

УДК 622.83:550.83:004

ОПЫТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГОРНЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ ПРИ РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ*



А. Ю. АБРАШИТОВ¹,
директор



А. Н. ШАБАРОВ²,
директор, д-р техн. наук,
Shabarov_AN@spmi.ru



П. А. КОРЧАК¹,
начальник отдела развития ГГИС



А. Д. КУРАНОВ²,
зам директора, канд. техн. наук

¹ Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Россия

² Научный центр геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

В результате интенсификации и углубления фронта горных работ при добыче полезных ископаемых наблюдается изменение напряженно-деформированного состояния массива, что приводит к развитию деформационных процессов различной природы – приросту напряжений в тектонически напряженных структурах и возникновению более опасных растягивающих напряжений в тектонически разгруженных структурах.

Развитие деформационных процессов распространяется на горные выработки, что приводит к снижению темпов проходческих и добычных работ, материальным потерям, создает угрозу для жизни работников.

Для обеспечения заложенных проектными решениями темпов строительства горных предприятий и запланированных объемов добычи полезных ископаемых необходимо разрабатывать и применять специальные меры, направленные на своевременное выявление опасных геодинамических (геомеханических) зон, что позволит снизить риск возникновения негативного геодинамического события до приемлемого уровня.

Отмечено, что для обеспечения проектных темпов строительства горных предприятий и запланированных объемов добычи необходимо разрабатывать и применять специальные меры, направленные на своевременное выявление опасных геодинамических (геомеханических) зон. Приведены результаты исследований на эквивалентных материалах, а также численного моделирования по обоснованию критериев безопасности.

Ключевые слова: разработка месторождений, горный массив, напряженно-деформированное состояние, деформационные процессы, геомеханические модели

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.06

Одними из наиболее сложных в разработке с точки зрения геодинамической безопасности являются месторождения апатит-нефелиновых руд, обрабатываемые рудниками Кировского филиала (КФ) АО «Апатит» подземным способом.

Объект исследований

Руду добывают на шести месторождениях тремя добычными подразделениями: Кировским, Расвумчоррским (подземная добыча) и Восточным (открытая) рудниками (**рис. 1**). Разработку месторождений подземным способом ведут по системе с подэтажным обрушением и торцовым выпуском руды с принудительным обрушением вышележащей толщи пород. В год проходят несколько десятков километров новых горных выработок различного назначения [1–3].

По данным Горного института КНЦ РАН за годы отработки месторождений зафиксировано 92 крупных геодинамических явления, классифицированных как техногенные землетрясения, горно-тектонические удары, горные удары, микроудары и толчки. Факторы, влияющие на формирование данных событий, можно разделить на природные и техногенные. К природным факторам относят блочное геологическое строение, высокие тектонические напряжения, различие физико-механических свойств пород и руд, наличие тектонических нарушений различного порядка (**рис. 2**), сезонную обводненность и др. Техногенные обусловлены особенностями применяемой системы разработки [4–6].

До 2015 г. наибольшее развитие в КФ АО «Апатит» получили следующие методы оценки устойчивости состояния массива горных пород: мониторинг сейсмических процессов на основе автоматизированной системы контроля; определение параметров напряженно-деформированного состояния

*В работе принимали участие сотрудники Кировского филиала АО «Апатит» В. С. Онуприенко и А. А. Стрешнев; директор Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН И. Ю. Рассказов; сотрудники Научного центра геомеханики и проблем горного производства СПбГУ С. В. Цирель, К. В. Морозов, А. В. Сучилин, А. О. Розанов, В. А. Киселёв и М. Е. Мельницкая.



Рис. 1. Рудники Кировского филиала АО «Апатит»

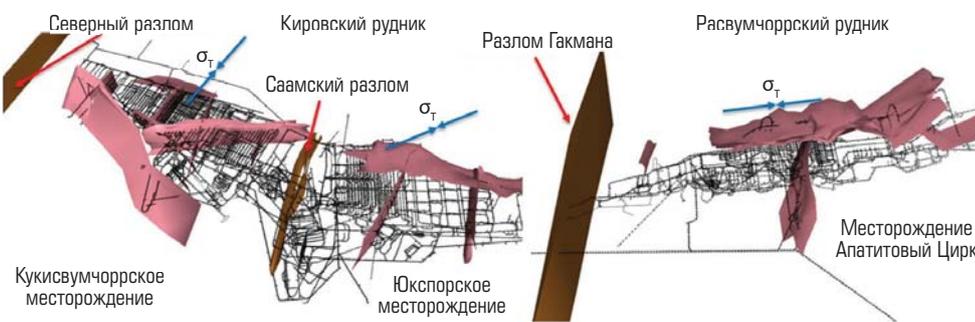


Рис. 2. Тектоническая схема разрабатываемых подземным способом месторождений:
 σ_T – вектор действующих в массиве напряжений (тензор напряжений)

массива горных пород в программном комплексе Sigma GT, основанном на численном моделировании методом конечных элементов (программа разработана ГоИ КНЦ РАН); локальные методы: визуальные наблюдения за состоянием массива, дискование керна, метод контроля разрушения скважин. Следует отметить, что применяемые методы не отвечали в полной мере требованиям по качеству оценки и прогноза развития геодинамической ситуации [7–9].

