На правах рукописи

Мельницкая Милитина Евгеньевна

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ БЛОЧНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:
доктор технических наук, главный научный сотрудник
Цирель Сергей Вадимович

Официальные оппоненты:
Сидоров Дмитрий Владимирович
доктор технических наук, ООО «Полигор», заместитель генерального директора по научной работе;
Трофимов Андрей Викторович
кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», лаборатория геотехники, заведующий лабораторией.

Ведущая организация – Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты.

Защита диссертации состоится 16 декабря 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 октября 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В результате обрушений, динамических заколообразований, горных и горно-тектонических ударов происходит наибольшее количество аварий и случаев травмирования персонала на шахтах и рудниках России. Из травмирующих факторов, которые приводят к несчастным случаям со смертельным исходом, 38% составляют обрушения горных пород.

Извлечение полезного ископаемого подземным или комбинированным способом сопровождается изменением напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Деформационные процессы, протекающие в зонах ведения горных работ, повышают опасность возникновения процессов разрушения, так как могут стать причинами вывода из строя горного оборудования, травматизма и гибели людей. Вовлечение в подработку больших объемов массива горных пород сопровождается развитием геодинамических процессов, опасных геодинамических явлений. Опасные геодинамические явления, вероятность проявлений которых напрямую связана с интенсивностью развития очистных работ и глубиной их ведения, остаются главными факторами, сдерживающими производительность рудников всего мира.

Интенсификация подземных работ на АО «Апатит» влечет за собой их углубление и, как следствие, рост уровня напряжений и опасности динамических проявлений горного давления. Вместе с тем, существующие методы мониторинга, оценки и прогноза развития геодинамических процессов не в полной мере обеспечивают требуемый уровень безопасности и эффективности ведения горных работ. Заблаговременное выявление очагов концентрации напряжений, областей процессов разуплотнения вмещающих пород позволяет значительно снизить вероятность возникновения динамических форм горного давления.

Достоверный прогноз развития геомеханических и геодинамических процессов позволит повысить безопасность ведения проходческих работ, снизить затраты на ремонт и перекрепление участков горных выработок.

Главные принципы и методы деформационного мониторинга опасных зон с целью управления горным давлением и прогнозирования горных ударов изучались в работах следующих ученых: С.Г. Авершин, З. Бениявски, А.Г. Акимов, И.М. Батугина, А.С. Батугин, И.В. Баклашов, Я.А. Бич, Г.Н. Кузнецов, Н.С. Булычѐв, П.В. Егоров, Б.А. Картозия, А.П. Господариков, О.В. Ковалев, А.А. Козырев, А.В. Леонтьев, А.М. Линьков, А.Г. Оловянный, Н.М. Проскуряков, А.Г. Протосеня, М.А Розенбаум, В.М Серяков, А.А. Филинков, С.В. Цирель, С.Е. Чирков, А.Н. Шабаров, Д.В. Сидоров, А.В. Трофимов, В.А Еременко и другие.

Развитию методов мониторинга и прогнозирования деформационных процессов посвящены исследования ученых и специалистов в том числе и Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета.

Основоположниками исследований на физических моделях явлений деформаций и разрушения толщи пород, окружающих подземные выработки, были М. Файоль, А. Леон и Ф. Вильгейм, Ф.Ю. Левинсон-Лесинг, М.М. Протодьяконов, Г. Шпаккелер, Е. Леер и К. Зейдл, Г. Домман, Ф.А. Белаенко и Г.Л. Павленко и др. Все указанные исследователи, за исключением М. Файоля, решали задачи при неизменном контуре выработки. Движение выработок, следовательно, деформации и разрушения окружающих пород не производилось. М. Файоль предпринял попытку представить в модели всю толщу пород и осуществить моделирование проходки выработки, однако в его опытах не были соблюдены условия механического подобия. Направление фундаментальных исследований, связанное с изучением на физических моделях процессов, протекающих в блочно-слоистых массивах изучалось в работах В.П. Глушихина, Г.Н. Кузнецова, М.Ф. Шклярского, И.М. Петухова.

Стремительный научно-технологический прогресс расширил возможности использования метода конечных элементов и в настоящее время широко используется для решения задач деформационных процессов, происходящих в массиве горных пород. Большой вклад в развитие моделирования геомеханических процессов методом конечных элементов, внесли ученые:

Б.З. Амусин, О.К. Зенкевич, Ж.С. Ержанов, А.А. Борисов, А.Б. Фадеев, Э Хук, Р. МакЛей, М. Джонс, Т. Пиан.

В работах Кольского научного центра РАН приведены результаты многолетних исследований проявления давления на месторождениях АО «Апатит», взаимосвязи геологических и деформационных процессов при ведении горных работ, описаны мониторинговые системы и способы прогноза геомеханических ситуаций. Тем не менее, существующие системы мониторинга не могут однозначно дать исследователям представление о процессах и прогнозе их развития, происходящих в массиве горных пород, ввиду его сложного строения.

Содержание диссертации соответствует п.1 «Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений», п.2 « Геомеханическое обеспечение открытой и подземной добычи полезных ископаемых, разработка методов управления горным давлением, удароопасностью, сдвижением горных пород, устойчивостью бортов карьеров», п.4 «Разработка теорий, способов, математических моделей и средств управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений», п.6 «Создание на основе современных информационных технологий методов, приборов, автоматизированных систем для изучения и контроля свойств горных пород и грунтов, строения и состояния их массивов, а также для прогнозирования динамических процессов и явлений» области исследований паспорта специальности 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Цель и задачи. Повышение безопасности ведения подземных горных работ на рудниках АО «Апатит», за счет выбора эффективных методов прогноза опасных геодинамических явлений по данным деформационного мониторинга.

