



ПРОГНОЗ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ УДАРООПАСНОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

X ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С УЧАСТИЕМ ИНОСТРАННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ
(Апатиты, 15-19 июня 2026 г.)

ТЕЗИСЫ
ДОКЛАДОВ

АПАТИТЫ
ИЗДАТЕЛЬСТВО КНЦ РАН
2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

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

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН

**«ПРОГНОЗ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ
УДАРООПАСНОСТИ
ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ»**

X Всероссийская научно-техническая конференция
с участием иностранных специалистов

(Апатиты, 15–19 июня 2026 г.)

Тезисы докладов

Апатиты
Издательство Кольского научного центра РАН
2026

УДК 622.2:622.8
ББК 33н
П78

Редакционная коллегия:
В. В. Рыбин (отв. редактор), И. Э. Семенова,
Н. Н. Кузнецов, М. С. Кулькова, Н. В. Бугаенко

«Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ».
П78 X Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов (Апатиты, 15–19 июня 2026 г.) : тезисы докладов. — Апатиты : Издательство Кольского научного центра РАН, 2026. — 68 с. : ил.

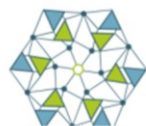
ISBN 978-5-91137-571-3

В сборник включены тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ» (Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, 15–19 июня 2026 г.). Представлены материалы, посвященные обсуждению современных достижений в области обеспечения геодинамической безопасности, комплексного мониторинга геомеханических процессов, разработки эффективных технологических решений при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях.

Материалы сборника могут представлять интерес для широкого круга исследователей и инженеров, аспирантов и студентов высших учебных заведений, занимающихся научными и практическими проблемами безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых.

УДК 622.2:622.8
ББК 33н

Конференция проведена при поддержке:



ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Информационные партнеры:



ISBN 978-5-91137-571-3
DOI:10.37614/978.5.91137.571.3

© Горный институт КНЦ РАН, 2026
© ФИЦ «Кольский научный центр РАН», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Багаутдинов И.И., Шабаров А.Н. Обоснование новой классификации горных ударов и механизма их возникновения	5-6
Билин А.Л., Калюжный А.С. Геомеханические резервы оптимизации конструкции борта карьера на этапе доработки месторождения	7-8
Бирючев И.В., Ожиганов И.А. Оценка объемов материалов крепления при планировании горных работ на основе геомеханических моделей	9-11
Борисенко Э.В., Богоудинов Р.М., Рыжков М.Ф. Опыт применения локальных способов предотвращения динамических явлений для обеспечения безопасности разработки угольных пластов Донбасса	11-12
Бурдинская А.А., Потапчук М.И., Сидляр А.В. Моделирование геомеханических процессов при отработке нижних горизонтов месторождения Фестивальное	13-14
Еременко А.А., Хмелинин А.П. Экспериментальные основы прогноза горных ударов на рудных месторождениях Горной Шории	15
Еременко В.А., Косырева М.А. Оценка устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m и расчет параметров динамической крепи выработок	16-19
Жабко А.В., Жабко А.А. Показатель удароопасности горных пород	19-21
Жиров Д.В. Стадийность в исследованиях геолого-структурных неоднородностей в целях обеспечения геодинамической безопасности освоения месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом	21-23
Иванов А.С., Розанов И.Ю. Интеграция данных БВС-съемок и блочного моделирования для мониторинга устойчивости бортов карьеров	23-24
Калюжный А.С. Комплексная методика оценки устойчивости бортов карьеров в массивах прочных скальных пород с учётом сдвиговых характеристик структурных ослаблений	24-25
Криницын Р.В. Управление горным давлением при отработке мощных рудных месторождений	25-27
Кузнецов М.А. Стратегия и инструменты оценки стабильности опорных пунктов при изучении современных горизонтальных движений земной коры на локальных полигонах спутниковыми методами	27-28
Кузнецов Н.Н., Кулькова М.С. Анализ изменения трещиноватости горных пород и их физико-механических свойств с глубиной на примере Хибинского массива	28-30
Лавриков С.В., Лукичев С.В. Моделирование выпуска горной массы с использованием стохастической модели клеточных автоматов	30-32
Ломов М.А., Книга К.О. Динамические проявления горного давления на руднике Южный (Приморский край)	32-33
Морозов И.А., Токсаров В.Н. Оценка уровня напряжений в соляных породах методом дисконирования керна	34-35
Назарчук О.В. Прогнозирование образования застойных зон в глубоких карьерах с помощью трехмерного моделирования	35-36
Никитенко А.С., Калашник А.И. Взаимосвязь твердотельных лунно-солнечных приливов и трендов деформирования подрабатываемого массива горных пород	37
Панжин А.А., Панжина Н.А. Исследование современных геодинамических движений территории Кольского полуострова и Карелии	37-38

Панжин А.А., Панжина Н.А. Система деформационного мониторинга прибортового массива при ведении открытых горных работ	39-40
Потапчук М.И., Рассказов И.Ю., Сидляр А.В., Бурдинская А.А. Моделирование геомеханических процессов в природно-технических системах удароопасных месторождений Дальневосточного региона	40-42
Рассказов И.Ю. Методы и средства геомеханического мониторинга для предупреждения горных ударов и снижения геодинамического риска . . .	43-44
Романевич К.В., Мулев С.Н. Разработка модели машинного обучения на основе мультимодальных данных для прогнозирования удароопасности на рудниках Октябрьского и Талнахского месторождений	44-46
Рукавишников Г.Д. Особенности сейсмического отклика массива горных пород на технологические взрывы для различных систем разработки	46
Рыбин В.В. Методический подход к выявлению областей потенциальной неустойчивости при ведении горных работ открытым способом в массивах скальных пород	47-48
Санфиоров И.А., Нежданов В.М., Богданов Р.А. Горнотехнические приложения шахтной сейсморазведки	48-50
Семенова И.Э. Геомеханические исследования как основа безопасности горных работ при освоении рудных месторождений европейской части Арктической зоны РФ	50-51
Семенова И.Э., Аветисян И.М. Оценка условий развития обрушения подработанных пород на месторождениях Хибинского массива	51-53
Семенова И.Э., Дмитриев С.В., Аветисян И.М. Направления развития программного комплекса SigmaGT	53-54
Семенова И.Э., Жукова С.А., Чернобров Д.С. Выявление аномалий сейсмичности в окрестности карьера на основе пространственно-временных параметров сейсмического процесса	54-55
Семенова И.Э., Константинов К.Н., Кулькова М.С., Старцев Ю.А. Оценка склонности горных пород и руд Оленегорского месторождения к горным ударам комплексом инструментальных методов	56
Синегубов В.Ю., Максимов А.Б. Научно-методическое обоснование шахтных испытаний динамических анкерных крепей воссозданием динамических нагрузок взрывом и их результаты на рудниках Хибин	57-58
Соколов И.В. Геотехнологические и геомеханические исследования – основа технологических инноваций при освоении месторождений твердых полезных ископаемых	58-59
Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Перспективы использования метода целевой разгрузки для подземного геомеханического мониторинга	59-61
Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Прогноз удароопасности при отработке наклонных золоторудных жил на больших глубинах	61-63
Целовальникова О.Н. Пример реконструкции параметров тензора напряжений кинематическим методом	63-64
Чуприн К.Э. Обоснование параметров каркасной горной конструкции для условий подземной разработки месторождения Джеруй штокверкового типа по результатам комплексного изучения объекта	65-66
Ярославцев А.Г., Жикин А.А., Ахматов А.Е. Прогноз потенциально опасных зон при ведении горных работ в соляных рудниках способом «Инсейс»	67-68

Багаутдинов И.И., Шабаров А.Н.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Bagautdinov_I@pers.spmi.ru

ОБОСНОВАНИЕ НОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГОРНЫХ УДАРОВ И МЕХАНИЗМА ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Геодинамические события на месторождениях отечественных и зарубежных горнодобывающих предприятий оказывают весьма негативное влияние на производственные процессы, которые в настоящее время все более склоняются к циклично-поточным технологиям.

Геодинамическое событие – внезапное и интенсивное разрушение массива горных пород, сопровождающееся выделением энергии, которое происходит в результате ее накопления в горной породе.

Таким образом, толчки, микроудары, горные удары, горно-тектонические удары и техногенные землетрясения рассматриваются авторами как формы проявления геодинамических событий. В российской нормативной практике различие между этими формулировками лежит скорее в юридической, а не технической плоскости.

Первые исследования горных ударов на угольных месторождениях нашей страны начались лишь во второй половине XX в. В 1992-1994 гг. международной группой специалистов была разработана единая классификация динамических явлений на основе энергетической теории горных ударов. К этому времени И.М. Петуховым были предложены и обоснованы два основных механизма горных ударов, которые вполне согласовывались с разработанной классификацией. Специалисты, занимающиеся в настоящее время проблемой горных ударов, отмечают, что указанные положения не отвечают современным представлениям о горно-тектонических ударах и их механизме, не учитывают специфику рудных месторождений, их структурные особенности.

Анализ энергии и координатной привязки гипоцентров крупных сейсмических событий на месторождениях Хибинского массива, карточек горных ударов, а также причин их возникновения поставил перед авторами исследования аналогичный вопрос.

Для установления причин возникновения геодинамических событий в качестве основного метода исследований авторы применяли анализ данных натуральных наблюдений за интенсивными геодинамическими событиями, которые проявляются в форме горных ударов и горно-тектонических ударов. В качестве экспериментальной базы для доказательства выдвинутых предположений и критериев приняты задокументированные случаи горных ударов на Хибинских месторождениях в период с 1980 по 2024 гг. [1].

На основе анализа результатов статистической обработки данных установлено, что процентное соотношение сейсмических событий, приуроченных к протяженным дайкам составляет от 41,4 до 61,5%. При увеличении энергии сейсмических событий больший их процент стремится произойти в районе обозначенных структурно-тектонических нарушений [2]. Результаты исследований хорошо согласуются с данными работы [3], где в статистический объем анализа включены все подсеченные тектонические нарушения на месторождениях.

Причиной горного удара в этом случае является сочетание высокопрочных даек в массиве вмещающих пород с высоким уровнем тектонических напряжений. В таблице 1 представлен вариант классификации горных ударов для удароопасных месторождений Хибин с учетом выделения новых факторов удароопасности [1].

Таблица 1 — Классификация горных ударов по механизму возникновения [1]

Основные причины и процессы	Механизм возникновения		
	Класс 1	Класс 2	Класс 3
	Горный удар	Горно-тектонический удар	Горный удар в районе дизъюнктивного нарушения
Расположение гипоцентра события	В районе возникновения геодинамического события	На удалении от зафиксированного очага разрушения	В дизъюнктивной области либо непосредственно в дайке
Напряженное состояние массива	$\sigma_{\theta} / \sigma_c \geq 0,56$	$\sigma_r / \sigma_a > 2$	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$
Физико-механические свойства образца/массива	$E_R / M_R < 1$	Отсутствие открытых трещин, зоны дробления и других нарушений вблизи сместителя	$E_d F / E_m F < 1$
Горно-геологические условия	Массив горных пород, склонный к хрупкому разрушению	Тектоническое нарушение дизъюнктивного типа в массиве горных пород	Дайка высокой прочности или в сочетании с тектонизированными контактами. Интрузивные взаимопересечения, преимущественно под острыми углами
Проявления опасного геомеханического состояния массива	Характерный треск породы, стрельание, выброс горной массы	Сдвиг со смещением по поверхности ослабления не менее III-IV ранга, часто сопровождается катастрофическими последствиями, включающими разрушение горной выработки, очистного блока или потерю целого горизонта	Выброс горной породы в районе залегания даек различного генезиса, в том числе скрытых

Примечания: σ_1, σ_3 – максимальные и минимальные главные напряжения; σ_{ci} – прочность породы в образце при испытании в условиях одноосного сжатия; m_b, s, a – эмпирические параметры критерия прочности Хука – Брауна; σ_c – предел прочности горной породы на одноосное сжатие (в образце); σ_{θ} – тангенциальное напряжение; σ_r – горизонтальная составляющая напряжений в массиве; σ_v – вертикальная составляющая напряжений в массиве; E_R – модуль упругости образца породы; M_R – модуль спада образца породы; E_d – модуль деформации дайки; E_m – модуль деформации вмещающих пород; F – площадь контакта дайки и вмещающих пород в зоне опорного давления.

Таким образом, авторами настоящей работы предлагается объяснить механизм горных ударов в районе залегания даек или в сочетании с тектоническими нарушениями дизъюнктивного типа с позиций теории жестких прессов. Геолого-структурные нарушения рассматриваются в данном случае с точки зрения их потенциальной возможности накапливать потенциальную энергию в результате очистных работ или перераспределения напряжений в массиве горных пород, а также с учетом их прочностных и деформационных свойств.

Список использованных источников:

1. Багаутдинов И.И., Шабаров А.Н. Исследование особенностей формирования удароопасности в зонах тектонических нарушений Хибинских месторождений // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 30-40. EDN IOOQPZ.
2. Bagautdinov I.I., Loktyukova O.Y., Shabarov A.N. (2025). Rock bursts and correlation with geological structures in rock mass. Gornyi Zhurnal, 2025(3), 53-60. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.08>.
3. Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 95-102. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-95-102.

Билин А.Л., Калюжный А.С.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: a.bilin@ksc.ru, a.kalyuzhny@ksc.ru

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ БОРТА КАРЬЕРА НА ЭТАПЕ ДОРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

На завершающем этапе эксплуатации глубоких карьеров возникает возможность дополнительной корректировки конечного контура за счёт выделения этапа доработки – периода продолжительностью до трёх лет, при котором допускается снижение коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) до 1,2 в соответствии с действующими Федеральными нормами и правилами (ФНиП, приказ Ростехнадзора № 439 от 13.11.2020). На примере Коашвинского месторождения апатитовых руд проведена оценка таких геомеханических резервов. Анализ выполнен по профилям № 2 и № 9 (висячий бок залежи), где исходный коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) составляет 1,31 (рис. 1).

Выполнены многовариантные расчёты устойчивости борта методом предельного равновесия. Показано, что при смещении верхней кромки борта внутрь рудного тела на 28,4 м (профиль № 2) и 31,5 м (профиль № 9, рис. 2) достигается совпадение координат борта на отметке -188 м с проектным положением, но существенным приростом извлекаемых запасов на нижних горизонтах. Расчёты подтверждают, что на горизонте этапа доработки КЗУ для скорректированного контура составляет 1,24 – 1,26, что удовлетворяет требованиям ФНиП.

Для применения такой конструкции требуется особое внимание. При выполнении буровзрывных работ по постановке борта на конечный контур следует применять внутрискважинное замедление 300–500 мс и контурное щелеобразование, что обеспечит сохранность законтурного массива и позволяет формировать откосы уступов под углами до 90°. Особое внимание следует уделять факторам деградации: трещиноватости, выветриванию, обводнённости, окислению и наличию карбонатных пород. Обязательным условием реализации проекта является функционирование иерархической системы мониторинга (региональный, локальный и визуальный уровни) и организация геомеханической службы для оперативного реагирования.

Экономический эффект от оптимизации борта в рассматриваемом участке оценивается в 4,5 млрд рублей, что эквивалентно исключению 22,9 млн м³ условной вскрыши. При распространении подхода на другие участки карьера эффект может быть увеличен более чем вдвое. Полученные результаты демонстрируют, что комплексный подход, включающий сочетание нормативных возможностей, современных БВР и системного мониторинга, позволяет безопасно реализовать геомеханические резервы на финальной стадии жизни карьера.

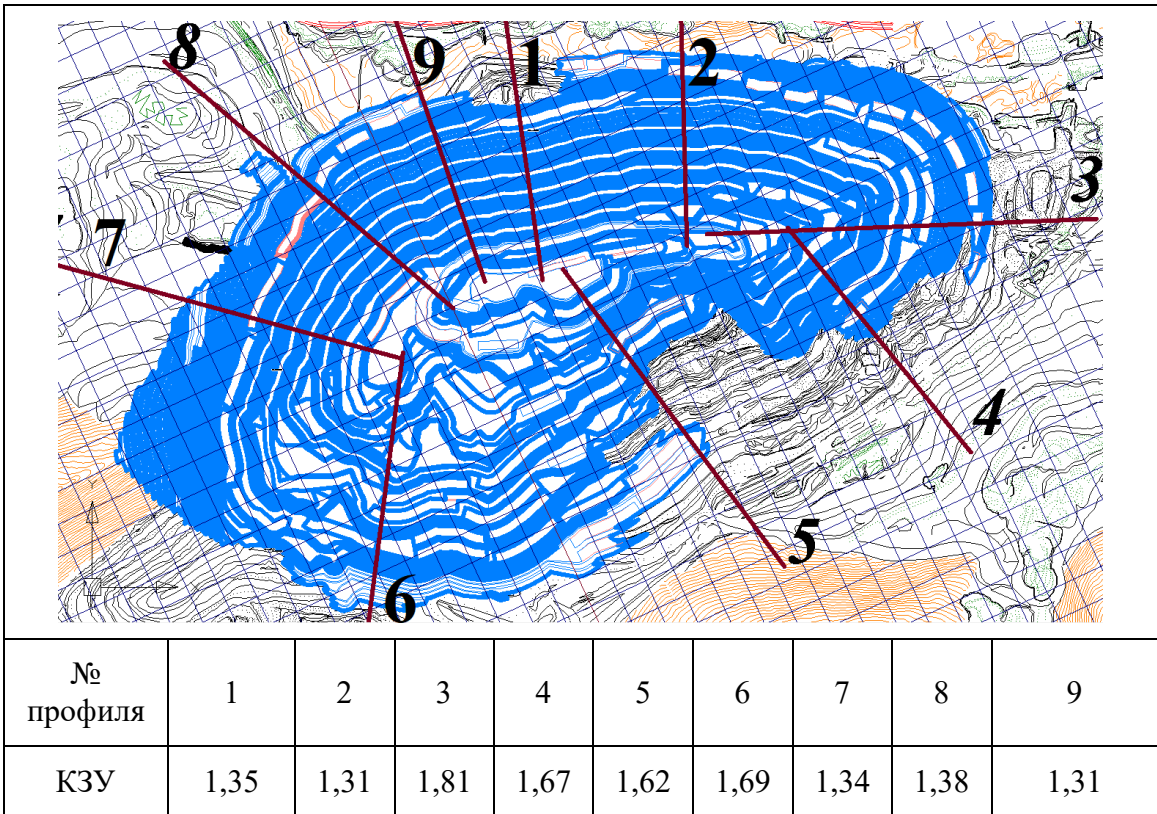


Рисунок 1 – План исходного контура карьера с расположенными на нем расчетными профилями и значениями КЗУ



Рисунок 2 – Исходный и скорректированный контура борта карьера по профилю № 9

Бирючев И.В.¹, Ожиганов И.А.²

¹ ООО «Рок Энд Милл», г. Москва, Россия

e-mail: i.biryuchev@rockandmill.ru

² УФ АО «ВНИМИ», г. Екатеринбург, Россия

e-mail: iv-barsuk@yandex.ru

ОЦЕНКА ОБЪЕМОВ МАТЕРИАЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ГОРНЫХ РАБОТ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Расчет стоимости проходки и строительства выработок производится на основе справочных данных, полученных по рудникам аналогам, включающих в себя стоимость материалов, оплату труда, затраты на обеспечение энергией и амортизационные отчисления. Наибольшей статьёй затрат, как правило, является стоимость материалов, необходимых для крепления горной выработки и поддержания ее в устойчивом состоянии в процессе эксплуатации. Это возникает из-за того, что проекты не содержат статью расходов, связанную с перекреплением неустойчивых участков, возникших из-за ошибок, допущенных при проектировании. Возможная ошибка в расчетах регулируется добавлением десяти процентов к стоимости материалов. В связи с чем расчеты себестоимости проходки имеют существенные допущения к их точности и не учитывает горно-геологические и геомеханические факторы проектируемого месторождения, влияющие на устойчивость выработок и выбор типов крепления.

В работе представлена подробная методология, применяемая для оценки объема материалов, необходимых для крепления подземных горных выработок на этапе проектирования, позволяя создать более точную финансовую модель и учесть возможные риски, связанные с геомеханическими модифицирующими факторами.

Подход к оценке объема материалов, необходимых для крепления подземных горных выработок (ПГВ) на этапе проектирования, предполагает следующие этапы:

- создание геологической модели (структурная, литологическая);
- создание численной модели распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) в массиве горных пород с учетом порядка отработки рудных запасов;
- создание блочной геомеханической модели породного массива;
- расчет Stress Reduction Factor (SRF) и рейтинга Q Бартона в блочной геомеханической модели;
- присвоение значений рейтинга Q Бартона к каркасам ПГВ;
- районирование выработок по классам качества массива, типам крепи и паспортам крепления;
- определение длин интервалов выработок, соответствующих классу качества массива;
- разработка паспортов крепления в соответствии с классом качества массива;
- оценка несущей способности крепи для каждого паспорта (численное моделирование, кинематический анализ);
- расчет объема материалов по каждому паспорту крепления.

Этап 1. Создание геологической модели (структурная, литологическая).

На данном этапе выполняется разработка литологической и структурных моделей. Выделяются все литологические разности, возможные вторичные изменения, зона коры выветривания и крупные структуры, которые могут повлиять на отработку запасов месторождения.

Как правило, на стадиях PFS и FS проектными организациями уже созданы геологические модели, содержащие в себе информацию о пространственном расположении разломов.

Детальность модели должна соответствовать стадии освоения месторождения.

Этап 2. Создание численной модели распределения НДС в массиве горных пород с учетом порядка отработки запасов.

На основании выделенных геомеханических доменов выполняется численное моделирование с учетом порядка отработки рудных запасов в соответствии с разработанным проектом. Выявляются потенциально опасные участки, на которых проходка выработок будет осложнена действием высоких сжимающих напряжений. По окончании анализа моделирования экспортируются результаты определенных главных напряжений (σ_1), действующих в массиве горных пород, по каждому этапу отработки.

Этап 3 и 4. Создание блочной геомеханической модели.

На данном этапе выполняется разработка блочной геомеханической модели породного массива. Выполняется интерполяция атрибутов, необходимых для выполнения расчетов крепи, оценки рейтинговой характеристики массива. Для оценки крепления используется рейтинговый показатель Q Бартона и проводится интерполяция показателей RQD, J_n , J_r , J_a , J_w .

Фактор, учитывающий действующие напряжения SRF, определяется последующей интерполяцией рассчитанных максимальных напряжений (σ_1) в блочную геомеханическую модель вместе с показателями предела прочности пород (UCS).

Для определения SRF рекомендуется использовать формулу Пека ($34 \times (S_{gsi}/S_1)^{-1.2}$) [PeckW, 2000. Australian Geomechanics, Journal and News of the Australian Geomechanics Society]. Далее выполняется калькуляция параметра Q Бартона по интерполированным атрибутам (RQD, J_n , J_r , J_a и J_w).

