

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук,  
С.В. Цирель

Санкт-Петербург – 2018

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Геомеханические и горно-геологические особенности разрабатываемых апатит-нефелиновых руд месторождений АО «Апатит». Действующие системы мониторинга.....	12
1.2 Опыт использования деформационного мониторинга на объекте исследования. .....	26
1.3 Анализ методов исследования напряженно-деформированного состояния горных массивов.....	30
Выводы по главе 1.....	34
ГЛАВА 2 НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРИНГОВЫХ СИСТЕМ ДЕФОРМАЦИЙ.....	36
2.1 Методы ведения деформационного мониторинга .....	36
2.2 Описание системы деформационного мониторинга состояния приконтурного массива с применением трехкомпонентного датчиков контроля деформации и ее монтажа .....	48
2.3 Описание опытной системы деформационного мониторинга за активностью структурных блоков массива горных пород .....	56
Выводы по Главе 2 .....	60
ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ЧИСЛЕННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ.....	62
3.1 Численное моделирование геомеханических и геодинамических процессов при взаимодействии структурных тектонических блоков массива .....	62
3.2 Решение обратных геомеханических задач на основе физического моделирования.....	70

Выводы по Главе 3 .....	83
4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ .....	84
4.1 Сопоставительный анализ данных мониторинговых систем .....	87
4.2 Интерпретация полученных результатов на основе разработанных методов прогноза удароопасности на основе деформационного мониторинга. ....	97
Выводы по главе 4.....	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103

## ВВЕДЕНИЕ

### **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. В «Годовом отчете о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору...» [11] отмечается проблема «Отсутствия полноценной испытательной базы не в полной мере, позволяющей моделировать процессы, негативное развитие которых определяет наличие рисков аварий, вызванных газодинамическими, геомеханическими, сейсмическими факторами». Из травмирующих факторов, которые приводят к несчастным случаям со смертельным исходом, 38% составили 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 [84,99]. Вовлечение в подработку больших объемов массива горных пород сопровождается развитием геодинамических процессов, опасных геодинамических явлений [18,67]. 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 [24,25].

Одним из горнодобывающих предприятий, для которого актуальны вышеперечисленные проблемы, является АО «Апатит», разрабатывающее удароопасные апатит-нефелиновые руды в Хибинском массиве, в сложных геодинамических условиях, и являющимся крупнейшим в мире производителем высокосортного фосфатного сырья. 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 требуемого уровня 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.

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. Бульчѐв, 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, 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 [51,54,63,85].

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 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 [13,69]. 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 (Далее - КНЦ РАН) [35-43,53] 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, как было указано выше. Проведение горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» сопровождается развитием геомеханических и геодинамических процессов, которые могут привести к частичной или полной потере устойчивости горных выработок и осложняют их проведение. Достоверный прогноз развития этих процессов позволит повысить безопасность ведения проходческих работ и снизить затраты на ремонт и укрепление участков горных выработок.

Тема актуальна в связи с общей тенденцией повышения интенсивности отработки месторождений, в том числе Хибинских апатит-нефелиновых, имеющегося большого потенциала к совершенствованию традиционных средств геомеханического мониторинга.

**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 текущих 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.

**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 обеспечивает прогноз опасных геодинамических явлений.

**Научная новизна:**

1. Установлены корреляционные связи между изменениями наклонов структурных 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 метод определения параметров регионального поля напряжений на основании данных системы мониторинга наклонов отдельных структурных блоков массива.

**Методология и методы исследования.** Анализ и обобщение натуральных и лабораторных исследований, содержащихся в российских и зарубежных литературных источниках, проведение анализа статистики горных ударов, участие в натуральных 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 натуральных условиях месторождения, выполнение комплекса численного моделирования с целью установления напряженно-деформированного состояния на основании натуральных данных об изменениях наклонов структурных блоков, установление корреляционных связей наклонов структурных блоков, деформаций и сейсмической активности массива горных пород, создание методики применения деформационного мониторинга с учетом блочного строения массива.

**Соответствие паспорту специальности.** Тема исследования 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

#### **Положения, выносимые на защиту**

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.

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.

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 натуральных 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 диссертационной работы представлены на заседаниях научно-технического совета Научного центра геомеханики и проблем горного производства и международных конференциях в период 2014-2018 гг.:

- 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 диссертации 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 содержит введение, четыре главы, заключение и список используемых источников. Содержит 116 страниц машинописного текста, 6 таблиц, 63 иллюстрации и список литературы из 101 наименования.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность Главному научному сотруднику, 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 заведующему лабораторией моделирования, к.т.н. Б.Ю. Зуеву и с.н.с., к.т.н. Р.С. Истомину. Заведующему лабораторией геомеханики, 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 заведующему лабораторией горного давления на рудных и нерудных месторождениях к.т.н. А.Д. Куранову за оказанную поддержку и всестороннюю помощь. Искреннюю благодарность автор выражает коллективу Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета.

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Геомеханические и горно-геологические особенности разрабатываемых апатит-нефелиновых руд месторождений АО «Апатит». Действующие системы мониторинга

Деформационные процессы в массиве, неотъемлемой частью которых является проявление сейсмической активности, перераспределение напряженно-деформированного состояния (Далее – НДС), сложное геолого-тектоническое строение в результате ведения горных работ являются основой изучения геодинамических и геомеханических явлений [3, 90].

Для поддержания добычи уровня и качества полезного ископаемого предприятиям требуется достоверная и своевременная информация о НДС массива горных пород, залегании полезного ископаемого, геолого-структурной нарушенности [1].

Развитие систем мониторинга состояния горного массива является основополагающим направлением в повышении эффективности ведения горных работ [19-20,79-83]. Тем не менее, существующие методы мониторинга, оценки и прогноза развития геодинамических процессов не обеспечивают полной безопасности и эффективности ведения горных работ и комплексного освоения недр.

На рисунке 1.1. по данным Росстата, приведено сопоставление добычи горной массы с количеством смертельных травм и аварий [76-78].

Не являются исключением из приведенной статистики и рудники АО «Апатит». АО «Апатит» входит в состав холдинга «Фосагро», крупнейшего европейского производителя фосфорных удобрений, Российским товаропроизводителем нефелинового концентрата [15,16].

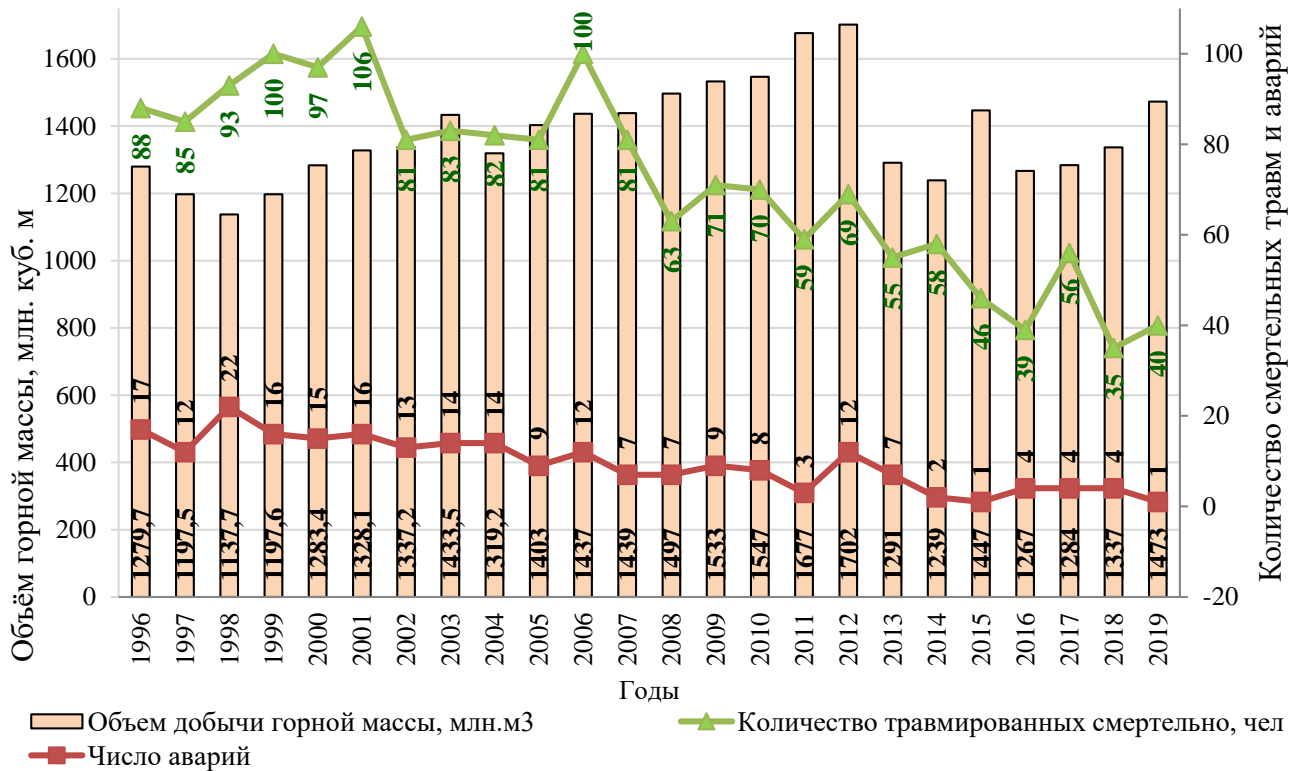


Рисунок 1.1 – Динамика объемов добычи горной массы, аварийности и травматизма [11]

Это проблема не только работ служб горнодобывающих предприятий, а мониторинга в целом, не только на российских рудниках и шахтах, но и на горных предприятиях всего мира [4-6,86].

Необходимость обеспечения запросов агропромышленного комплекса требует сохранения темпов добычи, углубление подземных горных работ на рудниках АО «Апатит», что, с учетом указанных выше факторов, приводит к повышению вероятности возникновения динамических проявлений горного давления [61]. Данное обстоятельство повышает требования к эффективности мероприятий, направленных на снижение вероятности возникновения динамических проявлений горного давления. Специалисты отдела технического развития, Центра геофизического мониторинга службы прогноза и предупреждения горных ударов (Далее – СППГУ) указывают на отсутствие оперативных методов оценки напряженно-деформированного состояния массива.

Деформационный мониторинг является эффективным инструментом, позволяющим получить информацию непосредственно о напряженно-

деформированном состоянии массива, а также о блочном перемещении, на широком диапазоне временных масштабов, изучать процессы, происходящие на конкретном участке нарушения сплошности [89]. Традиционный локальный мониторинг отображает степень удароопасности на конкретном участке выработки, локализует зону опасности, при этом не определяет происходящее в глубине массива. Повышенная опасность у стенки выработки может означать как небольшое локальное, так и обширное опасное повышение степени удароопасности и НДС [8,71-74].

Для точной оценки ситуации и выбора противоударных мероприятий требуется изучение состояния массива, прежде всего происходящих в нем деформационных процессов. Для этой цели чаще всего используют два подхода – математическое моделирование и расчеты по сейсмограммам. Однако оба метода основаны на большой идеализации горного массива, и почти не учитывают его сложных нелинейных особенностей. Кроме того, математическое моделирование показывает статическую ситуацию в определенный момент времени, а не развитие процессов. Вместе с тем, возникают сложности по определению участков массива, где степень деформации выше по сравнению с остальными участками.

Основной задачей исследования геодинамических процессов является определение качественных и количественных критериев возникновения опасности [87-88].

Группа «ФосАгро», является крупнейшим мировым производителем высокосортного фосфатного сырья, вторым в мире производителем аммофоса и диаммонийфосфата (по информации Fertecon).

Базовым предприятием группы «ФосАгро» является АО «Апатит», годовая производительность которого составляет 29 миллионов тонн руды и 7,5 миллионов тонн апатитового концентрата, так же вырабатываются нефелиновый, сиенитовый алюмощелочной, эгриновый, сфеновый и титаномагнетитовый концентраты [50]. Приоритетными задачами в АО «Апатит» являются обеспечение безопасности

производства, технологических процессов, а также поддержание ее уровня соответствующего современному состоянию науки и производства.

В АО «Апатит» входят рудники Кировский, Расвумчоррский и Восточный. Кировский и Расвумчоррский рудники осуществляют добычу подземным способом. Кировский ведет отработку месторождений Кукисвумчорр и Юкспор, Расвумчоррский – ведет отработку месторождения Апатитовый цирк и выемку подкарьерных запасов Плато Расвумчорр. Восточный рудник отрабатывает запасы месторождений Плато Расвумчорр, Коашвинское и Ньоркпахкское открытым способом карьерами Центральный, Коашвинский и Ньоркпахкский (рисунок 1.2). Продольные разрезы и горно-геологические условия эксплуатируемых Хибинских месторождений отражены на рисунке 1.3. Остаточные суммарные запасы руд составляют 306,2 млн. т, среднее содержание  $P_2O_5$  в запасах по месторождениям 13-14%.

Продолжительный производственный процесс, оказывающий влияние на породный массив и его природное сложное гравитационно-тектоническое напряженное состояние, являются определяющими факторами геодинамической обстановки района [62]. Высокому уровню сейсмической активности в районах ведения горных работ способствуют существенные объемы добычи, динамические воздействия массовыми взрывами, производимыми вследствие особенностей выбранной технологии, высокая активность неотектонических процессов, что сопровождается перестройкой естественного напряженного поля [9].

Фиксируются сейсмические события большой мощности (магнитуда 3-4) раз в десятилетие, ежегодно около двух тысяч сейсмических событий техногенного характера слабой и средней мощности [21].

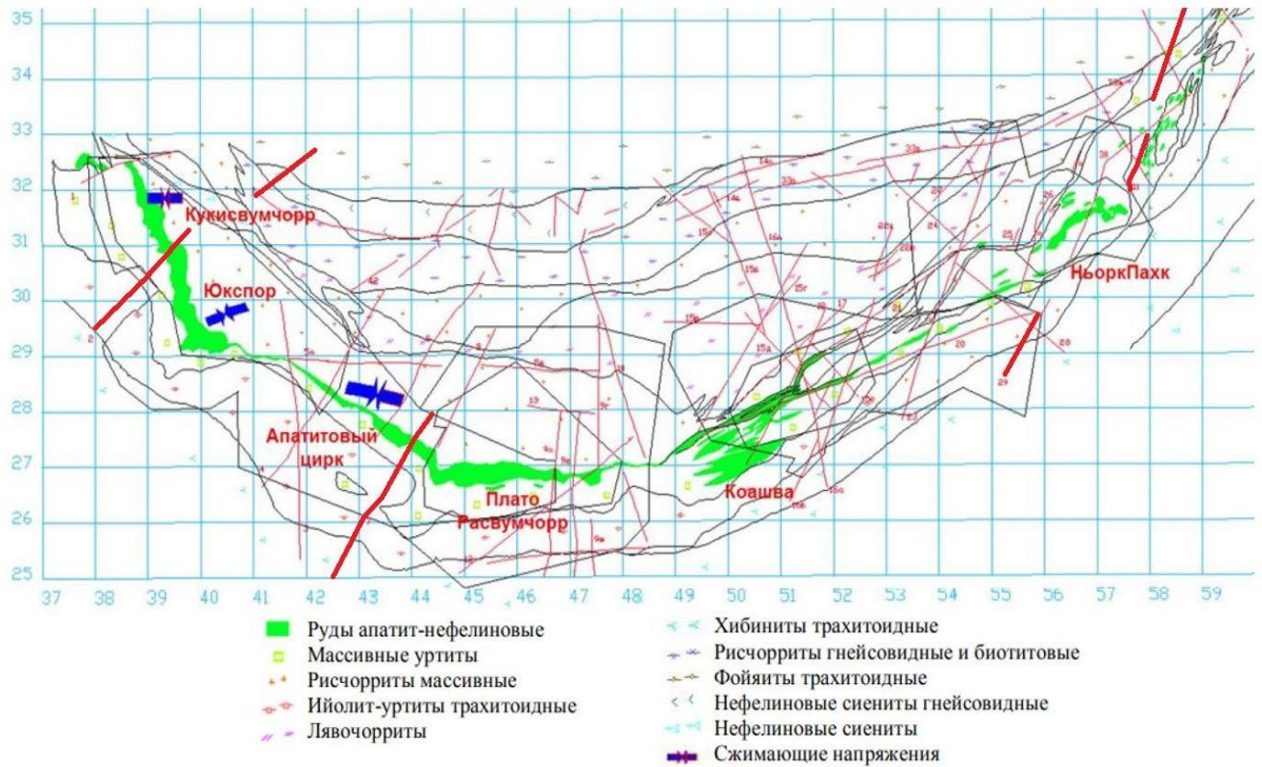


Рисунок 1.2 – Месторождения, обрабатываемые АО «Апатит» с разломно-блоковой тектоникой южной части Хибинского массива [9]