Задачи исследования:

1. Анализ и обобщение данных по сейсмической активности на рудниках АО «Апатит», опыта применения методов деформационного мониторинга для прогноза геодинамических явлений;

2. Обоснование методов ведения мониторинга, повышающих эффективность прогнозирования опасных геодинамических событий;

3. Разработка методик интерпретации данных системы мониторинга геодинамических процессов в массиве с использованием деформационных датчиков и датчиков определения наклона;

4. Анализ натурных данных геодинамического (сейсмического, деформационного) мониторинга;

5. Проведение экспериментов на основе физического моделирования из эквивалентных материалов, направленного на решение обратных геомеханических задач по определению параметров деформирования скважин в окрестностях горных выработок;

6. Определение параметров напряженного состояния массива на основе численной конечно-элементной модели.

7. Опытно-промышленная апробация и разработка методов использования деформационного мониторинга.

Цель исследования заключается в разработке метода определения параметров регионального и локального полей напряжений на основании данных натурных наблюдений.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация комплексного подхода систем деформационного мониторинга, с целью прогноза опасных геодинамических явлений на Кировском руднике АО «Апатит».

Идея работы. Разработка методов интерпретации данных систем мониторинга за подвижностью тектонических блоков, основанной на фиксации их наклонов, и системы скважинных деформационных датчиков, комплексное использование которых позволяет определить параметры изменения напряженного состояния массива и обеспечить прогноз опасных геодинамических явлений.

Научная новизна:

1. Установлены корреляционные связи между изменениями наклонов тектонических блоков массива и параметрами действующего в исследуемом массиве поля напряжений.

2. Выявлены закономерности, связывающие измеряемые деформации средствами мониторинга и действующие напряжения в массиве в диапазоне неупругих деформаций и начинающихся процессов разрушения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Проведено обоснование существующих методов ведения деформационного мониторинга, рекомендован способ установки датчиков, разработаны рекомендации по интерпретации данных мониторинга.

2. Определены связи между зафиксированными деформациями в массиве и действующими напряжениями в области неупругих деформаций и начинающихся хрупких разрушений.

3. Разработан методы определения параметров регионального поля напряжений на основании данных системы мониторинга отдельных тектонических блоков массива.

Методология и методы исследования. Анализ и обобщение натурных и лабораторных исследований, содержащихся в российских и зарубежных литературных источниках. Проведение анализа статистики горных ударов, участие в натурных измерениях удароопасности локальными, региональными, геомеханическими методами. Проведение физического моделирования. Апробация полученных данных физического моделирования, с целью установления связей между измеренными деформациями и напряжениями для применения в натурных условиях месторождения. Выполнение комплекса численного моделирования, с целью установления напряженно-деформированного состояния на основании натурных данных об изменениях наклонов тектонических блоков. Установление корреляционных связей наклонов тектонических блоков, деформаций и сейсмической активности массива горных пород. Создание методики применения деформационного мониторинга с учетом блочного строения массива.

Положения, выносимые на защиту:

1. Определение параметров регионального поля напряжений может выполняться на основании данных систем мониторинга за наклонами отдельных структурных блоков массива по методике, основанной на решении обратных геомеханических задач с помощью численного моделирования методом конечных элементов.

2. Перераспределение напряжений и локализация участков проявлений опасных геодинамических явлений массива в пределах тектонических блоков может осуществляется на основании данных скважинных методов деформационного мониторинга с применением критериев удароопасности, определенных по результатам моделирования на физических моделях из эквивалентных материалов.

3. Прогноз опасных геодинамических явлений на конкретном участке месторождения обеспечивается системами деформационного мониторинга, реализующими наблюдения в режиме реального времени за подвижностью тектонических блоков и действующих в массиве блоков напряжений.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается использованием современных методологических комплексов численного и физического моделирования. Применением материалов опыта российских и зарубежных предприятий, осуществляющих добычу полезных ископаемых, сопоставлением результатов исследований геодинамических процессов в натурных условиях при подземной разработке апатит-нефелиновых руд, при использовании деформационного мониторинга. Сходимостью данных физического и математического моделирования. Апробацией результатов исследований на международных и всероссийских конференциях.

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- Научная конференция Краковской горной академии (г. Краков, 2014 г).
- Международная конференция на базе Фрайбергской горной академии (г. Фрайберг,2015 г);

- Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (г. Пермь, 2016 г);

Форум проектов программ Союзного государства- VI Форум вузов инженерно-технологического профиля «Глобальная энергетика: Партнерство и устойчивое развитие стран и технологий» (г. Минск, 2017 г).

