сейсмоакустического мониторинга удароопасности массива горных пород месторождения Южное» изложена на 140 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 200 наименований, 75 рисунков, 20 таблиц.

1. Актуальность работы

Диссертация Константинова Александра Викторовича направлена на решение научно-практической задачи по разработке интеллектуальной системы анализа и интерпретации данных сейсмоакустического контроля массивов пород, склонных к динамическим проявлениям горного давления. Прогнозирование геодинамических рисков является важной задачей в связи с постоянным усложнением горно-геологических условий: неоднородностью массива горных пород, увеличением глубины отработки и интенсификацией техногенного воздействия. Оценка геодинамического состояния массива горных пород по данным сейсмоакустического контроля позволяет проводить прогноз горных и горно-тектонических ударов, а также возможных разрушений элементов горной технологии. Сейсмоакустический мониторинг позволяет фиксировать как сильные, так и слабые сигналы деформаций массива пород. Помимо сигналов естественной природы, подобные системы регистрируют вибрации от работы горной техники и проведения взрывных работ. Долгое время обработка массивов данных геомеханического

мониторинга сдерживалась недостатком вычислительных мощностей. Совершенствование вычислительных технологий и методов машинного обучения за последние 10 лет кардинально изменили ситуацию, открыв новые возможности для анализа сложных геодинамических процессов. В связи с вышесказанным, развитие и внедрение интеллектуальных систем анализа данных для повышения точности интерпретации сейсмоакустических сигналов, прогнозирования очагов разрушения на ранних стадиях и автоматизации оценки удароопасности массива являются актуальными.

2. Общая характеристика содержания диссертации

Диссертационная работа Константинова А.В. посвящена разработке средств интеллектуального анализа данных в системе сейсмоакустического мониторинга удароопасности массива горных пород месторождения Южное, опасного по горным ударам. Основной идеей работы является использование методов интеллектуального анализа измерительных сейсмоакустических данных с целью повышения надёжности выявления закономерностей формирования опасных очагов разрушений, а также прогноза динамических проявлений горного давления в процессе сейсмоакустического мониторинга разрабатываемого удароопасного месторождения. Поставленная в работе цель соответствует названию работы.

В первой главе автором дана историческая справка о проявлениях горного давления на горнодобывающих предприятиях мира, представлен обзор современного состояния методов прогноза и предупреждения горных ударов. Показаны основные подходы к оценке и контролю геомеханического состояния породного массива, в том числе методы интеллектуального анализа данных. Описаны средства сейсмоакустического мониторинга, применяемые на удароопасных месторождениях, в числе которых детально представлена система контроля горного давления «Prognoz-ADS». Сформулированы цель, идея и задачи диссертационной работы.

Во второй главе дана характеристика объекта исследования, выполнен анализ признакового пространства сейсмоакустических импульсов, выявлены характерные особенности техногенных сигналов и созданы обучающие наборы для нейросетевых моделей. Для разработки эффективного инструмента определения источников сигналов использованы методы нормализации и балансировки данных, а также ансамбля моделей машинного обучения. Показано, что применение этих моделей на реальных данных существенно повысило точность идентификации техногенных сигналов. Разработанные программные средства позволили автоматизировать процесс обработки сейсмоакустических данных в области определения типа источника, увеличивая объективность анализа и снижая зависимость от экспертных знаний. На основе

полученных результатов и разработанных программно-методических средств дополнена информация о геомеханических процессах, протекающих в массиве горных пород и проявляющихся в регистрируемых сейсмоакустических сигналах естественного происхождения, число которых в условиях месторождения Южное было увеличено приблизительно в 15 раз.

В третьей главе выполнен анализ сейсмоакустических событий на месторождении Южное, позволивший выявить зоны повышенной активности, связанные с процессами трещинообразования в горных породах. Приведено обоснование применения метода кластерного анализа для решения задачи выделения акустически активных зон. Его использование позволило детально изучить пространственные и временные характеристики этих зон. Представлены разработанные программные средства, локализующие очаги повышенного горного давления и определяющие динамику их развития. Результаты кластеризации могут использоваться для определения закономерностей возникновения и прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления.

В четвертой главе с использованием данных сейсмоакустического мониторинга системой «Prognoz-ADS» изучены случаи проявлений горного давления на месторождении Южное. Представлен процесс обучения моделей машинного обучения с использованием статистических параметров сейсмоакустических сигналов, что дало возможность прогнозировать проявления удароопасности и выявлять моменты с повышенной вероятностью их возникновения. Даны рекомендации по внедрению разработанных средств прогнозирования динамических проявлений горного давления в производственный процесс для повышения эффективности и безопасности горных работ.

3. Основные научные результаты диссертации

В диссертационной работе на защиту выносится три научных положения.

Первое 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».

Второе 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».

Третье 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 %».

Все научные положения в достаточной степени обоснованы и подкреплены публикациями. Достоверность и обоснованность научных положений обеспечиваются корректным выбором методов и подходов для проведения 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.

4. Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в выявлении закономерностей сейсмоакустических сигналов для подготовки обучающих наборов нейронных сетей; разработке математических моделей, позволяющих с высокой точностью определять тип источников сигналов; разработке методики локализации очагов повышенного горного давления и модели машинного обучения для прогнозирования удароопасности на основе сейсмоакустических данных.

5. Практическая ценность результатов диссертационной работы

Практическая ценность работы состоит в разработанных программно-методических средствах, основанных на применении методов интеллектуального анализа, повышающих точность обработки сейсмоакустических данных и обеспечивающих надежное прогнозирование опасных геодинамических явлений.

6. Полнота опубликования результатов диссертации

Основные результаты, положения и рекомендации диссертации были апробированы и получили одобрение специалистов в области горного дела на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах. 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.

Обоснование первого научного положения изложено в 12 опубликованных работах:

- Проектирование универсальной измерительно-аналитической платформы для исследования состояния породного массива // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 4. – С. 24–32.
- Сравнительный анализ результатов тестирования геофонов системы «Prognoz ADS» в шахтных условиях // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 8. – С. 38–46.
- Математические и программные средства оценки распределенной сети геофонов системы геомеханического мониторинга Prognoz-ADS // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 2. – С. 26–33.
- Исследование конфигураций приёмных антенн наблюдательной сети геофонов системы «Prognoz-ADS» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5-2. – С. 93–102.
- Разработка комплекса нейросетевых моделей для идентификации типа источника акустического излучения на удароопасном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 23–36.
- Software and Hardware Improvement for the Streltsov Ore Field Geodynamic Testing Area // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 56. – P. 02012.
- Development of multi-channel portable impact control device for local assessment of the state of the edge parts of the rock massif // Problems of Complex Development of Georesources : electronic resource, Khabarovsk, September 25–27, 2018. – Khabarovsk: EDP Sciences, 2018. – P. 02024.
- The calculation parameters for the effective seismic sensors placements to monitor burst-hazard rock massif // 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
- Разработка алгоритма автоматической идентификации сейсмоакустических сигналов средствами локального мониторинга // Проблемы недропользования. – 2019. – № 2. – С. 43–51.
- Разработка алгоритма оптимальной конфигурации наблюдательной сети системы геомеханического мониторинга // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 1. – С. 71–77.

- Development of Mathematical Algorithm for Seismoacoustic Signals Identification Using Local Geomechanical Control Means // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 129. – P. 01014.
- Совершенствование программно-аналитических средств системы сейсмоакустического мониторинга удароопасности «PROGNOZ-ADS» // 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

По второму научному положению опубликовано 7 статей:

- Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 21–32.
- Опытное исследование точности локации автоматизированной системы геомеханического мониторинга в условиях анизотропии горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 78–83.
- Algorithm for calculating hazard areas of a rock massif based on geomechanical data // E3S Web of Conferences. 2019. – Vol. 129. – P. 01002.
- Designing an improved geoacoustic event location algorithm in the "Prognоз-ADS" system // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 192. – P. 04013.
- Application of probabilistic clustering analysis to rockburst hazard assessment of rock mass // IOP Conference series. – 2019. – Vol. 773. – P. 012061.
- Анализ результатов сейсмического мониторинга Кукисумчоррского месторождения // Проблемы недропользования. – 2022. – № 1(32). – С. 38–44.
- Применение цифровых технологий для организации сейсмоакустического мониторинга удароопасности на месторождении «Южное» // 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

Материалы по третьему научному положению представлены в 8 работах:

- Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 12–1. – С. 167–182.

- Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий // Горная промышленность. – 2023. – № S5. – С. 18-24.
- Геомеханические проблемы отработки нижних горизонтов месторождения Южное (Приморский край) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-2. – С. 87–99.
- Перспективные методы оценки и контроля геомеханического состояния массивов пород // Проблемы недропользования. – 2019. – № 4 (23). – С. 83–90.
- The research of burst hazard of the rocks massif of Rasvumchorr mineral deposit according to seismoacoustic monitoring // E3S Web of Conferences. 2019. – Vol. 129. – P. 01022.
- Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 192. – P. 01009.
- Методы машинного обучения для прогнозирования опасных динамических проявлений горного давления // 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
- Анализ сейсмоакустических данных системы PROGNOZ-ADS на руднике Николаевский // Физика геосфер: материалы докладов, Владивосток, 11–15 сентября 2023 года. – Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2023. – С. 348-350

Большинство работ опубликовано в изданиях из списка ВАК, также представлены доклады на международных конференциях, что позволяет сделать вывод о достаточной аprobации результатов диссертационной работы.

Диссертант является автором 9 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности Роспатент. На разработанные в рамках выполнения диссертационной работы программные продукты, получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (всего 9 свидетельств): AcousticGroupsVisualization, AcousticEventGroups, SensorSensitivity, Geoacoustics3DView, AntennaCalc, OnsetTimeCorrection, GeoFiltration, PulsesFilterObserver, ActiveZonesClustering.