В 2015 г. руководством ПАО «ФосАгро» и КФ АО «Апатит» было принято решение о реализации «Комплексной программы инструментально-методических работ по обеспечению безопасной отработки месторождений апатит-нефелиновых руд АО «Апатит». Исполнителями программы стали специалисты Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета (НЦ ГиПП СПбГУ) [3], которые являются авторами нормативной и методической документации, научных рекомендаций, отраслевых инструкций и указаний для разработки месторождений, опасных и склонных к горным ударам, и имеют большой практический опыт внедрения решений в данной области [10–12].

Повышение уровня безопасности отработки месторождений апатит-нефелиновых руд на основании принятых последовательных решений по усовершенствованию оценки качества массива горных пород и повышению достоверности прогнозируемых геодинамических событий с использованием актуальных инструментов и средств геодинамического

и геомеханического мониторинга являлось конечной целью «Комплексной программы...».

Для успешной реализации проекта была разработана блок-схема обеспечения геодинамической безопасности для рудников КФ АО «Апатит» (рис. 3).

Исходя из приведенной блок-схемы, реализация проекта была разделена на несколько блоков.

1. Геодинамическое районирование, выбор местоположения опытного полигона для апробации элементов комплексной системы мониторинга состояния массива горных пород, разработка предложений по развитию уже существующих систем локального и сейсмического мониторинга.

2. Апробация и отладка работы элементов комплексной системы мониторинга, создание геомеханических моделей месторождений, расширение существующих систем локального и сейсмического мониторинга.

3. Разработка критериев опасности по данным систем комплексного мониторинга.

4. Создание и ввод в эксплуатацию программно-аппаратного комплекса безопасной отработки месторождений КФ АО «Апатит», отработка и корректировка критериев опасности [3].

Геодинамическое районирование месторождений, разработка геомеханических моделей

Геодинамическое районирование осуществляли поэтапно, за период 2015–2019 гг. выполнен весь комплекс работ

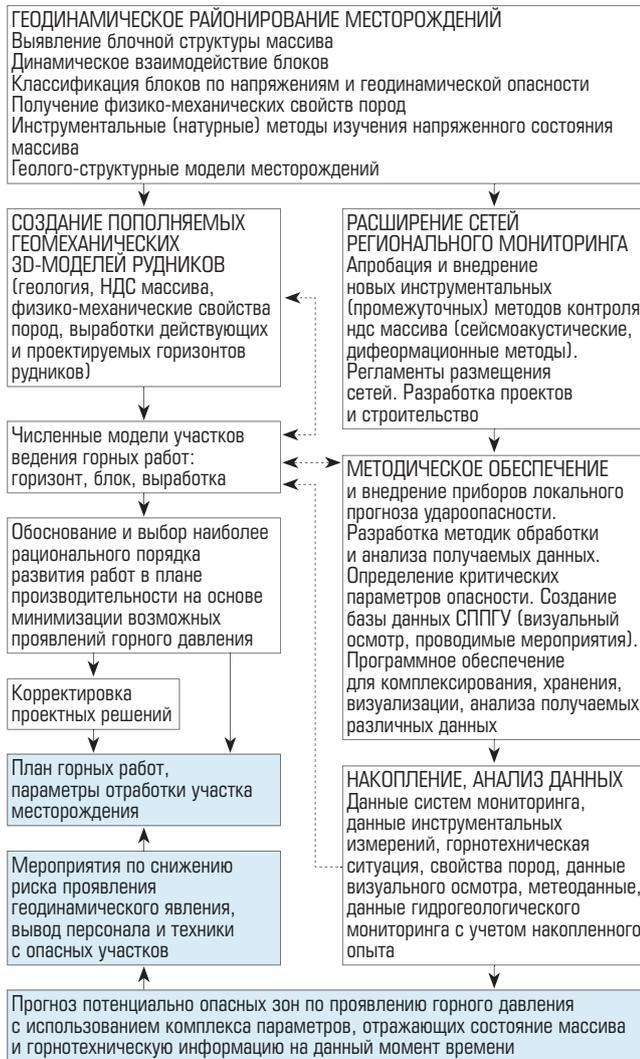


Рис. 3. Блок-схема обеспечения геодинамической безопасности на рудниках КФ АО «Апатит»

согласно методическим рекомендациям: морфоструктурный анализ поверхности; выделение разломов; картирование трещиноватости; выделение тектонически нагруженных и тектонически разгруженных зон; определение физико-механических свойств руды и пород; моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива методами численного моделирования; систематизация данных в блочные геомеханические модели [13–15].

Работы по морфоструктурному анализу поверхности, целью которого было выделение системы тектонических блоков и разделяющих их геодинамически активных разломов, проводили на основании комплексного изучения космофотопланов, топокарт и схем ранее выделенных разломов. В результате выполненных работ были составлены схемы основных элементов разрывной тектоники (разломы 1–4-го порядка) масштаба 1:50 000 для территории, включающей все обрабатываемые месторождения (рис. 4).