Интерполяция осуществляется внутри выделенных литологических разностей. В процессе анализа результатов моделирования, при необходимости, дополнительно могут выделяться геомеханические домены, на основании которых выполняется корректировка заложения проектных выработок.

Расчет SRF и Q выполняется в блочной геомеханической модели.

Этап 5, 6 и 7. Присвоение значений Q каркасам ПГВ. Районирование выработок по классам качества массива.

На данном этапе выполняется выделение каркасов проектируемых выработок из блочной геомеханической модели с их последующим районированием по классам качества массива. На основании данного анализа выделяются потенциально опасные участки, на которых может произойти потеря устойчивости выработки.

В статистической обработке распределения рейтинга Бартона Q участвует только массив, попадающий в пределы каркасов планируемых выработок. Далее оцениваются длины интервалов планируемых выработок, попавших в соответствующие категории Q по блочной модели, которые будут также соответствовать классу крепи.

Этап 8 и 9. Разработка паспортов крепления в соответствии с классом качества массива. Оценка несущей способности крепи для каждого паспорта (численное моделирование, кинематический анализ).

Для каждого класса качества массива разрабатывается паспорт крепления, позволяющий обеспечить устойчивость выработки с необходимым коэффициентом запаса устойчивости. Заверка паспортов крепления и оценка несущей способности осуществляется посредством численного моделирования и выполнения кинематического анализа.

На данном этапе возможно выполнение разделение по применяемым сечениям, назначению или сроку службы. Также возможно разделение на ГКР и ГПР для упрощения расчетов статей расходов $C_{арех}$ и $O_{рех}$.

Этап 10. Расчет объема материалов по каждому паспорту крепления.

На финальном этапе выполняется расчет объемов крепления для каждого разработанного паспорта.

Таким образом, геомеханические модели позволяют выполнить детальное районирование планируемых выработок по применяемым типам крепления и рассчитать объем материалов, необходимых для закрепления выработок в соответствии с разработанными паспортами крепления, а также оценить их стоимость еще на этапе проектирования.

Борисенко Э.В.¹, Богоудинов Р.М.², Рыжков М.Ф.²

¹ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, ДНР, Россия

e-mail:ehd1207@yandex.ru

²ГБУ «МАКНИИ», г. Макеевка, ДНР, Россия

e-mail:otdelgdy@yandex.ru

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ДОНБАССА

Разработка угольных пластов подземным способом на шахтах Донбасса зачастую осложняется влиянием зон геологических нарушений и проявлением динамических явлений (ДЯ), к наиболее опасным из которых относятся внезапные выбросы угля и газа, внезапные выдавливания угля и горные удары, хотя последние по уровню проявления – немногочисленны для данного угледобывающего региона.

Для предотвращения динамических явлений и обеспечения безопасных условий отработки угольных пластов применяются локальные способы (меры), перечень которых довольно широк и охватывает как способы гидрообработки (гидрорыхление, увлажнение), так и бурение разгрузочных скважин, и камуфлетное взрывание пласта.

В соответствии с ранее действовавшей и современной нормативной базой по борьбе с ДЯ [1], на шахтах Донбасса за последние 25 лет широкое применение получили следующие локальные способы предотвращения:

- гидрорыхление угольного пласта;
- бурение разгрузочных скважин;
- образование разгрузочных пазов;
- образование разгрузочной щели по длине очистного забоя.

Два последних способа в настоящее время не применяются на Донбассе вследствие закрытия угледобывающих предприятий, их применявших. Фактически применяемыми на сегодня в Донбассе локальными способами предотвращения ДЯ являются гидрорыхление угольных пластов и бурение разгрузочных скважин. Оба способа весьма универсальны: служат для предотвращения как внезапных выбросов, внезапных выдавливаний угля, так и горных ударов, обеспечивая при этом достаточно высокий темп ведения горных работ.

Анализ объемов применения данных способов за период 2001-2025 гг. показал, что гидрорыхление применялось в 78,9% очистных и подготовительных забоев от общего их числа с локальными мерами, а разгрузочные скважины – в 16,2% забоев.

Несмотря на высокую распространенность гидрорыхления на шахтах Донбасса, при его применении происходили ДЯ (внезапные выбросы, внезапные выдавливания угля) как в процессе нагнетания, так и после него – при ведении горных работ. По статистике, при гидрорыхлении пластов произошло 20,3% ДЯ от общего их количества при применении локальных мер [2].

Таким образом, оптимизация параметров гидрорыхления пластов для снижения опасности проявления ДЯ и повышения безопасности ведения горных работ в шахтах остается актуальной научно-технической задачей, стоящей перед горной наукой.

Анализ обстоятельств ДЯ, произошедших при гидрорыхлении пластов в период 2001-2025 гг., позволил установить основные причины и условия их проявления:

- влияние зон геологических нарушений определенного типа (наиболее опасны в плане реализации ДЯ нарушения пликативного, морфологического, седиментационного и дизъюнктивного типов);

- несоответствие параметров способа фактическому напряженно-деформированному состоянию (НДС) призабойной части пласта;

- нарушение паспортных параметров и контроля эффективности гидрорыхления по газодинамике из скважин («человеческий фактор»).

Неэффективность гидрорыхления в вышеуказанных геологических нарушениях может быть нивелирована за счет применения при их пересечении БВР в режиме сотрясательного взрывания или бурения разгрузочных скважин диаметром до 80 мм, длиной свыше 20 м при неснижаемом опережении более 10 м.

С другой стороны, такие параметры гидрорыхления, как длина нагнетательных скважин, глубина их герметизации, должны быть увязаны с НДС краевой части пласта, поскольку нагнетание воды как в зоне разгрузки, так и максимума опорного давления нерационально и не обеспечит разгрузку и дегазацию пласта в призабойной зоне [3]. Наиболее оптимальным является заложение фильтрующей части скважин между зоной разгрузки и максимумом опорного давления.

Для устранения влияния «человеческого фактора» на эффективность применения данного локального способа необходимо более широкое применение автоматизированного контроля эффективности гидрорыхления по параметрам искусственного акустического сигнала [1] и повышение уровня контроля со стороны ИТР над соблюдением требований документации по ведению горных работ.

Выводы. Применение на угледобывающих предприятиях Донбасса и Российской Федерации указанных практических рекомендаций позволит повысить эффективность применения локального способа (гидрорыхления пласта) путем учета горно-геологических условий, обоснованного выбора оптимальных параметров нагнетательных скважин, что в целом обеспечит снижение опасности проявления динамическим явлениям при применении профилактических мер и повысит безопасность разработки угольных пластов, склонных к динамическим явлениям.

Список использованных источников:

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». Утверждены Приказом Ростехнадзора от 10.12.2020. – № 515. – 96 с.
2. Коптиков В.П. Внезапные выдавливания угля / В.П. Коптиков, И.А. Южанин, В.П. Евдокимова [и др.]. – Донецк: Изд-во «Ноулидж», 2010. – 240 с.
3. Повышение эффективности гидравлического рыхления выбросоопасных угольных пластов / С.П. Минеев, А.А. Потапенко, Т.Я. Мхатвари и др. – Донецк: ООО «Восточный издательский дом», 2013. – 216 с.

Бурдинская А.А., Потапчук М.И., Сидляр А.В.
Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия
e-mail: ms.miheewa@inbox.ru, Potapchuk-igd@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ НИЖНИХ ГОРИЗОНТОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФЕСТИВАЛЬНОЕ

Месторождение Фестивальное находится в центральной части Хабаровского края, в Солнечном районе. Административным центром района является пгт. Солнечный, расположенный к западу от г. Комсомольска-на-Амуре. Месторождение открыто в 1957 г., а его отработка осуществляется с 1971 года. Разработка ведется силами АО «Оловянная рудная компания».

Месторождение располагается в пределах юго-восточной части хребта Мяо-Чан, на его восточных склонах. Для месторождения и прилегающей территории свойствен среднегорный рельеф с относительными превышениями водораздельных возвышенностей над днищами долин до 500-700 м, склоны долин довольно крутые (25-30°) [1].

Структурную основу месторождения Фестивальное образуют два складчатых комплекса – юрско-раннемеловой и позднемеловой. Территория пересечена системой разломов субмеридионального, субширотного и северо-западного простирания. На месторождении выделяется 22 жилообразных рудных тела крутого падения мощностью от 0,1 до 37,2 м. Текстура руд массивная, брекчиевая, полосчатая, вкрапленная. Руды комплексные. Главные рудные минералы: касситерит, халькопирит, вольфрамит, шеелит; нерудные - кварц, турмалин, серицит, хлорит. Породы и руды в основном крепкие, склонные к хрупкому разрушению.

Вскрытие месторождения реализовано комбинированным способом: двумя параллельными штольнями протяженностью более 2,5 км, двумя вертикальными стволами и сетью транспортных уклонов. Отработка рудных тел осуществляется двумя основными системами: этажно-камерной и системой с магазинированием руды. Основные параметры систем разработки: при этажно-камерной системе разработки высота подэтажа 15 м, междукамерные целики 8 м, потолочина 6 м, при системе с магазинированием руды: высота подэтажа 45,5 м, междукамерные целики 9,5 м, потолочина 4,5 м. Удельный вес применения систем разработки составил: с магазинированием руды 9,4%, системой подэтажных штреков 90,6% соответственно.

Для оценки удароопасности при отработке нижних горизонтов месторождения были выполнены комплексные геомеханические исследования. Основными задачами являлись: определение критической глубины безопасной отработки, обоснование конструктивных параметров системы разработки, оценка устойчивости горных выработок и прогнозирование напряженно-деформированного состояния массива [2].

В ходе исследований был проведен анализ структурно-тектонического строения месторождения и оценка современного поля напряжений, изучены физико-механические свойства пород и руд, разработаны численные модели и выполнено моделирование геомеханических процессов в горном массиве по мере отработки рудных тел.

Исследование напряженно-деформированного состояния массива показало, что отработка месторождения приводит к формированию сложного природно-техногенного поля напряжений [3]. До начала отработки максимальные напряжения (до 55 МПа) концентрируются в зоне Водораздельная на отм. +485 м и на отм. +520 м ниже выработанного пространства. Также отмечаются еще две зоны повышенных напряжений, в кровле рудного штрека гор. +405 м и ниже гор. 300 м. Но уровень

максимальных сжимающих напряжений на этих участках не превышает 42 МПа, интенсивность касательных напряжений 20 МПа. После первых этапов обработки происходит перераспределение напряжений и их концентрация преимущественно на границах выработанного пространства отработанных участков рудного тела 1 зоны Ягодная ниже отм. +330 м и выше отм. +390 м (максимальные сжимающие напряжения составляют более 90 МПа, интенсивность касательных до 45 МПа).

При полной обработке происходит разгрузка напряжений в районе отработанных участков и значительный рост в рудном массиве тела 4 зоны Водораздельная на границе с выработанным пространством в отм. 490-510 м (величина максимальных сжимающих напряжений достигает 115 МПа, интенсивность касательных напряжений до 35 МПа), и во вмещающем массиве ниже отм. 230 м рудного тела 1 зоны Ягодная (величина максимальных сжимающих напряжений достигает 128 МПа, интенсивность касательных напряжений до 60 МПа).

Результаты выполненных исследований позволили сделать вывод об отнесении нижней части месторождения, ниже 660 м (горизонт 270 м) к склонным к горным ударам.

С целью оценки удароопасности конструктивных элементов проектируемых систем разработки и обоснования их безопасных параметров было выполнено дополнительное моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива при последовательных этапах обработки рудного блока на горизонте отм. 270 м.

В результате моделирования систем разработки были получены следующие результаты: обработка выемочного блока и закладка верхнего подэтажа пустыми породами приводит к повышенным концентрациям напряжений в массиве потолочины и краевых частях междукамерных целиков (до 140 МПа). Система с магазинированием характеризуется формированием зон повышенных напряжений в потолочине и междукамерных целиках еще до начала выемки (до 90 МПа). При частичной обработке блоков максимальные напряжения концентрируются в центральной части междукамерных целиков, достигая 110 МПа. После полной обработки в потолочине сохраняется уровень напряжений до 80 МПа, а в междукамерных целиках – до 150 МПа.

При оценке устойчивости основных конструктивных элементов применяемых систем разработки, использовались критерии хрупкого разрушения: теория максимальных нормальных сжимающих напряжений и критерий Кулона-Мора [5]. Результаты расчетов показали, что основные элементы конструкций сохраняют устойчивость, минимальным запасом устойчивости характеризуются краевые части подэтажа.

Список использованных источников:

1. Заключение о склонности месторождения «Фестивальное» к горным ударам: отчет о НИР. – Рук-ль Сучилин А.В. – СПб: НМСУ «Горный», 2015. – 39 с.
2. Оценка склонности к горным ударам нижней части месторождения «Красивое» / М.И. Потапчук, А.В. Сидляр, А.А. Бурдинская, М.А. Ломов // Горная промышленность. – 2025. – № S4. – С. 116-121.
3. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 329 с.
4. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике, М.: Недра, 1987.
5. Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А., Филиппов П.А. Устойчивость горных выработок при системах подэтажного обрушения // ФТПРПИ. – 2008. – № 1.

Еременко А.А., Хмелинин А. П.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

e-mail: eremenkoa1949@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА ГОРНЫХ УДАРОВ НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ГОРНОЙ ШОРИИ

Таштагольское и Шерегешевское рудные месторождения расположены в сейсмоактивной Алтае-Саянской горной области и отрабатываются подземным способом на глубинах 600–1000 м и более. Для добычи железных руд на месторождениях в горный отвод включены Северо-Западный, Восточный, Западный, Юго-Восточный, Новый Шерегеш, Подрусловый, Главный и Болотный участки. Балансовые запасы руды составляют около 1 млрд т.

С понижением горных работ наблюдаются проявления горного давления в динамической форме, особенно с глубины 600 м и более, в форме стреляния, заколообразования, толчков, микроударов и горных ударов. С 1959 по 2025 гг. зарегистрировано более 80 тыс. геодинамических явлений, в том числе 22 горных удара и 85 микроударов. Таштагольское и Шерегешевское месторождения отнесены к опасным по горным ударам.

Отработка запасов осуществляется системами этажного принудительного обрушения, этажно-камерной, подэтажного обрушения без и с закладкой выработанного пространства. На геомеханическую обстановку при выемке рудных запасов оказывают влияние массовые технологические взрывы и объемы выработанных пространств. Установлена зависимость между магнитудой, энергетическим классом взрывов, толчков и массой зарядов ВВ.

В процессе отработки рудных участков определено расположение зоны максимума опорного давления в днище выработанного пространства, которое находится на расстоянии 30–60 м в массиве, и периодически смещается в сторону очистного пространства. Определено, что за период 15 лет максимальная энергия толчков изменялась от 10^7 до 10^9 Дж. На основе использования методов математического моделирования, микросейсмического, электрометрического и электромагнитной эмиссии осуществлялся прогноз геодинамических явлений как при отработке блоков (камер), так и при проведении горных выработок.

Рассмотрены варианты схем вскрытия глубоких горизонтов до 1500 м и более с учетом формирования зон концентрации толчков с различной энергией от 10^2 до 10^9 Дж. Для снижения удароопасности разработаны схемы обустройства массива горных пород веерными разгрузочными скважинами диаметром 89 и 102 мм.

Проведенные экспериментальные исследования способствовали осуществлению прогноза крупных геодинамических явлений при отработке рудных участков на месторождениях Горной Шории.

Еременко В.А., Косырева М.А.

Горный институт НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия

e-mail: prof.eremenko@gmail.com, marinkosyreva@gmail.com

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ПО ИНДЕКСУ R_m И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ КРЕПИ ВЫРАБОТОК

Согласно нормативным документам Российской Федерации месторождение считается удароопасным (опасное по горным ударам) с глубины H , если в горных породах, составляющих не менее 10% планируемого к отработке объема, отношение модуля спада к модулю упругости больше 1 и измеренное или расчетное главное напряжение (σ_{max}) превышает предел прочности породы при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$) «Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам».

Месторождение считается потенциально удароопасным (склонным к горным ударам) с глубины H , если в горных породах, составляющих не менее 10% планируемого к отработке объема, отношение модуля спада к модулю упругости больше 1; наибольшее главное напряжение (σ_{max}) на наиболее напряженных участках месторождения превышает 80% предела прочности на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) «Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам».

Массив считается склонным к горным ударам, если действующие в нем максимальные напряжения (σ_{max}) составляют: $\sigma_{max} \geq 0,8\sigma_{сж}$, где $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород и руд на одноосное сжатие, МПа.

По графику деформирования образца определяют модуль упругости E и модуль спада M : при $E/M < 1$ порода считается удароопасной; при $E/M > 1$ - неудароопасной.

С помощью численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород месторождения на стадии проектирования горных работ определяют значения максимальных напряжений в диапазоне рассматриваемых глубин.

Критерий удароопасности определяется:

$$K = \sigma_{max} / \sigma_{сж} \geq 0,8,$$

где K – коэффициент, характеризующий удароопасность массива.

Для количественной оценки устойчивости горизонтальных, наклонных и вертикальных подземных горных выработок различного назначения при разработке рудных и нерудных месторождений разработана рейтинговая классификация оценки устойчивости и выбора крепления подземных горных выработок по индексу R_m , которая прошла и продолжает проходить тестирование на действующих горнодобывающих предприятиях России и ближнего зарубежья. Диапазон оценки по индексу R_m представляет собой пять категорий устойчивости подземных горных выработок.

Метод и методика оценки устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m , представленные в публикациях [1, 2], позволяют определять (рассчитывать): время устойчивого стояния незакрепленной горной выработки с учетом ее ширины (пролета) ($T_{уст.}$); смещение незакрепленного контура подземной горной выработки с учетом ее ширины (пролета) (U); высоту свода возможного обрушения кровли подземной горной выработки (h_0); тип и параметры крепления выработки; вероятные риски обрушения закрепленной и незакрепленной выработки и многое другое.

Метод оценки устойчивости выработок по индексу R_m позволяет эффективно выполнять оценку проводимых и поддерживаемых в удароопасных массивах выработок с использованием факторов и показателей: напряженного состояния $R_{mt_{26}}$ ($\sigma_{сж}/\sigma_{max}$), учитывающих воздействие на выработку других выработок $R_{mt_{27}}$, способа проведения выработки $R_{mt_{28}}$, а также показателей, входящих в группы физико-механических свойств горных пород ($R_{mp_1} - R_{mp_3}$) и качества породного массива ($R_{mp_4} - R_{mp_9}$) и другие группы, входящие в эту систему оценки.

В методике оценки устойчивости выработок по индексу R_m представлены I-XV категорий выбора крепи или систем крепления выработок, некоторые из которых способны поглощать энергию динамических проявлений горного давления и непосредственно горных ударов.

Существуют и успешно применяются различные методы предотвращения горных ударов, однако последней линией защиты является крепь. Динамической называют крепь, способную выдержать нагрузку, создаваемую динамическими проявлениями горного давления [3, 4]. Система динамической крепи представляет собой стальные анкерные штанги с повышенными прочностными и деформационными свойствами, соединенные между собой прочной, но податливой поверхностной крепью.

Для решения задачи выбора подходящей системы крепи, способной противостоять горному удару по типу сейсмического сброса, требуются три основных расчетных параметра: а) магнитуда события, б) расстояние участка рассматриваемой выработки от гипоцентра сейсмособытия; в) потенциальная масса вывала.

Магнитуду расчетного события можно определить по закону Гуттенберга – Рихтера на основе интерпретации зарегистрированных ранее сейсмических событий (кривая зависимости между магнитудой и общим числом сейсмических событий за определенный период).

Расчетное расстояние от выработки до гипоцентра события определяется по данным сейсмического мониторинга.

Расчетная масса потенциального вывала определяется посредством экспертной оценки мощности нарушенной горной породы в кровле выработки, которая может быть сброшена в результате сейсмического сотрясения. Также могут быть применены аналитические или численные методы оценки. При динамической нагрузке крепь поглощает кинетическую энергию колебания приконтурного массива, а также потенциальную энергию массы сбрасываемой породы, смещающейся в выработку под действием силы тяжести [5]. Разработаны рекомендации по расчету параметров динамической крепи выработок (рисунок 1, таблица 1).

Таблица 1 – Способность к энергопоглощению различных видов анкеров

Тип анкера	Механизм деформирования	Максимальная деформация, мм	Энергопоглощение при деформации 100 мм, кДж	Энергопоглощение при деформации 150 мм, кДж
Гладкий стальной стержень Ø 22 мм, прочность на растяжение 230 кН, относительное удлинение до 15%, с несколькими прихватами по длине, полностью зацементированный в шпуре бетонным раствором или полимерной смолой	Растяжение	220	25	38
Стержень Ø 20 мм из арматурной стали, прочность на растяжение 215 кН, относительное удлинение до 20%, точно закрепленный полимерной смолой	Растяжение	210	23	35
Гидрораспорный стальной анкер Ø 54 мм, прочность на растяжение 200 кН, относительное удлинение до 10%	Проскальзывание*	300	10	14

Трубчатый фрикционный стальной анкер Ø 46 мм, прочность на растяжение 165 кН, относительное удлинение до 16%	Проскальзывание*	300	6	9
Стержень Ø22мм из арматурной стали с прочностью на растяжение 185 кН и относительным удлинением до 8%, полностью зацементированный в шпуре бетонным раствором или полимерной смолой	Растяжение	35	3	–

* Деформирование с проскальзыванием ограничивается в расчетах 300 мм, хотя эти виды анкеров способны проскальзывать на большее расстояние

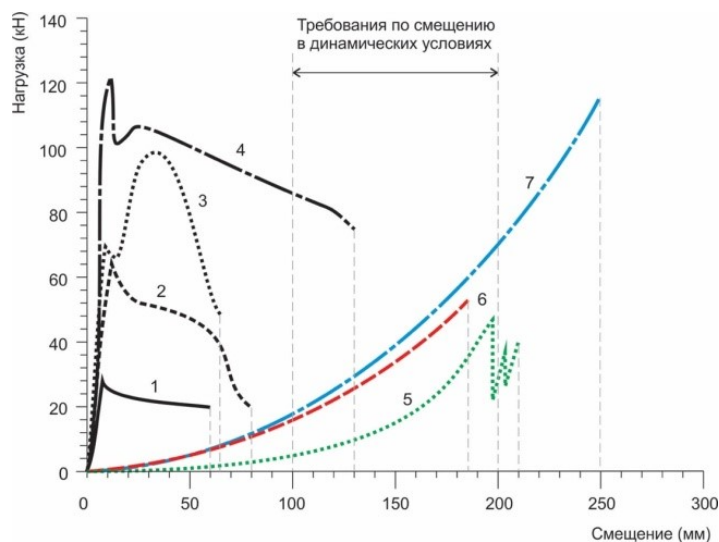


Рисунок 1 – Технологические свойства различных видов поверхностных креплений: 1 – фиброторкрет-бетон (ФТБ), толщина слоя 60 мм, синтетическая фибра, расход фибры 6 кг/м³, энергопоглощение 0.8 кДж/м², размер тестируемого образца 1.25×1.25 м; 2 – ФТБ, 80 мм, синтетическая фибра 6 кг/м³, 2.2 кДж/м², 1.25×1.25 м; 3 – ФТБ, 115 мм, стальная фибра, 20 кг/м³, 3.0 кДж/м², 1.25×1.25 м; 4 – ФТБ, 110 мм, стальная фибра 40 кг/м³, армирующая сварная сетка, 7.7 кДж/м², 1.25×1.25 м; 5 – сварная сетка проволока Ø5.6 мм, 1.3 кДж/м², 1.4×1.4 м; 6 – плетеная сетка из проволоки 3мм высокой прочности на разрыв, 2.4 кДж/м², 1.4×1.4 м; 7 – плетеная сетка из проволоки 4мм высокой прочности на разрыв, 6.5 кДж/м², 1.4×1.4 м

Выводы. Материалы, представленные в тезисах, определяют выборочные разделы разрабатываемого в 2025-2026 гг. Руководства по безопасности «Рекомендации по обеспечению устойчивости подземных горных выработок при разработке рудных и нерудных месторождений» (РБ), которое согласуется с разрабатываемым в настоящее время проектом Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости подземных горных выработок при разработке рудных и нерудных месторождений» (ФНП).