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК). Получен 1 патент.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 101 наименование. Диссертация изложена на 116 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 6 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность главному научному сотруднику Научного центра геомеханики и проблем горного производства, д.т.н. С.В. Цирелю за научное руководство работой. За помощь и организацию работ при выполнении физического моделирования на эквивалентных материалах автор выражает искреннюю признательность сотрудникам лаборатории моделирования Научного центра геомеханики и проблем горного производства, к.т.н. Б.Ю. Зуеву и с.н.с., к.т.н. Р.С. Истомину. Заведующему лабораторией геомеханики Научного центра геомеханики и проблем горного производства, к.т.н. К.В. Морозову и с.н.с. лаборатории горного давления на рудных и нерудных месторождениях, к.т.н. Д.А. Котикову автор выражает благодарность за консультирование. Автор глубоко признателен заместителю директора по науке и инновационной деятельности, заведующему лабораторией горного давления на рудных и нерудных месторождениях Научного центра геомеханики и проблем горного производства к.т.н. А.Д. Куранову за оказанную поддержку и всестороннюю помощь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ научно-технической литературы и данных практики по теме исследования, геомеханических и горно-геологических особенностей разрабатываемых руд месторождения на объекте исследования, описан и проанализирован опыт применения действующих систем мониторинга на рудниках АО «Апатит». На основе анализа отечественного и зарубежного опыта составлена классификация методов деформационного мониторинга.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены существующие методы ведения деформационного мониторинга. Проведен анализ данных мониторинговых систем, осуществлен выбор методов проведения деформационного мониторинга. Выполнено описание опытной системы деформационного мониторинга за активностью тектонических блоков с применением инклинометрических систем и состоянием приконтурного массива с применением трехкомпонентных датчиков контроля деформации. По результатам осмотра выработок и анализа карточек горных ударов выявлена необходимость создания методик интерпретации данных деформационного мониторинга.

Для решения поставленной задачи выдвинута гипотеза о целесообразности комплексного использования наклономерных и деформометрических методов наблюдения.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

Третья глава диссертации посвящена описанию произведенных экспериментов, использованию результатов наблюдений за наклонами тектонических блоков для повышения точности установления напряженно-деформированного состояния массива, основанных на численном моделировании геомеханических и геодинамических процессов, решению

обратных геомеханических задач на основе физического моделирования.

Четвертая глава диссертации посвящена использованию результатов исследований для прогноза геодинамических явлений, произведен сопоставительный анализ данных мониторинговых систем за наклонами тектонических блоков и сейсмической активности массива. Предложены рекомендации по интерпретации данных деформационного мониторинга, описана роль деформационного мониторинга в общей системе комплексного геодинамического мониторинга.

В заключении изложены основные научные и практические результаты выполненной работы.

Основные результаты исследований отражены при доказательстве следующих **защищаемых положений**:

1. Определение параметров регионального поля напряжений может выполняться на основании данных системы мониторинга за наклонами отдельных структурных блоков массива по методике, основанной на решении обратных геомеханических задач с помощью численного моделирования методом конечных элементов.

Движение структурных блоков зачастую сопровождают различные проявления горного давления, в том числе горных ударов.

Для реализации регионального мониторинга в условиях подземных рудников использовалась система инклинометров для наблюдений за смещениями блоков в горном массиве.

Для оценки действующих напряжений в блоке, основанных на наблюдениях за наклонами отдельных структурных блоков массива, использовалась методика решения обратных геомеханических задач на основе численного моделирования методом конечных элементов.

Для установления зависимости между наклоном блока и прогнозными изменениями напряженно-деформированного состояния на его границах проводилось многовариантное моделирование с углами поворота от 0 до 200 секунд. При каждом повороте блока, в каждой из точек нахождения инклинометров замерялись значения напряжений. Использовалась методика решения обратных геомеханических задач, с целью установления

прогнозной зависимости изменения НДС массива от углов поворота блока, основанного на натурных наблюдениях за наклонами отдельных структурных блоков массива зафиксированных системой инклинометров.

При повороте 80 секунд зафиксированы максимальные главные сжимающие напряжения. На рисунке 1 представлена эпюра распределения максимальных главных сжимающих напряжений до поворота блока σ_1, на рисунке 2 – представлена эпюра максимально возможных сжимающих напряжений σ_1', после поворота блока на 80 секунд

При угловом повороте на 80 секунд в окрестностях выработки наблюдается увеличение максимальных главных сжимающих напряжений на 20-30% в зонах нагрузки и уменьшение на 20% в зонах разгрузки. В зоне над выработкой в окружающем массиве наблюдается увеличение напряжений на 30-35%, непосредственно над выработкой наблюдается увеличение напряжений на 10-15%. Аналогичный прирост напряжений показывает график распределения концентрации напряжений на горизонте +170 м, а также выше горизонта на 25 и 75 м, по разрезам, представленный на рисунке 3.

Изменение напряжений было проанализировано в точках, соответствующих пересечению магистрали +500, по разрезам 7, 8, 9 и проекции линии контроля наклона инклинометрами (горизонт +170). Полученные графики зависимостей представлены на рисунке 4

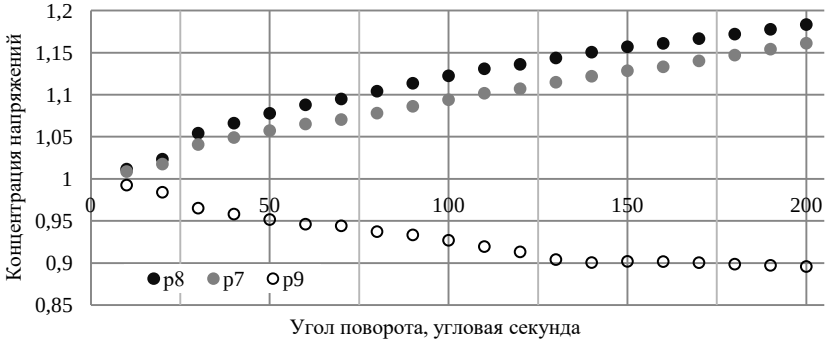

Рисунок 4 – График зависимости изменения концентрации напряжений от угла поворота

В результате поворота блока, изменяется поле напряжений что способно привести к образованию зон концентраций напряжений. Методика, основанная на решении обратных геомеханических задач, с помощью численного моделирования методом конечных элементов, позволяет определять параметры регионального поля напряжений на основании данных системы мониторинга за наклонами отдельных структурных блоков массива с достаточной точностью.