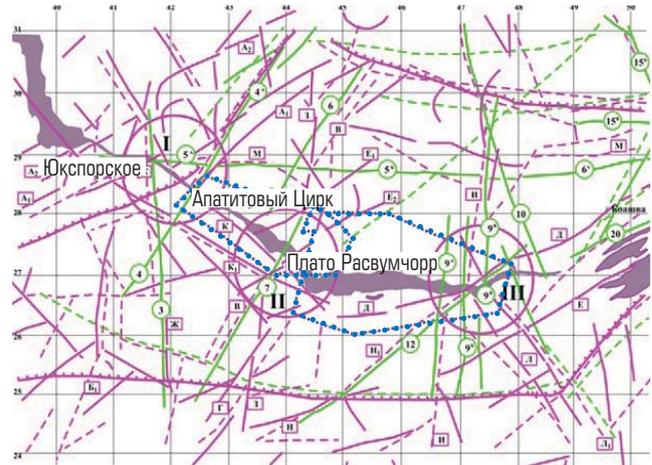


Рис. 4. Карта разломной тектоники горного отвода с выделенными разломами 2–4-го порядка
 I, II, III – тектонически наиболее напряженные узлы пересечения разломов трех и более направлений; синие линии – контур горного отвода; розовые линии – разломы II ранга; зеленые линии – разломы III–IV ранга

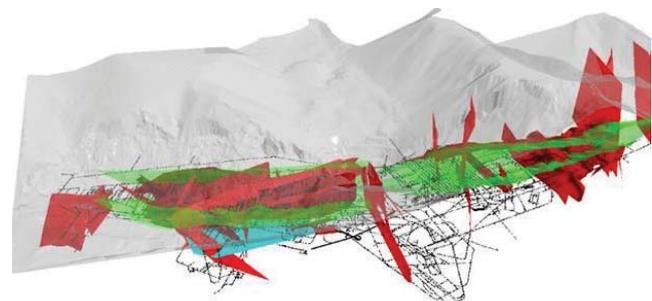


Рис. 5. Геолого-структурная модель Кировского рудника

Выделение разломов 4–7-го порядков проводили посредством анализа геологических планшетов, детального геологического картирования в подземных горных выработках и с помощью метода шахтной сейсмотомографии, который позволяет выявить как зоны пониженных скоростей (как правило, разгруженные трещиноватые зоны), так и зоны высоких скоростей (зоны наиболее прочных пород, тектонически нагруженные зоны, зоны с повышенной обводненностью).

По результатам проведенных работ специалистами Научного центра разработана геолого-структурная модель блочного строения месторождений КФ АО «Апатит» (рис. 5), включающая: рудные тела месторождений с планами отработки; тектонические нарушения; зоны интенсивной трещиноватости; вмещающие породы; поверхность рельефа.

Геомеханические модели месторождений КФ АО «Апатит» созданы на основе разработанных каркасных геолого-структурных моделей, геомеханической базы данных,

определения лабораторными методами физико-механических свойств горных пород. В соответствии с принятой на предприятии классификацией по нарушенности были рассчитаны значения показателя качества пород RQD и других рейтинговых показателей. Геомеханические характеристики массива пород интерполировали на соседние блоки методами ближайшего соседа и методом обратных расстояний с оценкой влияния тремя интерполяционными объемами (рис. 6). В дальнейшем выполняли расчет основных рейтинговых параметров RMR и Q.

Для уточнения ранее полученных результатов на основе разработанных моделей выполнена оценка влияния тектонических разломов на распределение напряжений в рудных телах (рис. 7).

Как показал анализ распределения напряжений, вблизи участков пересечения с тектоническими разломами, а также на участках значительного изменения геометрии рудных тел происходит существенное изменение напряженного состояния, и в связи с этим рудное тело можно условно разделить на блоки [6].

В настоящий момент созданы полнотельные геомеханические модели, включающие в себя основные расчетные параметры устойчивости массива; на их основании можно выполнять оценку состояния горного массива, своевременно разрабатывать соответствующие мероприятия и вносить корректировки в проектные решения [16–18].

Системы мониторинга геомеханических процессов

Вторым обширным направлением реализации «Комплексной программы...», выполненным совместно специалистами НЦ ГиПГП СПГУ, ИГД ДВО РАН, ОАО «Авангард», стал поиск, апробация и внедрение новых автоматизированных систем мониторинга опасных геодинамических процессов. Как показал анализ и опыт наблюдений на рудниках КФ АО «Апатит», применение одного сейсмического мониторинга недостаточно для обоснованных прогнозов. Необходимы дополнения в виде промежуточных методов – стационарного сейсмоакустического наблюдения на средних частотах и деформационного мониторинга.

Мониторинг деформационных процессов позволяет определять характер геомеханических явлений: высокой сейсмической активности соответствует сброс напряжений при

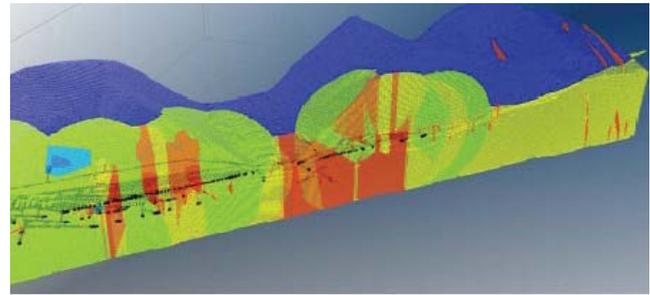


Рис. 6. Геомеханическая модель Кировского рудника по параметру RMR

нарастании деформаций, что относится к последствиям относительной безопасности; длительное накопление множеством событий упругой энергии может повлечь подготовку крупного динамического события при невысоких скорости и значениях деформаций.

Испытания автоматизированной сейсмоакустической системы контроля горного давления (АСКГД) Prognoz-ADS (разработка ИГД ДВО РАН) в условиях подземных рудников КФ АО «Апатит» были начаты в конце 2015 г. Применение системы контроля направлено на непрерывное получение сигналов импульсов сейсмоакустической эмиссии. Возникновение сейсмоакустических импульсов подтверждает наличие процессов упругого разрушения в массиве горных пород. Сейсмоакустическая система позволяет получать данные в частотном диапазоне 0,2–12 кГц и определять параметры характеристик акустических событий.