Список использованных источников:

1. Еременко В.А., Лушников В.Н., Косырева М.А. Метод рейтинговой оценки устойчивости подземных горных выработок R_m // Горный журнал. – 2025. – № 1. – 9-19.
2. Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Сергунин М.П., Еременко В.А., Косырева М.А. Разработка типовой инструкции по креплению подземных горных выработок на основе количественной оценки их устойчивости // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12. – С. 70–90.

3. Лушников В.Н., Еременко В.А., Сэнди М.П., Косырева М.А. Выбор анкерной крепи для выработок, пройденных в шахтах, склонных к горным ударам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 3. – С. 86-95.
4. Еременко В.А., Лушников В.Н. Методика выбора «динамической» крепи выработок для месторождений склонных и опасных по горным ударам // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 5-12.
5. Bucher, R, Cala, M, Zimmermann, A, Balg, C & Roth, A 2013, 'Large scale field tests of high-tensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rockburst loading', in Y Potvin & B Brady (eds), Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Western Australia, pp. 221-232.

Жабко А.В., Жабко А.А.

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург,
Россия

e-mail: zhabkoav@mail.ru

ПОКАЗАТЕЛЬ УДАРООПАСНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Как известно, модуль спада, используемый сегодня в качестве склонности к динамике, сильно зависит от размеров образца, степени обжатия, жесткости прессы и т.д., то есть больше характеризует условия нагружения, а не саму породу. Под удароопасностью пород, в общем случае, будем понимать их способность разрушаться в динамической форме при жестком нагружении. В работах [1, 2] предложен показатель склонности горных пород к динамическому разрушению, представляющий собой отношение удельных динамической и полной энергий (энергоемкостей):

$$p = \frac{2U}{\Pi} = \frac{E\Delta\psi}{2C} \cdot \frac{\cos\varphi \sin(\psi - \varphi)}{\sin\psi \operatorname{tg}^2\psi} \approx \frac{Ed\sigma_1^{\pi-\psi}}{(1-\mu)\sigma_1^2} \cdot \frac{\cos\varphi \sin(\psi - \varphi)}{\sin\psi \operatorname{tg}^2\psi (1 + \operatorname{tg}^2\psi)}, \quad (1)$$

где U – динамическая удельная энергия; Π – полная удельная линейная энергия; E – модуль упругости породы; $\Delta\psi$ – угол разворота элемента (зерна); φ – угол внутреннего трения; $d\sigma_1^{\pi-\psi}$ – разность максимального главного напряжения на пределе прочности и пределе упругости (дифференциал); σ_1, ψ – соответственно значения максимального главного напряжения и угла наклона площадки сдвига к минимальному главному напряжению на пределе прочности ($\psi \approx \pi/4 + \varphi/2$ (для образца)); $\mu = \sigma_3 / \sigma_1$ – коэффициент пропорциональности при испытании.

Наиболее удароопасная порода отвечает условию $p \rightarrow 1$ (здесь предполагается, что при $p \ll 1$ порода не способна к динамическим проявлениям, при $p \gg 1$ порода разрушается от растягивающих напряжений продольными трещинами и теряет устойчивость, но при мягком режиме нагружения способна разрушиться в динамическом режиме, а при $p \rightarrow 1$, то есть когда в объеме породы имеется определенное соотношение динамической и статической энергий, является наиболее удароопасной).

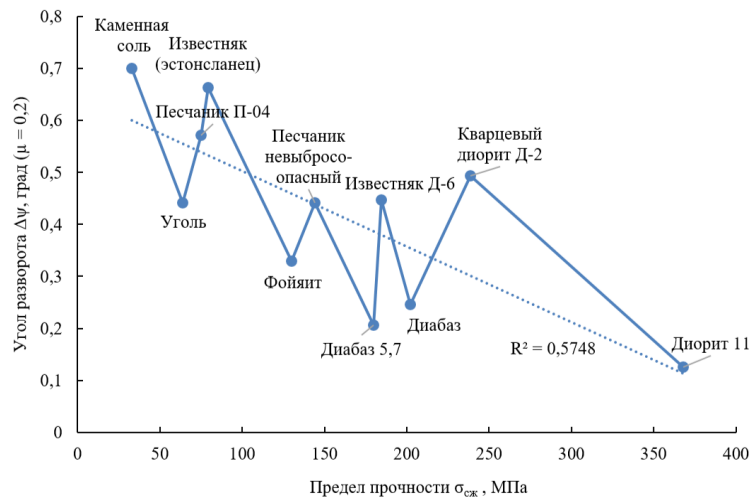


Рисунок 1 – Угол разворота сдвиговых площадок для некоторых пород [1, 2]

Для достоверного определения значения показателя (1) необходимы результаты стабилметрических испытаний с отсечкой пределов упругости и прочности, которые, в свою очередь, зависят от степени бокового обжатия (минимального главного напряжения) [1, 2]. Для многих удароопасных месторождений такие исследования до сих пор не проведены и имеются лишь результаты простейших одноосных испытаний, более того, во многих случаях даже не устанавливаются величины сцепления и угла внутреннего трения.

В первом приближении для определения $\Delta\psi$ можно воспользоваться графиком (рисунок 1) или принять некоторое среднее значение для удароопасных пород. В таблице 1, в качестве примера, приведен расчет показателя удароопасности для некоторых склонных к горным ударам месторождений. Подобный расчет осуществлен для многих других месторождений.

Таблица 1 – Удароопасность горных пород некоторых удароопасных месторождений

Порода	E , ГПа	φ , град	C , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	$\Delta\psi$, град	$P_{\Delta\psi=0,4^\circ}$	p
Поле рудника Октябрьский (Норникель)								
Сульфидная руда	54,5	41	18	75	7,5	0,5	0,75	0,95
Медистая руда	73,9	41	19	97	9,2	0,5	0,97	1,21
Роговики	69,2	36	26	81	11,7	0,5	0,99	1,33
Габбро-долериты подводные	71	38	26	124	12,7	0,5	0,87	1,14
Вкрапленные руды	70,6	37	21	103	11,9	0,5	1,16	1,52
СУБР								
Известняки П/с светло-серые	28,6	35	15,6	110	8,9	0,5	0,74	0,92
Известняки П/с брекчиевидные	33,3	35	12,2	77	7,7	0,5	1,10	1,38
Известняки Д2b (в/б)	39,9	36	17	125	9,3	0,5	0,88	1,1
Порфириды серые, темно-серые	22,1	33	20,1	127	12,7	0,5	0,52	0,64
Порфириды, туфогравелиты	20,7	33	13,3	85	9,4	0,5	0,73	0,91
Боксит немаркий каменистый	24,6	34	16,1	78	13,3	0,5	0,67	0,83
Боксит немаркий	15	34	7,5	43	5,2	0,6	0,87	1,3
Боксит красный немаркий	65	38	20	152		0,4	1,04	1,04
Боксит маркий плотный н/удар.	14	33	4,1	25	2,7	0,6	1,6	2,4
Диабазовый порфирит	52,1	37	33	86		0,5	0,55	0,68
Плато Расвумчорр								
Руда пятнистая массивная	68	42	21	92	3,8	0,5	0,74	0,93
Уртит массивный неравн/э	92	40	37	159	8,2	0,4	0,67	0,67
Рисчоррит сл.-пироксеновый	64	39	24	100	5,3	0,5	0,79	0,98
Луяврит	77	39	41	277	9,2	0,3	0,55	0,42

Коашва								
Апатит-нефелиновые руды	46	31	42	86	2,8	0,55	0,59	0,82
Ювиты	72	31	58	222	7,2	0,35	0,67	0,59
Ургиты	75	29	55	193	9,3	0,4	0,85	0,85
Ийолиты	84	29	69	224	12,8	0,35	0,76	0,67
Мельтейгиты	126	31	44	272	12	0,3	1,55	1,16
Джезказган (Восточно-Джезказганский рудник)								
Медная руда	39	35	27	180	14	0,4	0,58	0,58
Медно-свинцовая руда	57	35	32	200	14	0,4	0,72	0,72
Серый безрудный песчаник	55	35	30	203	10	0,4	0,74	0,74
Красный песчаник	40	30	23	100	3	0,5	1,01	1,27
Красный алевролит	36	30	19	45	3	0,6	1,1	1,65

Выполненный расчет подтверждает повышенную удароопасность пород месторождений, фактически склонных к горным ударам (динамическим явлениям) [3].

Список использованных источников:

1. Жабко А.В. Энергия сейсмических событий и критерии склонности горных пород к динамическому разрушению // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 2024. – №2. – С. 51–66.
2. Жабко А.В. Механика разрушения горных пород и расчет устойчивости горных массивов: научная монография. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2025. – 256 с.
3. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках: под общей редакцией И.М. Петухова и др. – М: Изд-во АГН, 1997. – 377 с.

Жиров Д.В.

Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: zhirovdv@mail.ru

СТАДИЙНОСТЬ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Стадийность геологоразведочных работ служит базовым принципом отрасли, реализуя метод последовательных приближений к "Истине": рекогносцировка → поиск → оценка → предварительная разведка → детальная разведка → эксплуатационная разведка. В отношении исследований геолого-структурных неоднородностей (разломы, разрывы, зоны дробления и повышенной трещиноватости, ослабленные поверхности, контакты и т.п.) такой же стройной системы нет, несмотря на очевидную необходимость. Виды и объёмы специальных тематических исследований, как правило, регламентированы требованиями и рекомендациями к соответствующим стадиям ГРР. Однако на практике преобладающая часть работ и исследований производится на средних - завершающих этапах эксплуатации месторождения, когда в полной мере проявляются опасные геодинамические процессы и явления. Эта данность объясняется простым умозаключением "пока нет проблем, искать их причины, прогнозировать и оценивать опасность нет необходимости". То есть, прогнозный аспект на ранних стадиях изучения и эксплуатации месторождения, как правило, отсутствует или минимизирован. Такое положение, к сожалению, часто приводит к неоправданным

затратам времени и ресурсов, когда проблемы "неожиданно" возникают. В настоящей работе предпринимается попытка исправить это упущение.

Целесообразно выделить следующие стадии изучения: 1) прогнозно-рекогносцировочная; 2) поисково-оценочная; 3) детальная и эксплуатационная разведка на этапе собственно освоения месторождения. Необходимо отметить, что обсуждаемые стадии немного смещены "вправо" по сравнению с таковыми геологоразведочной отрасли: необходимый комплекс работ выполняют после или в завершении семантически тождественных.

В состав **прогнозно-рекогносцировочных работ** входит сбор исходной информации по тектонике и особенностям НДС района/региона. С этой целью обобщаются и анализируются все доступные геологические (тектонические, геоморфологические и др.) данные, аэро- и космофотоматериалы (АФС и КФС), а также задокументированные проявления (ретро- и современные) региональной составляющей НДС. Данные о системах трещиноватости, в том числе опасного залегания, прогнозируются по результатам замеров и обработки замеров в районе работ, а также по аналогии с массивами пород этой же геологической формации (ассоциации прототектонической трещиноватости). Результатами становятся сведения о выявленных в районе работ опасных тектонических элементов и проявлений экзогенных явлений, а также прогнозные рекомендации по сети дальнейших изысканий и мониторинга.

Поисково-оценочная стадия включает в себя анализ и обобщение данных геологоразведочного и инженерно-геологического бурения по единичным профилям, а также обследований выявленных на начальных этапах горных работ геолого-структурных неоднородностей и деформаций рабочего контура карьера. Результатом служит обобщение для карьерного поля по типам и потенциалу геологических и геомеханических опасностей, выявление наиболее очевидных опасностей, а также результаты инженерно-геологического бурения по выбранным профилям.

Детальная и эксплуатационная разведка являются наиболее длительным и тщательно выполняемым этапом, который, как правило, начинается с момента достижения карьером средних глубин (~ 100÷200 м по скальным породам) и продолжается вплоть до завершения горных работ. К этому времени начинает проявляться большинство проблем, связанных с наличием структурных неоднородностей неблагоприятного для устойчивости залегания, повышенными водопритоками и с другими опасными экзогенными геологическими явлениями. Именно в ходе этой стадии создаётся система комплексного мониторинга и обосновываются изменения проектных решений с целью обеспечения геодинамической безопасности выполняемых горных работ.

Для каждой из перечисленных стадий разработаны комплексные методологии, включая традиционные и новаторские методы и технологии документации, мониторинга и зондирования внутреннего строения массива горных пород. Универсального и рационального по соотношению трат/эффекта набора пока нет, однако для каждого типа массивов горных пород и инженерно-геологических условий можно подобрать оптимальный комплекс опытно-промышленным путем, исключая менее и делая акцент на более эффективных инструментах и методиках. Необходимо отметить, что предложенная стадийность актуальна в первую очередь для крупных - суперкрупных сырьевых объектов. В отношении средних и мелких объектов рекомендуется следовать общим рекомендациям и правилам безопасности, разработанным по опыту работ на аналогичных месторождениях в сопредельных районах. При этом комплексы работ/исследований 1-го и 2-го этапов остаются востребованными в полной мере, а комплекс 3-го этапа - только частично, так как

многие проблемы могут проявиться только на завершающих стадиях. Кроме того, весьма значим финансово-экономический аспект, так как выполнение полного детального комплекса обследований и наблюдений весьма затратно, поэтому может стать непосильным бременем для горного предприятия малого - среднего масштаба.

Реализация стадийности исследований геолого-структурных неоднородностей позволяет не только заблаговременно выявить потенциально опасные элементы и структуры, но и тем самым предотвратить материальный урон и человеческие жертвы за счёт предупреждающей разработки и реализации мероприятий, исключающих нанесение невосполнимого урона.

Иванов А.С., Розанов И.Ю.

Горный институт КНЦ РАН, г. Анапты, Россия

e-mail: as.ivanov@ksc.ru, i.rozanov@ksc.ru

ИНТЕГРАЦИЯ ДАННЫХ БВС-СЪЕМОК И БЛОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

В современных условиях открытой разработки месторождений перемещение значительной массы горных пород приводит к изменению напряженно-деформированного состояния (НДС) и возникновению упругих и упруго-пластических деформаций. Следствием подобных изменений НДС являются случаи потери устойчивости как локальных участков, так и борта карьера в целом. Таким образом, обеспечение устойчивости бортов карьеров является важнейшей задачей безопасного ведения горных работ.

Традиционные методы геодезического контроля часто не позволяют оперативно фиксировать локальные деформации и оценивать структурные особенности массива на больших площадях, поскольку результаты полученных измерений не всегда возможно распространить на всю площадь исследуемого объекта, в особенности для скальных массивов горных пород.

В отличие от традиционных методов контроля фотограмметрический и лазерный мониторинг с применением беспилотных воздушных судов (БВС) позволяют получать информацию о пространственном положении множества точек, соответствующих исследуемой поверхности объекта. За счет высокой плотности, а также периодичности серии наблюдений, эти методы также позволяют определять величины вертикальных и горизонтальных смещений.

В докладе рассматривается технология мониторинга участка борта с применением БВС. Воздушное лазерное сканирование в сочетании с фотограмметрической обработкой позволяет строить высокоточные детализированные цифровые модели местности. Сравнительный анализ разновременных облаков точек в программном комплексе CloudCompare обеспечивает выявление смещений на поверхности борта карьера, документирование зон деформаций и расчет объемов обрушений.

Однако фиксация геометрических изменений отражает лишь следствие процессов разрушения. Для перехода к прогнозированию устойчивости предложен подход интеграции данных в блочную модель дневной поверхности. В ячейки модели загружаются геометрические атрибуты, рассчитанные в CloudCompare по результатам съемок (уклоны, кривизна поверхности и другие). Параллельно выполняется атрибутирование блоков показателями физико-механических свойств и геологического строения, полученными из скважин, лабораторных испытаний и архивной

документации. Ключевым этапом является структурный анализ: с применением модуля Discontinuity Set Extractor в модель импортируются данные о трещиноватости, которые преобразуются в дискретные элементы. На их основе для каждого блока автоматически рассчитывается показатель Rock Quality Designation, переводящий качественные наблюдения в количественные параметры.

Такой многоуровневый синтез формирует динамический цифровой двойник борта карьера. Интегрированная блочная модель позволяет не только ретроспективно анализировать историю смещений, но и оценивать текущее структурно-механическое состояние массива в строгой пространственной привязке. Результаты мониторинга визуализируются в виде цветowych карт, что упрощает интерпретацию данных геомеханическими службами. Практическая значимость работы заключается в создании методического инструментария для оперативного управления геомеханическими рисками и минимизации аварийных ситуаций. Предложенный алгоритм обработки и атрибутирования обладает высокой масштабируемостью и может быть интегрирован в применяемые на горнодобывающих предприятиях горно-геологические информационные системы.

Калюжный А.С.

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия
e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru*

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ В МАССИВАХ ПРОЧНЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД С УЧЁТОМ СДВИГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНЫХ ОСЛАБЛЕНИЙ

При ведении горных работ открытым способом на Кольском полуострове одной из ключевых особенностей является высокая степень трещиноватости скальных массивов, обусловленная длительной тектонической историей региона. Трещины различного генезиса: тектонические, кливажные и гравитационные, формируют сложную систему ослабления прибортового массива, которая определяет реальные механизмы разрушения бортов карьеров. В таких условиях прочностные характеристики монолитной породы утрачивают доминирующее значение, а несущая способность массива характеризуется параметрами поверхностей естественных разрывов, прежде всего сцеплением, которое может быть снижено на два и более порядков по сравнению с ненарушенной породой. В этих условиях особое значение приобретает интеграция лабораторных данных о сдвиговых характеристиках горных пород с результатами натурных исследований геомеханического состояния прибортовых массивов для выявления закономерностей стадийности потери устойчивости и разработки комплексной методики оценки устойчивости карьерных откосов.

По результатам выполненных исследований проведено 127 испытаний на прямой сдвиг со сжатием по стандартам ASTM D5607-16 и ISRM с определением сцепления (C') и угла внутреннего трения (ϕ') по естественным открытым трещинам и по монолиту (C и ϕ). Натурные исследования включали радиолокационный мониторинг, сейсмическое профилирование, телевизионный контроль скважин. Расчётная оценка устойчивости проводилась методом Моргенштерна–Прайса в специализированном программном комплексе.

Статистическая обработка подтвердила закономерное снижение значений сдвиговых характеристик по плоскостям структурных ослаблений: среднее отношение

C/C' составило 78 (коэффициент вариации 29%), φ/φ' – 1,7 (коэффициент вариации 36%). Около 30% трещин характеризуются критически низким сцеплением ($C' < 0,1$ МПа, среднее по выборке $\sim 0,06$ МПа). Сопоставление лабораторных данных с обратными расчётами показало отсутствие выраженного масштабного эффекта для сил трения по трещинам в магматических и метаморфических породах Кольского региона, что допускает прямое использование C' и φ' в инженерных расчётах. На основе комплекса инструментальных наблюдений установлена трёхстадийная модель потери устойчивости: разупрочнение массива – нарастание скорости деформирования – обрушение.

Предложенный комплексный подход, сочетающий прямое экспериментальное определение сдвиговых параметров структурных ослаблений, мониторинг изменений напряжённо-деформированного состояния и верификацию расчётных моделей по фактическим нарушениям устойчивости, является необходимым условием безопасной отработки глубоких карьеров в структурно-неоднородных скальных массивах.

Креницын Р.В.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: Roman_krincyn@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ОТРАБОТКЕ МОЩНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Одно из характерных месторождений на Урале представлено пятью мощными близкорасположенными крутопадающими рудными телами. Рудные тела месторождения локализуются на контакте мраморизованных известняков и вышележащих вулканогенно-осадочных пород. Тектоническое строение месторождения довольно сложное. Разрывные нарушения представлены в основном меридиональными и кососекущими крутопадающими нарушениями, которые вносят своё влияние в распределение полей напряжений на месторождении в целом и на каждом рудном теле в отдельности. Анализ структурно-тектонического строения свидетельствует, что породный массив является типичным представителем иерархически блочных скальных массивов, характерных для большинства рудных месторождений Урала. Месторождение отнесено к удароопасным, поэтому ведется изучение и мониторинг полей напряжений, удароопасности. Отработка ведется системой этажно-блокового обрушения с отбойкой руды на зажатую среду.

Отработка четырёх рудных тел привела к развитию зоны обрушения горных пород с выходом на поверхность. Над одним из рудных тел самообрушение не развивается. В рамках оценки устойчивости очистных выработок проведено исследование трещиноватости и физико-механических свойств руд и пород данного участка отработки. Дополнительно сделаны петрографические исследования (рисунок 1). В результате участок отнесен ко 2 категории трещиноватости – малотрещиноватые горные породы. Выявленные петрографией включения кварца и граната повышают прочностные свойства, что ведет к возможности накопления потенциальной энергии и увеличению удароопасности массива горных пород.

Оценку развития процесса самообрушения провели на основе методик Лобшира, Мэтьюз-Потвина, Мавдслея. Аппроксимацией аналитических расчетов установлены эмпирические зависимости, показывающие, что с достаточно высокой вероятностью (96%) должно произойти постепенное обрушение кровли с увеличением отрабатываемой камеры.

Дополнительно проведено прогнозное объемное моделирование распределения полей напряжений при отработке рудного тела на высоту двух этажей (80 м) с учетом полученных данных физико-механических свойств руд и пород залежи, а также отсутствия крупных тектонических нарушений, способных внести значительные изменения полей напряжений.