2. Перераспределение напряжений и локализация участков проявлений опасных геодинамических явлений массива в пределах тектонических блоков может осуществляться на основании данных скважинных методов деформационного мониторинга с применением критериев удароопасности, определенных по результатам моделирования на физических моделях из эквивалентных материалов.

Исследования Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета показали что, в условиях Кировского рудника, в окрестностях горизонтальных скважин протекают нелинейные процессы деформирования массива.

Для рассматриваемых условий, на физической модели из эквивалентных материалов по заданным напряжениям с фиксируемыми соотношениями вертикальной и горизонтальной составляющих, определялись соответствующие им деформации в скважине для установления соответствующих закономерностей. Для анализа был выбран участок массива горизонта +170, исследуемая область составила 250 метров. В скважину в двух взаимно перпендикулярных направлениях устанавливались модели деформометров, представляющие собой тензометрические скобы. Скобы устанавливались по осям действия максимальных (вертикальных) и минимальных (горизонтальных) напряжений на границах модели. Рассматривались условия, характеризующиеся величинами соотношений максимальных и минимальных напряжений на границах моделей вне зоны влияния скважины.

Методика проведения эксперимента заключалась в ступенчатом увеличении нагрузок по вертикальным и горизонтальным осям при сохранении заданных соотношений

напряжений $\sigma_{гор}/\sigma_{верт}$ до появления видимых признаков разрушения околоскважинного пространства.

Проанализированы изменения деформаций на начальном участке деформирования при отсутствии активной горизонтальной пригрузки, но при наличии начальной пригрузки вдоль оси скважины $\sigma_н = 0 \div 0{,}14$ (рисунок 5).

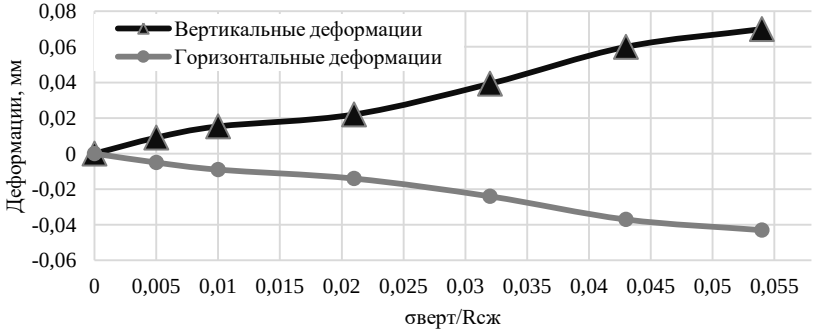

Рисунок 5 - Изменение вертикальных и горизонтальных деформаций на начальном этапе деформирования при отсутствии активных горизонтальных напряжений $\sigma_{гор}=0$

Анализ изменения деформаций на начальном участке деформирования при отсутствии активной горизонтальной составляющей показал, что наблюдается сжатие контура вдоль линии действия максимальных напряжений и растяжение контура вдоль линии минимальных напряжений. Однако при этом наличие напряжений вдоль оси скважины может существенно влиять на их соотношение. На рисунке 6 – приведены временные зависимости изменения деформации стенок скважины по линии действия максимальных и минимальных напряжений, изменения этих деформаций как функций максимальных действующих напряжений пронормированы в долях прочностей массива на одноосное сжатие. Участки скачкообразного характера образуются в результате моментов хрупкого разрушения.

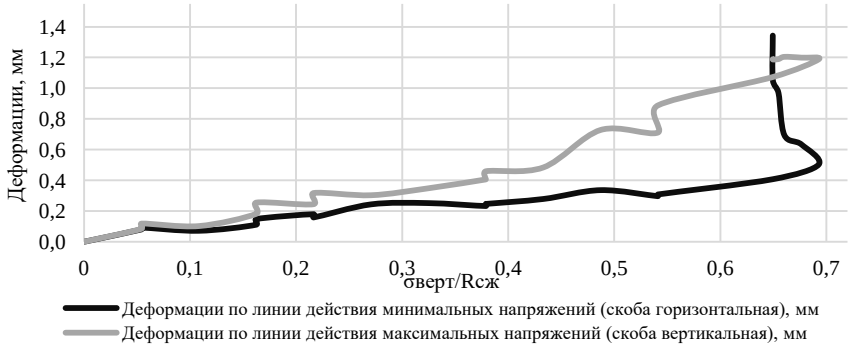

Рисунок 6 – Изменение деформаций скважины в модели из эквивалентных материалов

По результатам полученных данных для условий расположения трехкомпонентного датчика с соотношением главных напряжений 2:1 были получены значения деформаций соответствующих разрушения массива

Разработанная методика обеспечивает выполнение поставленной задачи по установлению корреляционных зависимостей между деформациями контура скважины с величиной напряжений, действующих вне зоны ее влияния. Установленные закономерности могут являться основой для интерпретации данных с трехкомпонентных датчиков и определения динамики параметров напряжений при приближении фронта горных работ.

3. Прогноз опасных геодинамических явлений на конкретном участке месторождения обеспечивается системами деформационного мониторинга, реализующими наблюдения в режиме реального времени за подвижностью тектонических блоков и действующих в массиве блоков напряжений.

Для получения характеристики напряженно-деформированного состояния массива следует использовать деформационные и сейсмические средства мониторинга как комплекс, так как использование средств мониторинга лишь одного типа не способствуют выявлению процессов изменения напряженно-деформированного состояния, а также его достоверного прогноза. При этом именно деформационный мониторинг позволяет интерпретировать данные сейсмического мониторинга, а комплексное использование дает

возможность получать корреляцию подвижек геологических блоков с сейсмическими событиями на уровне тектонических блоков.