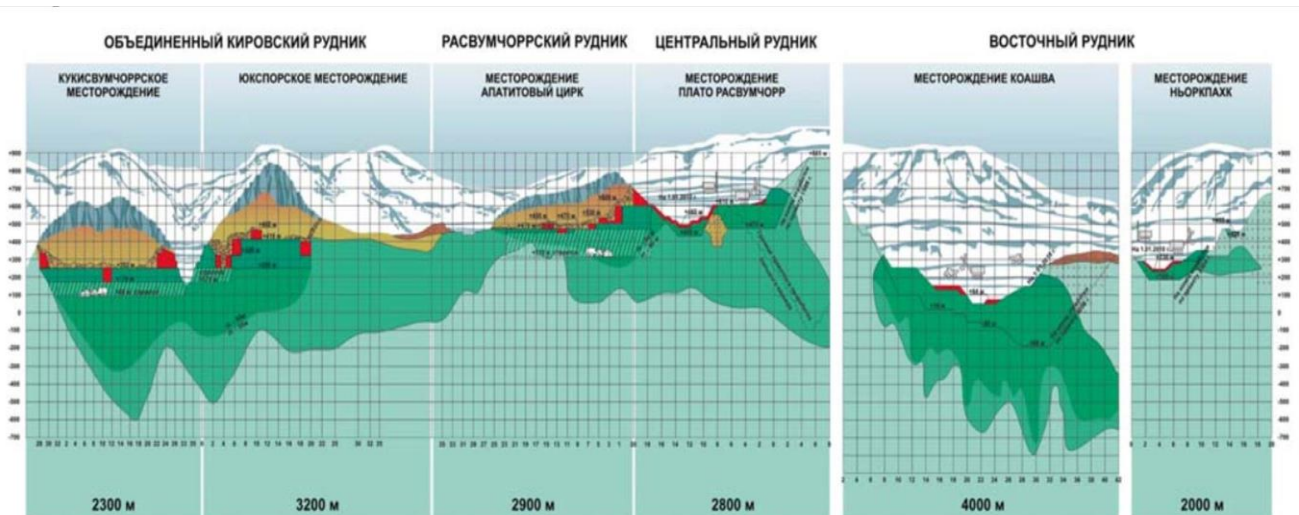


Рисунок 1.3. – Продольные разрезы и горно-геологические условия эксплуатируемых Хибинских месторождений нефелиновых руд

Разломно-блоковая тектоника южной части Хибинского массива, где сосредоточены эксплуатируемые месторождения апатита, исследовалась многократно научными организациями геологического и горно-геологического

профиля [66]. Главным критерием выявления и картирования подавляющей части этих разломов является характер рельефа земной поверхности.

На рисунке 1.2 красными линиями обозначены разломы Лопарский (Саамский) радиальный (№ 2), Южно-Расвумчоррский радиальный (№ 7), Центрально-Ньоркпахский (Сумийокский) радиальный (№ 29) и Центрально-Олень-Ручьевский радиальный (№ 31). Наибольшее влияние на геодинамическое состояние локального участка недр оказывают разломы низких порядков, имеющие много большую плотность пространственного распределения.

В Хибинском массиве роль блоковых структур хорошо выражена, по ступенчатому характеру превышений участков прослеживается связь рельефа с разрывными нарушениями. Значение разрывной тектоники обусловлено влиянием на устойчивое состояние выработок, качество полезного ископаемого за счет уменьшения полезного компонента, распределение напряжений в массиве, протекающие сейсמודинамические процессы.

Объектом исследований являются Кировский рудник АО «Апатит», тектонические особенности массива, существующие методы ведения мониторинга.

Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения образуют единое апатит-нефелиновое рудное тело магматического происхождения, разделенное Саамским разломом, отрабатываются Кировским рудником.

Общая протяженность пластообразной залежи северо-западного простирания, составляет 5.7 км, углы падения полого-наклонные от  $15^\circ$  до  $60^\circ$  на северо-восток.

Кукисвумчоррское месторождение апатит-нефелиновых руд представляет собой часть единой Кукисвумчорр-Юкспорской рудной линзы. Протяженность рудной залежи по простиранию (СЗ  $330-340^\circ$ ) составляет 2400 м, по падению прослежена на 1500-1600 м до абс. отм. 600-700 м. Углы падения рудной залежи увеличиваются от  $20-25^\circ$  до  $50-60^\circ$  на глубине. Месторождение разделяется по геоморфологии на Кукисвумчоррский и Саамский участки. Месторождение Юкспор находится в юго-западной части ийолитуртитовой дуги между

месторождениями Кукисвумчорр и Апатитовый Цирк, являющееся частью Кукисвумчорр-Юкспорской рудной линзовидной залежи. Месторождение приурочено к зоне контакта массивных уртитов (лежащий бок рудного тела) и покрывающих люявритов-малиньитов, гнейсовидных ийолитов, которые сменяются ричорритами. Средняя мощность рудной залежи по всему месторождению составляет 70 м. Рудное тело и вмещающие породы разбиты сетью трещин различной ориентировки [78]. Трещиноватость и структурная нарушенность горных пород рассматривалась многими исследователями. Учеными КНЦ РАН в 2004 году проведен анализ существующих классификаций структурной нарушенности массивов горных пород, который показал, что наиболее подходящей для условий Хибинских месторождений является классификация, соответствующая СП 23.13330.2018 (СНиП 2.02.02-85) [79].

Минеральный состав апатито-нефелиновых руд месторождений, согласно признанной в настоящее время геолого-технологической классификации апатитсодержащих руд, подразделяется на силикатно-оксидные, силикатные, карбонатно-силикатные, карбонатные и гидросиликатно-гидрооксидные руды [20]. Апатит, нефелин, эгирин, сфен, полевой шпат и титаномagnetит являются рудообразующими минералами на месторождениях Кировского рудника. Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения апатит-нефелиновых руд вскрыты 12 вертикальными стволами, двумя наклонными стволами, вентиляционным шурфом и 3 автоуклонами. Схема вскрытия Кировского рудника (проекция на вертикальную плоскость) представлена на рисунке 1.4.

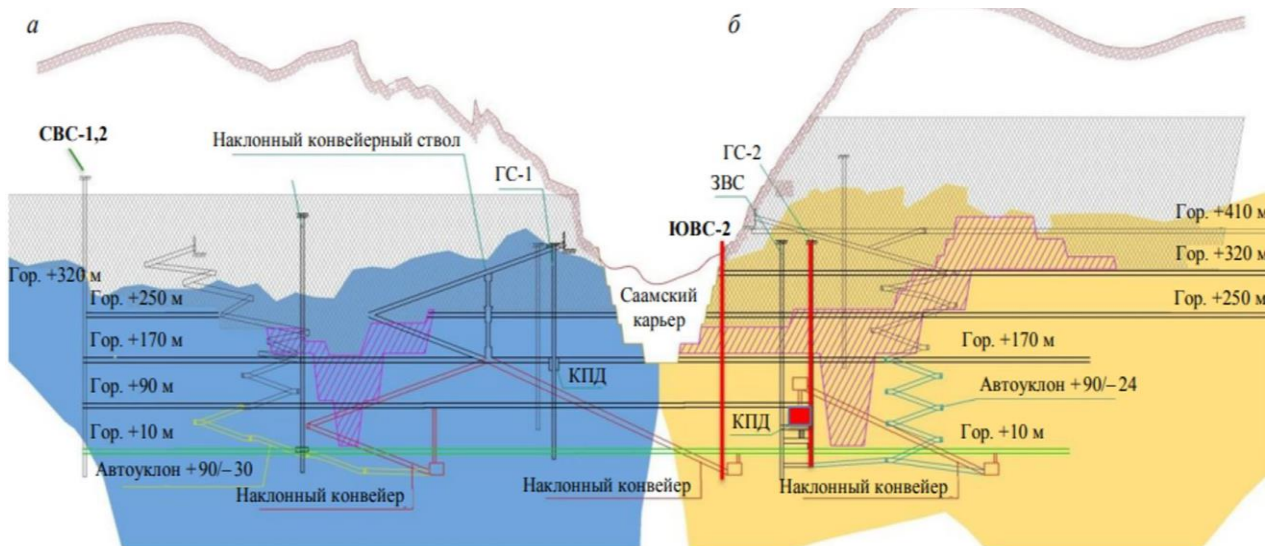


Рисунок 1.4 Схема вскрытия: а – Кукисвумчоррского б –Юкспорского месторождений Кировского рудника[20]

Подземным способом производится выемка запасов при системе этажного принудительного обрушения с компенсационными камерами, образованными путем взрывания скважин, а также по системе подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды.

На Кировском руднике 3500-4000 т отбивают массовыми взрывами, что составляет 40% от общей добычи, проявление реакции массива неоднозначно. Количество проводимых массовых взрывов в год в среднем составляет 18, за 2007 г. произведено – 18, за 2008 г– 16, в 2009 г. – 19, 2010 г. – 20, 2011 г. – 15 и за период с 2012 по 2013 гг. количество составило 34.

Динамические воздействия оказывают влияние на массив горных пород неоднозначно и на различных участках носят различный характер.

Трещиноватость пород представлена четырьмя системами трещин: 60% составляют пологопадающие и наклонные трещинами 1-й системы, около 40% крутопадающими трещинами 2-4-й систем. В натуральных условиях редко имеется возможность определить выраженный тип сети трещин, чаще всего происходит смешение нескольких типов систем и наложение искусственной трещиноватости.

Высокая тектоническая напряженность массива пород является основным геомеханическим фактором, определяющим устойчивость выработок на

апатитовых рудниках. На рисунке 1.5. отражены зависимости изменения напряжений в породном массиве в соответствии с глубиной [80].

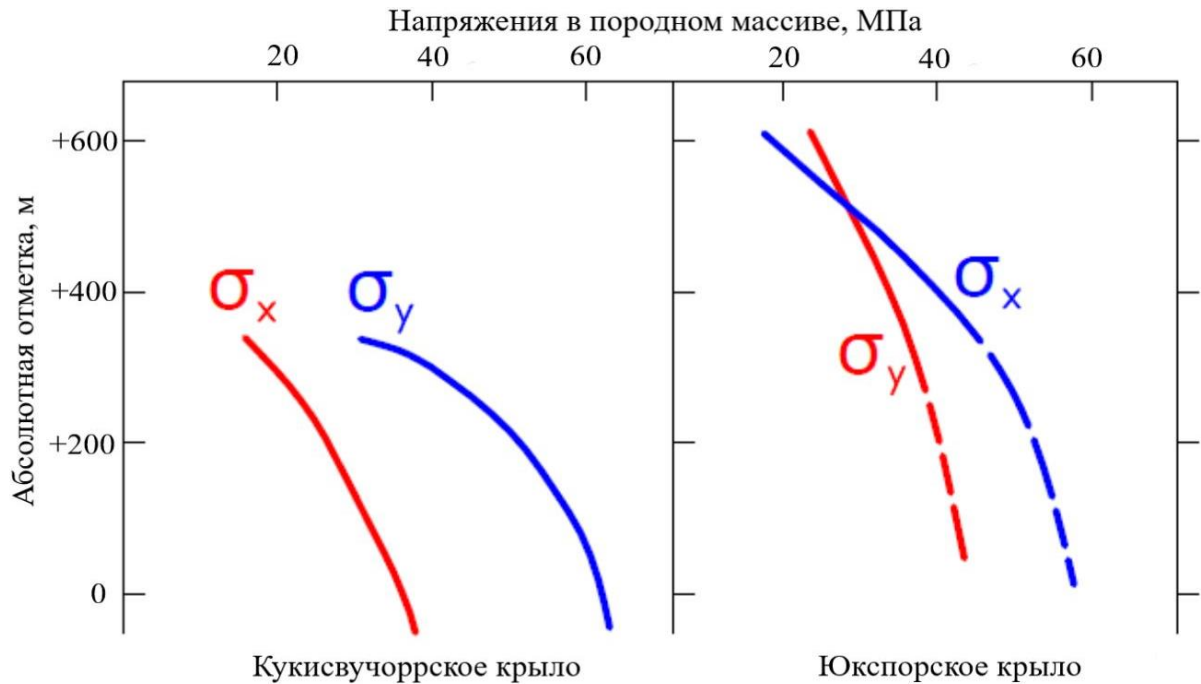


Рисунок 1.5 – Изменение напряжений в породном массиве с глубиной для Кировского рудника.  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – компоненты нормальных напряжений по простиранию и падению соответственно [80]

Измерение напряжений методом разгрузки Кировского рудника показало повсеместное преобладание напряжений горизонтального сжатия над вертикальными сжимающими напряжениями.

В условиях Кировского рудника Кукусвумчоррского крыла с приростом глубины в 230 м сопровождается приростом горизонтальных напряжений в 17 МПа, Юкспорского крыла с приростом глубины в 160-180 м – в 30 МПа [39].

Руды и породы по своим физико-механическим свойствам относятся магматическим, имеют высокие показатели прочности и упругости (Таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства горных пород Кукусвумчоррского месторождения

Наименование пород	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Сцепление, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, $10^4$ МПа
Уртиты	183	12,10		0,28	74000
Лявочоррит	219	7,20	45,90	0,22	29000

Продолжение таблицы 1.1

Наименование пород	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Сцепление, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, 10 <sup>4</sup> МПа
Мельтейгиты трахитоидные	230	11,40		0,24	94100
Рисчорриты массивные	182	11,30		0,28	71000
Рисчоррит	193	10,50	42,50		
Мончикит	312	12,00	62,40		76000
Ййолиты трахитоидные	190	10,60		0,27	85800
Ййолиты меланократовые	210	12,70		0,27	79600
Ййолит трахитоидный	211	9,50	54,90		
Ййолит полевошпатовый	221	9,60	37,60		74000
Пятнистая руда	89	2,30	1,90		30000
Пятнисто-полосчатая руда	101	2,70	20,90	0,24	25000
Богатая линзовидно-полосчатая руда	106	4,50	31,30	0,27	64000
Брекчия апатитовая	132	5,10	33,80	0,24	80000
Ййолит-уртит с апатитом	139	5,10	30,00		45000
Линзовидно-полосчатая руда	158	5,60	33,70		39000
Сетчатая руда	162	8,60	38,20		41000
Бедная линзовидно-полосчатая руда	164	5,30	40,40	0,21	63000
Блоковая руда	166	4,90	34,20		68000
Сетчатая руда	214	10,10	48,70	0,19	68000
Сфеновый уртит	91	7,40	23,40	0,29	67000
Ййолит-уртиты трахитоидные	157	9,80		0,27	79000

Породы, раздробленные трещинами и подверженные влиянию шпреуштейнизации, находятся в зоне разгрузки тектонических напряжений. Данное явление становится причиной концентрации напряжений в приконтактных участках массива.

Посредством геодинамического районирования подземных месторождений на Кировском руднике выявлен блок III ранга – Кукисвумчоррско-Юкспорский, включающий в себя три равноплощадных блока IV ранга, сопряженный с блоком Расвумчоррско-Апатитовый Цирк по Юкспорлакскому разлому.

Отрабатываемые месторождения относятся к «склонным и опасным по горным ударам с критической глубиной, по условию удароопасности 300 м»[81]. Породы, слагающие массив и рудные тела, обладают большой прочностью и жесткостью, а также склонны к динамическим формам разрушения. Напряжения, накопленные в них, достаточны для разрушения в динамической форме при определённых сформировавшихся условиях.

Внезапные подвижки блоков по существующим разломам, возникновение новых трещин происходит под воздействием ведения горных работ и геодинамических процессов. Данные явления способствуют возникновению сейсмических событий различных энергетических уровней, провоцирующих разрушение горных выработок и целиков [101]. Разрушение породного массива в окрестности горной выработки зависит от сформированного напряженного состояния массива, прочности породы и структурной нарушенности породного массива.

Первые официально зарегистрированные визуальные признаки динамических явлений на АО «Апатит» произошли на руднике «Кировский» Кукисвумчоррского месторождения в 1981 г.

В АО «Апатит» создана и более тридцати лет функционирует СППГУ для оценки категории удароопасности участков массива, выполнения мероприятий по предотвращению проявлений горного давления и выявление причин их возникновения [80]. Выделяются следующие уровни геомеханического мониторинга:

– Региональный геодинамический мониторинг. К категории геодинамических явлений относят сейсмичность, сейсмомониторинг осуществляется на основе автоматизированной системы контроля сейсмичности массива, мониторинг сдвижения поверхности методом спутниковой геодезии,

деформаций бортов карьеров. Позволяет производить укрупненную оценку территории месторождения и смежных районов, плотность сети наблюдений регулируется размерами месторождения.