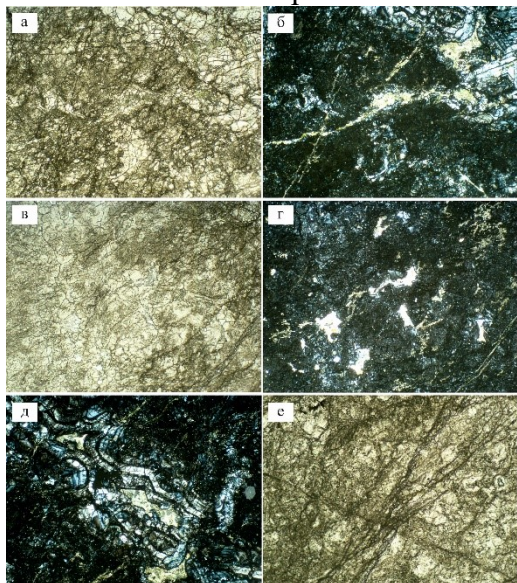


Рисунок 1 – Снимки гранатового скарна: а – б – структура породы (а – без анализатора, увеличение 25^x; б – с анализатором, увеличение 25^x); в – г – карбонат (кальцит), эпидот в промежутках между зернами граната (в – без анализатора, увеличение 25^x; г – с анализатором, увеличение 25^x); д – карбонат, образующий линзочки в агрегате граната (с анализатором, увеличение 25^x); е – разноориентированные микротрещинки в зернах граната (без анализатора, увеличение 100^x)

Заключение:

1. Напряженно-деформированное состояние массива вблизи очистных камер сложной конфигурации определяется не только горнотехническими условиями и физико-механическими свойствами пород, но и в значительной степени структурными неоднородностями массива (трещиноватость, тектонические нарушения и др.) и наличием высокопрочных минеральных включений.

2. Комплексное исследование, включающее структурный анализ и петрографию, позволило количественно оценить факторы, влияющие на прочностные свойства и удароопасность массива. Установлено, что наличие высокопрочных минералов (гранат, кварц) способствует концентрации напряжений.

3. Результаты геомеханического моделирования подтвердили принципиальную возможность отработки камер на высоту двух этажей в рассматриваемых условиях. При этом идентифицированы зоны концентрации напряжений, требующие повышенного внимания в процессе ведения очистных работ.

4. Для обеспечения безопасной отработки камер большого сечения в удароопасных условиях необходима разработка и внедрение систем мониторинга изменений полей напряжений, удароопасности как в зоне влияния очистных работ, так и за её пределами.

Список использованных источников:

1. Именитов В.Р. Локализация пустот при подземной добыче руды / В.Р. Именитов, В.Ф. Абрамов, В.В. Попов. – Москва: Недра, 1983. – 190 с.
2. Внедрение естественного управляемого обрушения вмещающих пород на железных рудниках Урала и Казахстана / Н.П. Влох, А.В. Зубков, Н.С. Ефремовцев [и др.] // Горный журнал. – 1981. – № 4. – С. 55-58.

3. Влияние статических и динамических напряжений на устойчивость подземных горных выработок / О.Ю. Смирнов, В.В. Бодин, Р.В. Криницын, А.А. Ершов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № S4. – С. 148-155.

Кузнецов М.А.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: m.kuznetsov@ksc.ru

СТРАТЕГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ОПОРНЫХ ПУНКТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛИГОНАХ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Одним из основных методов мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, как в естественных, так и техногенных средах, является контроль движения отдельных точек дневных поверхностей блоковых структур.

В зависимости от целей мониторинга, подобные наблюдения могут производиться на различных масштабах. От глобального, при изучении общеземных процессов реализующихся в виде подвижек тектонических плит, до региональных и локальных, при изучении процессов происходящих между или внутри отдельных геологических блоков.

Мониторинг движений и деформаций земной поверхности в районе расположения ответственных объектов в отечественной практике, как правило, производится на локальных или микролокальных полигонах с размерами от первых километров до нескольких десятков. При этом уже достаточно продолжительное время применяются спутниковые методы измерений. Для достижения необходимой точности, измерения на пунктах полигона производятся в статическом режиме, при этом между пунктами вычисляются так называемые базовые линии, которые могут быть объединены в локальную спутниковую сеть.

При построении обособленных локальных спутниковых сетей в основном используются два подхода. При первом, один или несколько пунктов априори принимаются за неподвижные, а вычисление сети и оценка перемещений остальных пунктов производится относительно них; при втором, производится вычисление свободной сети с последующим выявлением условно устойчивых пунктов. В каждом из подходов, определение опорных пунктов остаётся без должной оценки их собственного движения.

Вместе с тем, существует ряд прикладных научных программных комплексов для обработки спутниковых измерений перемещений наблюдательных станций на геодинамических полигонах глобального и регионального масштаба, с помощью которых не только успешно решаются задачи нахождения относительных скоростей наблюдаемых пунктов, но и реализуются современные глобальные отсчетные основы, такие как Международная земная отсчётная основа (ITRF).

При выполнении работ на локальном геодинамическом полигоне предпринята попытка определения собственных движений опорных пунктов с опорой на пункты международной сети ITRF и обработкой полученных данных в научном программном комплексе GAMIT/GLOBK.

В результате удалось отработать методику подготовки и обработки спутниковых измерений для целей мониторинга современных движений земной коры для локальных полигонов используя научный программный комплекс GAMIT/GLOBK.

В докладе рассмотрены подходы к решению ряда вопросов, возникающих при переходе от глобального масштаба к локальному с использованием инструмента «большой» геодинамики для решения задач в условиях отдельного полигона. При этом переход от глобального и регионального масштабов к локальному напрямую связан с размером рассматриваемых блоковых структур. Особо отмечается важность последовательного перехода между масштабными уровнями.

Предлагаемый подход позволяет повысить надёжность исходных пунктов и, как следствие, достоверность определяемых параметров движений земной коры в пределах локальных полигонов при проведении геодинамического мониторинга опасных природных и техногенных объектов.

Кузнецов Н.Н., Кулькова М.С.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: n.kuznecov@ksc.ru, m.kulkova@ksc.ru

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ГЛУБИНОЙ НА ПРИМЕРЕ ХИБИНСКОГО МАССИВА

В условиях увеличения глубины ведения горных работ особую актуальность приобретает изучение закономерностей изменения физико-механических свойств горных пород, параметров их трещиноватости и склонности к динамическому разрушению [1–6]. Несмотря на наличие значительного числа исследований, существующие данные зачастую носят противоречивый характер и не позволяют сформировать однозначные представления о таких закономерностях.

Целью настоящей работы является изучение особенностей изменения физико-механических свойств скальных пород и их трещиноватости с увеличением глубины залегания на примере одного из апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива.

Исследования проведены на керновом материале субвертикальной скважины длиной 501 м, заложенной на глубине 340 м от дневной поверхности. В пределах интервала 340–841 м от дневной поверхности выделены четыре литологических типа пород: ювит (длина керна составляет 5,7% от длины скважины), ричесоррит (32,3%), тингуаитовые дайки (1,2%) и хибинит (60,8%).

Методика исследований включала комплексный анализ структурной нарушенности массива и лабораторные определения физико-механических свойств пород. Оценка трещиноватости выполнялась по показателям индекса качества массива (RQD) и линейной частоты трещин (FF/m) на основе сплошного геомеханического описания керна. Физико-механические свойства (плотность, предел прочности при одноосном сжатии и растяжении) определялись по результатам испытаний образцов керна цилиндрической формы.

Установлено, что исследуемый массив характеризуется высоким качеством пород и низкой степенью структурной нарушенности: более 90% длины скважины соответствуют значениям RQD выше 90%. При этом выявлена выраженная вертикальная зональность трещиноватости. В верхней части разреза (в ювитах) наблюдается повышенная изменчивость параметров и локальные зоны тектонических

нарушений. В интервале распространения рисчорритов массив становится более однородным и слаботрещиноватым, а участок хибинитов характеризуется практически монолитным состоянием ($RQD \approx 100\%$, минимальная частота трещин).

Локальные отклонения от общей тенденции связаны с наличием тектонических нарушений и внедрением даек тингуайта, которые выступают зонами относительного ослабления массива, несмотря на их высокие прочностные свойства. Дополнительно в интервале глубин 470–660 м выявлены зоны дискования керна, не коррелирующие с естественной трещиноватостью пород, что указывает на влияние напряжённого состояния массива пород.

Результаты лабораторных исследований показали, что плотность пород в рассматриваемом интервале глубин от 340 до 841 м изменяется незначительно (в среднем $2,60\text{--}2,70 \text{ г/см}^3$) и не имеет выраженной зависимости от глубины. В то же время прочностные характеристики демонстрируют отчетливую тенденцию к снижению. В интервале от 340 до 480 м значения пределов прочности при одноосном сжатии пород составляют в среднем 150–192 МПа, тогда как на больших глубинах они снижаются в среднем до 100 МПа. Аналогичная закономерность наблюдается для значений пределов прочности при растяжении.

Снижение прочностных характеристик обусловлено, прежде всего, сменой литологического состава пород (переход от рисчорритов к хибинитам), однако также может быть связано с влиянием структурных особенностей и процессов ослабления массива.

На основе полученных экспериментальных данных выполнена оценка склонности пород к динамическому разрушению по критерию П.К. Кайзера. В результате установлено, что все четыре исследуемых литотипа склонны к динамическому разрушению. При этом с увеличением глубины, как и в случае с прочностными характеристиками, происходит снижение потенциала удароопасности пород.

Таким образом, для условий исследуемого участка Хибинского массива установлено, что с увеличением глубины происходит повышение качества массива и снижение его трещиноватости при одновременном уменьшении прочностных характеристик пород и практически неизменной плотности. Полученные результаты имеют важное значение для оценки устойчивости горных выработок и прогноза геомеханических условий, в том числе удароопасности, при освоении глубоких горизонтов месторождений.

Список использованных источников:

1. Каспарьян Э. В., Кузнецов Н. Н., Шоков А. Н., Пак А. К. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №4. – С. 69–84. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84.
2. Козырев А. А., Кузнецов Н. Н., Макаров А. Б. О критериях удароопасности горных пород // Горная промышленность. – 2023. – № S1. – С. 61–68.
3. Кузнецов Н. Н., Рыбин В. В. Влияние условий нагружения горных пород на их склонность к динамическому разрушению // ФТПРПИ. – 2025. – № 6. – С. 95–103. DOI: 10.15372/FTPRPI20250610.
4. Кулькова М. С. Геомеханическое обоснование параметров отработки Ждановского месторождения с учетом особенностей физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния массива: специальность 02.08.06:

- автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кулькова Мария Сергеевна. – Апатиты, 2025. – 24 с.
5. Константинов К. Н., Кулькова М. С. Комплексное геомеханическое обоснование крепления сверхглубоких подземных горных выработок с учетом особенностей теплового режима // Горная промышленность. – 2026. – № 1. – С. 151–156. – DOI 10.30686/1609-9192-2026-1-151-156.
 6. Семенова И. Э., Кулькова М. С. Определение параметров природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с применением натуральных и численных методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 19–32. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_19.

Лавриков С.В.¹, Лукичев С.В.²

¹Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия

e-mail: lvk64@mail.ru

²Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: s.lukichev@ksc.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПУСКА ГОРНОЙ МАССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В современных условиях приоритетной задачей развития отечественной горнорудной промышленности является процесс цифровизации и создание отечественных горно-геологических информационных систем (ГГИС). Одним из возможных решений в данной области является программное обеспечение (ПО) «МАЙНФРЭЙМ» [1,2]. Развитие ГГИС «МАЙНФРЭЙМ» осуществляется, в том числе за счет наполнения блока геомеханического обоснования применяемых технологических схем добычи полезных ископаемых программными средствами различного назначения.

В ряде технологий используется схема добычи с обрушением кровли и выпуском горной массы. Для моделирования движения раздробленных горных пород в современных условиях широко применяется численный метод дискретных элементов (МДЭ) [3-5]. В различных модификациях МДЭ позволяет учесть упругое и вязкое взаимодействие частиц, трение скольжения и трение качения, адгезионные и капиллярные силы, теплоперенос и др. Однако, наряду с неоспоримыми преимуществами, МДЭ имеет существенный недостаток – высокие временные затраты на проведение вычислений, что существенно ограничивает возможности его применения в условиях работы горнорудного предприятия.

В настоящей работе предложен иной подход к моделированию кинематики выпуска, основанный на использовании стохастической модели клеточных автоматов (МКА). В механике горных пород и сыпучих сред стохастические методы начали развиваться с середины 1950-х годов в работах Кандаурова, Литвинишина, Именитова [6-8] и др. В [9] данный метод был независимо предложен для анализа смешения сыпучих материалов. В [10,11] он применялся для моделирования кинематики сыпучих сред в плоской постановке.

В модели клеточных автоматов среда представлена набором ячеек (клеток), каждая из которых обладает определенным правилом деформирования: если материал (или его часть) из одной ячейки перемещается, то на его место с определенной вероятностью поступает материал из соседней ячейки. Построение МКА-модели

сводится к заданию ячеистой структуры тела и определению вероятностей перемещения материала между соседними ячейками. Неоспоримым преимуществом модели является сравнительная простота реализации и возможность учета (за счет варьирования вероятностей) широкого спектра свойств среды: формы и размера частиц, плотности, влажности, способности к разрыхлению, внешнего давления, разрушения и измельчения частиц, локализации деформаций, формирования завесаний, поверхностных склонов и др. К недостаткам МКА можно отнести тот факт, что здесь нет общего алгоритма задания вероятностных характеристик модели в зависимости от свойств среды, поскольку стохастические модели по своей сути являются имитационными.

В работе сформулирована трехмерная модель клеточных автоматов, разработаны оригинальные алгоритмы миграции материала с учетом свойств различных компонентов полезных руд и вмещающих пород, разрыхления, влияния крупности фракций, влажности, горного давления, формирования арочных завесаний и склонов. Разработан интуитивно понятный формат обмена данными с ПО «МАЙНФРЭЙМ», создан и апробирован на синтетических и на реальных данных программный комплекс на языке Object Pascal в среде Delphi. На рисунке 1 показан пример моделирования выпуска горной массы из камеры с одновременным включением системы трех донных и одного торцевого выпускных отверстий.

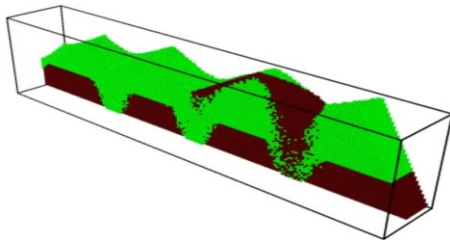


Рисунок 1 – Пример моделирования процесса выпуска на основе МКА

Вывод

Созданный на основе МКА-модели программный комплекс является перспективным для встраивания в отечественные ГГИС с целью геомеханического обоснования эффективности технологий добычи полезных ископаемых с использованием выпуска горной массы.

Список использованных источников:

1. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровые горные технологии: импортозамещение на примере горно-геологических информационных систем MINEFRAME // ФТПРПИ. – 2024. – № 4. – С. 165-172.
2. Наговицын О.В., Лукичев С.В., Алисов А.Ю. Объектная структура данных системы автоматизированного проектирования, планирования и сопровождения работ Mineframe // ГИАБ. – 2013. – № 7. – С. 179-183.
3. Pande G.N., Beer G., Williams J.R. Numerical methods in rock mechanics. Chichester: John Walley, 1990, 327p.
4. Лавриков С.В. Развитие методов математического моделирования и решение актуальных задач механики горных пород в Институте горного дела СО РАН // ФТПРПИ. – 2024. – № 4. – С. 3-28.

5. Журкина Д.С., Клишин С.В., Лавриков С.В., Леонов М.Г. Моделирование локализации сдвигов и перехода геосреды к неустойчивым режимам деформирования на основе метода дискретных элементов // ФТПРПИ. – 2022. – № 3. – С. 13-22.
6. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л., М.: изд-во литературы по строительству, 1966, 320с.
7. Будрык В., Литвинишин Е., Кнотте С., Салустович А. Вопросы расчета сдвижений поверхности под влиянием горных разработок. М.: Углетехиздат, 1956, 65с.
8. Именитов В.Р. Технология, механизация и организация производственных процессов при подземной разработке рудных месторождений. М.: Недра, 1973, 464с.
9. Ревуженко А.Ф. Принципы создания идеальных смесителей порошковых материалов // Порошковая металлургия. – 1989. – № 4.
10. Осинов В.А. Модель дискретной стохастической среды в задачах деформирования и течения сыпучих материалов // ФТПРПИ. – 1992. – № 5. – С. 44-53.
11. Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф. Стохастические модели в задачах локализованного деформирования сыпучих сред в радиальных каналах // ФТПРПИ. – 2000. – № 1. – С. 12-20.

Ломов М.А., Книга К.О.

Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

e-mail: 9241515400@mail.ru

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА РУДНИКЕ ЮЖНЫЙ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)

Одним из наиболее результативных инструментов управления горным давлением и прогноза опасных динамических явлений признан сейсмоакустический метод. Он позволяет фиксировать предвестники, зарождение и изменение поля напряжений по микросейсмическим сигналам в массиве горных пород, тем самым заблаговременно предоставляя информацию для принятия мер и предупреждения аварийных ситуаций и оптимизации технологических решений. Целью работы является разработка методик анализа и заблаговременного прогноза геомеханического состояния горного массива, а также выявление закономерностей в сейсмически активных зонах по данным сейсмоакустического мониторинга для снижения риска опасных динамических проявлений горного давления на руднике Южный. Рудник Южный, расположенный в Восточном Приморье, с 1986 года классифицируется как удароопасный, что связано с усилением геодинамических рисков и возрастанием вероятности горных ударов и других опасных событий. Повышенная природная и техногенная сейсмическая активность играет ключевую роль в оценке безопасности эксплуатации этого объекта. Поэтому изучение динамических процессов требует высокоточных технологий для прогнозирования возможных аварийных ситуаций. Одной из таких технологий является автоматизированная система контроля горного давления «Prognoz-ADS», которая была установлена в 2022 году на нижних горизонтах рудника и позволяет отслеживать акустические события различной энергии. Система, состоящая из ряда геофонов, фиксирует данные с высокой точностью, обеспечивая полный контроль за состоянием участка горного массива. После временной остановки работ по добыче полезных ископаемых в январе 2025 года на руднике наблюдается стабилизация количества акустических событий в сутки. Очаги акустической активности по-прежнему располагаются вдоль линии пересечения горных выработок с

геологическими разломами. Выполненный прогноз по данным сейсмоакустической системы показал высокую корреляцию с геологическими условиями месторождения, в том числе с зонами разломов. Полученные результаты подтвердили существующие теории о накоплении напряжений в определённых участках. Анализ полученных результатов показал, что не все события могли быть корректно идентифицированы системой из-за ограничения зоны мониторинга. Это указывает на важность расширения зоны охвата мониторинга, особенно в юго-западной части месторождения, где активно происходят геодинамические изменения.

Локальная концентрация АЭ-событий, зарегистрированных системой АСКГД «Prognoz-ADS», расположена в зонах пересечения горных выработок с геологическими разломами, что подтверждает результаты ранних исследований определяющего влияния геолого-структурных особенностей месторождения (рисунок 1).

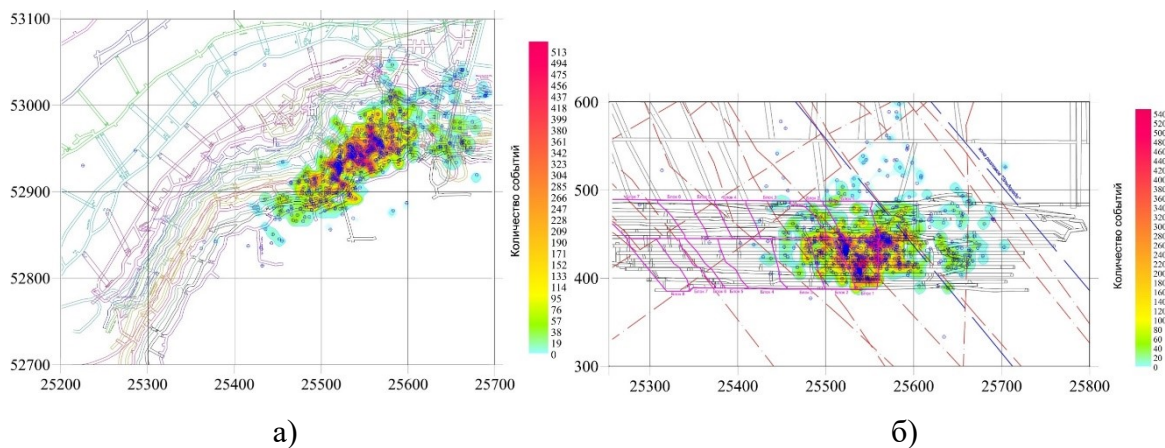


Рисунок 1 – Распределение АЭ событий, зарегистрированных за период с января по ноябрь 2025 г. на руднике Южный в проекции на: а) – совмещенный план горизонтов; б) – плоскость XZ плана горизонтов

В целом, внешняя сейсмическая активность не оказала заметного влияния на условия ведения горных работ, что подтверждается анализом сейсмических данных региональных станций. Таким образом, полученные результаты анализа данных позволяют сделать выводы о высоком уровне риска некоторых участков разрабатываемого месторождения и предложить улучшения в системе его мониторинга для повышения точности прогноза и управления рисками. Систематический подход к мониторингу динамических процессов поможет минимизировать геодинамические угрозы и повысить безопасность работы на Южном месторождении.

Технологические и аналитические исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ЦИМС» ХФИЦ ДВО РАН, финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2025-621.

Морозов И.А., Токсаров В.Н.

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

e-mail: imorozov.work@yandex.ru, toksarov67@mail.ru

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ МЕТОДОМ ДИСКОВАНИЯ КЕРНА

Дискование керна, как процесс разделения керна на диски в ходе бурения под действием высокого уровня напряжений, является нетипичным для квазипластичных соляных пород. Увеличение глубины отработки калийных (соляных) месторождений приводит к росту уровня напряжений в породном массиве и, как следствие, возникновению потенциальной возможности дискования керна. В работе приводятся результаты оценки уровня напряжений в соляных породах глубокого калийного рудника методом дискования керна.

Особенности разработки месторождения заключаются в следующем [1, 2]:

- глубина ведения горных работ более 1000 м;
- промышленный сильвинитовый пласт средней мощностью около 10 м;
- породы кровли представлены чередованием ангидрит-доломитовых и соляных пород;
- применяется камерная система разработки.

Бурение керновых скважин выполнено перпендикулярно породному обнажению на удалении от сопряжений.