Участком для испытаний, выбран блок 7/10 Кукисвумчорского месторождения, характеризующийся сложными геологическим строением и геомеханическими условиями. В работах блока была развернута опытная система, состоящая из 12 сейсмоакустических датчиков, данные с которых через цифровые приемники-преобразователи поступали в подземную аппаратную (рис. 8), расположенную на горизонте откатки, где установлен коммуникационный шкаф и источники бесперебойного питания [11].

Наиболее представительные данные о характере изменения акустической активности горного массива были получены

Максимальные главные напряжения

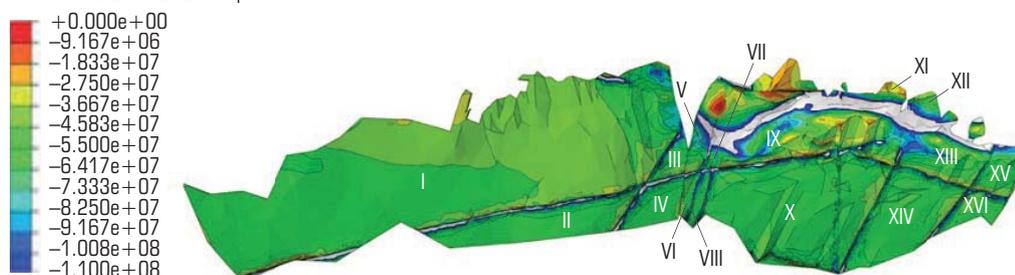


Рис. 7. Распределение наибольших главных напряжений в плане рудного тела Кировского рудника I–XVI – номера блоков



Рис. 8. Подземная аппаратная АСКГД

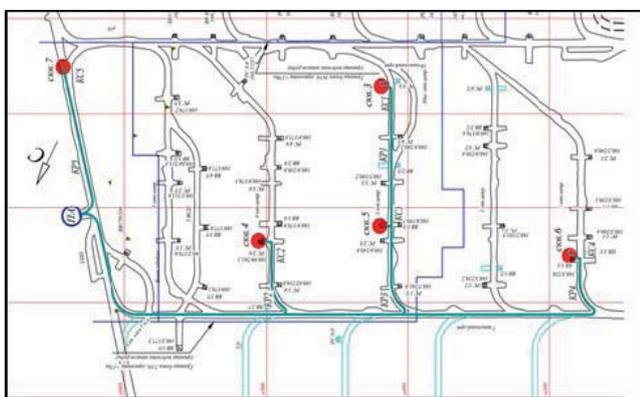


Рис. 9. Места установки датчиков СМД

в январе 2016 г. В этот период в пределах контролируемого АСКГД участка наблюдались рост числа сейсмоакустических событий и формирование акустически активной зоны. 27.01.2016 г. произошло сильное геодинамическое событие, в результате которого были разрушены кровля и стенки участков выработок.

В 2020 г. АСКГД Prognoz ADS развернута на Расвумчорском руднике для мониторинга активной тектонической зоны исследуемого горного массива, выявленного при выполнении геодинамического районирования. По данным сейсмической системы и АСКГД Prognoz ADS, в марте 2021 г. в контролируемой зоне был выявлен всплеск сейсмоактивности. Анализ горно-геологических, геомеханических данных показал, что параметры протекающих процессов аналогичны событиям, предшествующим крупному геодинамическому событию, произошедшему в начале 2018 г. На комиссии по горным ударам Расвумчорского рудника с участием специалистов НЦ ГиПП СПГУ были разработаны мероприятия по снижению риска возникновения геодинамического события до приемлемого уровня [19–21].



Рис. 10. Трехкомпонентный деформационный датчик ДД-3.1

Разработка, создание опытных образцов и развертывание системы деформационного мониторинга (СМД) на опытном участке Кировского рудника (рис. 9) выполнены специалистами НЦ ГиПП СПГУ в сотрудничестве с ОАО «Авангард».

Действие системы автоматизированного сбора данных деформационного мониторинга направлено на получение информации о протекающих деформационных процессах при статическом нагружении породного массива, а также динамическом движении структурных блоков. Система соответствует техническим требованиям, степени защиты и обеспечивает выдачу и формирование полученных сигналов с датчиков СМД в табличной и графической формах.

Параметр	Значение
Диапазон измерения перемещений вдоль осей x , y и z , мм	$-1 \dots +1$
Разрешающая способность перемещений вдоль осей x , y и z , мкм	10
Температурный диапазон среды для измерений, °C	$-5 \dots +20$
Относительная влажность воздуха, %	30–95
Напряжение питания датчиков, В	12
Потребляемая мощность датчика, Вт, не более	2
Напряжение питания датчиков, В	12
Потребляемая мощность одним датчиком, Вт, не более	2
Тип выходного сигнала устройства	RS-485
Степень защиты корпуса	IP66

Для системы разработаны трехкомпонентные деформационные датчики ДД-3.1, ДД-3.2 (рис. 10), которые размещают в горизонтальных скважинах со следующими параметрами: расстояние от почвы выработки до устья скважины 1,5 м; диаметр скважины 0,076–0,079 м; глубина скважины 15 м.

Таким образом, датчик находится вне зоны влияния краевой части выработки и служит для оценки процессов деформирования массива горных пород, вызванных изменениями горнотехнических условий отработки месторождения.