Сейсмические события разделялись на категории по количеству выделяемой энергии. На рисунке 7 отражен результат проведенного анализа, выявлено типичное распределение, подтверждающее достоверность фиксируемых данных в пределах зоны анализа.

Наибольшее количество сейсмических событий сосредоточено в категории до 10^3 Дж, что составляет 45% от общего количества анализируемых данных, при этом совокупная доля категории более 10^6 Дж занимает лишь 1%, несмотря на это именно последствия сейсмособытий большой мощности представляют наибольшую опасность.

Распределение очагов сейсмических событий в районе наблюдений носит неравномерный характер. Массовые взрывы являются мощным энергетическим воздействием на окружающий массив пород что, с одной стороны, может привести к подготовке опасного сейсмического события, а с другой – активизировать подготовленное ранее сейсмическое событие.

В результате исследования проведен сравнительный анализ и установлена взаимосвязь текущих значений угла наклона инклинометров от среднеарифметического значения по времени и полученных данных о зарегистрированных сейсмических событиях.

Результаты вычислений представлены на рисунках 8 и 9. Для сравнения с данными автоматизированной системы контроля сейсмического мониторинга, на графики были нанесены энергии сейсмических событий и взрывов – представлены в виде lg(E).

На рисунке 9 отображен наиболее распространенный механизм связи, заключающийся в изменениях наклонов в ближайшие дни после сильных сейсмических событий с энергией десятки и сотни кДж, т.е. имеет место некоторая трансформация массива после сильных сейсмических событий. В свою очередь, повороты и перемещения блоков могут вызвать перераспределения локальных напряжений вокруг горных выработок, заколообразование и др. Сейсмическим событиям большой мощности могут отвечать одновременные с ними подвижки блоков.

Как видно из графиков, большие зафиксированные углы наклона тектонического блока через некоторое время приводят к

одному или группе сейсмических событий со средней (от 10^3 до 10^5 Дж) и высокой (более 10^5 Дж) энергией.

Деформационный мониторинг показывает, какому геомеханическому процессу соответствует высокая сейсмоактивность – относительно безопасному сбросу напряжений (когда деформации нарастают) или продолжению накопления упругой энергии и подготовке крупного динамического события (когда деформации остаются невысокими или даже скорость деформации снижается). Таким образом, наблюдаются сложные причинно-следственные связи между более медленными квазистатическими и быстрыми динамическими процессами в массиве.

На основании проведенного анализа полученных данных физического моделирования установлены зависимости смещения контура скважины от прироста напряжений (рисунок 10).

Критерием возможности возникновения горных ударов для условий Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит» является превышение расчетными величинами максимальной компоненты главных напряжений 0.5 от минимального предела прочности данного типа пород на одноосное сжатие ($\sigma_{max} \geq 0.5\sigma_c$). В лежачем боку зафиксированные максимальные напряжения на гор.+320 м составляли ≈30 МПа, на гор.+250 м ≈40 МПа, на гор.+170 м и +90 м получены напряжения, равные соответственно ≈50 МПа и ≈60 МПа.

На основании действующих максимальных напряжений по указанным отметкам горизонтов выполнен расчет величин возможного прироста напряжений, для горных пород с различными пределами прочности при одноосном сжатии, в зависимости от качественной характеристики.

Для использования критических значений приростов напряжений, на конкретных отметках горизонтов, представлены по пределу прочности пород на одноосное сжатие в соответствии со смещением контура скважины (рисунок 11)

Результаты исследований позволяют устанавливать корреляционные зависимости между деформациями контура скважины с величиной напряжений, возникающих в массиве. Установление таких корреляционных связей позволяет интерпретировать показания натурных деформометров

(трехкомпонентных датчиков). Определены критериальные значения деформаций, при которых возможны динамические формы проявления горного давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе результатов исследований предлагается новое методологическое решение актуальной задачи по ведению деформационного мониторинга, которое может использоваться при отработке запасов месторождений полезных ископаемых. Основные результаты исследований:

1. В результате исследования существующих мониторинговых систем и средств, применяемых при подземной разработке месторождений полезных ископаемых установлено, что развитие комплексных систем деформационного мониторинга состояния горного массива является основополагающим направлением в повышении эффективности и безопасности ведения горных работ. Выявлена потребность создания комплексных подходов к мониторингу геодинамических процессов в массиве горных пород и методик интерпретации данных. Это необходимо для установления связей между деформациями, сейсмической активностью и прогнозируемыми параметрами изменения напряжённого состояния массива горных пород.

2. Установление таких связей обеспечивает получение набора данных, требуемых для прогноза удароопасности, разработки мероприятий по предотвращению опасных геодинамических явлений.

3. Обоснованы методы ведения деформационного мониторинга, повышающие эффективность оценки состояния массива, уровня его удароопасности и прогноза опасных геодинамических явлений. Метод деформационного мониторинга является эффективным для оценки текущего напряженно-деформированного состояния массива и, как следствие, выбора противоударных мероприятий.

4. Предложен способ непрерывного наблюдения за блочным перемещением, процессами, происходящими на конкретном участке сплошности за счет применения инклинометрических

систем и скважинных деформометрических комплексов прямых измерений, что позволяет осуществлять контроль за состояние массива на локальном и региональном уровнях.