В ходе исследования установлено, что дискование керна не всегда позволяет выполнить количественную оценку уровня действующих напряжений в соляных породах. В то же время особый интерес представляют результаты, полученные на основе повторного бурения керновых скважин в барьерные и междукамерные целики. По данным первичного бурения, выполненного с минимальным отставанием во времени от оконтуривания целиков, фиксировалось интенсивное дискование. При повторном бурении керновых скважин в междукамерных целиках дискование не обнаружено, что свидетельствует о выходе целиков из-под нагрузки и также подтверждается другими исследованиями, выполненными на опытном участке.

Одним из возможных путей решения проблемы количественной оценки уровня напряжений в соляных породах методом дискования керна может быть проведение численных экспериментов для получения зависимостей между параметрами поля напряжений и параметрами дискования керна с учетом характерных особенностей деформирования соляных пород [3-5].

На основе проведенных исследований показана потенциальная возможность применения метода дискования керна для оценки уровня напряжений в соляных породах.

Список использованных источников:

1. Токсаров В.Н., Поляков И.В., Бельтюков Н.Л., Лифшиц Е.Л., Морозов И.А. Напряженное состояние породного массива в условиях Гремячинского калийного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 100–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_100.
2. Морозов И.А., Токсаров В.Н., Лукина Е.С. Оценка устойчивости потолочины между выработками в условиях глубокого калийного рудника // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2026. – Вып. № 1. С. 424–430.

3. Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 16–28. DOI:10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.
4. Токсаров В.Н., Морозов И.А., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – С. 113–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-113-124.
5. Морозов И.А., Токсаров В.Н., Поляков И.В., Лифшиц Е.Л. Оценка влияния очистных работ на устойчивость горных выработок калийного рудника // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2024. – Вып. № 1. – С. 226–237.

Назарчук О.В.

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия
e-mail: o.nazarchuk@ksc.ru*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАСТОЙНЫХ ЗОН В ГЛУБОКИХ КАРЬЕРАХ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С увеличением спроса и развитием технологий добычи полезных ископаемых с каждым годом увеличивается количество глубоких карьеров. На данный момент в России находятся более пяти глубоких карьеров, глубина которых превышает 500 м, например, Восточный Олимпиадинского ГОКа, Центральный ОАО Апатит, Железный Ковдорского ГОКа и другие.

Увеличение глубины карьеров, в свою очередь, приводит к ослаблению естественного воздухообмена и, как следствие, ухудшению санитарно-гигиенических условий труда. В связи с этим возникает вопрос: до каких пределов происходит снижение воздушных потоков вблизи борта и дна карьера. Ослабление воздушных потоков приводит к образованию застойных зон, в которых происходит накопление вредных газов (NO_x, CO), мелкодисперсной пыли и других веществ.

Одним из способов прогнозирования образования застойных зон в карьерном пространстве является численное моделирование, которое позволяет рассчитать места образования этих зон при различных метеорологических условиях (температурные режимы, направление ветрового потока). Данное исследование посвящено моделированию аэро-термодинамики атмосферы карьерного пространства на основе CFD-моделирования в программном комплексе ANSYSFluent.

Моделирование проводилось с использованием классических для данного рода задач начальных и граничных условий на примере одного из действующих карьеров Мурманской области и учитывает климатические условия региона. Результаты моделирования представлены в виде векторного поля скорости (рисунок 1) и распределения загрязняющего вещества NO_x (рисунок 2).

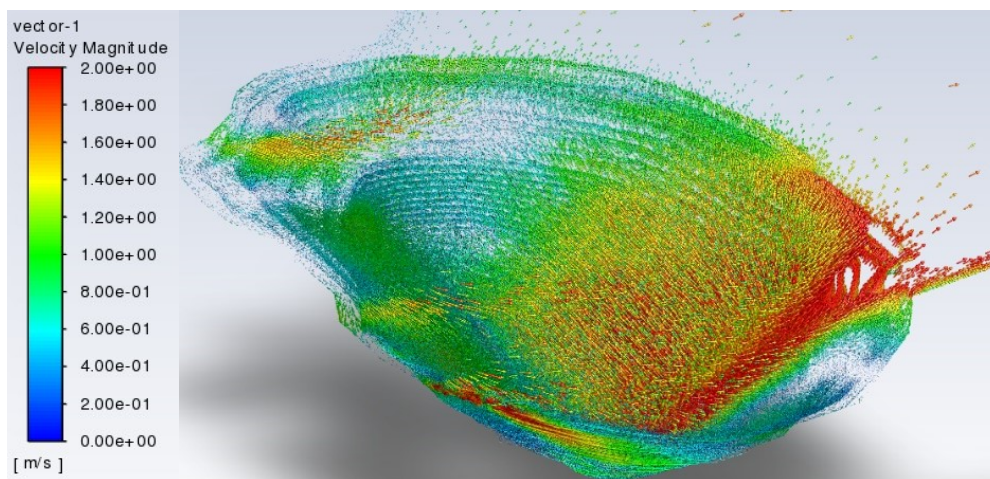


Рисунок 1 – Векторное поле скорости атмосферы карьера

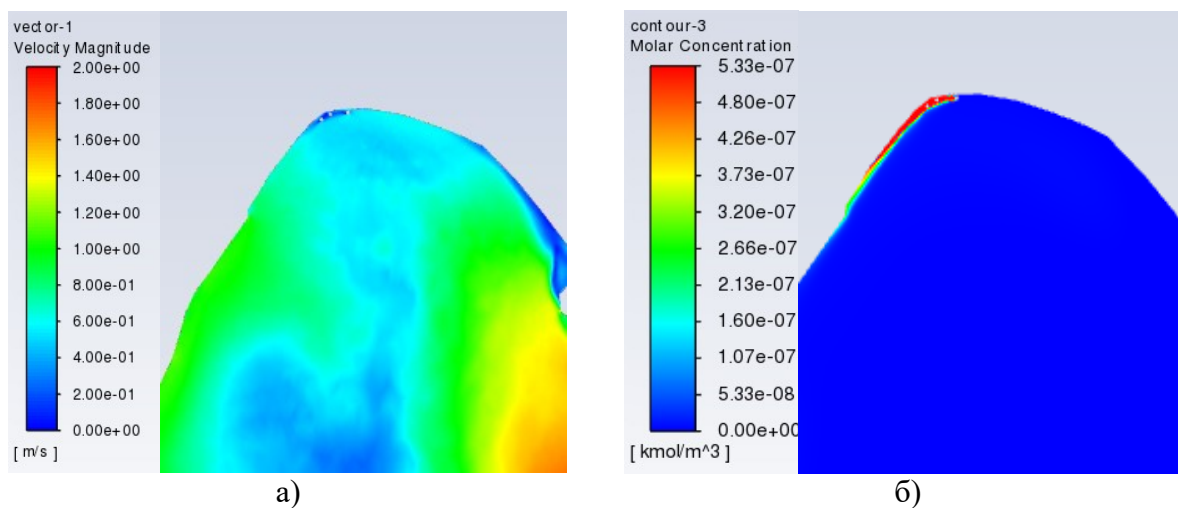


Рисунок 2 – Пример застойной зоны: а) контур поля скорости, б) распределение загрязняющего вещества вдоль борта карьера с превышением ПДК

Результаты численного моделирования могут быть рассмотрены как важный пример при разработке методического подхода к прогнозированию образования застойных зон в глубоких карьерах и определению их параметров, дают представление о распределении воздушных потоков внутри карьерного пространства и демонстрируют места накопления вредных веществ.

Никитенко А.С., Калашник А.И.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: a.nikitenko@ksc.ru

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛУННО-СОЛНЕЧНЫХ ПРИЛИВОВ И ТРЕНДОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Контроль деформационного состояния породного массива, в котором разрабатывается месторождение полезных ископаемых, является важной задачей геомеханики. Для этих целей применяются различные методы, в том числе основанные на высокоточных измерениях деформаций (кварцевые деформометры, наклонометры и т.п.). Вместе с тем, разрешающая способность этих методов позволяет выделять на результатах измерений гармоника твердотельных деформаций вследствие лунно-солнечных приливов.

Твердотельные лунно-солнечные приливы представляют собой регулярное внешнее воздействие и могут использоваться как естественный тест-сигнал для оценки чувствительности геосреды и измерительной системы. В данной работе анализируются результаты измерений наклономеров с целью выявления возможного отклика массива на приливное воздействие.

Для исследования использованы данные наклономерных наблюдений на руднике «Карнасурт» Ловозерского массива (Кольский полуостров). Экспериментальные данные сопоставлялись с модельным приливным воздействием, рассчитанным в точке установки прибора. Применялись спектральный анализ, регрессионный подход, а также кросс-спектральный анализ с оценкой когерентности и фазового сдвига. Статистическая значимость проверялась с использованием суррогатных тестов.

Обнаружены эпизоды статистически значимой связи результатов наклономерных измерений с приливным воздействием. Наиболее устойчивый отклик обнаружен в полусуточном диапазоне, тогда как суточные компоненты выражены слабее и характеризуются высокой неопределенностью. Фазовый анализ указывает на наличие согласованного отклика.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии признаков отклика горного массива на приливное воздействие, регистрируемого наклономером. Наблюдаемые особенности согласуются с ожидаемыми приливными вариациями и требуют дальнейшего изучения на расширенном наборе данных.

Панжин А.А., Панжина Н.А.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

email: panzhin@igduran.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА И КАРЕЛИИ

На основе экспериментальных данных определены скорости современных геодинамических движений в Международной земной системе координат ITRF2014 станций GNSS, расположенных на территории Кольского полуострова и Карелии. Выполнено детрендрование полученных временных рядов скоростей геодинамических движений и исключена их региональная составляющая. В результате

Панжин А.А., Панжина Н.А.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

email: panzhin@igduran.ru

СИСТЕМА ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРИБОРТОВОГО МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Действующим нормативным документом регламентируется, что организация, эксплуатирующая объект ведения открытых горных работ, должна обеспечить проведение визуальных и инструментальных наблюдений за состоянием бортов, откосов и уступов. В случае выявления в прибортовом массиве зон и участков возможного проявления разрушающих деформаций, необходима организация стационарных инструментальных наблюдений и (или) дистанционного мониторинга. На предприятии должен быть организован оперативный деформационный мониторинг, задачей которого является контроль устойчивости участков бортов в локальных зонах, в рабочих зонах и на участках расположения внутрикарьерной инфраструктуры. На дальнейших этапах разработки месторождения должна быть заложена станция наблюдения маркшейдерскими методами за деформациями бортов карьера. Исходя из этого, предлагается схема поэтапного формирования наблюдательной станции для осуществления деформационного мониторинга прибортового массива при ведении открытых горных работ.

Основными принципами построения системы деформационного мониторинга является поэтапность развития сети наблюдательных станций и разумная достаточность маркшейдерско-геодезических построений, обеспечивающая получение достоверной информации о деформационных процессах, происходящих в прибортовом массиве.

На первом этапе разработки необходимо создание в прибортовом массиве, на конечном контуре карьера, а также внутри карьерного пространства, на технологических площадках, долговременной основы наблюдательной станции в виде опорной маркшейдерской сети (ОМС), репера которых будут использоваться не только для инструментальных наблюдений за состоянием бортов карьера, но и при проведении съемочных работ. Привязку реперов и контроль неизменности их пространственного положения необходимо осуществлять от пунктов Государственной геодезической сети (ГГС), расположенных вне зоны влияния горных работ, поскольку зачастую отвалы располагаются в непосредственной близости от карьера, и отсутствует возможность заложения исходных и опорных реперов в прибортовом массиве на необходимом расстоянии от конечного контура карьера (не менее 1.5 Н). Принцип формирования системы деформационного мониторинга приведен на рисунке 1.

Основой поэтапного формирования системы деформационного мониторинга является обеспечение постоянного визуального и инструментального наблюдения за нарушением устойчивости бортов, уступов, откосов с целью обнаружения признаков развития деформаций в рабочей зоне. При визуальных наблюдениях производится общее объектное и маршрутное обследование состояния откосов и берм, фиксация, в том числе с использованием фотосъемки, выявленных трещин и признаков нарушения устойчивости. При выявлении и документировании опасных участков реализуются долговременные маркшейдерские наблюдения за перемещениями реперов профильных линий, закладываемых вблизи нижней бровки осыпанного нижнего яруса, а также наблюдения за смещениями массива (призменный мониторинг с использованием роботизированного тахеометра, либо георадарный).



Рисунок 1 – Схема поэтапного формирования системы деформационного мониторинга

Результаты деформационного мониторинга, полученные совместно с использованием долговременной основы наблюдательной станции совместно с инструментальными наблюдениями за перемещениями реперов профильных линий – являются основой для формирования площадной наблюдательной станции. Полученные в результате инструментальных наблюдений данные о процессе сдвига в прибортовом массиве преобразуются в тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций, по величинам и направлению которых определяются закономерности деформирования массива и потенциальная опасность отдельных его участков.

Потапчук М.И.¹, Рассказов И.Ю.², Сидляр А.В.¹, Бурдинская А.А.¹

¹Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

e-mail: Potapchuk-igd@mail.ru

²Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

Анализ удароопасности на подземных рудниках Дальневосточного региона указывает на усложнение горнотехнической ситуации и увеличение геодинамического риска при ведении горных работ, обусловленные ростом выработанных пространств и глубины разработки. Безопасность и эффективность горных работ в подобных условиях во многом зависят от своевременного прогноза зон опасных концентраций напряжений и точной оценки степени влияния очистной выемки и тектонической структуры месторождения на изменение напряжённо-деформированного состояния массива [1]. В практике геомеханических исследований для изучения природно-техногенных полей напряжений наиболее широко применяется численное моделирование НДС методом

конечных элементов [2-3]. Наиболее надежные результаты исследований обеспечивают 3D модели, учитывающие технологию отработки запасов, геологическое строение горного массива и особенности его тектонической структуры, включая особенности взаимодействия по границам тектонических блоков.

В Дальневосточном регионе среди уже эксплуатируемых удароопасных месторождений выделяется Южное полиметаллическое месторождение, на котором первые горные удары с тяжелыми последствиями произошли на глубинах всего 150-170 м. В настоящее время глубина отработки достигла 500 м. В выработанном пространстве рудника накопилось значительное количество забалансовых целиков, концентраторов напряжений. Кроме этого, горные работы сейчас ведутся в зоне пересечения Рудного разлома. Все это приводит к увеличению геодинамического риска при его отработке. Так, 29 октября 2024 г. в районе Блока 6-411 (подэтаж 419 м) произошло динамическое проявление горного давления в форме толчка, в результате были выявлены обрушения породы в горных выработках на подэтажах +411, +419, +427 м. Для выявления причин мощного геодинамического явления было выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов в объемной постановке задачи последовательной отработки блоков 1-7 в этаже +411... +431 м. Результаты моделирования показали, что выемка запасов в вышеуказанных этажах приводит к формированию сложного природно-техногенного поля напряжений и к значительным концентрациям напряжений, преимущественно в забалансовых рудных целиках, оставляемых на вышележащих горизонтах. Максимальные значения сжимающих напряжений достигают 230 МПа, значительно превышают предел прочности на сжатие рудного массива и указывают на потенциальную удароопасность и необходимость разработки профилактических мероприятий для их разгрузки и приведения в неудароопасное состояние.

Стоит также отметить, что отработка блоков 1-7 в этаже +411... +440 м осуществляется в непосредственной близости либо на пересечении с разломом «Рудный». Поэтому для установления влияния данной тектонической структуры на удароопасность месторождения было выполнено дополнительное моделирование, которое показало, что наличие разлома приводит к росту сжимающих напряжений в этажах +387... +427 м и +440... + 480 м. Величина сжимающих напряжений достигает 100 МПа, что с высокой вероятностью приведет к разрушению остроугольных участков в массиве, формирующихся между висячим боком рудного тела и разломом «Рудный» в месте их пересечения.

В Солнечном районе Хабаровского края отрабатывается еще одно полиметаллическое месторождение «Фестивальное», которое было отнесено к склонным по горным ударам с глубины 660 м (горизонт 270 м) от поверхности [4]. Отрабатывается месторождение с 1968 г., большая часть запасов, разведанных в 1958-1977 гг., в настоящее время отработана.

В 2025 г. на Фестивальном месторождении, на котором горные работы велись достаточно интенсивно, преимущественно в районе рудной зоны Геофизическая наблюдалось усложнение геомеханической обстановки. Оловорудное месторождение «Фестивальное» представлено четырьмя крупными рудными зонами: Ягодная, Геофизическая, Водораздельная и Красивая. Рудные зоны прослежены по простиранию от 880 до 1440 м, по падению – от 500 до 760 м. Строение рудных зон сложное, включающее в себя как основные жильные тела, так и серию жилообразных оперяющих тел. Мощность основных и оперяющих рудных тел непостоянная и для отрабатываемой зоны Ягодная составляет 1,0-6,3 м, зоны Водораздельная 0,9-4,3 м, зона Геофизическая 1,2-6,5 м. Падение рудных тел, в основном, крутое (70-90°). Рудная зона Ягодная до гор. 525 м практически отработана, основные запасы рудной зоны

Водораздельная сосредоточены ниже гор. 450 м. На нижних горизонтах в районе рудной зоны Геофизическая наблюдаются участки, характеризующиеся сложным геологическим строением и высокой изменчивостью параметров рудных тел.

Прогноз удароопасности в пределах шахтного поля Фестивального месторождения осуществляется путем инструментальных измерений параметров сейсмоакустической активности массива горных пород с применением прибора локального контроля «Prognoz-L2» [5], а также визуальными наблюдениями. В 2025 г. по результатам измерений параметров АЭ в отдельных участках горного массива на горизонтах 370 м и 330 м регистрировался повышенный уровень акустической активности, и устанавливалась категория «Опасно». В июне 2025 г. было выявлено разрушение горных выработок в районе ВХВ на горизонтах 370 м и 330 м.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) последовательной поэтажной отработки в районе профильных линий ГII, ГIII и ГIV позволило установить следующее: выемка запасов рудного тела 2 до гор. 460 м и рудного тела 1 до гор. 480 м в районе профильной линии ГII приводит к формированию зоны концентрации в рудном массиве ниже границы выработанного пространства, уровень напряжений достигает 180 МПа, интенсивность касательных до 80 МПа; участок максимального сближения рудных тел в районе профильной линии ГIII уже отработан, в этаже 300... 370 м расстояние между рудными телами составляет более 15 м, и максимальные концентрации напряжений наблюдаются в рудном массиве ниже отработанных камер, уровень напряжений достигает 160 МПа и более; в районе профильной линии ГIV рудные тела сближаются на отметке 440 м и ниже до отм. 360 м. В связи с тем, что мощность рудных тел в районе данного профиля составляет 6-10 м напряжения концентрируются в рудно-породном массиве ниже отработанных блоков. После выемки рудных тел до гор. 360 м уровень напряжений достигает более 125 МПа, приближаясь к предельным величинам напряжений.

Кроме этого, выемка запасов рудной зоны Геофизическая приводит к формированию значительных областей разгрузки во вмещающем массиве вдоль отработанных камер, а также в районе сближения рудных тел. Уровень растягивающих напряжений превышает 10 МПа и указывает на высокую вероятность разрушения данных участков.

Список использованных источников:

1. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И.Ю. Рассказов. – М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 329 с12.
2. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
3. The birth of the finite element method and of computational mechanics / Zienkiewicz O.C. // Int. J. Numer. Meth. Eng. – 2004. – № 60. – P. 3-10.
4. Отчет о НИР «Исследование геомеханического состояния массива горных пород оловорудного месторождения «Фестивальное» и подготовка Заключения по оценке его склонности к горным ударам, г. Хабаровск, ИГД ДВО РАН, рук. Работ Рассказов И.Ю., 162 с.
5. Оценка геомеханического состояния удароопасного массива горных пород по данным локального геоакустического контроля / А.А. Терешкин, Д.С. Мигунов, П.А. Аникин [и др.] // Проблемы недропользования. – 2017. – № 1(12). – С. 72-80. – EDN VWDLXE.

Рассказов И.Ю.

*Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия
e-mail: rasskazov@igd.khv.ru*

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГОРНЫХ УДАРОВ И СНИЖЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА

Освоение недр на современном этапе ведется в усложняющихся горногеологических условиях и на больших глубинах и часто сопровождается динамическими проявлениями горного давления: от внезапных выбросов породы и газа до разрушительных горных и горно-тектонических ударов. В этих условиях для контроля и эффективного управления горным давлением необходимо применение комплекса различных теоретических, численных и инструментальных методов. Наиболее надежные прогнозные оценки удароопасности могут быть получены при применении нескольких дополняющих друг друга методов и технических средств, объединенных в единую систему комплексного геомеханического мониторинга (СКГМ), которая позволяет регистрировать и определять параметры не только крупных геодинамических событий, но и их предвестников.

В системе комплексного геомеханического мониторинга важную роль играют методы машинного обучения. Они применяются на всех его этапах: от выделения полезных сигналов в общем потоке акустических событий, до определения параметров потенциально удароопасных зон и прогноза опасных геодинамических явлений [1].

В АСКГД «Prognoz ADS», которая является важным элементом системы комплексного геомеханического мониторинга, фильтрация технологических помех производится как на аппаратном, так и на программном уровне с использованием специальных алгоритмов. Для обработки данных применяются методы интеллектуального анализа [2, 3]. Выделение формирующихся очагов горных ударов базируется на теории случайных графов с использованием установленной компоненты связности и разработанных алгоритмов, основанных на методах кластерного анализа. Надежность прогноза удароопасности обеспечивает методика, в которой используются модели случайного леса, градиентного бустинга и рекуррентные нейронные сети.

Наличие системы комплексного мониторинга открывает новые возможности для разработки эффективных методов снижения удароопасности и геодинамического риска, основанных на взрывной разгрузке массива. Их реализация включает в себя бурение вееров скважин в район формирующегося очага горного удара и проведение сотрясательного или камуфлетного взрывания, обеспечившего снижение удароопасности и перемещение опасной зоны вглубь массива. При этом на всех этапах разгрузки осуществляется непрерывный сейсмоакустический мониторинг геомеханических процессов. Для предотвращения горно-тектонических ударов взрывным воздействием разгружаются высоконапряженные зоны, формирующиеся вдоль границ тектонических блоков.

Применение системы комплексного мониторинга на ряде удароопасных рудников доказало возможность обеспечить допустимый уровень безопасности горных работ за счет выявления и эффективной разгрузки потенциально удароопасных участков еще на ранних стадиях подготовки горных и горно-тектонических ударов.