– Локальный геодинамический мониторинг включает в себя визуальный осмотр с фиксацией наблюдений в журналы. Визуальные наблюдения выполняются на исследуемых участках, выявленных в результате регионального мониторинга (сейсмический шум, разломы, интенсивные оседания). В качестве локальных наблюдений используется дискование кернов, основанный на эффекте разрушения керна при снятии с него в ходе выбуривания действующих в массиве пород напряжений, контроль разрушения стенок, определение НДС горного массива, гравиметрические и геомагнитные исследования. Плотность сети наблюдений регулируется сосредоточением участков с проявлением сейсмодиформационных процессов и техногенного генезиса.

– Региональный прогноз удароопасности осуществляется на основе моделирования НДС массива методом конечных элементов в программном комплексе Sigma GT разработанного Горным институтом КНЦ РАН применяется с целью оценки геомеханических ситуаций в зонах горных работ [73].

Используемые системы мониторинга позволяют:

– регистрировать опасные зоны, осуществить выбор преимущественно эффективного комплекса мер по предотвращению опасных геодинамических событий;

– заблаговременно выявлять предстоящие опасные геодинамические динамические события, такие как обрушения, горно-тектонические удары, осуществлять планирование горных работ предотвращая данные явления или минимизируя ущерб от них;

– определять место, время и масштаб предстоящих динамических событий для безопасной эвакуации работников горного предприятия и сохранения оборудования;

– обеспечивать выявление и отработку опасных зон эффективными методами.

Мониторинг сейсмичности на рудниках осуществляется при помощи двух сейсмосетей – сейсмосети Объединенного Кировского рудника АСКСМ-ОКР и сейсмосети Расвумчоррского рудника АСКСМ-Р (рисунок 1.6). Эти автоматизированные системы контроля сейсмичности массива (Далее - АСКСМ) способны лоцировать геодинамические явления в самих рудниках с точностью в несколько десятков метров, но не в состоянии адекватно лоцировать сейсмические события, произошедшие за пределами шахтных полей рудников.

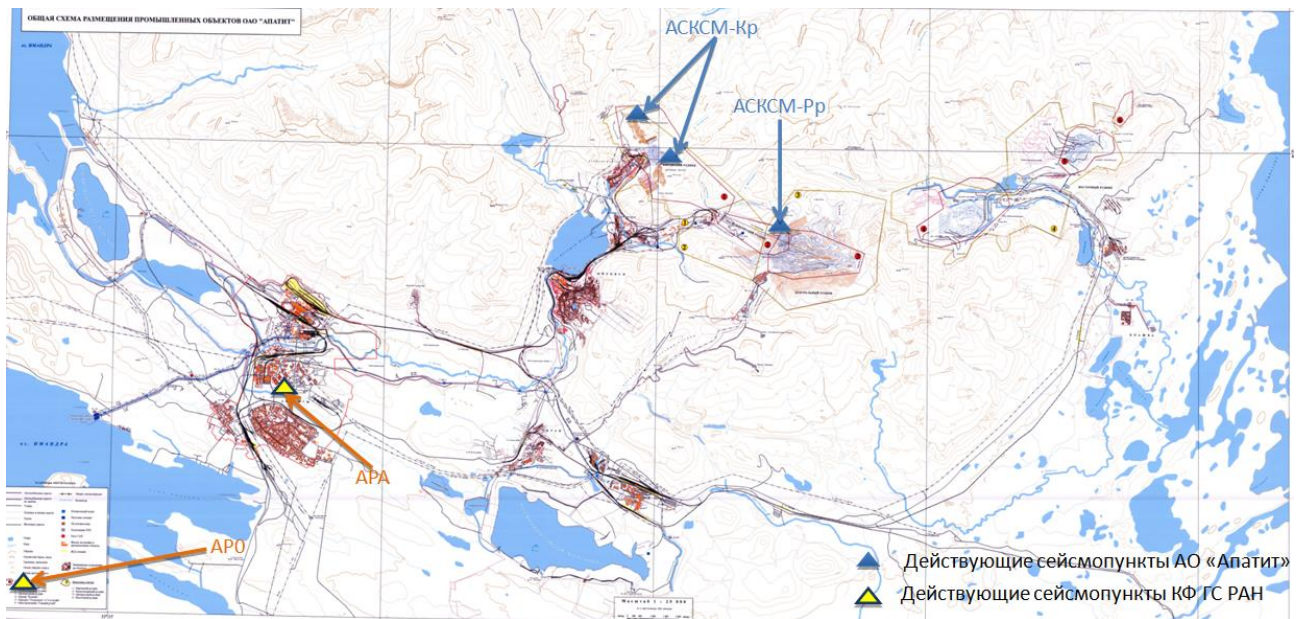


Рисунок 1.6 – Расположение сейсмопунктов

Камчатский филиал геофизической службы РАН (Далее - КФ ГС РАН) совместно со специалистами служб АО «Апатит» проводят геодинамический мониторинг. Зона регистрации сейсмических событий (в системе координат WGS-84) ограничена: по широте от 67.550 по 67.720; по долготе от 33.188 по 34.236 и составляет 50 км. Основной задачей является получение информации о сейсмическом режиме за пределами рудничных АСКСМ, и изучение влияния геодинамической обстановки на смежных рудных полях.

Объединенная система контроля состояния сейсмичности массива (Далее – ОСКСМ) позволяет производить оценку геодинамической ситуации.

Сейсмическая сеть АО «Апатит» состоит из 45 сеймопавильонов расположенных в подземных выработках рудников. Задачей ОСКСМ является

оперативное сейсмическое районирование (координаты сейсмических событий и энергия).

Для полноты и достоверности данных НДС массива и всего геодинамического процесса необходимо использование как региональных методов мониторинга (сейсмический мониторинг, маркшейдерские измерения) и локальных наблюдений в выработках, так и сейсмоакустического мониторинга. Сущность деформационного мониторинга подробно раскрыта в п. 1.2 главы 1.

Сейсмоакустические измерения, в отличие от деформационных, характеризуют участок массива, с которого принимаются высокочастотные (от сотен до десятков тысяч Гц), могут быть заменимы электромагнитными измерениями, так как при любых процессах разрушения генерируются электромагнитные волны [91,101]. Если сильные сейсмические события отвечают только определенным типам НДС и свойствам массива, то сейсмоакустическое (естественно, разной частоты и интенсивности) будет наблюдаться в любом напряженном массиве.

Согласно утвержденным «Указаниям по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения)» [80] должны применяться визуальные наблюдения, метод дискования керна, определение категории удароопасности по разрушению стенок шпуров и скважин, ультразвуковой метод. В основном используется визуальный метод, в критических случаях дополняемый основным штатным геомеханическим методом – определение категории удароопасности горных выработок методом дискования керна.

Опыт предыдущих годов показал, что получаемых данных недостаточного для обеспечения безопасности. На Кировском руднике произошло ряд масштабных проявлений горного давления динамического характера.

Для более достоверной и полной характеристики НДС массива и геодинамического процесса необходимы не только региональные методы мониторинга (сейсмический мониторинг, маркшейдерские измерения) и локальные наблюдения в выработках, а также и промежуточные методы. Основными

промежуточными методами являются деформационный и сейсмоакустический мониторинг.

Деформационный мониторинг позволяет восстанавливать вторую составляющую НДС – деформации, но следует принимать во внимание существующие ограничения, связанные с измерением деформаций, таких как: – зачастую измерение деформаций может характеризовать только малый линейный участок массива; – измеряются не полные величины деформаций, а изменения, произошедшие с какого-то момента; – полная деформация является тензором, а измерение всех 6 компонент обычно затруднительно или вовсе невозможно [27,47-49]. Учитывая данные ограничения, не является возможным измерение деформации при проходке выработки. Для получения информации, требуется промежуток времени для расчета разности смещений. Тем не менее, именно соотношение напряжений и деформаций полнее всего характеризует процесс изменения параметров напряженно-деформированного состояния.

## **1.2 Опыт использования деформационного мониторинга на объекте исследования.**

Тектоническая нарушенность, сейсмическая активность и НДС массива являются главными факторами геодинамического состояния. Интенсивность проявления, соотношение и взаимовлияние этих факторов определяют степень удароопасности любого участка недр, месторождения, выработки [21-26].

В структурном плане на территории Кировского рудника выделяются несколько разрывных нарушений третьего и четвертого порядков. Основным является Саамский разлом, пространственно расположенный в зоне сочленения рудных тел Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений.

В поле месторождений разлом представляет собой крутопадающую, ромбовидную в плане зону тектонически ослабленных пород. Мощность дизъюнктива составляет от десятков до сотен метров в зоне раздува. Тектонические нарушения четвертого порядка, как и Саамский разлом, имеют Северо-Восточное

простираение. Все нарушения сопровождаются развитием шпреуштейнов и являются зонами гипергенного преобразования рудоносной толщи.

Основные работы по деформационному мониторингу проводились КФ ГС РАН и специалистами СППГУ в рамках научно-исследовательской работы «Геомеханический мониторинг состояния массива геодезическими методами на полигонах ОАО «Апатит» в 2012 г.

На горизонте +252 м заложен первый нивелирный наблюдательный полигон. Наблюдения ведутся с 1991 года. Фиксация перемещений проводилась на основе нивелирных наблюдений по 38 наблюдательным реперам вертикальном направлении. В районе Саамского разлома был заложен в 2003 г. подземный светодальномерный полигон из 6 пунктов [42] для осуществления полной оценки изменения НДС контролируемого массива горных пород. В настоящее время полигон представляет собой две ветви (14 и 6 наблюдаемых реперов соответственно), не имеющие связи между собой. Каждый участок имеет свой исходный репер. К настоящему времени выполнено 63 цикла нивелирных и 23 цикла светодальномерных измерений.

Проведенные многолетние наблюдения на Кировском руднике подтвердили возможность осуществлять контроль за состоянием массива горных пород. Несмотря на дальнейшее развитие сети наблюдений, проведенные исследования не позволили сделать однозначные выводы о связи деформаций с динамическими проявлениями горного давления.

Деформационный мониторинг движений породного массива производится на наблюдательных станциях, исполненных реперами (контурными и глубинными) и инклинометрами расположенных в скважинах и на стенках горных выработок

В настоящий момент мониторинг деформационных процессов менее унифицирован, чем сейсмический. В работе, представлены типы выделенные коллективом НЦГиППП в ходе многолетних исследований и полевых работ на различных месторождениях России:

- инструментальный маркшейдерский контроль, предоставляет возможность проводить мониторинг развития процессов движения горных пород соизмеримых

с размерами шахтного поля (региональный мониторинг). Наблюдения конвергенции стенок, кровли или почвы выработок электронными тахеометрами. Недостатками являются большие временные интервалы между измерениями, трудоемкость съемки и обработки данных.

- системы лазерных сканирующих мониторинговых систем, позволяют осуществлять контроль за смещениями и деформациями горных выработок по наблюдательным станциям, образующих сканерный ход. Недостатком является большой объем данных, являющийся избыточным, что снижает скорость обработки данных. Конкурентным преимуществом является максимально возможная точность, метод позволяет получать данные на локальном и региональном уровнях.

- использование датчиков деформации в системах регистрации электромагнитной и акустической эмиссии, сейсмических системах (оптоэлектронный датчик продольных смещений, лазерный интерферометр-деформограф, инклинометрия, деформометры). – Деформационный мониторинг в данных системах является как дополняющий основные измерения вышеуказанных систем.

Из методов деформационного мониторинга можно выделить группы по способам измерений:

- прямой метод, при котором искомым параметром являются измерения деформации массива горных пород (упругие, пластические, разрывные), геолого-структурного блока, водозащитной толщи, элементов крепи, также их производные - смещение, кривизна, наклон, конвергенция, нагрузки и напряжения;

– косвенный метод, используется при невозможности применения прямых методов деформационного мониторинга (исследования сейсмической активности, сейсмоакустической эмиссии, электроразведка, ультразвук, радиометрия, гравиметрия).

По скорости протекания исследуемых процессов:

– статистические и квазистатические процессы – относительно медленного развития;

– динамические процессы – внезапные сдвигения горной массы (микроразземлетрясения, горный удар).

В зависимости от способа передачи информации можно выделить следующие системы:

– системы, основанные на сборе данных на устройства твердотельных накопителей, расположенные в точках измерения, с последующим переносом информации на энергонезависимых носителях до средств обработки и мониторинга;

– системы, использующие проводную связь

– системы, использующие радиосвязь;

– системы, использующие оптоволоконную связь;

– системы, применяющие гибридные виды связи, например, от датчиков к контролеру по радиосвязи, далее к серверной станции (проводная система передачи), или от датчиков к контролеру по проводной системе, далее по радиосвязи на серверную станцию.

Для работы в сложных горно-геологических условиях, с целью получения достоверных результатов требуется обеспечить взаимодействие датчика с массивом горных пород, предотвратить воздействие датчика на объект во время измерения, учесть частотные искажения (могут возникать из-за различной плотности сред). Используемые конструкции должны обеспечивать однозначность зависимостей получаемых измерений датчика (выходная величина или код) от входной величины, высокую чувствительность, устойчивость к помехам (высокие давления, температура, агрессивная среда), надежность, малые габариты и вес.

Для выявления зон концентрации напряжений, посредством деформационного мониторинга, в первую очередь, чрезвычайно важно осуществить выбор среди подтипов мониторинга, а также используемых инструментов для его реализации. Следующим этапом становится рациональный

выбор направлений измерений деформаций, более точным образом характеризующих происходящие деформации на данном участке.

### **1.3 Анализ методов исследования напряженно-деформированного состояния горных массивов**

В настоящее время для решения геомеханических прикладных задач разработано множество методов исследования НДС массива горных пород, которые можно разделить на три основные группы: натурные, аналитические и лабораторные. Подробная классификация методов представлена на рисунке 1.7, основанная на трудах [90-97].

Исследования НДС массивов горных пород возможно распределить по целому ряду критериев: физическим принципам, объектам исследований, стадиям изучения напряженного состояния пород. В процессе изучения НДС массивов горных пород используются методы физических и математических моделей [13].

Исследования, производимые натурным путем, позволяют получить достоверные данные о свойствах пород, смещениях и деформаций массива горных пород. Вместе с тем, в совокупности с производственно-экспериментальными являются трудоемкими из-за большого количества обрабатываемых данных, зачастую требуют дополнительных работ с использованием лабораторного оборудования [52,100].

Эффективность применения физического моделирования, являющегося лабораторным методом исследований, обуславливается сложностью или невозможностью прогноза явлений в натуральных условиях. Для качественного проведения исследования на моделях из эквивалентных материалов (Далее – ЭМ) требуется корректный подбор материала, выбор свойств, масштабов моделирования и критериев подобия.



Рисунок 1.7 – Методы исследования напряженно-деформированного состояния массива

Моделирование в лабораторных условиях как метод исследования сложноструктурных объектов различных физических процессов широко используется в геомеханике.

Физическое моделирование как метод обеспечивает подобие исходных структурных и физико-механических параметров горного массива, позволяет воспроизводить необходимое напряженное состояние по трем компонентам в соответствии с единым критерием динамического подобия, тех или иных горных работ, а также исследование различных физических и геофизических полей в зависимости от влияния тех или иных влияющих факторов. При этом, в отличие от природы, в лабораторных условиях параметры каждого из этих факторов могут быть заданы и проконтролированы самим исследователем, а их влияние может быть оценено как по отдельности, так и по совокупности [28-34].

Моделирование массива и изучаемых процессов производится на специально подготовленных стендах. Многолетние наблюдения показали, что отличия в результатах полученных моделированием на плоских и объемных стендах имеют несущественные различия, которые не учитывались при заключениях.

В качестве ЭМ используются различные смеси. Исходными инертными материалами могут служить кварцевый или речной песок, молотая слюда (мика), тальк, мел, глина и др. Кроме того, в некоторых случаях применяются дробь, чугунная стружка, резиновая крошка, древесные опилки. В качестве цементирующих веществ в основном используют гипс, цемент, клей силикатный, парафин, канифоль, вазелин.

Теоретической основой для физического моделирования физических явлений служит учение о подобии. На основе работ Ньютона, А.О. Фидермана, Д. Букингэма и М.В. Кирпичева по исследованию динамического подобия, Ж. Бертран вывел основные принципы и теорему подобия для механических явлений, позже в 1936 г. Г.Н. Кузнецовым был создан метод физического моделирования. Метод получил распространение в мировой практике и его эффективность доказана практическим применением в сфере решения геомеханических задач при отработке месторождений.

В 1980-2010 метод получил развитие в работах М.Ф. Шклярского, Ф.П. Глушихина, М.С. Злотникова, В.Н. Павлова, Б.Ю. Зуева, а также О. Якоби.

Актуальность и сложность геофизических и геомеханических исследований, направленных на решение проблем формирования постоянного мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород, является одной из острых проблем современности в стратегии развития минерально-сырьевой базы.

Необходим полноценный и качественный сбор геофизических данных, организация непрерывного наблюдения, контроль за состоянием модельного представления среды [46].