Автором диссертации получено свидетельство о государственной регистрации базы данных South-Dalpolimetall системы геомеханического мониторинга Prognoz-ADS.

Исходя из доступной реферативной части данных программных продуктов, все они разработаны в рамках выполнения диссертационной работы и использованы для решения поставленных задач.

7. Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в постановке цели и выборе средств для её достижения, анализе признакового пространства сейсмоакустических сигналов и разработке нейросетевых моделей для определения их источников. Также он включает в себя разработку методики идентификации акустически активных зон, связанных с горным давлением, и выбор значимых признаков для прогнозирования удароопасности. Диссидентом были разработаны, обучены и протестированы модели машинного обучения для предсказания динамических проявлений горного давления на месторождении Южное, что является современным инновационным подходом к решению актуальной задачи.

8. О стиле и языке диссертации и автореферата. Соответствие автореферата основным положениям диссертации.

Содержание и тема диссертационной работы соответствуют паспорту научной специальности 2.8.6 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика». Автореферат соответствует содержанию диссертации по всем ключевым аспектам, представленным к защите: целям исследования, поставленным задачам, научной новизне, практической значимости и выводам.

Диссертация и автореферат изложены технически грамотным языком, оформлены в соответствии с требованиями ВАК и ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автор использовал общепринятую научную горную терминологию, что делает полученный результат доступным широкому кругу специалистов. Выводы и рекомендации работы изложены четко.

9. Вопросы и замечания по диссертации и автореферату

1. Целью диссертационной работы является «разработка интеллектуальной системы»; однако разработка это процесс, а в качестве цели предпочтительно указывать результат исследований.

2. В поставленных задачах отсутствует анализ современного состояния вопроса, хотя в первой главе он выполнен в значительном объеме.

3. На стр. 13 текста диссертации говорится, что причины возникновения горных ударов имеют многофакторный характер. Какие типы входных данных

обучающей выборки, по Вашему мнению, могли бы увеличить точность выявления формирования опасных очагов прогноза?

4. Применим ли разработанный программно-методический комплекс для условий других удароопасных месторождений, например Хибинских апатит-нефелиновых месторождений?

5. Возможно ли развитие разработанной методики идентификации типа источника регистрируемых сигналов для классификации процессов разрушения в динамической форме: стреляний, толчков, микроударов, горных ударов?

6. Ранее на рудниках КФ АО «Апатит» для автоматизированной системы контроля горного давления «Prognоз – ADS» проводилась модернизация программного обеспечения «GeoAcoustics», что позволило производить фильтрацию шумов и идентификацию акустически активных зон. Чем принципиально отличается Ваш подход к категоризации событий от реализованного, какие дает преимущества?

7. Имеют место отличия в обозначениях и единицах измерений величин физико-механических свойств, использованных в работе. Например:

- в подписи к таблице 2.1 указано γ – вес пород $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- в шапке таблицы 2.2 γ используется для обозначения плотности $\frac{\text{т}}{\text{м}^3}$.

8. Наиболее эффективным для геодинамического мониторинга массива горных пород и прогноза удароопасности является применение комплекса методов. Было бы целесообразным обозначить в тексте диссертации, в комплексе с какими методами, по мнению автора, лучше всего работает сейсмоакустический мониторинг.

10. Заключение

Представленная на отзыв диссертационная работа Константина Александра Викторовича на тему «Разработка средств интеллектуального анализа данных в системе сейсмоакустического мониторинга удароопасности массива горных пород месторождения «Южное» выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических исследований, анализом большого объема накопленных данных, с использованием моделей машинного обучения разработана методика обнаружения и оценки очагов повышенного горного давления в удароопасном массиве горных пород.

Автор диссертационной работы успешно выполнил комплекс задач, связанных с заявленной тематикой, что подтверждает завершенность представленной к защите диссертационной работы.

Представленная к защите диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует требованиям, предъявляемым в п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, а её автор, Константинов Александр Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 - «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Отзыв ведущей организации рассмотрен и одобрен на научном семинаре Отдела Геомеханики Горного института ФИЦ КНЦ РАН «27» марта 2025 г. протокол № 03.

Руководитель отдела Геомеханики, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук по специальности 25.00.20 –
«Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»
Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН)
Адрес: 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24.
i.semenova@ksc.ru тел.8-81555-79-478

 31.03.2025

Семенова Инна Эриковна

Старший научный сотрудник, кандидат технических наук по специальности 2.8.6 –
«Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»
Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН)
Адрес: 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24.
s.zhukova@ksc.ru тел.8-81555-79-685

 31.03.2025

Жукова Светлана Александровна

Я, Семенова Инна Эриковна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

“31 марта” 2025 г.



Я, Жукова Светлана Александровна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

“31 марта” 2025 г.