5. Разработан метод определения параметров регионального поля напряжений на основании данных наблюдений наклонов отдельных структурных блоков массива, в сочетании с решением обратных геомеханических задач, основанных на численном моделировании методом конечных элементов. Методика обеспечивает выполнение поставленной задачи по установлению корреляционных зависимостей между деформациями контура скважины с величиной напряжений, действующих вне зоны ее влияния.

6. Выявлена связь между зафиксированными деформациями в горном массиве и действующими напряжениями, предшествующими моменту разрушения массива, определены критерии возможности возникновения горных ударов для условий рудников АО «Апатит» за счет применения метода физического моделирования на эквивалентных материалах.

7. Установлены эмпирические связи между деформациями и напряжениями, позволяющие локализировать очаги удароопасных участков массива в пределах тектонических блоков.

8. Результаты исследования могут использоваться горнодобывающими предприятиями и проектными организациями в области ведения комплексного подземного деформационного мониторинга за состоянием массива горных пород по направлению выбора эффективных методов прогноза опасных геодинамических явлений.

9. Дальнейшие решения проблем в области геомеханического обеспечения подземной добычи полезных ископаемых могут быть направлены на сочетание методов деформационного мониторинга с новыми или существующими методами наблюдений за состоянием массива и установление закономерностей с целью прогнозирования удароопасности и установление категорий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Мельницкая, М.Е. Физическое моделирование динамических явлений при подземной разработке полезных

ископаемых / Б.Ю. Зуев, С.В. Цирель, М.Е. Мельницкая, Р.С. Истомин // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование – 2. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №11 (специальный выпуск 60-2). – С. 117-125.

2. Мельницкая, М.Е. Физическое моделирование геомеханических процессов при обрушении пород кровли / Б.Ю. Зуев, С.В. Цирель, М.Е. Мельницкая, Р.С. Истомин // Маркшейдерский вестник. – 2017. – №3. – С. 56-60.

Публикации в прочих изданиях:

3. Мельницкая, М.Е. Физическое моделирование формирования зон разрушения в области влияния очистных горных работ / Б.Ю. Зуев, Н.В. Кротов, Р.С. Истомин, М.Е. Мельницкая, А.А. Вьюников // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Сборник научных трудов. – 2017. – С. 412-417.

4. Мельницкая, М.Е. Использование сейсмического и радарного мониторинга при оценке оползневых явлений на карьерах / Н.Я. Мельников, М.Е. Мельницкая // Научные исследования и разработки в эпоху глобализации. Сборник научных трудов. – 2016. – С. 209-213.

5. Мельницкая, М.Е. Определение параметров зон разрушения горных пород с помощью датчиков акустической эмиссии на моделях из эквивалентных материалов / Б.Ю. Зуев, Р.С. Истомин, М.Е. Мельницкая // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербургский горный университет. СПБ. – 2017. – С. 37.

6. Melnitskaya, M.E. Control methods of rock pressure / M.E. Melnitskaya // International University of Resources. Scientific Reports on Resource Issues. – 2015. – V. 1. – P. 186-191.

Патенты:

7. Патент №2679645 Российская Федерация, МПК G01N 33/24 (2006.01), B25B 21/02 (2006.01), B25B 23-147 (2006.01). Устройство для деформационного мониторинга при моделировании на образцах искусственных материалов: №2018121598: заявл. 13.06.2018 . Цирель С.В., Мельницкая М.Е., Лодус Е.В. ; заявитель Санкт-Петербургский Горный университет - 6 с. : ил.

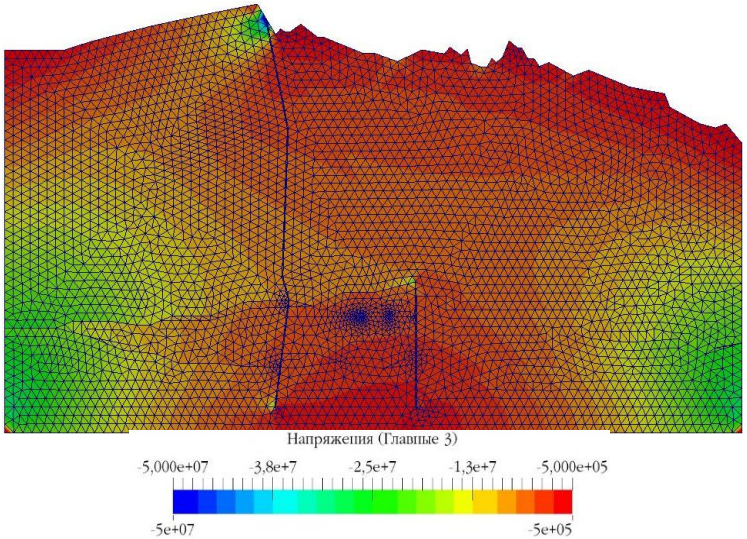

Рисунок 1 – Эпюра распределения максимальных главных сжимающих напряжений до поворота блока

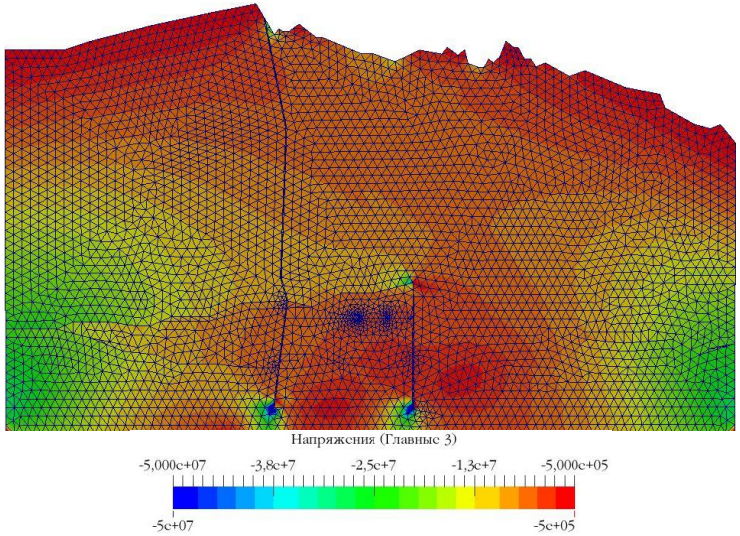

Рисунок 2 – Эпюра распределения максимальных главных сжимающих напряжений после поворота блока на 80 угл. секунд