Численное моделирование предусматривает построение идеализированных схем – численных моделей исследуемых процессов или явлений и их исследование аналитическими методами [12-13,65,69,98]. Моделирование получило в геомеханике широкое развитие. Результаты натурных исследований имеют существенный разброс и могут обладать недостаточной общностью.

Натурные методы изучения НДС являются трудоемкими и дорогостоящими, не способствуют в получении достаточной информации о геодинамической ситуации[14].

Зависимости получаемых результатов при реализации той или иной математической постановки задачи, требуют дополнительной проверки достоверности натурными методами.

Калининым Э.В. отмечается значимость лабораторного, натурального и инженерных расчетов при геологических исследованиях оценки интенсивности проявлений и прогноза развития процессов в массиве, оценки деформаций в результате проходки подземных выработок.

В работе [17] приведены результаты сравнительного анализа численного и физического моделирования НДС массива горных пород поляризационно-оптическим методом.

Использование математических методов, без учета других исследований, не позволяет отследить сложный характер процессов разрушений, основанных на механизмах накапливания и выделения упругой энергией массива.

Сочетание физического и численного методов моделирования изучения НДС массива позволяет существенно повысить степень достоверности и надежности результатов исследований.

### **Выводы по главе 1**

Проведенный анализ научно-технической литературы и данных практики по теме исследования дает основание считать, что при всем многообразии методов изучения НДС массивов горных пород, в настоящее время, существует необходимость создания комплексных подходов к мониторингу геодинамических процессов в массиве горных пород и методик интерпретации данных. Это необходимо для установления связей между фиксируемыми деформациями и параметрами сейсмической активности и прогнозируемыми параметрами изменения напряжённого состояния массива горных пород. Установление таких связей обеспечивает получение набора данных, необходимых как для прогноза удароопасности, так и разработки мероприятий по предотвращению опасных геодинамических явлений. В связи с этим цель настоящей диссертационной работы заключается в повышении безопасности ведения подземных горных работ на рудниках АО «Апатит» за счет использования эффективных методов прогноза геодинамических явлений по данным деформационного мониторинга, сочетании физических и математических методов моделирования изучения НДС массива.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ и обобщение данных по сейсмоактивности на рудниках АО «Апатит», опыта применения методов деформационного мониторинга для прогноза геодинамических явлений;

- обоснование методов ведения мониторинга, повышающих эффективность прогноза опасных геодинамических явлений;

- разработка методик интерпретации данных системы мониторинга геодинамических процессов в массиве с использованием деформационных датчиков и датчиков определения наклона;

- анализ текущих данных геодинамического (сейсмического, сейсмоакустического, деформационного и т.д.) мониторинга;
- проведение физического моделирования, наблюдение с помощью различных типов датчиков, выявление наиболее информативных из них, имеющие натурные аналоги;
- опытно-промышленная апробация и разработка методов использования деформационного мониторинга;
- последовательность решения сформулированных задач определяет структуру и содержание диссертационной работы.

## ГЛАВА 2 НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ МОНИТОРИНГОВЫХ СИСТЕМ ДЕФОРМАЦИЙ

### 2.1 Методы ведения деформационного мониторинга

Деформационный мониторинг является неотъемлемой частью как региональных, так и локальных методов определения НДС массива горных пород. Для отдельно взятого участка массива или тектонического блока деформационный мониторинг решает задачи пространственно-временных процессов, происходящих в массиве горных пород.

Системы регистрации динамики деформаций при изменении напряженного состояния приконтурного массива выработок подразделяются:

1) Системы прямых измерений используются для выработок, находящихся вне зоны влияния очистных работ, позволяют осуществлять контроль за состоянием приконтурного массива.

2) Системы бинарной оценки используются для околоствольных и вскрывающих выработок, находящихся вне зоны влияния очистных работ, позволяют оценивать состояние приконтурного массива выработок по категории удароопасности («опасно», «неопасно»)

3) Системы регистрации деформационного состояния, используются для приконтурного массива выработок, находящихся в зоне влияния очистных работ, слоистых и трещиноватых горных породах, позволяет осуществлять сбор данных на твердотельные накопители.

4) Системы непрерывной дистанционной регистрации, используются для контроля приконтурного массива выработок, находящихся в зоне опорного давления, позволяет передавать данные от системы на поверхность в режиме реального времени.

Системы регистрации деформационного мониторинга подразумевают фиксирование линейных и угловых перемещений на основе использования датчиков различных типов механических перемещений.

Датчики, входящие в системы можно классифицировать по различным характеристикам:

- статистические (зависимость входной и выходной величин);
- чувствительность (фиксация изменений входной величины);
- разрешающая способность (точность измерений);
- обратное воздействие (изменение характеристик измеряемого объекта при установлении датчика);
- динамические (зависимость выходного сигнала от времени);
- надежность (работа датчика, соответствующая эксплуатационным параметрам в течении необходимого времени, затраченного на исследование).

По взаимодействию с объектом исследования различают контактные (крепление на объект исследования) и бесконтактные (электромагнитное излучение), по способу обработки сигнала измерения - аналоговые, цифровые, бинарные; по способу измерения - механические (линейные угловые перемещения), электрические, пневматические, гидравлические и комбинированные; по принципу измерений - прямые и косвенные; по принципу действия - генераторные и параметрические (модуляторы).

По физическому принципу действия:

- Омические (резистивные) датчики. Принцип действия основан на изменении электрического сопротивления, относятся к параметрическому типу, подразделяются на электроконтактные, потенциметрические (реостатные) и тензометрические (металлические и полупроводниковые).
- Магнитомеханические датчики. Принцип действия основан на явлении ферромагнитного материала, подразделяются на индуктивные (однотактные и двухтактные), трансформаторные (ферродинамические, микросимы), магнитоупругие (дроссельные и трансформаторные), магнитоупругие, магнитострикционные, датчики Холла, датчики Виганда.
- Волоконно-оптические датчики. Используются в экспериментальных и теоретических подходах исследования распределения процессов динамического

деформирования, сейсмического мониторинга, трещин. Существуют волоконно-оптические датчики (далее - ВОД), основанные на различных принципах действия:

- амплитудные (оптическое туннелирование, ВОД на оптическом отражении, ВОД на оптическом согласовании волокон, ВОД на потерях при микроизгибах);
- фазовые (одноволоконные многомодовый интерферометр, датчик угловой скорости, интерферометр Саньяка, кольцевой интерферометр Фабри-Перо, микрорезонаторные датчики, интерферометр Майкельсона, интерферометр Маха-Цандера);
- спектральные (решетка Брэгга, Бриллюэновское рассеивание, светогенерация);
- поляризационные (магнитное, электрическое поле).

По способу измерений:

- прямые (чувствительным элементом является волоконный световод);
- комбинированные, с передачей данных измерений по аналоговой форме;
- комбинированные, с передачей данных измерений по волоконно-оптической линии.

- Емкостные и пьезоэлектрические датчики. Относятся к параметрическим, принцип работы основан на преобразовании изменяемой величины в сопротивление.

Датчики деформации служат для конвертации фиксируемых величин деформации в удобные для измерения, хранения и передачи сигналов.

Наиболее распространенными являются электрические датчики деформации, что обусловлено высокоскоростной передачей данных на расстоянии, универсальностью преобразования величин полученных другими методами в вольты и в обратном порядке, отсутствием потерей точности, чувствительности и скорости средств измерений в результате преобразования величин в цифровой код.

Контактные датчики резисторного (реостатного) вида широко применяются в горной промышленности, преобразуют линейное или угловое перемещение в изменение сопротивления электрической цепи. Эти датчики используются в разработанных ВНИМИ приборах КДМ-1 и КДМ-2, упрощенная схема которых представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема производства замеров приборами контроля деформаций массива КДМ-1 и КДМ-2

Датчики представлены в двух модификациях, отличительной особенностью которых является работа в однопредельном и многопредельном режиме. Контактные датчики в основном применяются при оценке деформаций пластичности и ползучести.

Для оценки НДС краевой части горного массива применяется индикатор разрушения стенок скважины (ИДС-1), в конструкции которого используется реостатный резистор. Прибор, разработанный институтом ВНИМИ (рисунок 2.2).

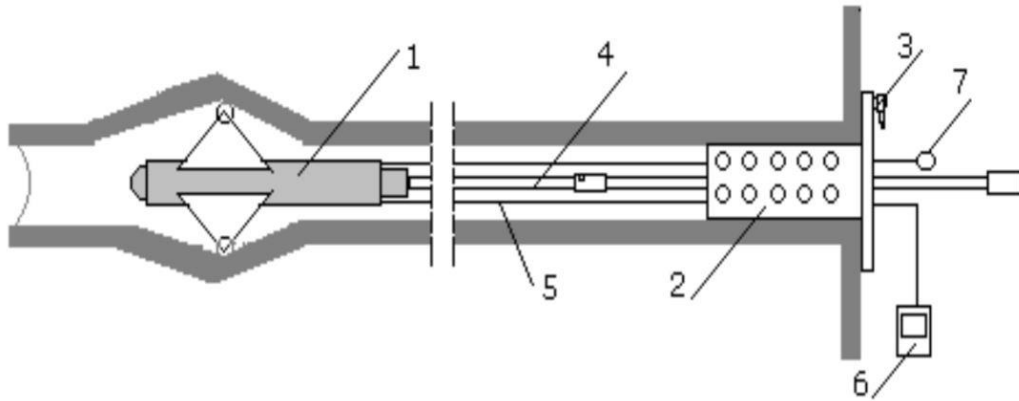


Рисунок 2.2 – Общий вид индикатора деформаций стенок скважины.

1 – профилемер, 2 – кондуктор с 3 – маятниковым отвесом, 4 – досылочные штанги, 5 – кабель с 6 – мультиметром, 7 – механизм принудительного складывания пантографов профилемера

Среди распространенных ныне конструкций наиболее надежными и точными являются индуктивные датчики, позволяющие производить измерения деформаций, угловых и линейных перемещений с преобразованием в электрический сигнал.

Индуктивные датчики, представленные на рисунке 2.3, содержат линейный дифференциальный трансформатор и усилитель несущей частоты.

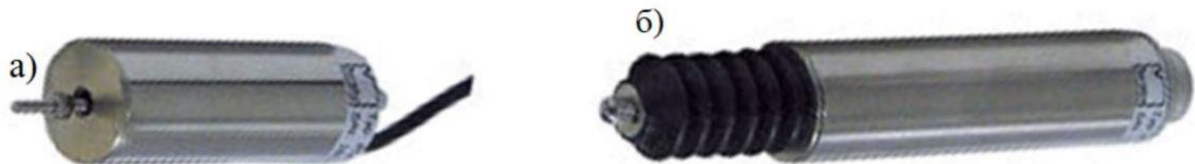


Рисунок 2.3 – Датчики перемещения с аналоговым выходом:

а – модель 8740 со свободным штоком; б – модель 8741 с подпружиненным штоком

Отличительными особенностями датчиков являются, внутренние катушки и электроника соединены таким образом, чтобы минимизировать влияния вибрации и ударных нагрузок.

На российском рынке предложен широкий спектр индуктивных датчиков перемещений с различными характеристиками (Рисунок 2.4).

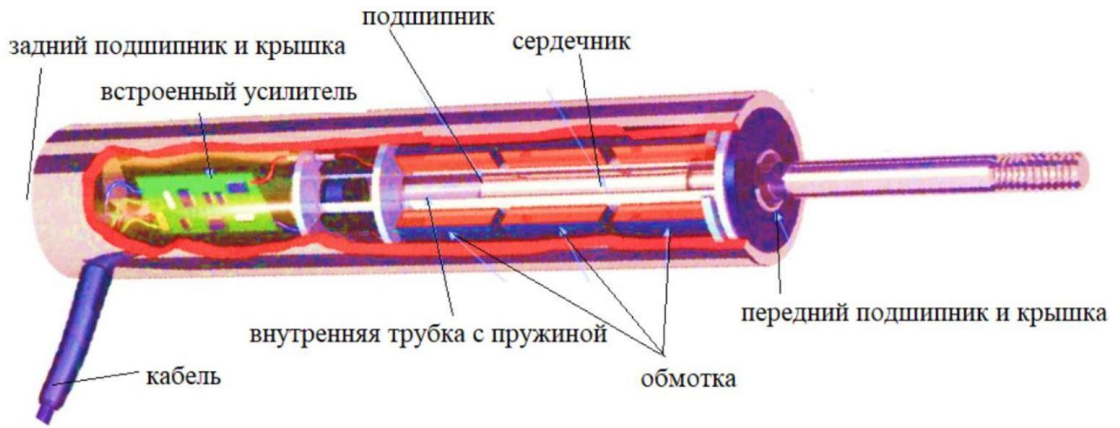


Рисунок 2.4 – Внутреннее строение типичного индуктивного датчика перемещения

В системах деформационного контроля капитальных выработок применяется индуктивный датчик ДИ7, конструкции ВНИМИ, входящий в систему GITS (Geo Info Trans Sistem). Конструкции располагают в скважинах. Изменение индуктивности связано с перемещением штока. Внешний вид модуля сопряжения и индуктивного датчика изображен на рисунке 2.5. Так же, как и датчики компании Burster ДИ7 имеют подпружиненный шток.



Рисунок 2.5 – Внешний вид модуля сопряжения (МСДИ) и индуктивного датчика (ДИ7)

Разработанный ОАО ВНИМИ (в настоящее время НЦ геомеханики и проблем горного производства) трехкомпонентный деформометр [64] имеет в качестве чувствительных элементов три преобразователя линейных перемещений ДИ-8. Датчик выполнен в виде объемного модуля с системой пантографов, позволяющий измерять деформации стенок скважин в трех ортогональных

направлениях. Техническая характеристика датчика приведена в таблице 2.1, а чувствительность датчика определяется по графику тарировки, представляющем зависимость частоты сигнала от перемещения сердечника датчика ДИ-8.

Таблица 2.1 - Техническая характеристика датчика ДИ-8

Диапазон измерения перемещений, мм,	0-7
Чувствительность (средняя), Гц/мкм,	19
Максимальное напряжение выходного сигнала, мВ,	160
Диаметр, мм,	42
Масса, кг,	0,085

ИГД СО РАН, основываясь на анализе известных схем и устройств измерения деформаций, был разработан многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа МОЭД-1п (рисунок 2.6) [55,56].



Рисунок 2.6 – Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа [56]

МОЭД-1 предназначен для измерения деформаций, смещения массива горных пород вдоль скважин. Обеспечивает фиксацию процесса изменения НДС нетронутого массива, создавшееся в результате ведения взрывных работ.

Прибор был опробован в условиях полиметаллических месторождений в рамках научно-исследовательских работ по изучению особенностей развития деформационно-волновых процессов при проходке подземных выработок взрывом. К недостаткам прибора можно отнести большие габариты и относительную сложность конструкции датчиков.

Четырехканальный скважинный продольный деформометр (разработка ИГД СО РАН и КТИ НП СО РАН), позволяет через скважину фиксировать

смещения геолого-структурных блоков. «Прибор разработан на основе абсолютного датчика угловых положений и предназначен для непрерывных прецизионных измерений смещений геоблоков в массивах горных пород и определения деформаций в геосредах с естественной и наведенной структурой (зоны дезинтеграции, тектонические разломы, разрушаемые горным давлением и взрывами, породные целики, закладочные массивы). Основное применение – для исследования механизма распространения низкоскоростных деформационных волн (маятникового типа) и контроля их распространения при техногенных воздействиях от взрывов и горных ударов в приконтурной части породных массивов подземных выработок рудников и шахт» [2].

Четырехканальная наблюдательная станция глубинных реперов (совместная разработка ИГД СО РАН, ИУУ СО РАН и КТИ НП СО РАН) позволяет фиксировать глубинными реперами смещения геолого-структурных блоков при проявлении горного давления

На рисунке 2.7 отображена структурная схема четырехканальных станций глубинных реперов на основе микрометрического оптоэлектронного датчика МЭУ-25, имеющего канал синхронизации для обеспечения параллельной работы в составе группы из восьми датчиков.