Список использованных источников:

1. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий / И.Ю. Рассказов, Ю.В. Федотова, П.А. Аникин, Д.С. Мигунов, А.В. Константинов // Горная промышленность. 2023. № 5S. С. 18-24.
2. Константинов А. В., Рассказов И. Ю. Разработка комплекса нейросетевых моделей для идентификации типа источника акустического излучения на удароопасном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 23–36.
3. Рассказов И.Ю. Аникин П.А., Грунин А.П., Константинов А.В. Методы и средства геомеханического мониторинга для безопасного и эффективного освоения недр // Горный журнал. 2025. № 3. С. 4-11.

Романевич К.В., Мулев С.Н.

АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: romanevichkirill@yandex.ru, smuleva@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УДАРООПАСНОСТИ НА РУДНИКАХ ОКТЯБРЬСКОГО И ТАЛНАХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Горные работы на Талнахском и Октябрьском месторождениях в Норильском промышленном районе ведутся в условиях сложного тектонического строения массива и сильной нарушенности вмещающих пород и руд, на некоторых участках отмечаются превышения горизонтальных напряжений более чем в 2 раза относительно вертикальных [1]. Участки на глубинах более 700 м относятся к опасным по горным ударам.

Выемка различных типов руд ведется на глубинах 500-1500 м и более. Основная применяемая система разработки – камерная система с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями со сплошным или камерно-целиковым порядком отработки. В незначительных объемах, как правило, на выклиниваниях, применяются варианты слоевой системы отработки с закладкой. Очистная выемка производится в защищенных зонах, образованных бурением разгрузочных скважин большого диаметра.

В соответствии с «Указаниями по безопасному ведению горных работ» [2] на рудниках действуют участки по прогнозированию горных ударов, ведутся наблюдения и выполняются мероприятия по их предупреждению. Выявление зон формирования и распределения сейсмических событий осуществляется микросейсмическим методом с помощью системы «Релос-Р/Ш-64-Н», обработка информации выполняется по методикам ВНИМИ [3].

По данным, представленным в [1], только на руднике «Гаймырский» в течение 2020 г. зарегистрировано более 8 700 сейсмособытий с суммарной энергией $3,7 \cdot 10^6$ Дж (из них 76 событий с энергией более 4 500 Дж и 7 – более 10 000 Дж) и в течение 2021 г. – 5 500 сейсмособытий с суммарной энергией $2,1 \cdot 10^6$ Дж (из них 27 событий с энергией более 4500 Дж и 3 – более 10 000 Дж).

При выполнении работ по научно-методическому сопровождению автоматизированных систем непрерывного сейсмического мониторинга рудников ЗФ Октябрьского и Талнахского месторождений специалистами АО «ВНИМИ» проводятся

исследования и разрабатываются технические решения для совершенствования метода прогнозирования удароопасности, обеспечивающие повышение информативности прогноза и безопасности при ведении горных работ, предлагаются новые интеллектуальные подходы, параметры и критерии комплексного прогнозирования [4, 5].

В рамках одного из разрабатываемых подходов массив итерационно разделяется на центральные и соседние блоки заданной величины. Для каждого блока с его уникальным индексом учитывается количество сейсмособытий N и суммарная энергия с возможностью дополнения широкого спектра параметров – геолого-геофизических, горнотехнических и др. Так формируется структурированная информация о пространственном распределении мультимодальных данных в пределах месторождения. На этом наборе данных производится обучение модели машинного обучения для прогноза вероятности крупных сейсмособытий (энергия более 4 500 Дж) на срок от суток и более. Таким образом выявляются связи между локальной конфигурацией параметров и сейсмическими событиями заданной энергии, что позволяет выполнять краткосрочный прогноз развития удароопасных зон.

В ходе непрерывного сейсмического мониторинга вмещающих массивов и научно-методического сопровождения на базе вновь поступающих данных проводится тестирование, необходимое для проверки обобщающей способности модели. Это основной способ оценить реальную практическую ценность прогноза модели машинного обучения.

На данном этапе разработки модель демонстрирует смешанное качество с заметным, но нестабильным прогностическим потенциалом – в ряде случаев крупные целевые события действительно попадают в прогнозные зоны или находятся на их границе, что говорит о наличии у модели способности локализовать области повышенной вероятности событий (события происходят в единственной или основной зоне прогноза).

Вместе с тем ряд реальных крупных событий происходит вне прогнозных зон или лишь частично пересекается с ними либо в выявленных прогнозных зонах фиксируются события меньшей энергии, тогда как целевые (крупные) события оказываются вне этих зон – модель улавливает общую активность, но хуже различает целевые события. Также присутствуют ложноположительные срабатывания, когда в прогнозных зонах не происходит событий ни в день прогноза, ни на следующие сутки. Вероятно, это является результатом того, что модель на данном этапе не учитывает динамику горных работ, которые оказывают воздействие на напряженно-деформированное состояние массива, а также ряд других факторов.

В целом представленную модель можно охарактеризовать как обладающую частичной предсказательной способностью. Данные, получаемые в ходе научно-методического сопровождения, пополняют обучающую выборку разрабатываемой модели для ее дальнейшего развития.

Список использованных источников:

1. Дарбинян Т.П., Марысюк В.П., Уткин Н.Н., Муштекенов Т.С. Развитие геотехнологии освоения сульфидных медно-никелевых залежей в сложных геодинамических условиях рудников «Октябрьский» и «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Москва; Норильск: Штрих Ру, 2025. – 335 с.
2. Указания по безопасному ведению горных работ на Октябрьском и Талнахском месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. – Норильск, Санкт-Петербург, 2015. – 93 с.

3. Мулев С.Н., Питаль М.Н. Программный комплекс GITS2. Руководство по эксплуатации. Санкт-Петербург: ВНИМИ; 2024. 117 с.
4. Романевич К.В., Мулев С.Н. Применение гибридных методов машинного обучения и геопространственного моделирования для повышения надежности прогнозов геодинамических процессов. Комбинированная геотехнология: цифровизация и роботизация геотехнологических процессов / Под ред. М.В.Рыльниковой // Научные труды XIII Международной научно-практической конференции, г. Магнитогорск, 26-30 мая 2025 г. М: ИПКОН РАН, 2025. С. 162-164.
5. Романевич К.В. Разработка модели машинного обучения на основе мультимодальных данных для прогнозирования удароопасности // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2025. – Т. 12. № 4. – С. 65-72. <http://dx.doi.org/10.15372/FPVGN2025120408>.

Рукавишников Г.Д.

АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: rukavishnikov@vniimi.ru

ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВЗРЫВЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ

В работе выполнен анализ сейсмической активности массива горных пород после технологических взрывов на месторождении, ведущем добычу железной руды подземным способом на большой глубине с применением различных систем разработки.

Данное месторождение примечательно тем, что в пределах одного шахтного поля применяются несколько принципиально разных систем разработки – этажная с принудительным обрушением, камерная система с закладкой выработанного пространства, система подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды.

Одинаковая глубина ведения горных работ, одно поле тектонических напряжений, схожие геологические условия позволяют сравнивать системы разработки по наведённой сейсмичности и делать вывод о характерных особенностях сейсмического режима в зависимости от применяемой технологии разработки и её параметров.

У каждой системы разработки есть геометрические параметры, энергетические параметры (масса ВВ, схема взрывания) – то, что заложено «в начало» процесса. В «конце процесса» – коэффициенты извлечения, потери, разубоживание, объём образованных пустот (требующих заполнения либо твердеющей закладкой, либо обрушенными породами), а также «отклик» массива горных пород в виде роста сейсмической активности после проведения технологических взрывов.

Для анализируемых систем разработки рассчитаны такие параметры сейсмической активности, как энергетический класс сейсмической волны самого взрыва, количество и суммарная энергия толчков после взрыва, траектория смещения приведённого центра сейсмозернового выделения, распределение толчков по расстоянию от места взрыва. Выявлены особенности, характерные для каждой из систем разработки.

Рыбин В.В.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: v.rybin@ksc.ru

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ОБЛАСТЕЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ В МАССИВАХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Выявление потенциальных областей неустойчивости при ведении горных работ осуществляется посредством организации системы мониторинга. Мониторинг устойчивости массива пород выполняется с использованием комплекса различных методов, в числе которых геодезические методы (классическая геодезия, методы спутниковой геодезии, геодезические радары, беспилотные летательные аппараты (БПЛА)); геофизические методы, основанные на исследовании внутреннего строения массива пород, в том числе микросейсмический метод.

В процессе развития подходов к геомеханическому мониторингу сформирована комплексная система наблюдений за состоянием массива горных пород с целью своевременного выявления негативных изменений и разработки рекомендаций по их локализации (рисунок 1).

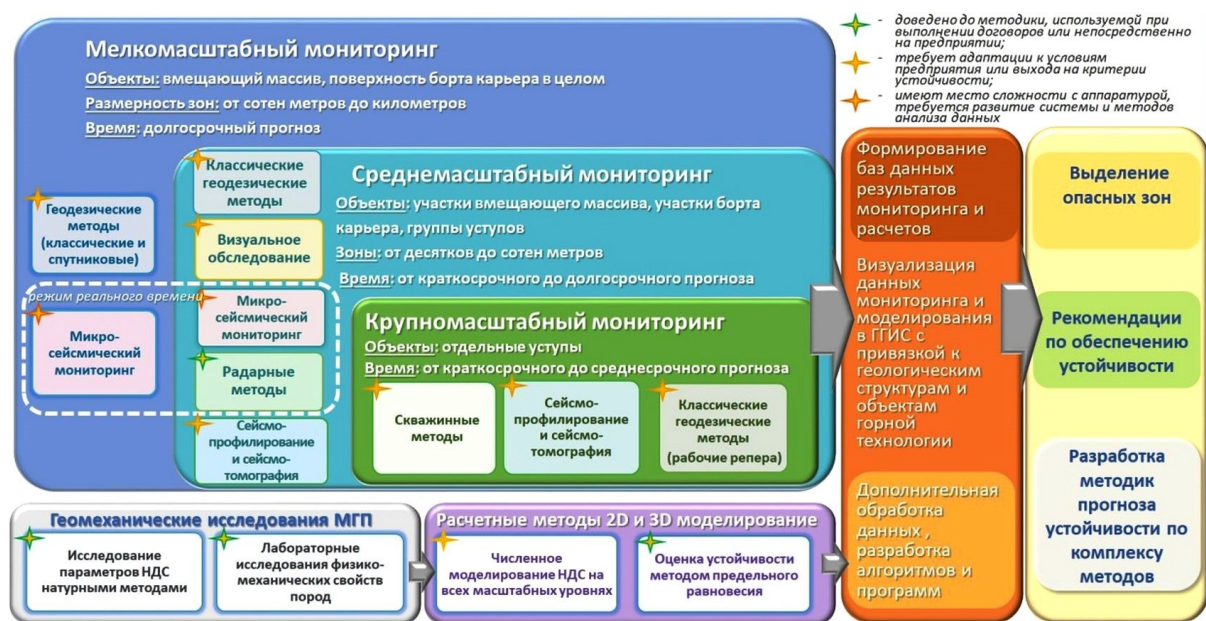


Рисунок 1 – Схема мультимасштабного мониторинга

В результате использования всего комплекса методов формируется ряд инженерно-геологических, геомеханических, расчётных моделей, на основе которых производится районирование месторождения в границах выработанного пространства для выявления потенциально опасных участков, что, в свою очередь, позволяет планировать необходимые профилактические мероприятия для обеспечения безопасности горных работ.

На рисунке 2 приведён пример последовательной разработки моделей для районирования массива пород в окрестности крупного рудного карьера.

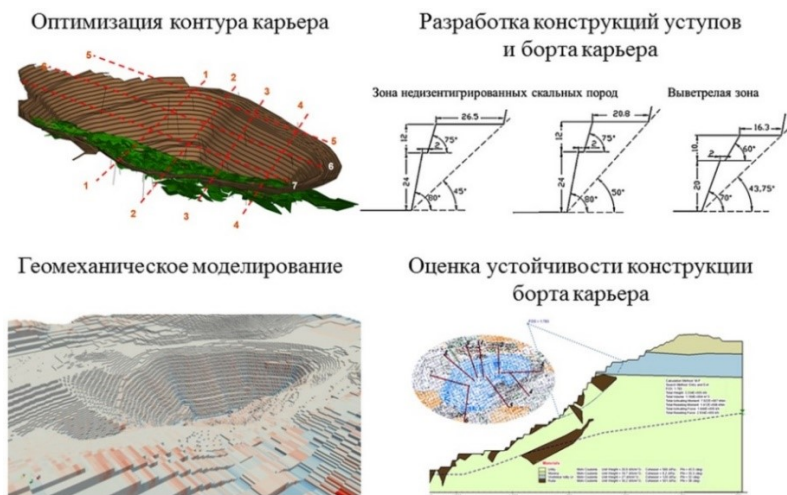


Рисунок 2 – Разработанные модели и результаты моделирования геомеханических условий для отработки открытым способом глубоких запасов одного из крупных рудных месторождений Кольского региона

Предлагаемая схема мультимасштабного мониторинга устойчивости позволяет эффективно и безопасно обрабатывать крупные рудные месторождения с применением открытой геотехнологии.

Санфиоров И.А.¹, Нежданов В.М.¹, Богданов Р.А.²

¹Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

e-mail: sanf@mi-perm.ru , asa@mi-perm.ru

²ПАО «Уралкалий», г. Березники, Россия

ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Сейсморазведочные и акустические исследования во внутренних точках среды одно из наиболее информативных направлений горной геофизики. Они широко применяются при решении задач выявления особенностей геологического строения, влияющих на безопасность ведения горных работ.

Помимо подобных традиционных задач за счет развития аппаратно-методической базы в рамках геофизического обеспечения безопасного ведения горных работ для этого вида исследований сформировалось отдельное направление. Данное направление обеспечивает контроль эффективности разного рода специализированных мероприятий, направленных на обеспечение устойчивости основных горнотехнических элементов, необходимых для подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Подразумевается как непосредственная дефектоскопия горнотехнических конструктивных элементов, так и прогнозирование негативных явлений, непосредственно влияющих на их сохранность [1]. В первом случае возможна оценка: структуры и свойств межкамерных целиков, полнота заполненности камер закладочным материалом и состояние приствольного массива за тубингами. Ко второму можно отнести прогноз газонасыщенных зон потенциально опасных на динамические явления, приводящие к разрушению горных выработок.

В основе применяемых технологий регистрации упругих колебаний – методика общей глубинной точки (МОГТ), позволяющая настраивать системы наблюдений под конкретные сейсмогеологические параметры объекта изучения. Регистрация сейсмических колебаний осуществляется телеметрическими системами сбора

сейсмоакустических данных (IS-128), обеспечивающими цифровую запись сигналов в широком диапазоне частот (f до 5 кГц). Источник возбуждения ударного типа. Вертикальная разрешающая способность, определяемая как $1/4$ -длины волны $\lambda=V/f$, где V – эффективная скорость распространения упругих волн, при удалении (H) целевых отражающих горизонтов до 100 м достигает 1-1.5 м. Горизонтальная разрешающая способность, определяемая как $1/2$ - $1/3$ первой зоны Френеля $d=(2*\lambda* H)^{0.5}$, при таких же удалениях составит не менее 9-11 м. На данном этапе развития подобных технологий рассматриваются возможности совершенствования аппаратного обеспечения сейсмоакустических исследований, направленного на повышение их технологичности и разрешающей способности получаемых результатов. С этой целью возможно применение аппаратных решений из смежной сейсмоакустическим исследованиям области – акустической дефектоскопии [2]. При этом применяются апробированные в горных выработках методические решения, направленные на получение необходимого для интерпретационных заключений отношения сигнал/помеха.

Возбуждение и регистрация упругих волн внутри породного массива с учетом диаграммы направленности точечного источника в случае необходимости позволяют получать информацию о закономерностях распространения, как продольных, так и поперечных волн различной поляризации [3]. Подобная многоволновая сейсморазведка реализуется в рамках единой полевой системы регистрации [4]. Цифровая обработка базируется на общепринятых подходах по повышению отношения сигнал/помеха для целевого типа волн с учетом высокочастотного спектра регистрируемых данных. Информационной базой этапа интерпретации являются конечные результаты цифровой обработки сейсморазведочных данных: временной разрез МОГТ, кинематические и амплитудные параметры регистрируемого волнового поля. В зависимости от решаемых задач в набор интерпретационных параметров дополнительно включают спектральные характеристики волнового поля и данные шахтной электроразведки [5].

Основной объем шахтных сейсморазведочных исследований по данному направлению связан с контролем конструктивных элементов подземного пространства. Сейсморазведочные оценки составляют информационную основу геомеханических расчетов сроков их сохранности [6] и позволяют оптимизировать горнотехнические мероприятия по предотвращению газодинамических явлений.

Оценка степени выполнения закладочных работ [7] и изучение свойств приствольного массива относятся к более экзотическим задачам. Сейсморазведочные исследования, связанные с контролем результативности закладки горных выработок и сохранностью стволов, позволяют определить содержание работ, направленных на купирование нежелательных последствий, обусловленных выявленными отклонениями.

Список использованных источников:

1. Санфирова И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Никифорова А.И. Сейсморазведочный комплекс информационного сопровождения горных работ в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 8-12. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.01.
2. Бабулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. – 2013. – № 7. – С. 51-75.
3. Санфирова И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. Изучение особенностей формирования поля отраженных волн при наблюдениях в горных выработках

- соляных рудников на основе полноволнового моделирования // Геофизика. – 2021. – № 5. – С. 4–11.
4. Бабкин А.И., Санфиоров И.А., Мачерет А.М. Оценка информативности шахтной многоволновой сейсморазведки для прогноза изменчивости физико-механических свойств породного массива // Инженерная и рудная геофизика 2020: 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020», Пермь, 14–18 сентября 2020 года. Пермь: Общество с ограниченной ответственностью «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2020. – 85 с. DOI: 10.3997/2214-4609.202051107.
 5. Санфиоров И.А., Степанов Ю.И. Комплексная интерпретация шахтных сейсмо- и электроразведочных исследований // Горное эхо. – 2022. – № 1(86). – С. 113–118. DOI: 10.7242/echo.2022.1.18.
 6. Барях А.А., Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г. Задачи геофизики и геомеханики в обеспечении безопасного ведения горных работ на калийных рудниках // Горная промышленность. – 2025. – № 4S. – С. 140–145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4S-140-145.
 7. Санфиоров И.А., Байбакова Т.В., Тарантин М.В., Кузнецов И.Л., Иванов С.В. Влияние закладки горной выработки на параметры отражённых волн // Инженерная и рудная геофизика 2025: материалы научно-практической конференции и выставки, Екатеринбург, 21–25 апреля 2025 года. М.: ООО «Геомодель Развитие», 2025. – С. 304–307.

Семенова И.Э.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: i.semenova@ksc.ru

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ОСНОВА БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ ОСВОЕНИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РФ

Кольский полуостров — стратегически важная часть Арктической зоны Российской Федерации, где на сравнительно небольшой территории сосредоточено свыше 400 месторождений около 40 видов полезных ископаемых, включая, например, уникальные апатит-нефелиновые руды Хибин (свыше 30% мировых запасов), медно-никелевые руды Печенгского района (около 15% российской добычи никеля), Ловозерские тундры (более 14% российских запасов оксидов редкоземельных элементов). Из них разрабатывается более 60 месторождений, отработка запасов которых представляет собой комплексную задачу, сложность которой возрастает по мере ведения горных работ и требует системного подхода. Ключевые взаимосвязанные аспекты этой задачи включают:

- особенности и изменчивость геологического строения месторождений;
- ухудшение геомеханических условий в процессе разработки;
- необходимость обоснования оптимальных геотехнологий, обеспечивающих баланс между экономической эффективностью добычи и минимизацией геомеханических, экологических и иных рисков.

Высокие геомеханические риски, такие как горные удары и неуправляемые обрушения, связанные в том числе с особенностями региональной тектоники, требуют исследования свойств горных пород, параметров напряженно-деформированного состояния (НДС), превентивного мониторинга и прогнозирования геомеханической

ситуации. Именно геомеханические параметры массива горных пород являются предметом многолетних исследований отдела геомеханики Горного института КНЦ РАН, которые можно сгруппировать в рамках следующих основных научных направлений:

- исследование НДС месторождений Северо-западной части Арктической зоны РФ натурными методами и развитие представлений о трансформации исходного и техногенного полей напряжений на больших глубинах;
- изучение физико-механических свойств горных пород комплексом лабораторных методов;
- исследование процессов динамического разрушения массива скальных пород на основе данных микросейсмического мониторинга;
- выявление потенциальных областей нарушений устойчивости при ведении горных работ в тектонически напряжённых массивах;
- мультимасштабное моделирование и прогнозирование НДС массива горных пород с учётом различных геологических и горнотехнических факторов;
- развитие методов обеспечения безопасности при крупномасштабном техногенном воздействии.

При этом решение геомеханических задач в институте опирается на оригинальные программные продукты. Так моделирование НДС с учетом основных геологических и горнотехнических факторов осуществляется в САЕ Sigma GT, а визуализации всего спектра данных лабораторных и натурных исследований, дополнительная обработка информации, построение карт зон повышенного риска в ГГИС «МАЙНФРЭЙМ». Итоговая цель текущих разработок – оперативная поддержка принятия геомеханически обоснованных решений на всех этапах освоения месторождений.

В ближайшие годы ключевые усилия будут сосредоточены на развитии предиктивной аналитики и автоматизации геомеханического мониторинга, а также на использовании ИИ-алгоритмов для автоматического прогнозирования критических состояний массива. Это обеспечит переход от реактивного реагирования на инциденты к проактивному управлению рисками — критически важному условию устойчивого освоения минерально-сырьевой базы Арктики.

Семенова И.Э., Аветисян И.М.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: i.avetisian@ksc.ru

ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ ОБРУШЕНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ХИБИНСКОГО МАССИВА

Современный этап освоения апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива характеризуется рядом вызовов, связанных с необходимостью обеспечения планомерного и контролируемого развития обрушения подработанных пород. Эта проблема становится особенно значимой при отработке глубоких горизонтов, где высота налегающей толщи может превышать 500-800 м, а особенности строения рудных тел характеризуются уменьшением мощности с глубиной. В итоге совокупность данных факторов обуславливает сложность реализации контролируемого планомерного самообрушения на планируемых к отработке глубоких горизонтах. Таким образом, системы разработки с обрушением на Хибинских рудниках имеют

определенные ограничения по применимости на больших глубинах, что требует соответствующего геомеханического обоснования.

Проведен комплекс исследований, основанный на применении методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Исследования выполнены с использованием специализированного программного комплекса Sigma GT, разработанного в Горном институте КНЦ РАН. В ходе исследований разработан ряд трехмерных численных моделей НДС массива горных пород в окрестности перспективных зон ведения горных работ на различных участках Хибинской апатитовой дуги с учетом действия в массиве тектонического поля напряжений, основных геологических и горнотехнических факторов.