Кроме датчиков, в состав аппаратно-программной части СМД входят:

- аппаратура для регистрации и обработки сигналов, поступающих с датчиков деформаций (скважинных накопителей, сервера обработки данных СМД);



Рис. 11. Внешний вид прибора Prognoz-L

- линии передачи данных, соединяющие датчики с сервером, установленном в подземном павильоне;
- аппаратура для удаленного доступа с СМД;
- программные средства СМД: система визуализации «Мониторинг СМД».

Методика наблюдений предусматривает непрерывный режим работы датчиков, линий передачи данных и системы удаленного доступа. Считывание показаний датчиков проводят с минимальным интервалом от 1 мин. Максимальный интервал устанавливается оператором СМД и не должен превышать 2 ч. Входными параметрами СМД являются: местоположение установочных скважин; номера скважин и датчиков; время и глубина установки датчиков. Выходными параметрами СМД служат: значения деформаций по трем ортогональным направлениям (x – вертикальное направление, y – направление в горизонтальной плоскости, перпендикулярное оси скважины, z – направление вдоль оси скважины); время снятия сигнала, температура датчика.

Результаты работы СМД показали, что тренд изменения показаний датчиков соответствует ожидаемым в заданных условиях и отражает характер деформирования стенок скважин при превалировании горизонтальных напряжений. Аналогичные результаты получены с помощью численного моделирования. Установлен уровень деформаций, который можно рассматривать как пороговое значение, характеризующее возможность динамических проявлений горного давления в выработках.

Локальный мониторинг

Согласно утвержденным на момент запуска «Комплексной программы...» «Указаниям по безопасному ведению горных работ на месторождении, склонном и опасном по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения)», служба прогноза и предотвращения горных ударов должна применять следующие методы локального прогноза удароопасности:

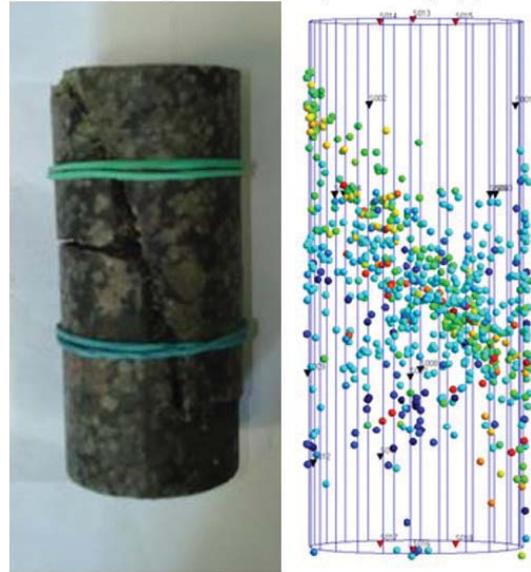


Рис. 12. Результаты лабораторных испытаний образца пегматоидного уррита с апатитом (слева) и распределение гипоцентров АЗ (справа)

- визуальные наблюдения;
- установление удароопасности горных выработок методом дискования зерна (МДК) по результатам измерений толщины дисков;
- выявление удароопасности по контрольным испытаниям разрушения стенок (КРС) шпуров и скважин.

Как было отмечено выше, перечисленные методы обладают некоторыми недостатками – являются либо излишне субъективными, либо трудозатратными и небезопасными для персонала.

Одним из методов, исключая перечисленные недостатки, является метод акустической эмиссии (АЭ). Апробацию и внедрение акустического прибора Prognoz-L (рис. 11), разработку методики определения удароопасности проводили в тесном сотрудничестве с разработчиком и производителем – ИГД ДВО РАН.

Для разработки необходимых алгоритмов фильтрации и шумоподавления за период опытной эксплуатации проведены и детально проанализированы порядка 300 акустических измерений как от машин и механизмов, так и от процессов развития зон хрупкого разрушения на контуре горных выработок в различных геолого-технических условиях [22–25].

Обоснование акустико-эмиссионных критериев начала критической стадии трещинообразования проводили согласно методике лабораторных испытаний в условиях всестороннего давления на образцах зерна горных пород всех категорий прочности (рис. 12, 13) [10].

В результате исследований для каждого литотипа пород были установлены параметры АЭ, на основании которых

осуществляется экспресс-оценка удароопасности горного массива – число сигналов АЭ за 15 с по каналу 1, усредненному по всему интервалу измерения T , $N_{АЭ}^1$:

$$N_{АЭ}^1 = \frac{1}{T/15} \sum_1^{T/15} (N_{\Sigma} \cdot 15 \text{ с})$$

и амплитудное распределение b -фактора:

$$b = \lg \frac{N_{АЭ}^1}{N_{АЭ}^2} / \lg \frac{A_1}{A_2},$$

где $N_{АЭ}^1$ и $N_{АЭ}^2$ – значения числа сигналов АЭ за 15 с по каналам 1 и 2, усредненные по всему интервалу времени измерения; A_1 и A_2 – пороговые значения амплитуд АЭ по 1-му и 2-му каналам.

Программный комплекс прогноза возникновения геодинамических явлений с применением искусственных нейронных сетей

При решении задачи прогноза мест и факта возникновения сильного геодинамического события на любом горнодобывающем предприятии исходными данными для работы нейронной сети являются карты изменчивости значений факторов, влияющих на появление исследуемого явления. Результатами работы нейронной сети являются карты вероятности возникновения исследуемого события. В силу больших трудозатрат и значительного объема вычислительных и графических работ операции для прогноза преимущественно выполняют с использованием специального программного обеспечения [26–28].