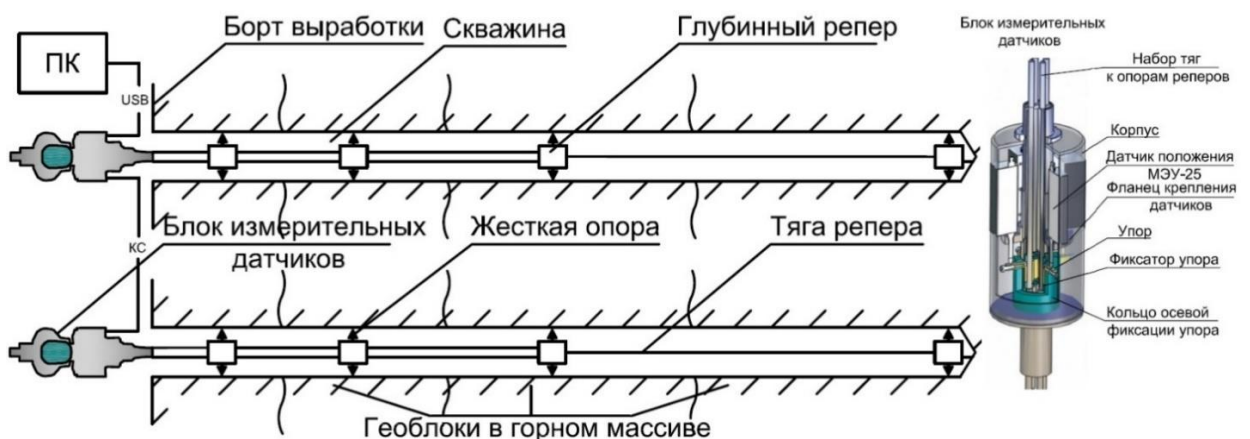


Рисунок 2.7 – Структурная схема группы четырехканальных станций глубинных реперов с каналом синхронизации с конструкцией четырехканального блока регистрации

Тросовые датчики служат для измерения больших растягивающих деформаций (смещений), в качестве примера RX50 SENSORSYSTEMS (Рисунок 2.8) [60].

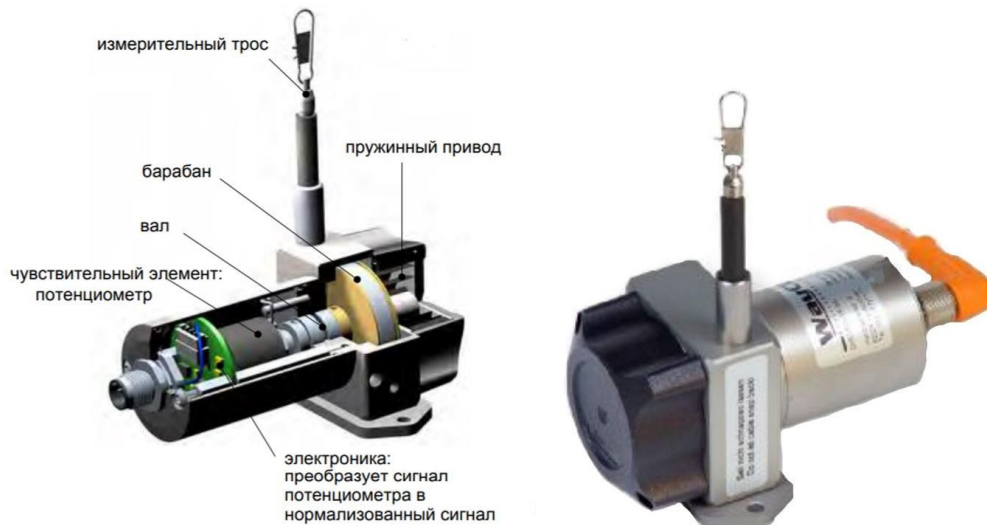


Рисунок 2.8 – Тросовый датчик линейных перемещений серии RX50 [60].

Преимуществами вышеуказанных датчиков являются применение в зонах множественного трещинообразования или раскрытия трещин, на поверхности выработок в зонах больших деформаций, высокая производительность, продолжительный срок эксплуатации, компактные размеры, широкий диапазон рабочих параметров (температура, влажность), что актуально для горнодобывающих производств. Существенным недостатком является быстрый износ подвижных деталей, что сокращает количество измерений и способствует трудности в обслуживании.

Метод глубинных реперов получил широкое распространение в отечественной и зарубежной практике [57,70], репера закрепляются в скважинах по схеме, представленной на рисунке 2.9. Измерение сдвижения слоев массива и деформаций горных пород осуществляется за счет натяжения проволоки или сопротивления системы штанг. При установке необходимо обеспечить надежность закрепления репера в скважине для точности получаемых измерений.

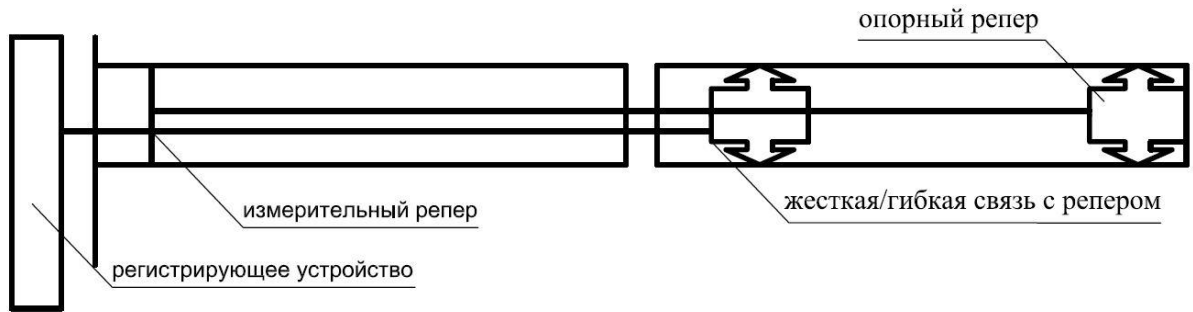


Рисунок 2.9 – Обобщенная схема глубинного репера

На основании разработанной в ИФЗ РАН технологии изготовления стабильных малогабаритных наклономеров и короткобазисных деформометров из кварцевого стекла за последнее десятилетие были созданы различные датчики, имеющие применение в горной промышленности. ООО «Оптические измерительные системы» совместно с Горным институтом КНЦ РАН на Кировском руднике использовался наклономерно-деформометрический комплекс. «С целью ведения контроля над процессами деформирования и разрушений в массиве под влиянием ведущихся горных работ в 2010 г. был создан геодинамический полигон, включающий в себя подземный пункт регистрации данных, расположенный на горизонте - 24 м Юкспорского крыла Кировского рудника, и наземный пункт сбора, накопления и обработки данных. В состав подземного пункта входит комплекс датчиков деформометров (рисунок 2.10, а) и наклономеров (рисунок 2.10, б) и регистратор информации «Regin-3F-6k» (разработки Института физики Земли РАН) и элементы, обеспечивающие бесперебойное питание системы» [58].



2.10 – Наклономерно-деформометрический комплекс:

а) накладной кварцевый деформометр ДКК-3 и б) наклономер НК [58]

Комплекс позволяет производить измерения во время производственных процессов, опробование подтвердило информативность получаемых данных, используемых для прогноза развития деформационных процессов.

Преимущества заключаются в: высокой стабильности датчиков и избирательности измерения перемещений (использование в конструкции кварцевого стекла), возможности выявления средне- и краткосрочных предвестников техногенных землетрясений.

Для определения угла наклона используются инклинометрические системы, позволяющие осуществлять свои функции на стационарных и подвижных объектах за счет простоты монтажа и разнообразия интерфейсов. Существуют гириноклинометры и электроинклинометры

Особый вид деформационного мониторинга представляют светодальномерные измерения. Измерения проводят лазерными деформометрами, которые отличаются высокой интерференционной точностью больших замерных зон, возможностью фиксировать процессы в режиме реального времени без ограничения периодов [68].

Деформационный мониторинг как метод контроля удароопасности основан на факторе высокой избирательности - регистрируется изменения искомой величины (смещение, угловое отклонение объекта), поэтому в отличие от применяемых геофизических методов нечувствителен к неэффективным параметрам (температуры измеряемой и окружающей сред, влажность, работы горных машин и оборудования).

Развитие деформационных процессов необходимо контролировать на различных масштабных уровнях как на локальном (участки выработок), так и региональном (геолого-структурный блок, шахтное поле), что осуществимо с применением методов на основе использования глубинных и контурных реперов. Результаты деформационного мониторинга могут являться критерием геофизического мониторинга удароопасности [54,85].

Стремительный прогресс в разработке новых технологий деформационного мониторинга значительно увеличил выбор геодезических и геотехнических

приборов, доступных для горнодобывающих предприятий, что ставит новые задачи к проектированию и анализу мультисенсорных систем. Полная автоматизация, интеграция данных, непрерывный сбор, комплексный анализ и интерпретация полученных данных, повышение точности и надежности являются ключевой проблемой в разработке систем деформационного мониторинга. Рациональная конфигурация систем деформационного контроля состояния массива горных пород должна совмещать различные типы датчиков в зависимости от характера деформаций участка массива и системы выработок.

С 1990 г. выполняются измерения деформаций на измерительных полигонах, оборудованных на Кировском руднике [10]. Полигоны созданы с целью получения информации о геомеханических процессах, развивающихся в горно-технологической обстановке.

На Кировском руднике работы по деформационному мониторингу ведет ряд организаций, в том числе НЦГиПП СПГУ. В последнее время для вышеуказанных целей использовались трехкомпонентные датчики системы мониторинга деформации и инклинометры, входящие в опытную систему наблюдения за наклоном структурных блоков. Исследования проводились в рамках проведения НИР «Комплексная программа инструментально-методических работ по обеспечению безопасной отработки месторождений апатит-нефелиновых руд ОАО Апатит» [42].

Для условий Кировского рудника выделены основные виды деформаций:

- деформации вблизи выработок, к ним относятся заколообразование, конвергенция, вывалы, расслоение и др.;
- деформации, связанные извлеченной ранее породой, например общее оседание и интенсивное оседание покрывающей толщи, происходящее вблизи зоны отработки;
- деформации в зонах геодинамических явлений, например целиков и других напряженных участков с динамическими проявлениями;
- деформации, возникающие в результате тектонического движения и реализующиеся после перестройки НДС в результате ведения горных работ,

характеризуются смещениями вдоль разломов

– деформации на границах блоков, в результате их подвижек;

В условиях объекта исследования по мере продвижения рабочего фронта и углубления горных работ становится однозначным влияние на разломно-блоковую тектонику в пределах шахтного поля, следовательно, основными параметрами деформации и НДС массива на региональном уровне являются перемещения блоковых структур

Для качественного определения деформаций локального уровня важно иметь представление о происходящих процессах приконтурного массива скважин.

Поэтому для комплексной оценки напряженного состояния массива целесообразно использовать наклонмерные и деформометрические методы наблюдения совместно.

## **2.2 Описание системы деформационного мониторинга состояния приконтурного массива с применением трехкомпонентного датчиков контроля деформации и ее монтажа**

Трехкомпонентные датчики деформации используются для фиксации в реальном времени изменений радиальных и продольных смещений контура скважины в месте установки датчика. На основании получаемых данных можно судить о характере процессов деформаций приконтурного массива скважины в условиях влияния подземной разработки месторождения, выявление структуры и величины зон нарушенности и деформирования пород, определение величины допустимого и критического деформирования пород кровли горных выработок. В составе системы могут использоваться датчики различных типов, система может принимать данные разных физические величины, что является важным преимуществом для осуществления комплексного мониторинга.

Основными этапами организации деформационного мониторинга являются изготовление, испытание и наладка системы деформационного мониторинга.

Сотрудниками Научного центра геомеханики и проблем горного производства совместно с ОАО «Авангард» для условий Кировского рудника была



Опытный образец трехкомпонентного датчика деформаций выполнен на основе индуктивного принципа измерения перемещений по координатам (X, Y, Z), технические характеристики отражены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Технические характеристики трехкомпонентного датчика

Основной параметр, единица измерения	Значение параметра
Диапазон измерения перемещений вдоль осей X, Y и Z, мм	-10...+10
Предел основной абсолютной погрешности измерения перемещений вдоль осей X и Y, мкм	5
Температура окружающей среды, °C	-5...+20
Относительная влажность воздуха, %	30..95
Напряжение питания датчиков, В	12
Потребляемая мощность одним датчиков, не более Вт	2
Глубина установки датчиков в скважине, м	0..15
Тип выходного сигнала устройства	радиоканал RS-485
Диаметр скважины для размещения датчика уточняются в процессе работы, мм	76+3
Период опроса датчиков в скважине (устанавливается по команде оператора)	от 1 мин до 20 суток.

Трехкомпонентный датчик перемещения осуществляет контроль процессов напряженно-деформационного состояния горных пород в выработках и передачу информации об зафиксированных значениях и состоянии датчика в цифровом виде. Закрепление датчика производится в исследуемой специально подготовленной скважине, что позволяет производить регистрацию деформации и получать достоверную информацию о состоянии вмещающего массива горных пород. Регистрация деформаций осуществляется при статическом нагружении массива горных пород и динамических подвижках структурных блоков.

Выбор места размещения датчиков и заложения смотровых шпуров осуществляется по результатам визуального обследования горных выработок рудника.

Перемещение датчика в скважине осуществляется с помощью специальной штанги, состоящей из отдельных сегментов, скручиваемых вместе.

Крепление датчика в скважине происходит посредством перемещения опор пантографа, движение которых осуществляется вращением винта в гайке с помощью электродвигателя входящего в состав датчика. Чувствительные

элементы по координатам  $X$  и  $Y$  выдвигаются из корпуса и упираются в стенки скважины после крепления пантографов. Для установки датчика (питания электродвигателя) используется внешний источник питания напряжение 12 В и силой тока не менее 1.5 А.

Схема установки трехкомпонентных датчиков на опытном горизонте +170 м Кировского рудника АО «Апатит» приведена на рисунке 2.12. Места расположения датчиков выбраны на опытном участке, находящемся в зоне примыкающей к крупной тектонической структуре – Саамскому разлому, влияния трех пересекающихся разрывных нарушений и фронта приближающихся очистных работ на вышележащих горизонтах.

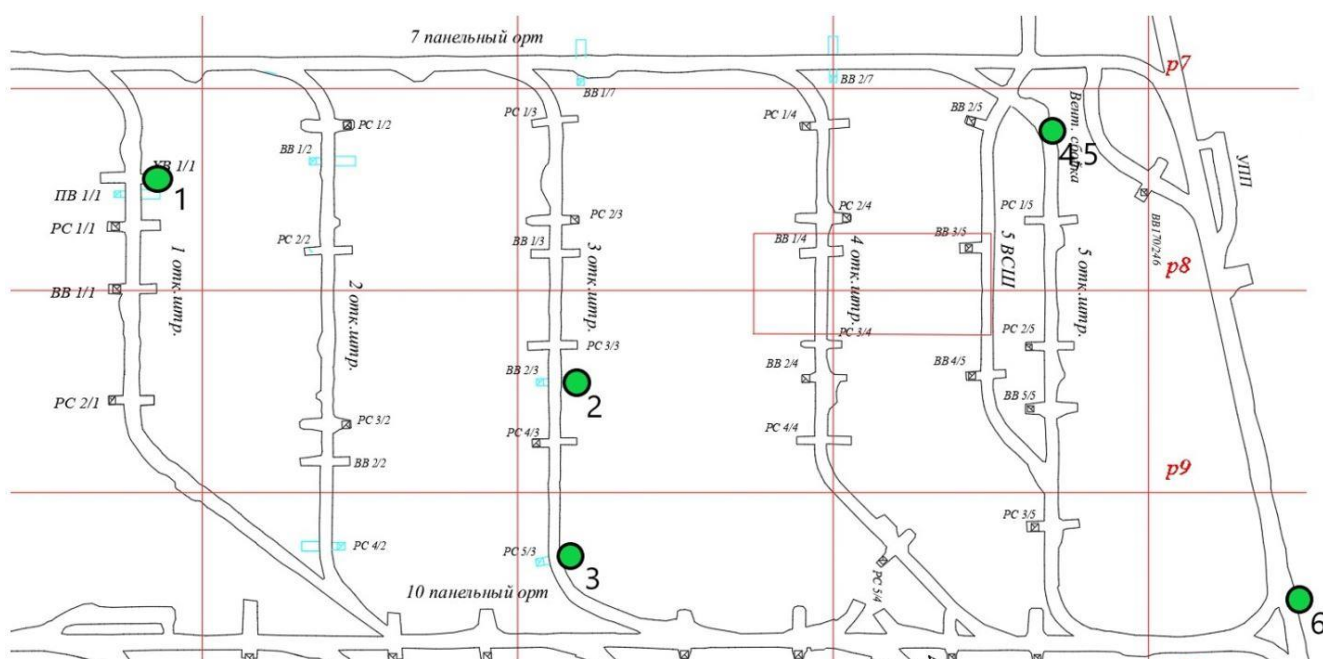


Рисунок 2.12 – Схема установки трехкомпонентных датчиков на опытном горизонте +170 м Кукисвумчоррского крыла Кировского рудника АО «Апатит»

Измерения деформаций массива с применением трехкомпонентных датчиков деформаций выполняются по трем осям. По осям  $X$  и  $Y$  оцениваются деформации в направлениях, перпендикулярном оси бурения скважины. Ось  $Z$  позволяет оценить деформации в вдоль оси бурения скважин (рисунок 2.13).