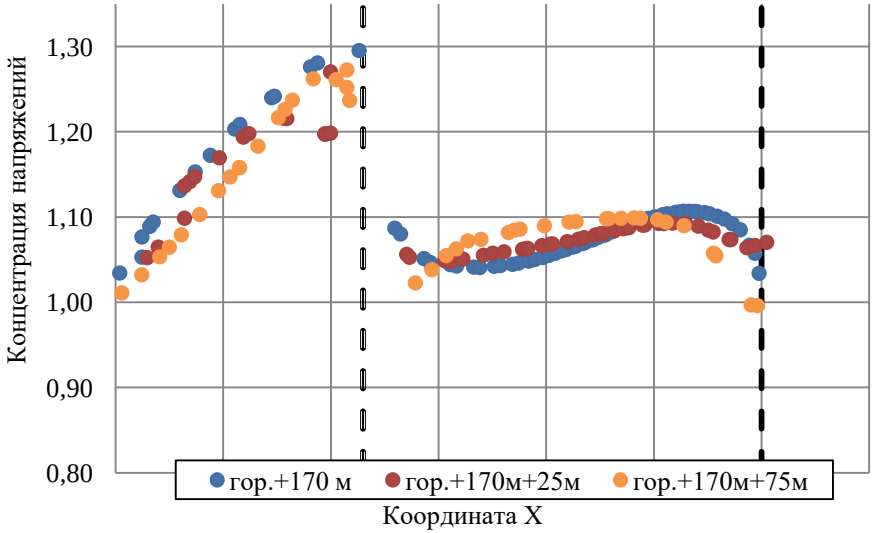

Рисунок 3 – Значение горизонтальной координаты при зафиксированном наклоне блока в 80 угл. секунд.

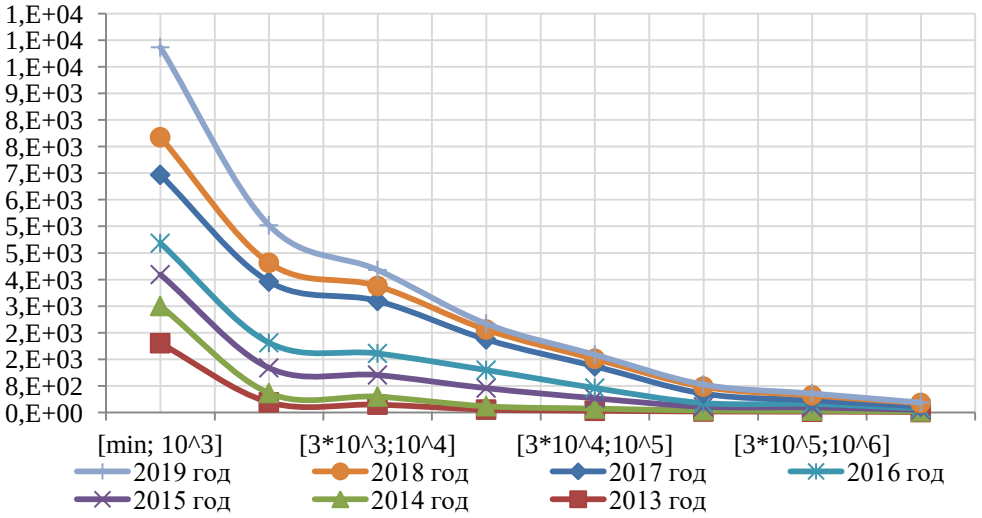

Рисунок 7 – Распределение сейсмических событий по количеству выделяемой энергии

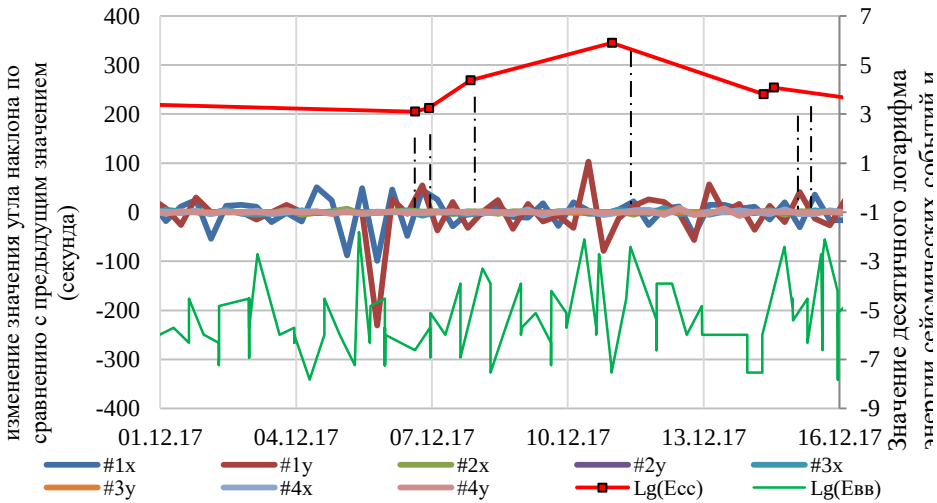

Рисунок 8 – График изменения отклонения текущего значения угла наклона от предыдущего значения по времени, при сравнении с данными взрывных работ и сейсмических