Для решения задачи совместного анализа данных на подземных рудниках КФ АО «Апатит» использован программный комплекс Advangeo®. Он представляет собой программное обеспечение, разработанное для моделирования и анализа пространственных данных с использованием искусственного интеллекта. Комплекс состоит из базы данных (БД) и геоинформационной системы (ГИС). Базы данных управляют параметрами нейронной сети и моделируют метаданные, которые хранятся в Microsoft SQL Server. ГИС-компонент представляет собой дополнение к программе ArcGIS версии 10.0 компании ESRI.

В процессе подготовки исходных данных для обучения были выявлены следующие факторы, влияющие на вероятность происхождения геодинамического события:

- расстояние до проекции фронта очистных работ;
- расстояние до контура подготовительной выработки;
- расстояние до тектонического нарушения;
- расстояние до контура висячего бока рудного тела;
- плотность сейсмических событий естественного происхождения;
- энергия сейсмических событий естественного происхождения;
- категория пород по трещиноватости;

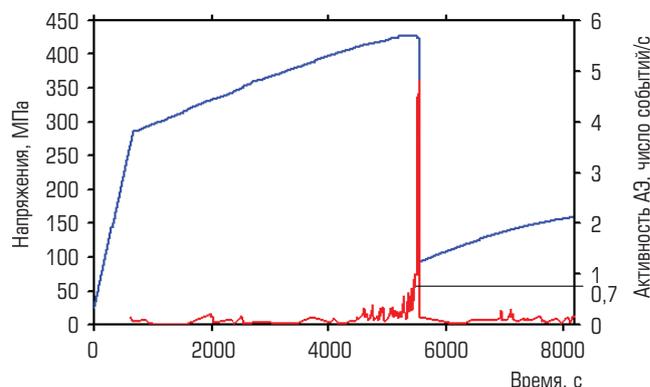


Рис. 13. Сопоставление изменения напряжения и активности АЭ

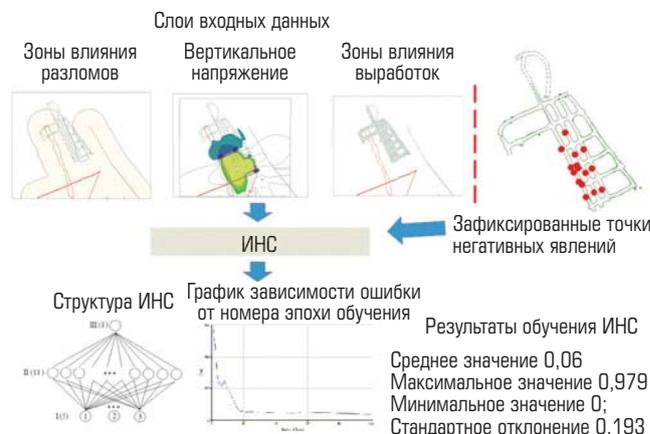


Рис. 14. Основные элементы процесса обучения сети для трех учитываемых факторов

- показатель качества пород;
- глубина от поверхности до горизонта работ.

Принцип использования разных наборов факторов обеспечил применение нейронных сетей для осуществления прогноза в условиях неравномерного распределения данных о количественных значениях влияющих факторов как для ретроспективного анализа в процессе обучения сети (рис. 14), так и для прогноза [29–31].

Для обучения искусственной нейронной сети (ИНС) в качестве исходного материала были приняты горно-геологические объекты, расположенные на опытном участке, на котором были установлены системы сейсмоакустического и деформационного мониторинга. Указанный участок был выбран в качестве области обучения в силу того, что все вышеуказанные факторы имели непрерывное представление на исследуемой территории в рамках имеющегося картографического материала.

Внутри данной области по карточкам горных ударов были отмечены места зафиксированных опасных явлений (горных

ударов) и тектонических нарушений (рис. 15). В процессе подготовки исходных данных для обучения также были созданы следующие карты: карта изменчивости главного напряжения; карта плотности сейсмических событий за прошедший период [32, 33].

По результатам обучения ИНС была выполнена проверка ее работоспособности. Для этого было выполнено прогнозирование возникновения опасных явлений на горизонте по вышеперечисленным факторам.

По результатам исследований выработан алгоритм формирования прогнозных карт возникновения опасных геодинамических явлений на принятых к анализу участках ведения работ.

Передаваемые результаты прогноза в формате электронных таблиц могут быть визуализированы заказчиком посредством любого средства геологического моделирования, САД-системы или другого аналогичного программного обеспечения.

Заключение

Кроме вышеперечисленных работ, выполнен большой объем исследований на эквивалентных материалах, путем численного моделирования и т. д., направленных на обоснование критериев безопасности [34–37].