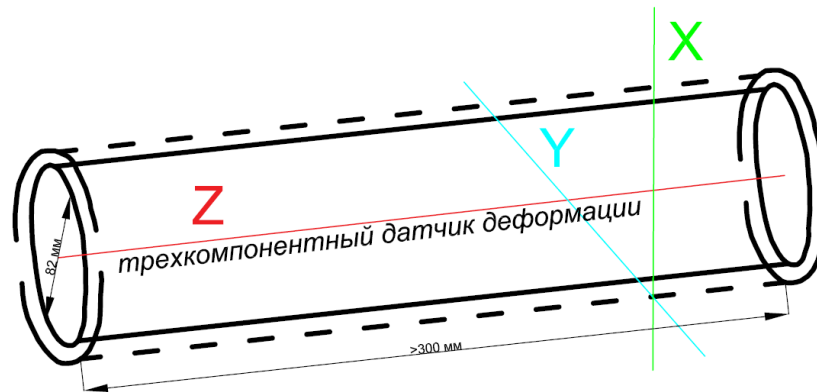


Рисунок 2.13 – Параметры выполнения измерительной скважины и положение датчика

Измерительная скважина проходится бурением алмазной коронкой диаметром 76+3 мм. Точность измерения 10 мкм.

В сейсмопавильоне установлен сервер для сбора данных с трехкомпонентных датчиков деформации. Вывод данных «MonitoringSystem» на компьютер производится в папку с программой, где находятся рабочие файлы.

Точка 1 выбрана в качестве реперной, для оценки состояния ненарушенного массива, расположенная в центральной части единого блока. Проводимые на вышележащих горизонтах горные работы не оказывают влияния на показания датчика. Расположение точки установки датчика выбрано с целью определения особенности массива с учетом его литолого-петрографического фактора.

Точка 2 характеризует влияние на НДС массива тектонических нарушений, исключая влияние зоны горных работ.

Точка 3 оценивает влияние на НДС массива трех пересекающихся разрывных нарушений, а также динамику изменения НДС при приближении фронта очистных работ на вышележащих горизонтах.

Точки 4 и 5 выбраны с целью определения общего характера изменений деформаций.

Точка 6 характеризует деформирование массива пород со стороны висячего бока рудной залежи.

Трехкомпонентные датчики (точки 2-6) размещаются в горизонтальных скважинах с высотой устья скважины от почвы выработок – 1,3-1,5 м, диаметром

скважин – 76-79 мм и глубиной скважин – 10 м с подъемом 3-5° в борт выработки. Начальные этапы установки одного из датчиков приведен на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 – Начальные этапы установки трехкомпонентного датчика

Примеры результатов, обработанных данных с датчиков представлены на рисунках 2.15-2.18.

Точка 4 (горизонтальная скважина)

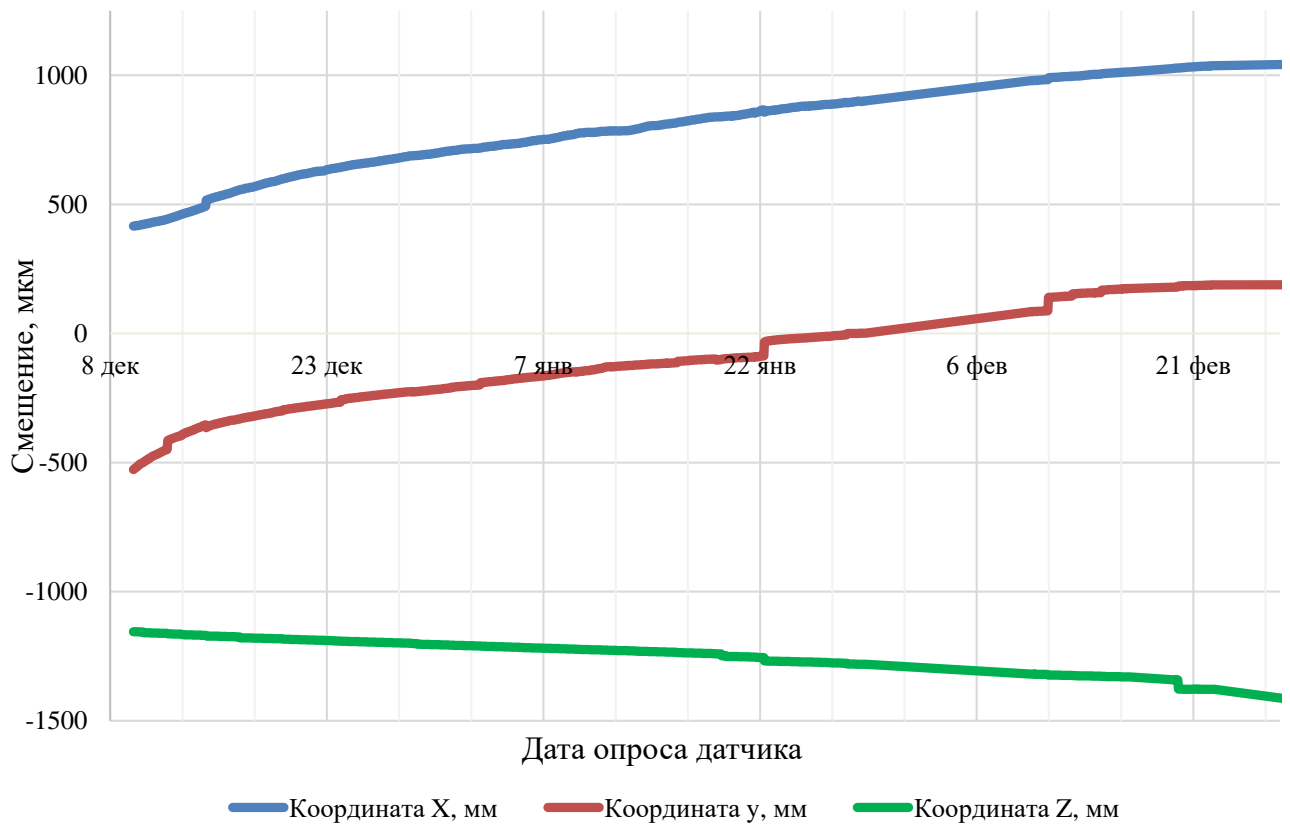


Рисунок 2.15 – Пример получаемых данных после обработки информации

Точка 4 (горизонтальная скважина)

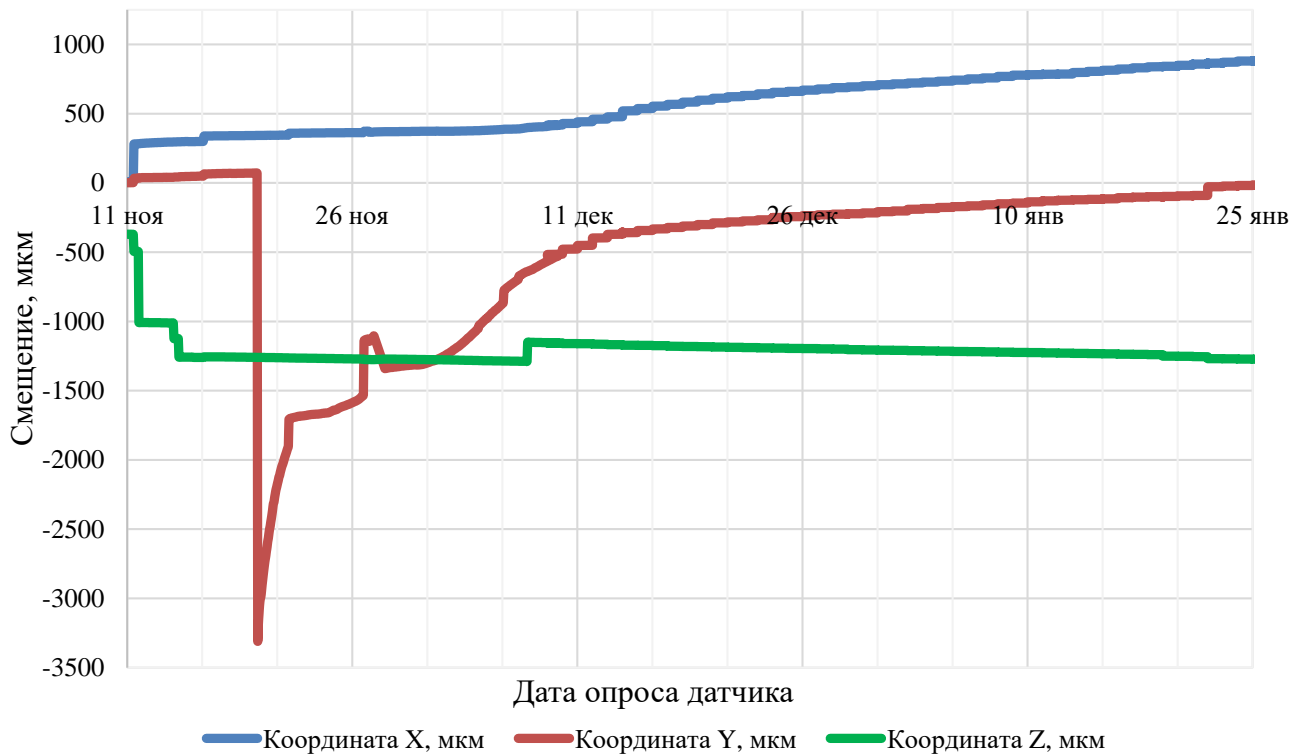


Рисунок 2.16 – Пример получаемых данных после обработки информации

Точка 5 (вертикальная скважина)

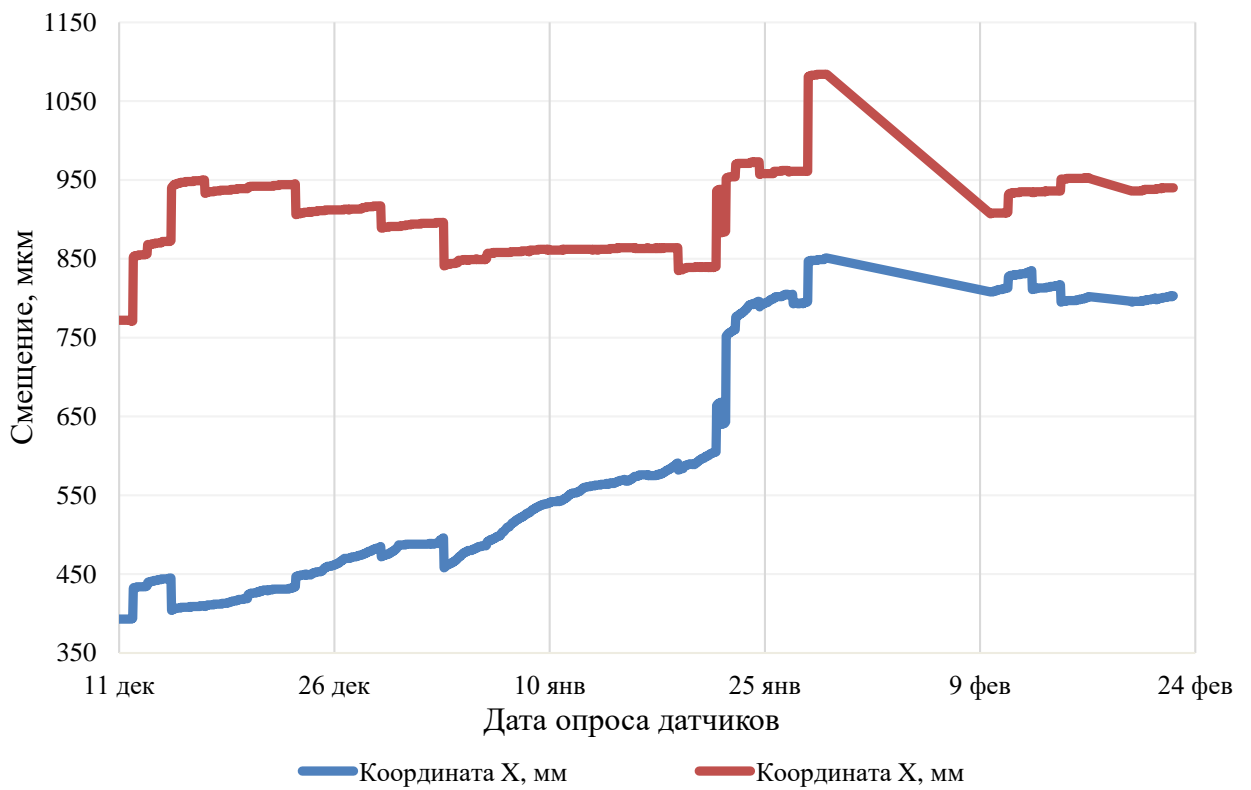


Рисунок 2.17 – Пример получаемых данных после обработки информации

## Точка 5 (горизонтальная скважина)

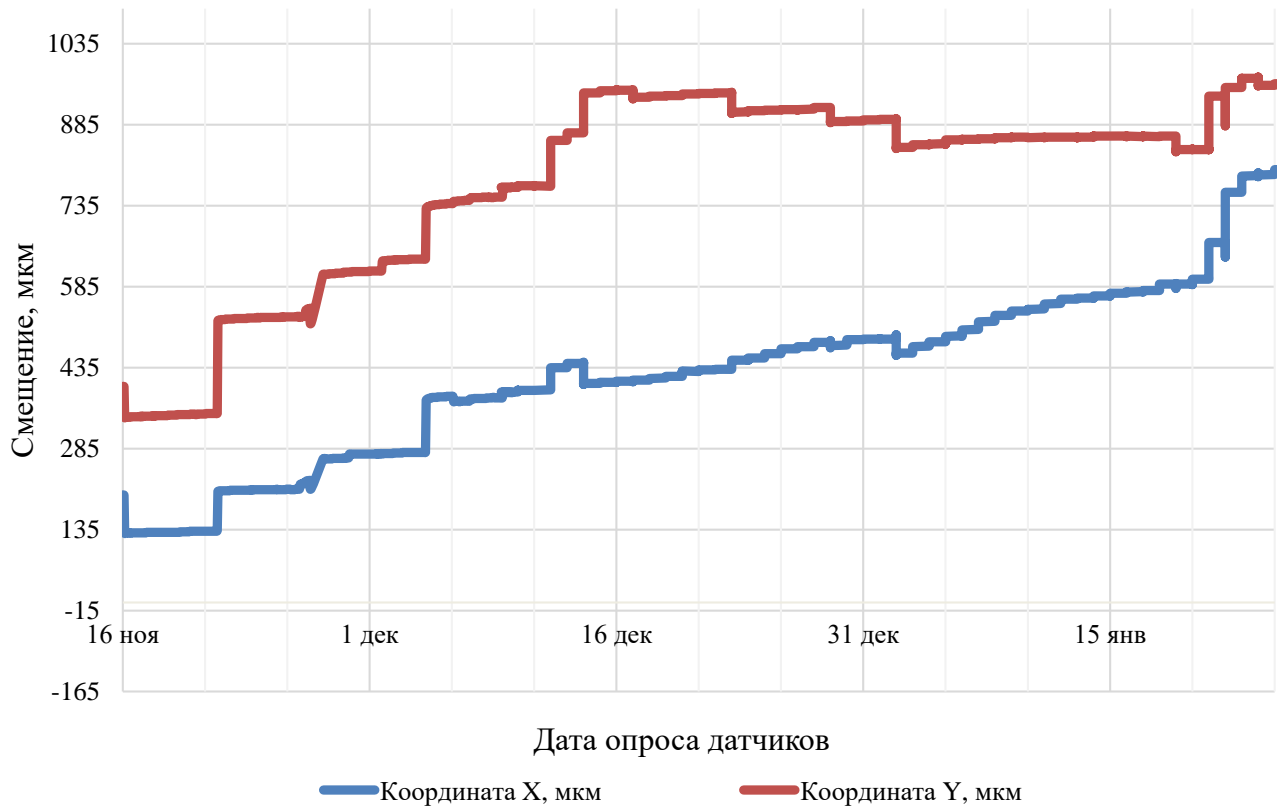


Рисунок 2.18 – Пример получаемых данных после обработки информации

Датчики, установленные в точках 4 и 5, успешно функционировали с ноября 2016 г в штатном режиме постоянного мониторинга деформаций.

Система на основе трехкомпонентных датчиков обеспечивает непрерывный дистанционный контроль состояния породы, а также возможность автоматизированного сбора информации о деформациях, в ее составе допустимо использовать датчики различных типов, измеряющие физические величины, что обеспечивает возможность комплексного мониторинга. В составе системы может быть использовано оборудование различных производителей, поддерживающее указанные выше стандарты передачи данных.

Выполненные исследования на опытном участке Кировского рудника, подтверждают возможность осуществлять контроль состояния массива пород. В результате подтверждена методика процесса установки, фиксации, обработки результатов и произведена оценка предельных погрешностей измерений.

Вместе с этим, несмотря на дальнейшее развитие сети наблюдений, проведенные исследования не позволили сделать однозначные выводы о связи деформаций с динамическими проявлениями горного давления.