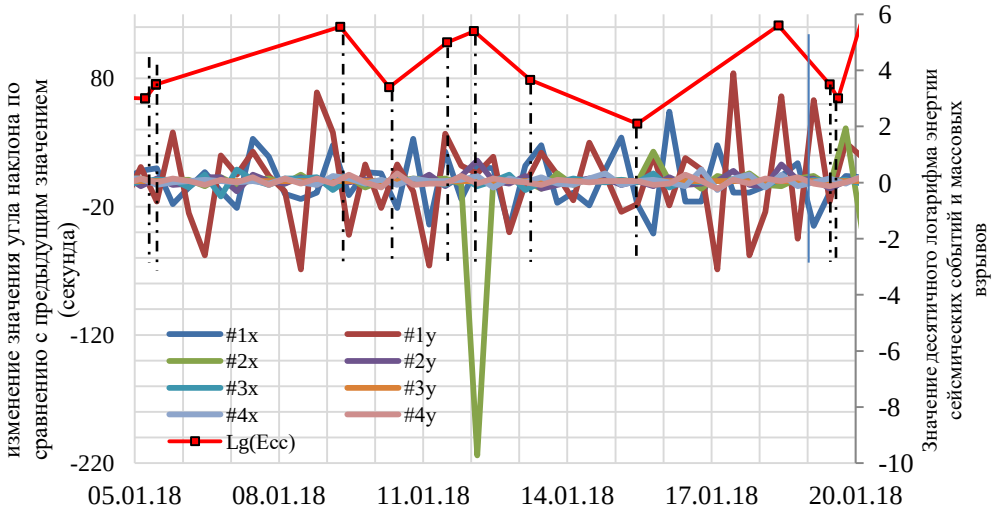

Рисунок 9 – График изменения отклонения текущего значения угла наклона от предыдущего значения по времени, при сравнении с данными взрывных работ и сейсмособытий с 05.01.18 по 19.01.18

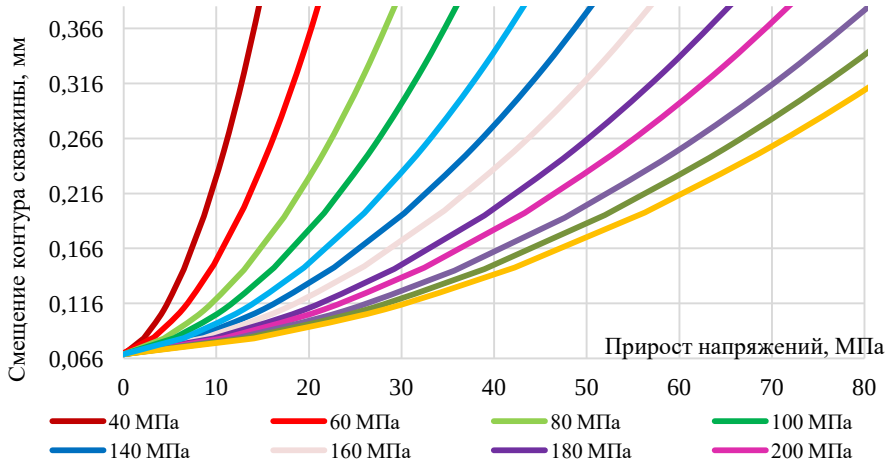

Рисунок 10 – Зависимость смещений контура скважины от прироста напряжений в массиве

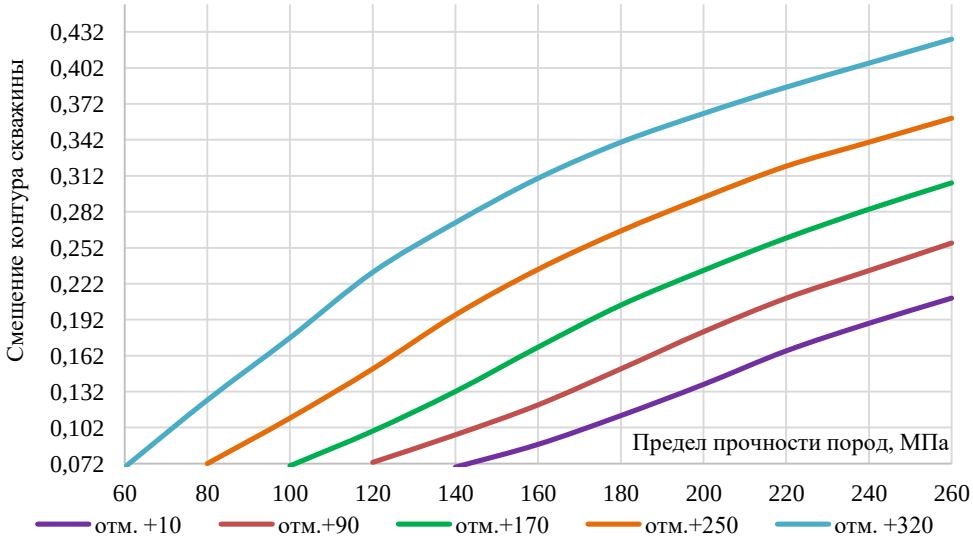

Рисунок 11 – Критерии удароопасности на основе деформационного мониторинга