Несмотря на повышение интенсивности горных работ, рост горного давления с глубиной отработки, внедрение современных методов прогноза опасных динамических явлений и разработанных программных средств, систем мониторинга позволяет оперативно реагировать на изменение геодинамического режима, разрабатывать профилактические мероприятия. Это даст возможность предотвратить развитие более серьезных катастрофических ситуаций, приводящих к масштабным нарушениям в горных выработках, вплоть до остановки технологического процесса. Отмечен экономический эффект от реализованных мероприятий и своевременно принятых

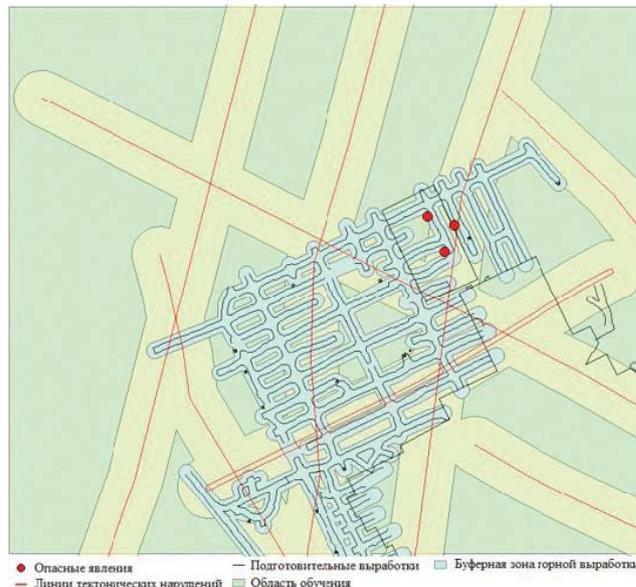


Рис. 15. Область обучения на опытном участке

управленческих решений с помощью обозначенных инструментов. Качественный эффект также очевиден: например ранее анализ причин возникновения крупных геодинамических событий занимал несколько недель, а теперь благодаря внедренным инструментам реализация мероприятий составляет несколько дней.

Библиографический список

См. англ. блок.

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 40–48
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.06

Dealing with geodynamic safety challenges in cooperation with a mining company: A case-study

Information about authors

A. Yu. Abrashitov¹, Director

A. N. Shabarov², Director, Doctor of Engineering Sciences, Shabarov_AN@spmi.ru

P. A. Korchak¹, Head of MGIS Development Department

A. D. Kuranov², Deputy Director, Candidate of Engineering Sciences

¹Apatit's Division in Kirovsk, Kirovsk, Russia

²Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Intensification and growing depth of mining induces changes in the stress–strain behavior of rock mass, which initiates deformation processes of various nature. In order to provide the project rates of mine construction and the planned production output, it is required

to develop and apply special measures aimed at the prompt detection of hazardous geodynamic (geomechanical) zones.

The article describes the implemented package of activities on updating geological structure features of mineral deposits being in operation at Apatit's Division in Kirovsk, construction of a geoinformation model including geomechanical and geodynamic peculiarities, testing of equivalent materials, as well as numerical modeling aimed to validate safety criteria for different geological conditions. A pilot testing routine of deformation and seismic monitoring systems and portable rockburst hazard devices is implemented. Specific weights of influence are obtained for each external factor under analysis in the bulk of the processed data on a rock burst probability. A procedure to predict points of hazardous geodynamic events in underground openings using artificial neural networks is developed and tested. The introduction of the proposed tools can enable prevention of hazardous situations which can lead to large-scale damages in mine up to shutdown of a production process. The article highlights the economic effect of the implemented activities and promptly made managerial decisions.

The authors appreciate participation of V. S. Onuprienko and A. A. Streshnev from Apatit's Division in Kirovsk, I. Yu. Rasskazov, Director of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far East Branch RAS, as well as S. V. Tsirel, K. V. Morozov, A. V. Suchilin, A. O. Rozanov,

V. A. Kiselev and M. E. Melnikskaya from the Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems in the studies.

Keywords: mineral mining, rock mass, stress–strain behavior, deformation processes, geomechanical models.