Для достижения результата, подразумевающего установления взаимосвязи проявлений динамических событий и характера деформаций на локальном и региональном уровне для комплексной оценки необходимо использование инклинометрических приборов. Как было отражено выше, осуществляя мониторинг за относительными перемещениями блоков, возможно оценивать изменение регионального поля напряжений. Подобные наблюдения должны быть длительными с относительно небольшим периодом опроса. Целесообразно рассмотреть в качестве основы подобной системы совокупность инклинометров.

### **2.3 Описание опытной системы деформационного мониторинга за активностью структурных блоков массива горных пород**

Опытная система мониторинга за перемещением структурных блоков на Кировском руднике АО Апатит предназначена для непрерывного оперативного мониторинга и контроля, обеспечивает регистрацию данных, заявленными техническими характеристиками приборов, разработана совместно ОАО «Авангард» и НЦ геомеханики и проблем горного производства.

Система мониторинга на Кировском руднике АО «Апатит» представляет пространственно-распределенную сеть станций контроля с возможностью экспорта данных, является беспроводной сенсорной сетью датчиков линейного перемещения и инклинометров, подключенных к координатору беспроводной сенсорной сети. Инклинометры выполнены в промышленном исполнении и предназначены для использования в сложных горно-геологических условиях. Это позволяет применять их в неблагоприятных условиях, во взрывоопасных зонах, выдерживают механические нагрузки и вибрации.

На рисунке 2.19 представлена структурная схема оборудования системы деформационного мониторинга за активностью структурных блоков на Кировском руднике АО Апатит.

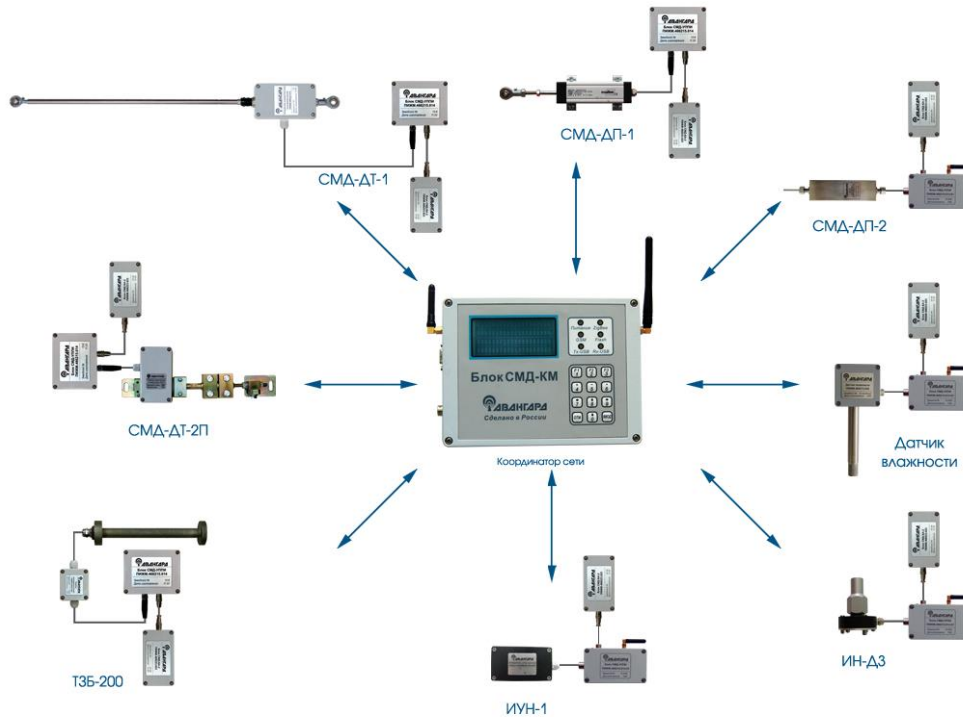


Рисунок 2.19 – Структурная схема оборудования системы деформационного мониторинга за активностью структурных блоков

Инклинометры используются как средство измерения, предназначенное для контроля абсолютного или относительного углового положения объекта относительно вертикали. Основными областями применения являются статический контроль угловых отклонений малоподвижных объектов, требующих высокоточный контроль углового положения. Инклинометр с системой крепления в виде кронштейна отображены на рисунке 2.20. Диапазон измеряемого угла наклона:  $\pm 15^\circ$ ; погрешность: не более  $\pm 30''$ .



Рисунок 2.20 – Датчик угла наклона (инклинометр)



Результаты обработки данных, на основе вычислений, проведенных сотрудниками Научного центра геомеханики и проблем горного производства представлены на рисунках 2.22, 2.23.

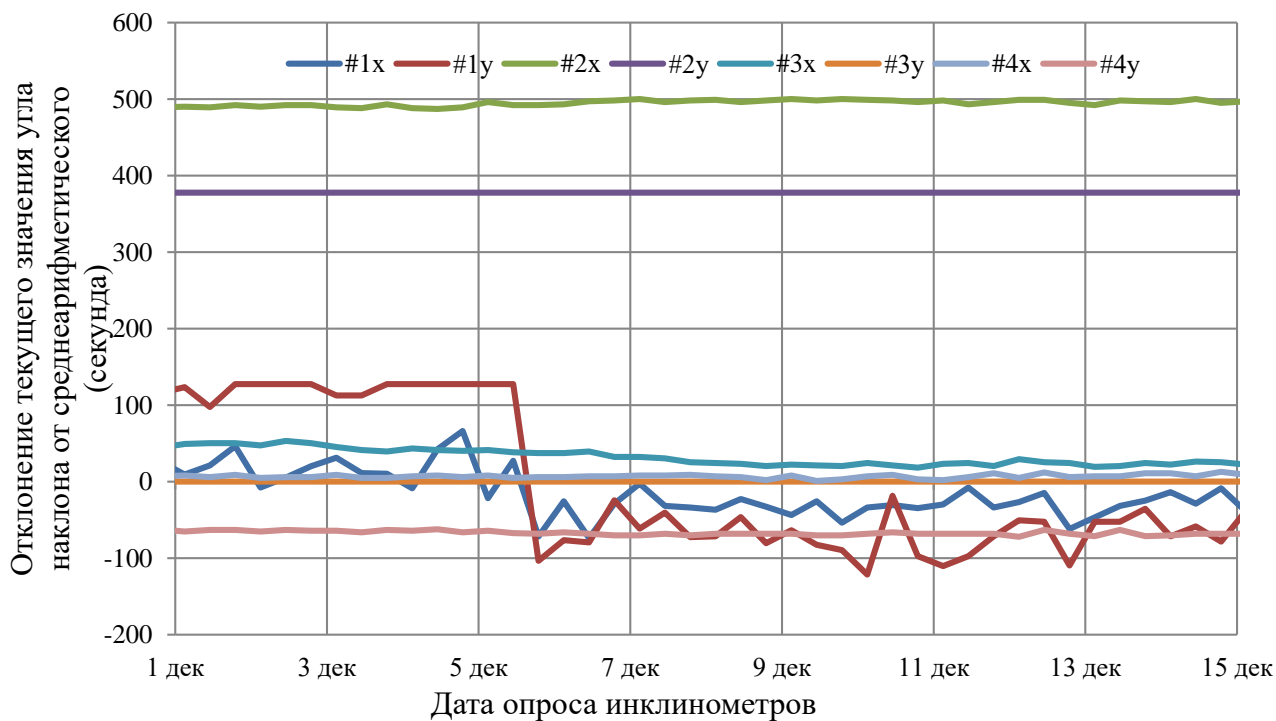


Рисунок 2.22 – Отклонение текущего значения угла наклона от среднеарифметического

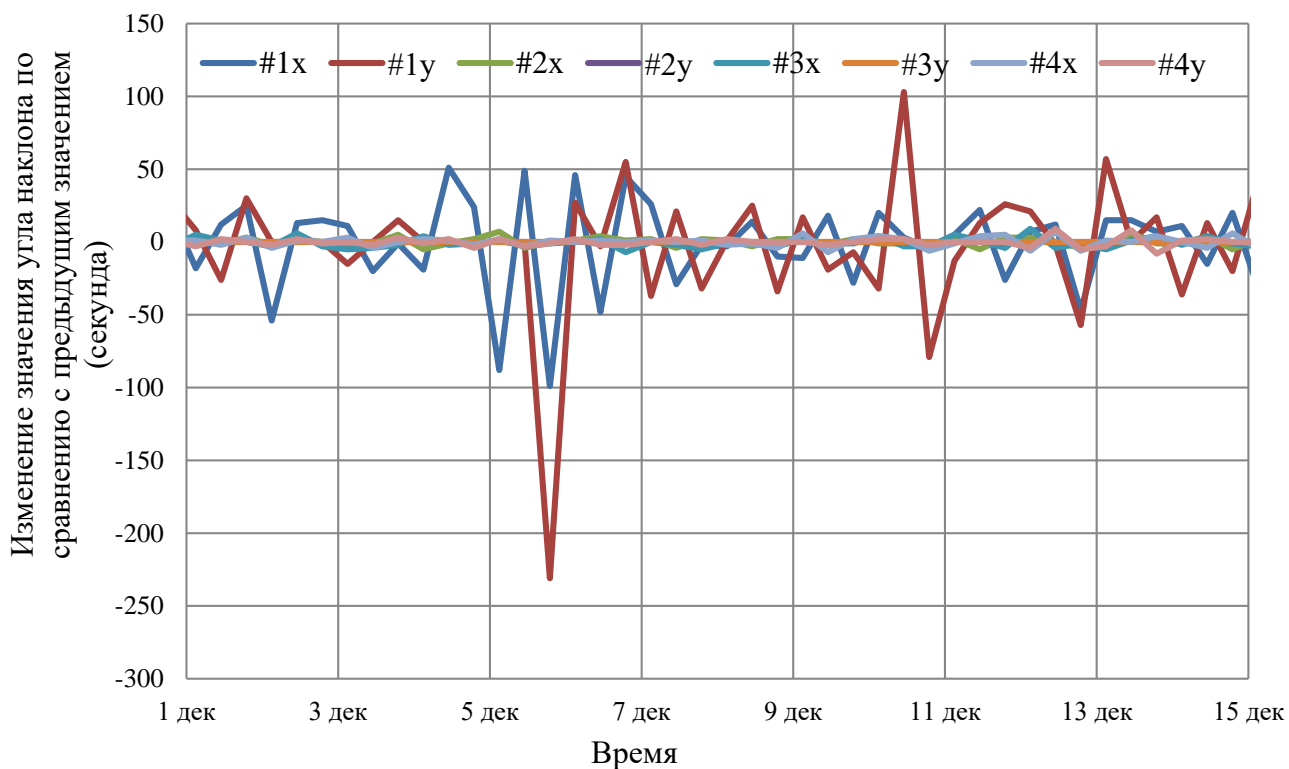


Рисунок 2.23 – Результат обработки данных, полученных системой инклинометров

Мониторинг с помощью системы инклинометров позволяет в условиях подземной разработки месторождений определять движения структурных блоков.

Определение изменений напряжений на контактах структурных блоков может быть основано на наблюдениях за наклонами отдельных структурных блоков массива.

Для получения более точной 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 прогноза. При этом именно деформационный мониторинг и рассчитанные по его данным напряжения позволяет интерпретировать данные сейсмического мониторинга, а комплексное использование дает возможность получать корреляцию подвижек структурных блоков с сейсмическими событиями.

## **Выводы по Главе 2**

Основу информации о пространственно-временных характеристиках процессов деформирования горного массива, по которым можно оценивать происходящие геомеханические и геодинамические процессы в массиве горных пород, составляют непрерывные измерения на локальном и региональном масштабных уровнях.

Однако при современном уровне развития лабораторных, натуральных, производственно-экспериментальных и аналитических методов исследования НДС массива особой сложностью является установление эмпирических связей между деформациями и напряжениями. В связи с широким выбором на мировом рынке датчиков деформационного контроля, проблемой также является выбор инструментов, позволяющих осуществлять непрерывное получение данных на больших временных промежутках, что является основой для деформационного мониторинга. Назначением систем деформационного мониторинга является предупреждение, на основе получаемых данных, критического состояния массива

горных пород. Инструменты деформационного мониторинга позволяют получать представление о НДС массива, блочном перемещении, процессах, происходящих на конкретном участке сплошности. Деформационный мониторинг за активностью структурных блоков методом системы инклинометров позволяет в условиях подземной разработки месторождений своевременно определять движения блоков, ограниченных структурой естественных трещин.

Для получения данных о развитии деформационных процессов в наиболее ответственных элементах горного массива необходимо использовать систему прямых измерений линейных деформаций. Такой системой является деформационный мониторинг с применением скважинных деформометров. Для получения более точных достоверных результатов параметров деформационного мониторинга необходимо использовать комплексную систему деформационного мониторинга, включающую инклинометры и трехкомпонентные датчики линейных перемещений, что позволит осуществлять контроль за поведением массива на локальном и региональном уровне.

С учетом отмеченных выше факторов, комплексное использование инклинометров и трехкомпонентных датчиков линейных перемещений особо актуально к применению в сложных горно-геологических условиях.

## **ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ЧИСЛЕННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ**

Изучение геомеханических и геодинамических процессов в породных массивах обеспечивает решение задач управления горным давлением, определения параметров процессов деформирования и перераспределения напряжений, разрушения породного массива, оценки и прогнозирования опасных геодинамических явлений. Для решения вышеуказанных задач используются аналитические, натурные, производственно-экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния массива. Численное моделирование является одним из основных методов исследований в горной геомеханике. Интенсивное развитие компьютерных технологий за последнее десятилетие способствовало развитию численных методов моделирования и их преобладанию над аналитическими моделями.

При моделировании геомеханических процессов численным методом возникают трудности при анализе неупругих процессов деформирования, протекающих в натуральных условиях. При моделировании геомеханических процессов необходимо учесть множество факторов: блочная структура массива, параметры структурных неоднородностей (размеры, залеченность трещин), литологическое строение, глубина залегания месторождения, изменчивость физико-механических свойств слагающего массива пород, природная сейсмичность региона, обводненность, наличие газового фактора, влияние горных работ. В описанных условиях эффективным методом является физическое моделирование на ЭМ.

### **3.1 Численное моделирование геомеханических и геодинамических процессов при взаимодействии структурных тектонических блоков массива**

Геодинамические явления при разработке апатит-нефелиновых руд зачастую проявляются в зонах, подверженных влиянию разломов, образующих тектонические блоки. Движение блоков обусловлено технологическими факторами

и восходящими тектоническими движениями. Подвижки тектонических блоков зачастую сопровождаются различными проявлениями горного давления, в том числе горные удары [37].

Для оценки изменения параметров напряженного состояния блочного массива при взаимодействии его структурных блоков выполнен комплекс численного моделирования.

Проведено численное моделирование методом конечных элементов, с использованием методики решения обратных геомеханических задач, с целью установления прогнозной зависимости изменения НДС массива от углов поворота структурного блока, основанного на наблюдениях за наклонами отдельных структурных блоков массива зафиксированных системой инклинометров.

Диапазон задаваемых угловых значений в качестве граничных условий моделирования был определен исходя из данных продолжительных наблюдений с использованием системы инклинометров.

В качестве расчетной схемы использовался продольный разрез участка месторождения Кукисвумчорр (рисунок 3.1).