Анализ результатов исследований позволил выделить четыре типа зон в массиве горных пород с различным характером и скоростью деформирования подработанной толщи. К первому типу отнесены зоны в районах стыковки подземных горных работ с карьерными выемками, где процессы трещинообразования и обрушения протекают наиболее активно. Это обусловлено как большей нарушенностью массива в этих зонах, так и меньшей высотой подработанной толщи. Примером подобных зон может служить зона стыковки подземных горных работ Кукисвумчоррского месторождения и Саамского карьера.

Второй тип зон приурочен к консольным зависаниям налегающей толщи пород (одностороннее опирание). Характерным примером формирования таких зон являются консольные зависания на месторождении Апатитовый цирк. В данном случае происходит постепенное снижение уровня сжимающих главных напряжений σ_{\max} в консольном массиве одновременно с ростом абсолютных величин растягивающих главных напряжений σ_{\min} и увеличением площади их распространения. Формирующиеся субвертикальные трещины отрыва развиваются как от дневной поверхности, так и из зоны подработки массива с последующим их объединением по мере роста деформаций растяжения. В результате формируется равномерное обрушение краевой части подработанного массива без существенных зависаний даже при мощности налегающей толщи более 400 м.

Третий тип зон характерен для условий трехстороннего опирания и отличается формированием более неоднородного поля напряжений. Примером трехстороннего опирания является участок Гакман Юкспорского месторождения. В данном случае выявлено три типа областей трещинообразования в подработанном массиве: области с субвертикальными площадками растягивающих σ_{\min} , приуроченные к верхней части зависания; области с субгоризонтальными площадками σ_{\min} , приуроченные к краевой и нижней части зависания; области растягивающих напряжений вблизи ослабленной зоны, формирующие оперяющие трещины в ее окрестности. В целом, при развитии горных работ складываются условия для самообрушения части массива подработанных пород при их мощности 300-400 м.

К четвертому типу зон относятся участки массива при четырехстороннем опирании. Примером являются подземные горные работы на месторождении Олений ручей, где мощность налегающей толщи пород над очистным пространством составляет до 600 м. Результаты численного моделирования показывают, что по мере развития горных работ до отметки -400 м реализуется только частичное обрушение подработанного массива. Этот процесс развивается в консоли над висячим боком рудного тела, стремясь сформировать практически вертикальную стенку. После формирования субгоризонтальной кровли дальнейшего развития зон растягивающих напряжений по направлению к дневной поверхности не происходит. Роста областей растягивающих напряжений и соответственно трещинообразования на дневной поверхности также не наблюдается. Такая ситуация приводит к возникновению

дефицита самообрушающихся покрывающих пород, необходимых для заполнения выработанного пространства. Это влечет за собой ряд негативных последствий, включая невозможность формирования предохранительной породной подушки, увеличение геодинамических рисков и рост потерь полезного ископаемого в недрах. Дополнительную сложность создает невозможность оперативного контроля заполнения выработанного пространства породами по мере выемки рудных запасов.

Таким образом, разработанный комплекс взаимосвязанных геомеханических моделей позволяет осуществлять прогноз развития обрушения подработанных пород с учетом специфических горно-геологических и технологических условий месторождений Хибинского массива и выявлять участки, где применение систем с обрушением руды и вмещающих пород проблематично.

Семенова И.Э., Дмитриев С.В., Аветисян И.М.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: s.dmitriev@ksc.ru

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SIGMAGT

С начала 2000-х годов в Горном институте КНЦ РАН разрабатывается и успешно используется CAE (computer-aided engineering) система SigmaGT, основанная на решении упругой задачи геомеханики методом конечных элементов. SigmaGT используется для выполнения оперативного прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород на основе разработанных геомеханических моделей месторождений с учетом основных геологических, геомеханических и горнотехнических факторов. Преимуществами системы являются адаптивность интерфейса под условия и задачи конкретного горного предприятия, а также снижение вероятности ошибок моделирования за счет установки приложения совместно с обоснованными моделями месторождения на нескольких масштабных уровнях. То есть перед горным инженером не стоит задача постановки граничных условий и формирования оптимальной сетки конечных элементов. Слои модели привязаны к разрезам и магистралям рудничной системы координат, а также планам развития горных работ на ближайшие 3-5 лет, что позволяет легко формировать расчетные варианты в соответствии с планами горных работ или при необходимости ситуационных отклонений от него. Имеются инструменты автоматизированной генерации уточненных моделей отдельных блоков и элементов горной технологии. Благодаря простоте и скорости подготовки расчетных вариантов и локальных моделей, SigmaGT стала неотъемлемым инструментом специалистов служб прогноза и предотвращения горных ударов на таких горнодобывающих предприятиях как КФ АО «Апатит», АО «СЗФК», АО «Кольская ГМК» и др.

Основой программы является методика последовательных приближений, представляющая собой определенный принцип наследования граничных условий. Данная методика позволяет строить подмодели отдельных участков массива горных пород, блоков месторождений и систем выработок таким образом, что создаваемая вновь модель меньшего масштаба характеризуется параметрами НДС исходной модели.

На сегодняшний день система развилась до полноценного программного комплекса технических решений «SigmaGT 2.0» на основе геомеханического моделирования и постобработки результатов расчетов. Набор программ для подготовки локальных моделей различного масштаба и конфигурации, модуль уточненного

моделирования, модуль построения двумерных картин изолиний, а также модуль трехмерной визуализации являются неотъемлемой частью САЕ.

Расчетные модули и интерфейс программы постоянно развиваются. Среди приоритетных направлений совершенствования SigmaGT можно выделить следующие:

- разработка кроссплатформенной версии программного комплекса. Поддержка семейства свободных операционных систем с открытым исходным кодом позволит устанавливать программный комплекс на большинство альтернативных Windows системам, в том числе на AstraLinux, РЕД ОС и другие операционные системы, включенные в реестр отечественного программного обеспечения;

- объединение ранее разработанных вспомогательных модулей под единым пользовательским графическим интерфейсом (ПГИ). Разработанные ранее программные решения, предназначенные для решения частных задач, представляют собой оригинальные программы с различным пользовательским интерфейсом. Единообразие ПГИ в комплексе упростит работу в нем и ускорит работу комплекса в целом;

- создание собственной оптимизированной графической САД библиотеки. Разрабатываемая графическая библиотека основывается на использовании спецификации OpenGL. Тенденция на увеличение размерностей сеток создаваемых моделей месторождений требует производительного блока визуализации для отображения сечений конечно-элементных сеток.

- использование системы вложенных сеток для ускорения процесса пересчета модели. Несмотря на достигнутый прогресс в развитии расчетного модуля программного комплекса, острым остается вопрос потребления оперативной памяти (ОЗУ) персонального компьютера. Данный подход позволит разряжать сетку конечных элементов на отдаленных от зоны ведения горных работ участках без потери в точности расчетов. В результате ожидается снижение требований к ОЗУ и увеличение скорости проводимых расчетов.

Таким образом, основными преимуществами программного комплекса SigmaGT являются: мультимасштабный подход к моделированию напряженно-деформированного состояния массива горных пород, возможность адаптации системы под задачи конкретного горного предприятия, минимизация времени на подготовку и расчет прогнозных вариантов развития горных работ, а также постоянное развитие модулей постобработки результатов расчета НДС.

Семенова И.Э., Жукова С.А., Чернобров Д.С.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: i.semenova@ksc.ru, svetlana.zhukowa@yandex.ru, d.chernobrov@ksc.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ КАРЬЕРА НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

При ведении открытых горных работ в массиве, включающем карьерную выемку, непрерывно происходит трансформация его напряженно-деформированного состояния, связанная с изменением формы карьера, сезонными факторами и вскрываемыми геологическими структурами. В результате таких изменений наблюдаются концентрации напряжений на границах структурных неоднородностей, что приводит к активизации процессов трещинообразования в массиве пород и как следствие – нарушению его сплошности. Эти процессы оказывают существенное

влияние на устойчивость бортов карьера, особенно когда трещинообразование происходит вблизи поверхности.

Поток сейсмособытий во времени и пространстве свидетельствует об активных процессах трещинообразования. В связи с этим необходим контроль развития этих процессов, который на сегодняшний день осуществляется с помощью микросейсмического мониторинга.

Целью исследования является выявление аномалий сейсмичности при развитии открытых горных работ на Ковдорском месторождении. Для выявления потенциально опасных участков применялись: метод пространственной кластеризации сейсмических событий, количественный параметр распределения сейсмической энергии, классификация уровней сейсмичности.

Для анализа пространственного распределения сейсмических событий был применен метод иерархического кластерного анализа по минимальному расстоянию. Такая кластеризация позволяет выделить пространственные структуры, состоящие из сейсмических событий, произошедших в примерно одинаковых условиях в связи с их геометрической близостью.

По сформированным кластерам событий были установлены наиболее опасные участки массива, среди которых можно отметить «долгоживущую» зону сейсмоактивности под дном карьера в южной части. Выявлено проявление сейсмоактивности в нижней части юго-западного участка борта, под дном карьера на глубинах от -250 м до -350 м. Отмечено регулярное проявление мощных событий с энергией более 10^5 Дж вблизи геологических разломов, которые, вероятно, связаны с их активизацией при формировании контура карьера. Зоны концентрации событий в нижней части северного борта обусловлены взрывными работами.

Для выявления потенциально опасных участков по плотности распределения сейсмической энергии карьерное пространство было разделено на четыре слоя по 200 м, каждый слой разбит на ячейки 50x50 м. Для каждой ячейки определено соотношение суммарной выделившейся сейсмической энергии к площади пространственной ячейки $\sum E/S_{\text{яч}}$.

Построены карты изолиний, с помощью которых установлены зоны различного уровня распределения потока сейсмической энергии. Проведено сопоставление ежегодных значений площадного распределения сейсмической энергии событий по слоям за период с 2019 по 2025 гг. Области повышенного энерговыделения (аномалии сейсмичности) в основном приурочены ко дну карьера (отм. -400÷-200 м) и связаны с интенсификацией и углублением горных работ.

Таким образом, данные микросейсмического мониторинга являются основой для построения динамических моделей напряженно-деформированного состояния массива. Такая информация важна для выявления аномалий сейсмичности и прогнозирования возможных обрушений и деформаций бортов карьера. Сравнивая результаты сейсмического мониторинга с геотехническими расчетами и анализом геологических структур, инженеры могут принимать обоснованные решения по управлению горными работами, корректировать параметры буровзрывных работ, оптимизировать бортовые уступы и разрабатывать мероприятия по повышению их устойчивости.

Ключевые слова: открытые горные работы, карьер, массив горных пород, сейсмический мониторинг, наведенная сейсмичность, площадное распределение сейсмической энергии, сейсмичность, обводненность, кластер сейсмособытий.

Семенова И.Э., Константинов К.Н., Кулькова М.С., Старцев Ю. А.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: i.semenova@ksc.ru, k.konstantinov@ksc.ru, m.kulkova@ksc.ru, y.startsev@ksc.ru

ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД ОЛЕНЕГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ К ГОРНЫМ УДАРАМ КОМПЛЕКСОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Для большинства горнорудных районов Кольского полуострова характерна тектоническая природа напряженного состояния. Это связано с расположением полуострова в краевой части Балтийского щита и движением литосферных плит, что определяет иерархично-блочную тектоническую структуру массива, в том числе для Оленегорского железорудного района. С 2005 года разработка Оленегорского месторождения ведется комбинированным способом, отработка прибортовых и подкарьерных запасов осуществляется подземным рудником. Комплексная оценка геомеханического состояния массива пород в окрестности подземных выработок по мере увеличения глубины горных работ является необходимой для уточнения параметров напряженно-деформированного состояния и выявления возможных разрушений приконтурного массива в динамической форме.

Проведено визуальное обследование подземных горных выработок горизонта -190м (400м от дневной поверхности) и выполнены исследования приконтурного массива комплексом геомеханических и геофизических методов – ультразвуковым, реометрическим, сейсмическим и методом акустической эмиссии. В результате установлен средний показатель глубины нарушенной зоны в окрестности выработок, около 0,2м от контура. На основе исследований методом сейсмического профилирования получены упругие характеристики (величины скоростей продольных и поперечных волн, коэффициент Пуассона, модуль Юнга), величины которых коррелируют с результатами лабораторных исследований упругих характеристик на образцах, что свидетельствует о минимальных показателях нарушенности пород. Данные визуального обследования в совокупности с результатами замеров методом акустической эмиссии не выявили внешних признаков удароопасности и процессов развития трещинообразования в приконтурном массиве выработок гор. -190м. Это позволяет экстраполировать результаты инструментальных исследований, выполненные в выработках, пройденных по рудными кварцитами и вмещающим гнейсам на шахтное поле данного горизонта.

Таким образом, на глубине 400м от дневной поверхности геомеханическое состояние массива пород Оленегорского месторождения можно характеризовать как устойчивое с отсутствием признаков отнесения к слонным и опасным по горным ударам.

Синегубов В.Ю., Максимов А.Б.

ООО «Геотехническое бюро», г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: vs@gtburo.ru

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ШАХТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ АНКЕРНЫХ КРЕПЕЙ ВОССОЗДАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ВЗРЫВОМ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ НА РУДНИКАХ ХИБИН

Обеспечение устойчивости горных выработок на глубоких горизонтах удароопасных месторождений, таких как Хибинские апатит-нефелиновые месторождения, осложняется высокими тектоническими напряжениями и риском горно-тектонических ударов. Жесткие системы крепления в условиях динамического нагружения часто неэффективны, так как не способны поглощать сейсмическую энергию и воспринимать деформации контура без потери несущей способности. Целью исследования стала разработка и натурная апробация методики подбора анкерной крепи, основанной на имитации сейсмических воздействий с помощью взрывных работ.

Методический подход включал теоретический анализ взаимодействия сейсмической волны с массивом, численное моделирование и многоэтапные опытно-промышленные испытания. Ключевым критерием воссоздания сейсмического события заданной магнитуды являлась скорость смещения частиц породы (ppv) на контуре выработки. Разработанный алгоритм выбора крепи основан на оценке кинетической энергии выбрасываемой породной массы и сравнении ее с энергопоглощением анкеров, а также на учете деформационных критериев.

Испытания проводились на участках, где с помощью параллельных выработке взрывных скважин, расположенных на расстоянии 5-30 м от контура, имитировались динамические удары с энергией событий от 10^6 до 10^9 Дж. Оценка состояния крепи выполнялась посредством визуального осмотра и сравнения данных 3D-сканирования до и после взрыва.

Эксперименты позволили дифференцировать эффективность различных типов крепей в диапазоне динамических нагрузок:

- область низких нагрузок (энергия до 10^6 Дж, скорость смещения около 3 м/с): существенных нарушений сплошности дисперсно-армированного набрызгбетона (ДАНБ) не зафиксировано. Применение дорогостоящих динамических анкеров на таких участках признано нецелесообразным;

- область средних нагрузок (энергия 10^6 - 10^7 Дж, скорость смещения до 6 м/с): зафиксировано преимущество динамических анкеров перед жесткими крепями (забивными фрикционными анкерами ЗФА и трубчатыми гидрораспорными ТГРА) в сочетании с ДАНБ. На участках с ЗФА наблюдалось трещинообразование в ДАНБ, тогда как динамическая крепь сохранила целостность и несущую способность при смещениях до 10 см;

- область высоких нагрузок (энергия 10^7 - 10^8 Дж и выше, скорость смещения свыше 10 м/с): на участках без динамической крепи или с жесткими анкерами зафиксированы значительные обрушения породы на глубину до 0,4-0,7 м с площадью вывалов до 35%.

- предельные нагрузки (аналог 10^9 Дж на удалении 20-30 м): ни один из испытанных типов динамических анкеров (как зарубежного, так и отечественного производства) не обеспечил эксплуатационной надежности выработки – происходило полное разрушение стенки.

Разработанная методика натурных испытаний подтвердила свою применимость для сравнительной оценки эффективности крепей при динамических воздействиях. Исследования показали, что область эффективного применения динамических анкеров в условиях Хибинских месторождений ограничена событиями с энергией до 10^8 Дж. При горно-тектонических ударах большей энергии обеспечить устойчивость выработок исключительно креплением невозможно, что указывает на необходимость первоочередного применения превентивных мер по управлению горным давлением и снижению напряженно-деформированного состояния массива.

Соколов И.В.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: sokolov@igduran.ru

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ – ОСНОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Приведены результаты фундаментальных и прикладных научных исследований Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), выполненных по геотехнологической и геомеханической тематике в рамках Государственного задания и хозяйственных договоров с индустриальными партнерами, направленные на повышение безопасности и эффективности горного производства. По геотехнологической тематике в качестве методологических основ стратегии комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ) обоснованы взаимосвязи, методы их учета и параметры технологических процессов: устойчивости уступов и бортов карьеров; комбинированных систем разработки; автотранспортных систем карьеров; буровзрывных работ; формирования рудопотоков и систем рудоподготовки; систем безопасности горнодобывающего производства. Реализация методологии способствует экономически эффективному, технически и технологически безопасному комплексному освоению запасов месторождений ТПИ. По геомеханической тематике на основании экспериментально-аналитических исследований параметров современных геодинамических движений на разных масштабных уровнях выполнено районирование территорий РФ по риску техноприродных катастроф. Результаты исследований, базирующихся на выдвинутых чл.-корр. РАН В.Л. Яковлевым методологических принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности, не только развивают теорию и методологию горной науки, но являются основой технологических инноваций при освоении месторождений ТПИ.

ИГД УрО РАН реализовывает программу комплексных междисциплинарных фундаментальных, поисковых и прикладных исследований, направленных на разработку с последующим внедрением:

- эколого- и энергоэффективных геотехники и геотехнологий добычи ТПИ открытым, подземным и комбинированным способами с элементами автоматизации и роботизации;

- систем учета и мониторинга состояния запасов техногенных образований и комплексных технологий по ликвидации, консервации, переработке и утилизации отходов горно-металлургического производства;

- систем геомеханического, геологического и геофизического мониторинга и комплексной оценки состояния подработанных территорий для обеспечения безопасности природо- и недропользования, предотвращения техногенных катастроф;
- геоинформационных баз данных природных условий и параметров горнодобывающих предприятий, методов технолого-эколого-экономической оценки последствий освоения месторождений.

Исследования выполнены в рамках Гос. задания № 075-00410-25-00. Г.р. № 1022040200004-9-1.5.1. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001) и № 075-00410-25-00. Г.р. № 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027). Выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства (FUWE-2025-0003).

Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: avdeev0706@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ЩЕЛЕВОЙ РАЗГРУЗКИ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В настоящее время существуют десятки методов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива в целом, и геомеханического мониторинга на рудниках, в частности. Методы изучения и контроля геомеханического состояния массивов горных пород могут быть как очень трудоемкими и требующими дорогостоящего оборудования, так и выполняться работниками геолого-маркшейдерской службы ГОКа в процессе выполнения непосредственных обязанностей.

Одним из распространенных методов оценки напряженно-деформированного состояния в подземных условиях является метод щелевой разгрузки, разработанный специалистами ИГД УрО РАН (ранее именованный институтом горного дела Минчермета СССР). Измерения параметров поля первоначальных напряжений методом щелевой разгрузки проводятся более 50 лет на рудниках России и ближнего зарубежья.

Метод щелевой разгрузки является одним из видов натуральных измерений напряжений, основанным на оценке деформаций массива после нарушения его сплошности. Метод сравнительно нетрудоемкий и экономичный, по сравнению с аналоговыми методами разгрузки на больших базах или скважинными. Оценка действующего напряжения производится путем измерения смещений распорных реперов, установленных перпендикулярно разгрузочной щели, пропиленной на контуре горной выработки. Разгрузочные щели можно оформлять различными способами: перфоратором, электрическими дисковыми пилами или бензорезами. Для оформления разгрузочной щели требуется сравнительно небольшой участок незакрепленной стенки или кровли выработки (соответствующий диаметру щели 23-35 см), что увеличивает количество подходящих для измерений участков. Для проведения работ не требуется габаритного оборудования, его хранения и перевоза. Используемое оборудование (перфоратор, дисковые пилы, микрометр) мобильно. Его удобно перевозить любыми видами наземного и авиатранспорта. За смену при благоприятных условиях можно оформить до 7-10 щелей. Сроки заложения наблюдательных станций щелевой разгрузки с циклом наблюдений по ним составляют около 5-10 дней.

Метод щелевой разгрузки в настоящее время широко используется для оценки первоначального напряженного состояния массива горных пород на рудниках, так как позволяет оперативно получить количественные характеристики первоначального поля напряжений. Однако щелевая разгрузка имеет и другое, не такое известное применение.

Метод щелевой разгрузки позволяет оценивать техногенные напряжения в элементах подземных геотехнологий (целики, стенки и кровля очистного пространства, приконтурный массив подготовительно-нарезных выработок) как в статике, так и в динамике, что позволяет использовать его в целях геомеханического мониторинга.

Разгрузочные щели можно закладывать изначально для определения техногенных напряжений в конструктивных элементах систем разработки с целью оперативного геомеханического контроля, что особенно удобно в стесненных условиях выработанного пространства и ограниченном времени выемки запасов эксплуатационных блоков при малой и средней выемочной мощности рудных тел. Так, в 2005 г. авторами на руднике Ирокинда при отработке маломощных рудных жил было оформлено 26 разгрузочных щелей в кровле очистной выработки и целиках с целью оценить фактическую устойчивость кровли и возможность отработки целиков. По результатам работ была произведена выемка внутриблоковых, надштрековых и подштрековых целиков с последующей локализацией выработанного пространства бутовой полосой [1].

Во-вторых, после заложения станции щелевой разгрузки с целью определения первоначального напряженного состояния и снятия первичных деформаций разгрузочные щели станции могут дополнительно служить длительное время для контроля геомеханического состояния (от полугода до нескольких лет в зависимости от степени сохранности наблюдательных щелей и самой выработки). Повторные циклы измерений заключаются в измерении дополнительных деформаций между распорными реперами щелей с помощью микрометра и, очевидно, не требуют больших временных затрат. Такие станции удобно закладывать на контуре охраняемых горных выработок долговременного использования, а также в породных и рудных целиках длительного стояния после установления факта опасности охраняемого участка на руднике. Степень опасности участков рекомендуется оценивать по результатам регионального и локального прогнозов геомеханического состояния на основе визуального обследования выработок. Так, на руднике Многовершинный наблюдения по долговременным станциям щелевой разгрузки авторами успешно проводились в течение 8 лет (2012-2020 гг.) с целью оперативного контроля проявлений процессов горного давления в основных транспортно-вентиляционных выработках долговременного использования, находящихся при этом в зоне влияния очистных работ [2]. За период наблюдений в действующих выработках были нарушены отдельные щели на участках с интенсивным водопритокom (коррозия распорных реперов) или механически повреждены в процессе ведения горных работ, что не помешало восстановить утраченные репера и продолжать наблюдения.