References

1. Abrashitov A. Yu., Korchak P. A., Sinegubov V. Yu. Basic trends of stability development in underground mines of Apatit. *Innovations in Mine Design and Planning. Geomechanical Support of Mine Design and Mining Supervision: VIII International Conference Proceedings*. Saint-Petersburg : Sankt-Peterburgskiy gorniy universitet, 2017. pp. 423–428.
2. Kozyrev A. A., Semenova I. E., Zhukova S. A., Zhuravleva O. G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact. *Gornaya promyshlennost*. 2022. No. 6. pp. 95–102.
3. Guryev A. A. Sustainable development of crude ore resources and beneficiation facilities of JSC Apatit based on best engineering solutions. *Journal of Mining Institute*. 2017. Vol. 228. pp. 662–673.
4. Geodynamic zoning of subsoil : Guidelines. Leningrad : VNIMI, 1990. 128 p.
5. Shabarov A. N., Zamorkina Yu. V., Popov A. L., Bagautdinov I. I. Integrated approach at geodynamic zoning of mine fields. *GIAB*. 2018. Special issue 49. Underground coal mining in the 21st century-2. pp. 496–506.
6. Bagautdinov I., Kuranov A., Belyakov N., Streshnev A. The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite-nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state. *Problems of Complex Development of Georesources : Proceedings of VII International Scientific Conference. E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 56. 01019. DOI: 10.1051/e3sconf/20185601019
7. Galaov R. B., Kisel A. A., Andreev A. A., Zubkov V. V. Pre-stopping assessment of stress state of ore body S-2 in Skalistaya Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 7. pp. 10–14. DOI: 10.17580/gzh.2016.07.02
8. Vilner M., Nguen T. T., Korchak P. The assessment of the roof beam stability in mining workings. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues : Proceedings of the Russian–German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*. London : Taylor & Francis Group, 2020. pp. 53–57.
9. Gospodarikov A. P., Morozov K. V., Revin I. E. A method of data interpretation in seismicity and deformation monitoring in underground mining in terms of the Kukisvumchorr deposit of Apatit company. *GIAB*. 2019. No. 8. pp. 157–168.
10. Rozanov A., Petrov D., Gladyr A., Tereshkin A., Samoilov V. et al. Acoustic Emission Method of Rock Burst Risk Assessment. *Proceedings of the 81st EAGE Conference and Exhibition 2019*. London, 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901152
11. Rasskazov I. Yu., Fedotova Yu. V., Anikin P. A., Sidlyar A. V., Korchak P. A. Improvement of the automated system of geomechanical monitoring and early prevention of dangerous geodynamic phenomena. *GIAB*. 2022. No. 12-1. pp. 106–121.
12. Protosenya A., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37, No. 2. pp. 137–147.
13. Panzhin A. A., Panzhina N. A. Research of short-period geodynamics of rock array of Kachkanar mining and processing plant. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2020. No. 2. pp. 318–329.
14. Kemkin I. V., Grebennikov A. V., Ma X. N. Geodynamic Setting on the Paleo-Asia Continent Eastern Margin in the Paleocene. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1079, No. 7. 072008. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/7/072008
15. Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Kondrashov I. A. Early Cimmerian volcano-plutonic formations of the Sadon group of polymetallic deposits in North Ossetia: Geodynamic typification and minerageny. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2022. Vol. 12, No. 2. pp. 6–18.
16. Akıncı A. C., Nurlu N., Güney A. Origin and geodynamic implications of basaltic rocks intercalated with Miocene turbidites around the İskenderun Basin (Eastern Mediterranean / Turkey). *Journal of African Earth Sciences*. 2023. Vol. 198. 104780. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2022.104780
17. François C., Debaille V. The geodynamic evolution of Earth viewed by the PTt record of metamorphic rocks. *Geosciences Made in Belgium : Proceedings of the 7th International Geologica Belgica Meeting*. Brussels : Geologica Belgica, 2021. Vol. 4. pp. 49–50.
18. Mvodo H., Ganno S., Gus Djibril Kouankap Nono, Fossi D. H., Philomene Estelle Nga Essomba et al. Petrogenesis, LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geodynamic implications of the Kribi metavolcanic rocks, Nyong Group, Congo craton. *Acta Geochimica*. 2022. Vol. 41, Iss. 3. pp. 470–495.
19. Morozov K. V. Creation of rock mass monitoring deformations systems on rock burst hazardous mineral deposits. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development—Full Papers : Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering*. London : CRC Press, 2019. Vol. 6. pp. 1318–1323.
20. Gospodarikov A. P., Morozov K. V., Revin I. E. Analysis of the time series of seismic and deformation monitoring, obtained from closed works at the Kirovsky mine of JSC "Apatite". *International Journal of Engineering & Technology*. 2020. Vol. 9, No. 2. pp. 568–571.
21. Gospodarikov A. P., Revin I. E., Morozov K. V. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorr deposit of AO Apatit. *Journal of Mining Institute*. 2023. DOI: 10.31897/PMI.2023.9
22. Makeev V. M., Pikulik E. A., Guseitsev A. S. Neotectonic structures and modern geodynamics of the middle flow region of the Don river (the territory of the Novovoronezh nuclear power plant). *Izvestiya vuzov. Gorlogiya i razvedka*. 2022. No. 1. pp. 75–87.
23. Sukhov V. V., Suyarko V. G., Chuenko O. V. On connection of modern geodynamic processes in carbonate rocks with tectonic activation of Petriv's'k-Kreminna fault. *Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo universiteta im. V. N. Karazina. Ser. Geologiya. Geografiya. Ekologiya*. 2017. No. 46. pp. 56–61.
24. Okpoli C. C., Oladunjoye M. A., Herrero-Bervera E. Geodynamics of Precambrian Rocks of Southwestern Nigeria. London : IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.104668
25. Korchak P. A. Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass. *GIAB*. 2021. No. 5. pp. 85–98.
26. Bagautdinov I. I., Belyakov N. A., Sevryukov V. V., Rasskazov M. I. Hardening soil model in prediction of plastic deformation zone in soft rock mass of Yakovlevo iron ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 12. pp. 16–21. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.03
27. Shong-Loong Chen, Shen-Chung Lee, Yu-Syuan Wei. Numerical Analysis of Ground Surface Settlement Induced by Double-O Tube Shield Tunneling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30, Iss. 5. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000732
28. Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V., Trushko V. L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2022. Vol. 32, Iss. 1. pp. 113–119.
29. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Dvoynikov M. V., Buslaev G. V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 244. pp. 428–438.
30. Bartashchuk O., Suyarko V. Geodynamics of formation of the transition zone between the Dnieper-Donets basin and the Donbas foldbelt. Tectonic regimes and kinematic mechanisms of inversion. *Geodynamics*. 2021. Vol. 1(30). pp. 25–35.
31. Zubov V. P., Phuc L. Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 795–806.
32. Zubov V. P., Golubev D. D. Prospects for the use of modern technological solutions in the flat-lying coal seams development, taking into account the danger of the formation of the places of its spontaneous combustion. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 534–541.
33. Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. pp. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02
34. Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 162–166.
35. Zuev B. Yu. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 542–552.
36. Zubkov V. V., Zubkova I. A., Andreev A. A. Geomechanical justification of working off of a deposit of copper-bearing ores of the October field. *Marksheyderskiy vestnik*. 2013. No. 4(96). pp. 29–31.
37. Tsirel S. V., Pavlovich A. A., Melnikov N. Ya., Idiyatullin M. M. The joint use of physical and numerical modeling in assessing the stability of the pit walls with a complex structure. *GIAB*. No. S21. pp. 3–12.