При достаточном количестве сохранённых щелей возможно получить объемный тензор напряжений повторно. В 2019-2022 гг. авторами были проведены измерения напряжений на глубоких горизонтах шахты Юго-Западная Дарасунского рудного поля с целью отследить в динамике изменение параметров НДС. Были получены количественные характеристики изменения объемного тензора напряжений в массиве в процессе осушения массива горных пород после его многолетнего затопления [3].

Список использованных источников:

1. Управление геомеханическими процессами при разработке наклонных жил в условиях многолетней мерзлоты / Сосновская Е.Л., Сосновский Л.И., Павлов А.М., Филонюк В.А., Авдеев А.Н., Рубцов Л.Г. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва: изд. МГГУ.– 2006. – № 11. – С. 77-83.
2. The geomechanical state of the mine «Mnogovershinnoe» lower levels monitoring /A.Avdeev, E.Sosnovskaya, R.Krinityn. // VII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources”. E3S Web of Conferences 56, 02017 (2018)
3. Прогноз развития геомеханической ситуации при повторной консервации шахты «Юго-Западная» / Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н., Харисов Т.Ф.// Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. № 3. – С. 368-380.

Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н.

Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: avdeev0706@mail.ru

ПРОГНОЗ УДАРООПАСНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ НАКЛОННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ ЖИЛ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Золоторудные жилы малой и средней мощности наклонного падения, учитывая высокие прочностные свойства вмещающих массивов, разрабатываются системами с открытым очистным пространством, в основном, камерно-столбовыми с креплением очистного пространства распорными стойками по необходимости [1,2]. Подготовка при этих системах рудная, заключающаяся в проведении рудных откаточно-вентиляционных штреков и восстающих. Для защиты подготовительно-нарезных выработок оставляются междуэтажные целики, а также охранные целики восстающих. Кровля очистного пространства поддерживается опорными внутриблоковыми целиками. Очевидно, что с понижением горных работ, расчетные размеры устойчивых целиков повышаются, а пролет кровли очистного пространства между ними, соответственно, снижается.

Оставление большого объема целиков приводит к существенным потерям. Такие целики оставлять нерационально. На практике для уменьшения потерь в качестве целиков стараются использовать участки пустых пород или забалансовых запасов. При высокой ценности руд внутриблоковые и охранные целики извлекают после выемки основных запасов эксплуатационного блока в отступающем порядке. Однако при погашении целиков с целью снижения потерь в остающихся целиках накапливаются повышенные напряжения, которые могут привести к хрупкому разрушению целиков в удароопасных формах. Увеличение пролета кровли между оставшимися целиками приводит к незапланированным обрушениям с опасными проявлениями воздушной волны в узком очистном пространстве.

В настоящей работе проведен прогноз потенциальной удароопасности при разработке нижних горизонтов двух золоторудных месторождений: Ирокиндинское и Кедровское, расположенных в районе Южно-Муйского хребта на территории республики Бурятия. Месторождения находятся в отработке с 1996-97 гг. В настоящее время (2025-26 гг.) глубина горных работ (отсчитываемая от земной поверхности) на них достигла 620-730 м на Ирокиндинском руднике, 700-800 м – на Кедровском.

Авторами в процессе исследований натурными измерениями методом щелевой разгрузки по методике ИГД УрО РАН был установлен уровень естественного поля напряжений на нижних горизонтах рудников Ирокиндинский и Кедровский. Установлено, что на глубинах 620-800 м в массиве месторождений действуют значительные гравитационно-тектонические напряжения, повышающие вероятность негативных проявлений горного давления. Тектонические напряжения величиной 10-22 МПа наблюдаются в горизонтальной плоскости, носят сжимающий характер и составляют 50-98% от веса налегающей толщи пород.

Для оценки влияния современной тектонической активности на руднике на подвижность структурных блоков и вероятность проявления горно-тектонических ударов было выполнено геодинамическое районирование района месторождений с использованием методов морфоструктурного, линеаментного, гидрографического анализа рельефа земной поверхности и космофотоматериалов. Установленные в результате районирования зоны геодинамической активности подтверждают естественный характер процессов деформации тектонических структур в пределах горного обрамления Муйско-Куандинской впадины, Южно-Муйского хребта и Витимского плоскогорья. В пределах лицензионного отвода Ирокиндинского рудника фиксируется 11 участков геодинамической активности, Кедровского – 6. Участки представлены зонами пересечения высокоранговых разломов, участками повышенной концентрации тектонических нарушений.

Проведены лабораторные испытания физико-механических свойств образцов горных пород массива Кедровского и Ирокиндинского месторождений. По результатам испытаний установлена склонность к накоплению энергии под нагрузкой и хрупкому разрушению на базе двух методик: по соотношению прочностей пород на сжатие и растяжение (методика Кузнецова Г.Н.) и по отношению упругой деформации к остаточной (методика Бича Я.А.).

Для анализа характера распределения техногенных напряжений, а также уточнения критических глубин по горным ударам было проведено конечно-элементное моделирование техногенных напряжений в конструктивных элементах систем разработок на базе сертифицированного программного комплекса FEM, разработанного проф. Зотеевым О.В. (ИГД УрО РАН).

По результатам моделирования установлено, что наиболее неустойчивыми и потенциально удароопасными на Кедровском месторождении являются охранные целики рудных подготовительных штреков. Минимальная расчетная критическая глубина по проявлениям горного давления в динамически опасных формах составит для них на момент погашения внутриблоковых целиков 780-850 м.

На Ирокиндинском руднике удароопасная ситуация создается во временных охранных целиках блокового восстающего и откаточных штреков в процессе погашения внутриблоковых целиков. На момент формирования всех внутриблоковых целиков и охранных целиков восстающего целики находятся в неудароопасном состоянии. В процессе погашения целиков при достижении обнажения кровли 12-14 м в непогашенных целиках концентрируются повышенные техногенные напряжения выше допустимых по проявлениям горного давления в динамических формах. При этом в кровле очистного пространства между непогашенными целиками формируется области растяжения глубиной до 2 м, в которых прогнозируются обрушения. Аналогичная ситуация развивается при погашении целиков и на Кедровском месторождении. Следует отметить, однако, что фактически разрушение целиков и кровли очистных выработок на нижних горизонтах рудников происходит преимущественно в неудароопасных формах, без выброса значительной энергии. Безопасность работ при погашении целиков в

настоящее время обеспечивается оставлением опорных неизвлекаемых целиков, по возможности с низкими содержаниями металла.

Учитывая достижение горными работами критических глубин по проявлению горного давления в динамических формах на обоих рудниках, а также опасные геомеханические условия, формирующиеся в процессе погашения целиков, рекомендуется обеспечить оперативный геомеханический мониторинг очистных работ и предусмотреть технические мероприятия по упрочнению кровли и целиков и снижению концентрации напряжений, в том числе: анкерное крепление расланцованной кровли очистного пространства и целиков, локализации очистного пространства бутовыми полосами (от влияния воздушной волны при обрушениях кровли) с регулируемым самообрушением кровли [1], в случае необходимости – закладочных работ.

Список использованных источников:

1. Павлов А.М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота / А.М. Павлов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 128 с.
2. Обоснование рациональных параметров систем разработки наклонных жил малой и средней мощности при изменении криоусловий / Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н.// Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 2. С. 157-168.

Целовальникова О.Н.

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

e-mail: o.tselovalnikova@ksc.ru

ПРИМЕР РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ КИНЕМАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) отрабатываемых месторождений остается ключевым направлением для обеспечения безопасности и эффективности горных работ.

Одной из актуальных проблем является реконструкция палеонапряжений, формировавших существующие системы разломов и трещин, а также оценка их влияния на современное НДС массива горных пород. Были проведены исследования по выявлению параметров тензора напряжений на участке горных работ одного из месторождений Кольского региона.

Метод исследования заключался в кинематическом анализе следов скольжения (стрий) на плоскостях разломов с последующим определением редуцированного тензора напряжений.

Проведено детальное картирование стрий в подземных горных выработках различных рудных тел. Зафиксированы азимуты и углы падения плоскостей разломов, направления следов скольжения (рисунок 1).

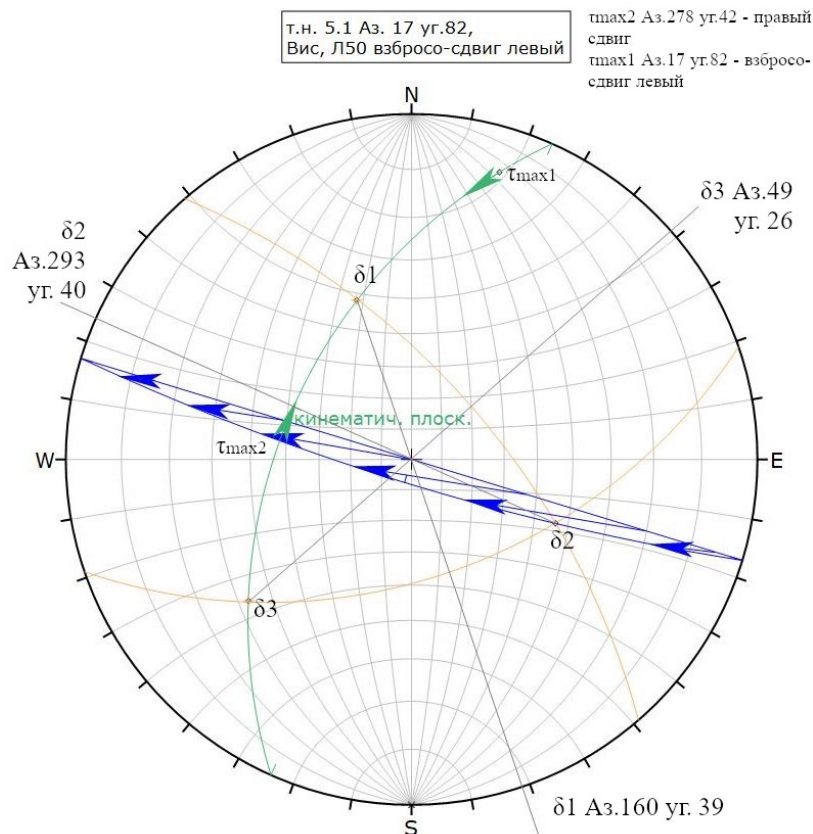


Рисунок 1 – Плоскость трещины с нанесенными следами скольжения и проекция кинематической плоскости (т.н.5.1)

Обработка полученных данных осуществлялась с использованием стереографической сетки Вульфа-Гущенко и конической палетки О.И. Гущенко для реконструкции общего поля напряжений по методу Л.А. Сим.

Выполнена реконструкция главных нормальных и максимальных касательных напряжений, реализовавшихся на отдельных разрывных нарушениях.

Список использованных источников:

1. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М. Изд-во: Наука. 1975. 536 с.

Чуприн К.Э.

ОсОО «Альянс Алтын» (Кыргызстан), г. Бишкек, Кыргызская Республика
e-mail: chuprin.ke@alliance-altyn.kg

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАРКАСНОЙ ГОРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЖЕРУЙ ШТОКВЕРКОВОГО ТИПА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ ОБЪЕКТА

Месторождение золота Джеруй расположено в Таласской области Кыргызской Республике и относится к месторождениям золотокварцевой формации. Особенностью отработки запасов месторождения Джеруй подземным способом является комбинированная схема отработки: доработка карьера открытыми горными работами (ОГР) и одновременная подземная выемка запасов подземными горными работами (ПГР). Период реализации проекта 2016-2045 гг.

По результатам геодинамического районирования с оценкой склонности пород и руд к горным ударам, выполненного в 2024 г., были проанализированы горно-геологические и горно-технические условия разработки месторождения; определена способность пород и руд к накоплению упругой энергии и хрупкому разрушению; определена блочная структура месторождения; рассчитана величина и определены направления исходного и техногенного поля напряжений (максимальным главным сжимающим напряжением является горизонтальное, действующее в направлении, согласном с простираем Рудоконтролирующего разлома, и превосходящем вертикальные гравитационные напряжения в среднем в 1,94 раза); определена критическая глубина удароопасности (+2960 м).

Продолжением работ стали исследования по обоснованию применения каркасной геотехнологии отработки запасов рудника «Джеруй» 3-мя догоняющими этажами, параметров и порядка отработки.

Одновременное ведение комбинированных ОГР и ПГР с применением БВР на границах предохранительного целика небезопасно с технологической точки зрения и с точки зрения нарушения сплошности и изменения физико-механических свойств массива целика от наведенной трещиноватости в процессе ведения взрывных работ. Ведение подземных очистных работ необходимо начинать снизу вверх от максимальной определенной проектной глубины разрабатываемого кварцевого ядра месторождения Джеруй.

Системами разработки, которые подходят для рассматриваемых условий освоения месторождения Джеруй подземным способом, являются: камерная система разработки с последующей закладкой камер или система разработки горизонтальными слоями с закладкой очистного (выработанного) пространства с восходящей выемкой. Они характеризуются довольно высокими затратами на добычу и малыми потерями и разубоживанием, поэтому системы данного класса целесообразно применять при добыче ценных руд (золота).

Наиболее эффективная и безопасная схема подземной разработки месторождения – каркасная. Формирование каркаса в камерно-целиковой системе позволит минимизировать процессы проявления горного давления при ведении подземных горных работ и влияние ОГР в карьере.

Разработка схем проводилась на основе расчетных данных влияния на вмещающие рудный, закладочный и породный массивы взрывов скважинных и шпуровых зарядов взрывчатых веществ при ведении одновременно открытых и подземных горных работ.

Для условий освоения золоторудного месторождения Джеруй с применением каркасной горной конструкции обоснованы параметры камерно-слоевой системы разработки с закладкой выработанного пространства.

Определены потери полезного ископаемого при определении границ (параметров) камер. В потери вошли те краевые участки рудной залежи, запасы которых нецелесообразно извлекать по причине их разубоживания и уменьшения содержания золота в руде. На основе созданной 3D модели рассчитаны потери полезного ископаемого и количество золота в рудной массе камер.

Для достижения эффективной отработки камер предлагается два варианта извлечения запасов из них: со сплошной выемкой руды в камерах и раздельной выемкой руды с учетом 3D модели распределения золота в рудном массиве. В камерах с неравномерным распределением объемов руды по ширине, длине и высоте камер выемка будет осуществляться раздельно от нерудных запасов.

Обоснованы параметры очистных камер с учетом качества рудного и породного массива и действующих в массиве напряжений с использованием метода Метьюза-Потвина. Представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния каркасной горной конструкции. Показан порядок отработки рудных запасов камер в каркасном исполнении с учетом изменяющейся конъюнктуры рынка и цены золота.

Параметры камер определялись таким образом, чтобы учесть не только напряженно-деформационное состояние массива, но и параметры геологической блочной модели по ресурсам, а также учитывались минимальные размеры возможного горного оборудования для проходки камер, что в целом позволило снизить теоретические потери и разубоживание при отработке камер.

После выполнения исследовательских работ были сделаны следующие выводы:

1. Ресурсная модель фрагментирует геологическую модель на элементарные блоки с присвоением качественно-количественных характеристик;
2. Экономическая модель присваивает ценность этим блокам;
3. Геотехническая модель укрупняет блоки в очистные единицы, ранжирует и определяет порядок отработки;
4. Технологическая модель является завершающей и определяет целесообразность отработки блока в камере, позволяя сформировать оптимальный производственный план добычи.

По результатам работы можно дать следующие рекомендации:

Создавать, вести и постоянно обновлять различные модели по месторождению, что позволит полноценно оценивать его состояние, и впоследствии правильно планировать очередность отработки камер, с учетом содержаний и возможного разубоживания при добыче.

При этом на последних стадиях дорабатываются все запасы участка залежи, и это обеспечивает повышение производственной и экономической эффективности, а также повышает безопасность горных работ.

При достижении критической глубины удароопасности (+2960 м) необходимо выполнить комплекс дополнительных контрольно-инструментальных замеров и исследований.

Ярославцев А.Г., Жикин А.А., Ахматов А.Е.
Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия
e-mail: asa_gis@mi-perm.ru

ПРОГНОЗ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ЗОН ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В СОЛЯНЫХ РУДНИКАХ СПОСОБОМ «ИНСЕЙС»

Сейсморазведочные технологии на сегодняшний день являются наиболее обоснованным и эффективным инструментом для решения задачи обеспечения безопасной разработки калийных рудников. Некоторые из них, например, сейсморазведка на отражённых волнах по методу общей глубинной точки, не только прошли многолетнее натурное опробование, но и включены в действующие нормативные документы недропользователей на Верхнекамском месторождении солей. Основные направления их применения связаны с контролем водозащитной толщи [1], перекрывающей горные выработки от проникновения слабоминерализованных вод, а также с исследованием горизонтальной плоскости околорудничного пространства для оценки структуры и состояния междокамерных и межшахтных целиков [2].

Одновременно с этими направлениями существует не менее важная задача дистанционного оперативного прогноза физико-геологических неоднородностей породного массива впереди забоя выработки. И здесь также наиболее высокоразрешающим, помехоустойчивым и «дальнобойным» методом выступают технологии сейсмоакустической локации. В мировой практике данные подходы более 30 лет применяются при проходке туннелей и угольных шахт, в то время как для соляных рудников они до последнего времени практически не развивались.

В ГИ УрО РАН разработан оригинальный способ оперативной сейсмоакустической локации физико-геологических неоднородностей массива соляных пород впереди забоя горной выработки, получивший название «Инсейс». Данная технология основана на использовании многоканальной малоапертурной площадной системы регистрации и изучении отраженных поперечных волн вертикальной поляризации (SV-волны).

При возбуждении колебаний на почве выработки возле забоя в условиях тонкослоистого соляного разреза значительная часть энергии сдвиговых волн распространяется в горизонтальном направлении [3]. Это обуславливает получение когерентных отражений практически от любых физически контрастных объектов в разрабатываемом пласте. Волны, приходящие из других нецелевых направлений околорудничного пространства (верхнего и нижнего), подавляются за счёт реализации площадной интерференционной системы наблюдений и специальных приемов цифровой обработки данных. В основу цифровой обработки в предложенном способе заложен алгоритм миграционного суммирования с использованием интеграла Кирхгофа (KPSDM).

Реализация полевых наблюдений возможна как в активном, так и в пассивном вариантах. В первом случае и источники, и приёмники колебаний располагаются непосредственно возле забоя. Генерация колебаний производится ударным источником возле каждого пункта приёма. Во втором случае в качестве источника колебаний выступает режущий орган проходческого комбайна. При этом пункты приёма располагаются либо позади комбайна, либо в соседней камере.

Математическое моделирование для различных физико-геологических условий показало, что предложенный способ позволяет успешно лоцировать впереди забоя относительно слабоконтрастные объекты, например, зоны литологического замещения. Данные геологические неоднородности в условиях калийных рудников снижают

качество добываемого сырья, могут выступать маркерами зон с пониженными физико-механическими свойствами и областей повышенного газонасыщения. Подобные особенности строения предполагают возможность газодинамических явлений (ГДЯ), представляющих прямую угрозу жизни персонала и сохранности дорогостоящего горного оборудования.

Натурное опробование предложенного способа прошло апробацию в рудниках Верхнекамского и Гремячинского месторождений калийных солей. Эффективность выбранных подходов верифицирована на контрольных объектах, в качестве которых выступали известные горные выработки, расположенные непосредственно впереди забоя (рисунок 1).

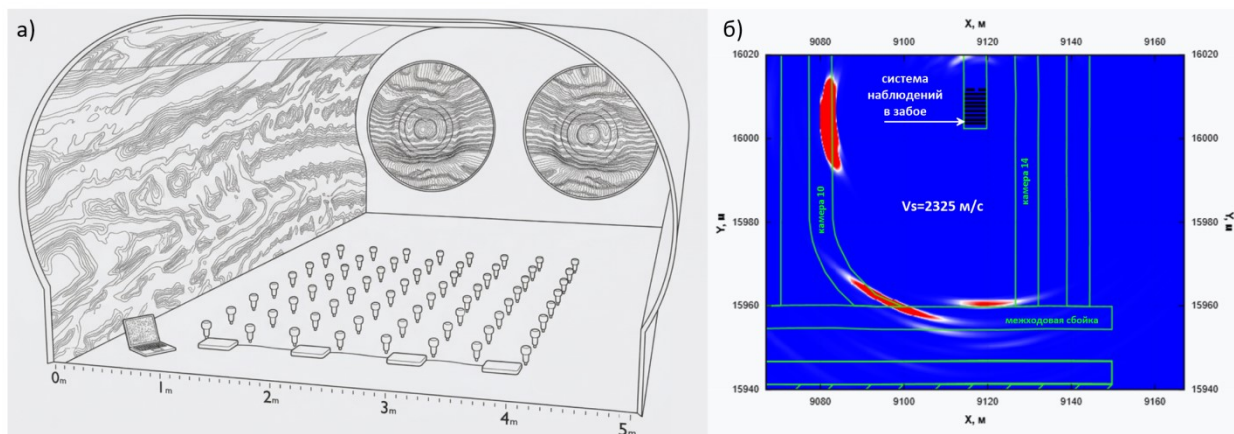


Рисунок 1 – Схема расположения системы сейсмоакустических наблюдений возле забоя (а) и результат натурального эксперимента на контрольных объектах (б)

Полевые эксперименты показали, что погрешность определения горизонтального удаления объекта от груди забоя составляет не более 2 метров. С учётом имеющихся сейсмогеологических условий максимальная дальность обнаружения физико-геологической неоднородности составляет 100-120 метров. Время реализации единичного наблюдения в пределах одного забоя составляет не более 1-2 часов и в основном зависит от степени готовности почвы выработки к наблюдениям.

Список использованных источников:

1. Санфиоров И.А., Бабкин А.И. Сейсморазведка МОВ в горных выработках соляных рудников // Геофизика. – 2006. – № 3. – С. 23-26.
2. Бабкин А. И., Санфиоров И. А. Сейсморазведочный прогноз литологических неоднородностей в горизонтальной плоскости межштрекового пространства // ГИАБ. – 2011. – № 11.
3. Ярославцев А.Г., Тарантин М.В., Жикин А.А. Учет направленности источников сейсмических колебаний при решении горно-геологических задач / Горный журнал. – 2023. – № 11. С. 37-42. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.06

Научное издание

«ПРОГНОЗ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ УДАРООПАСНОСТИ
ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ»

X Всероссийская научно-техническая конференция
с участием иностранных специалистов

(Апатиты, 15–19 июня 2026 г.)

Тезисы докладов

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано в печать 28.05.2026. Формат бумаги 60×84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 7,9. Заказ № 27. Тираж 300 экз.

Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской академии наук».
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14.

Отпечатано в Федеральном исследовательском центре
«Кольский научный центр Российской академии наук».



ISBN 978-5-91137-571-3



9 785911 375713