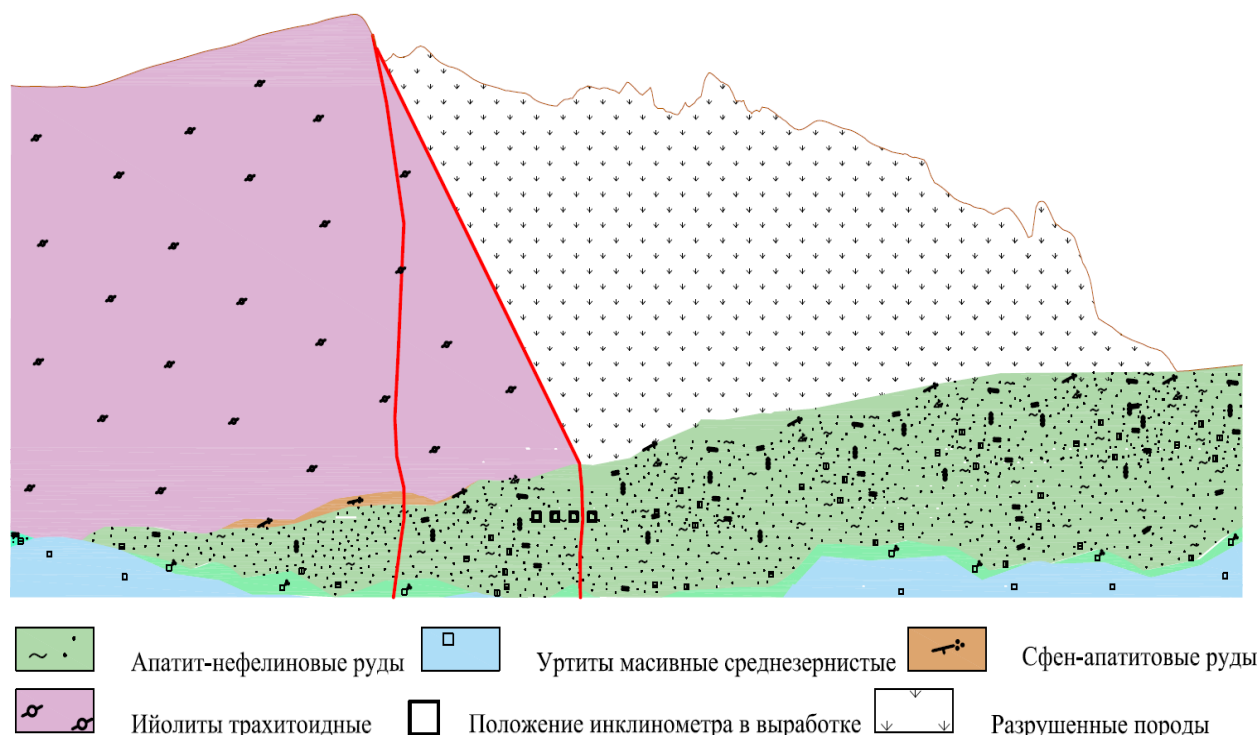


Рисунок 3.1 – Продольный разрез Кировского рудника, принятый в качестве расчетной схемы

Для расчета параметров напряженно-деформированного состояния массива исходными данными являются физико-механические свойства и данные о величинах компонент гравитационно-тектонического поля напряжений. Породы и их физико-механические свойства приняты согласно таблице 3.1., разломы заданы областями массива с ослабленными свойствами.

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства руд и пород, принятые для моделирования

Литотип/породы	Удельный вес, МН/м <sup>3</sup>	Модуль упругости образца, МПа	Модуль упругости массива, МПа	Коэффициент Пуассона
Уртиты массивные среднезернистые	0,028	59220	19495	0,25
Ийолиты трахитоидные	0,028	75480	24847	0,26
Сфен-апатитовые руды	0,028	57667	18983	0,28
Апатит-нефелиновые руды	0,028	52121	17158	0,26
Разрушенные породы	0,028	75480	1480,5	0,40

Модуль упругости массива для уртитов, ийолитов, сфен-апатитовых и апатит-нефелиновых руд принят с учетом структурной нарушенности с использованием рейтинга горных пород  $RMR = 60$ , принятого средним для диапазона, соответствующего средней нарушенности, вычислялся по следующей эмпирической зависимости, по формуле (3.1) [101]:

$$E_m = E \cdot e^{\frac{RMR-100}{36}}, \quad (3.1)$$

где  $E_m$  – модуль упругости массива,  $E$  – модуль упругости образца.

Определение параметров напряженного состояния массива выполнено на основе численной конечно-элементной модели, разработанной в программном комплексе САЕ Fidesys 1.7. Расчетная схема исходной модели для расчета представлена на рисунке 3.2.

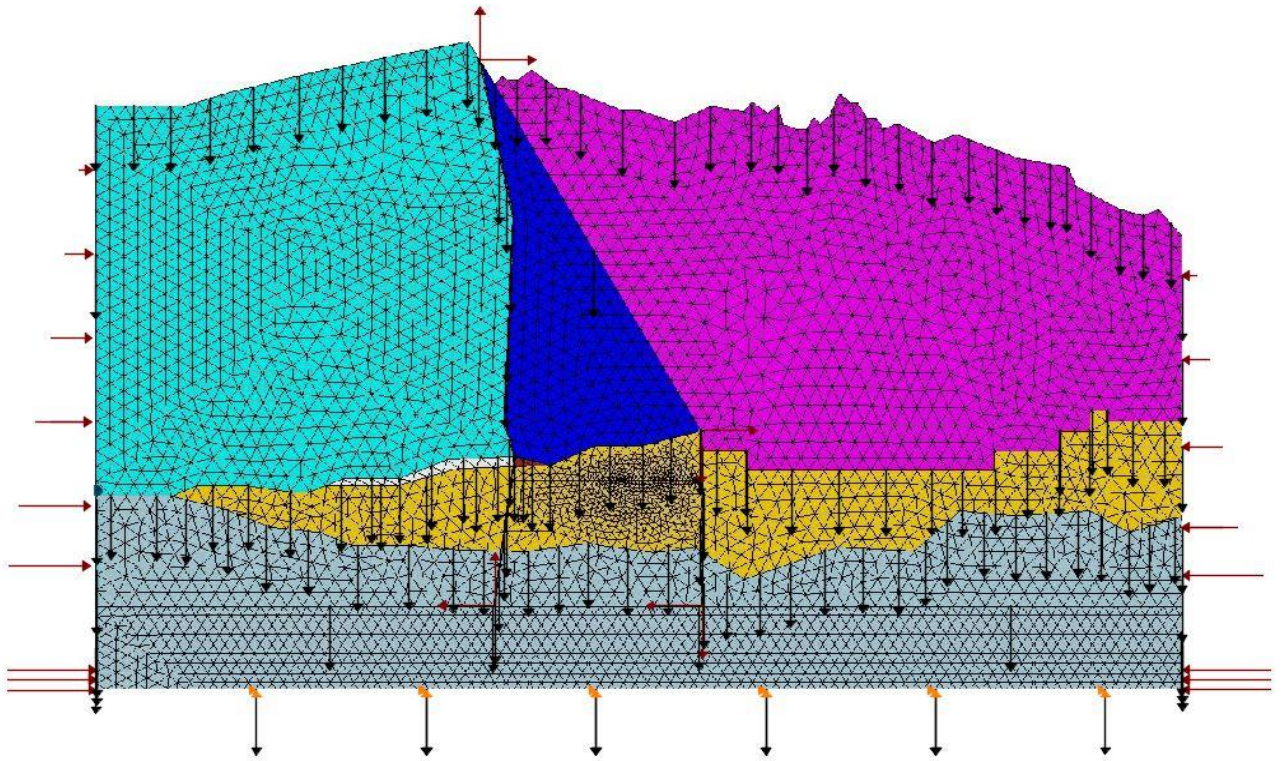


Рисунок 3.2 – Расчетная схема исходной модели для расчета

Моделирование осуществлялось следующим образом. В вертикальном направлении компонента естественного поля напряжений массива определялась гравитационной составляющей. В горизонтальном направлении компонента естественного поля напряжений по простиранию рудного тела задана согласно [80] и распределяется по глубине согласно линейному закону и на уровне абсолютной отметки 0 составляет 30 МПа. Нижняя грань модели закреплена от перемещений и вращений по всем направлениям. Поворот блока, фиксируемый в натуральных условиях инклинометрами, задавался как перемещение четырех граничных точек при повороте блока по часовой стрелке относительно линии, соответствующей горизонту +170 м. По причине невозможности пересечения двух граничных условий в нижней части модели создана зона в виде дополнительной прямоугольной области массива, не оказывающей существенного влияния на результаты расчетов. Геометрия представлена сеткой плоских треугольных элементов первого порядка. При этом выполнено сгущение сетки вблизи

рассматриваемых точек с дифференциацией размера элемента от 4 до 20 м. Количество элементов модели составляет около 1000 шт.

Для установления зависимости между наклоном блока и прогнозными изменениями НДС на границах тектонического блока проводилось многовариантное моделирование с углами поворота от 0 до 200 секунд. При каждом повороте блока в каждой из точек нахождения инклинометров замерялись значения напряжений (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Значения напряжений, изменяющихся в соответствии с углом поворота

Угол поворота, угл.секунда	Инклинометр 1	Инклинометр 2	Инклинометр 3
	Значение напряжения, Па		
0	-5347590	-8473520	-10256400
10	-5307570	-8570980	-10344900
20	-5262150	-8671100	-10436100
30	-5160990	-8933040	-10674500
40	-5123380	-9033940	-10759700
50	-5088570	-9132920	-10843800
60	-5059170	-9218860	-10924500
70	-5048870	-9277510	-10978500
80	-5011890	-9355660	-11057000
90	-4990880	-9435990	-11140200
100	-4956830	-9510820	-11220100
110	-4916810	-9581880	-11299400
120	-4883120	-9626510	-11354500
130	-4834170	-9690530	-11433500
140	-4815180	-9748870	-11506700
150	-4822800	-9803340	-11574000
160	-4821340	-9837560	-11621900
170	-4814610	-9885390	-11694000
180	-4805070	-9930910	-11764500
190	-4797520	-9979120	-11836900
200	-4790100	-10027000	-11909200

При повороте 80 угл. секунд зафиксированы максимальные главные сжимающие напряжения по данным натурных исследований системой инклинометров.

На рисунке 3.3 представлена эпюра распределения максимальных главных сжимающих напряжений до поворота блока  $\sigma_1$ , на рисунке 3.4 – представлена

эпюра максимально возможных сжимающих напряжений после поворота блока на 80 секунд  $\sigma_1'$ .

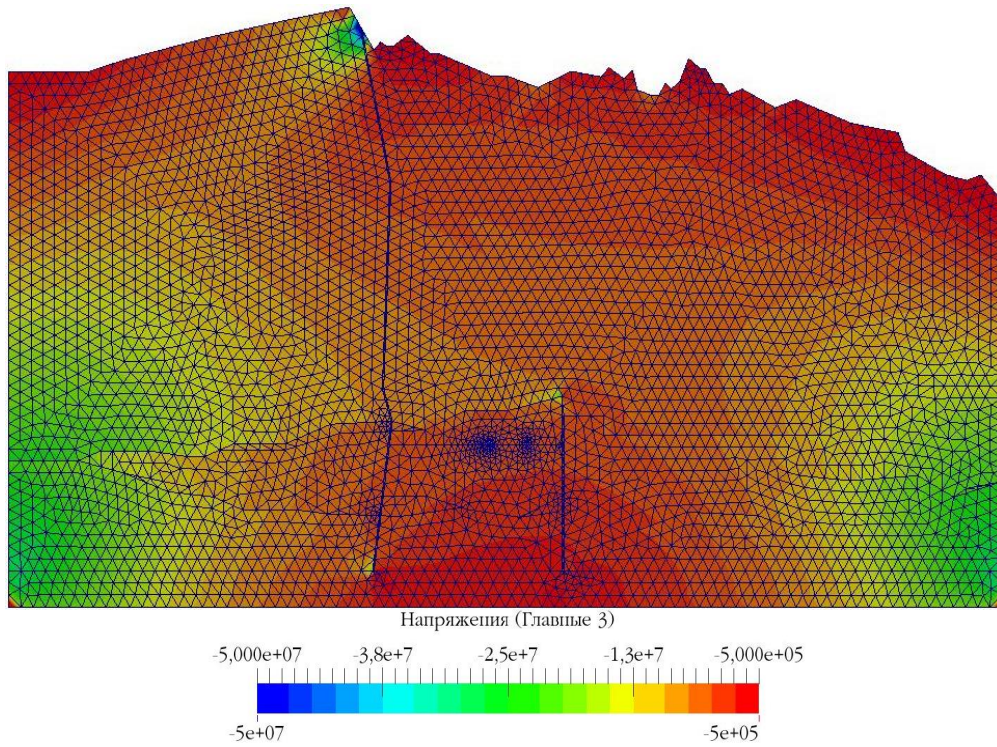


Рисунок 3.3 – Эпюра распределения максимальных главных сжимающих напряжений до поворота блока

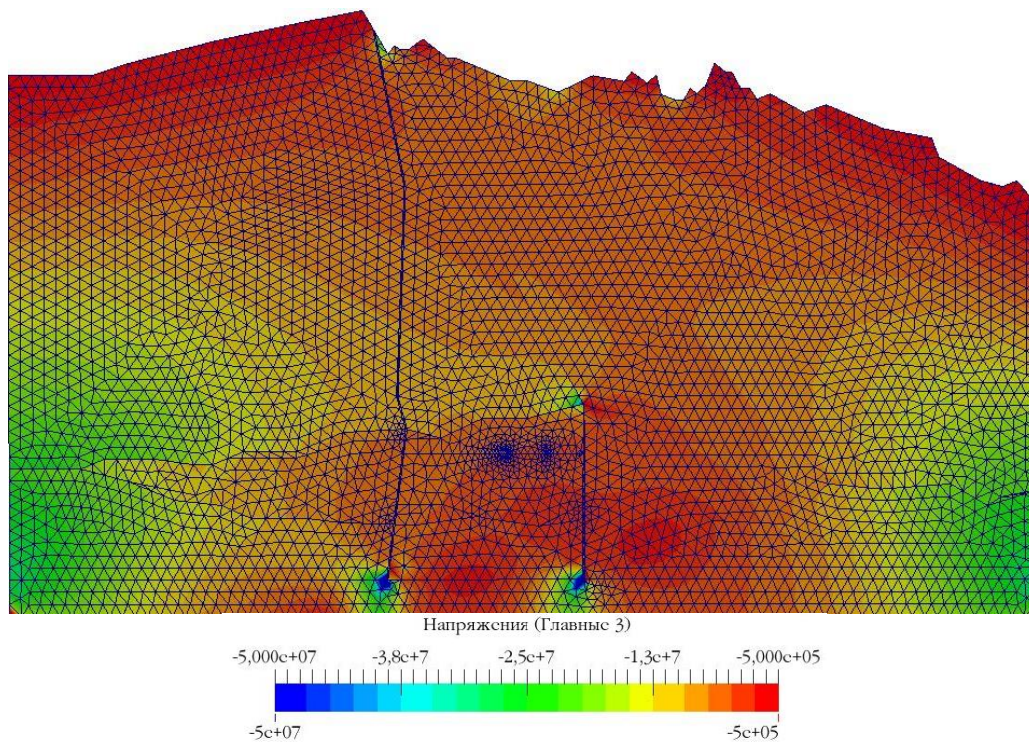


Рисунок 3.4 – Эпюра распределения максимальных главных сжимающих напряжений после поворота блока на 80 угл. секунд

Наиболее наглядно изменение напряжений отображает эпюра распределения концентрации напряжений  $\sigma'_1/\sigma_1$  вблизи выработки, представленная на рисунке 3.5

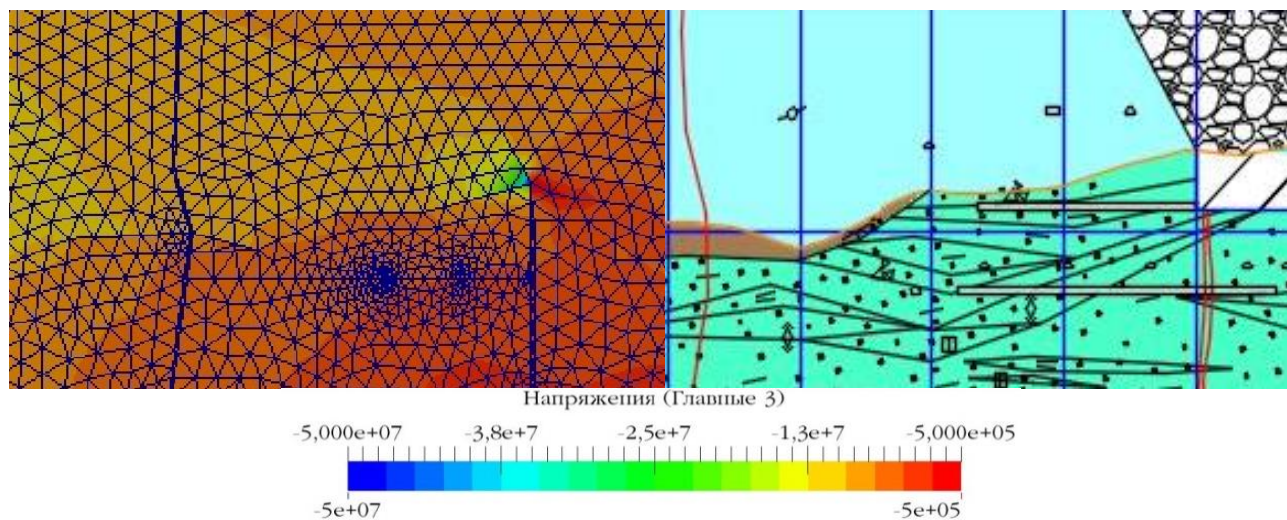


Рисунок 3.5 – Распределение концентрации напряжений исследуемой области.

При угле поворота в 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 3.6.

Для установления зависимости между наклоном блока и прогнозными изменениями НДС на его границах было проведено многовариантное моделирование с диапазоном углов поворота от 0 до 200. Изменение напряжений было проанализировано в точках, соответствующих пересечению магистрали +500, разрезов 7, 8, 9 и проекции линии контроля наклона инклинометрами (горизонт +170). Полученные графики зависимостей представлены на рисунке 3.7

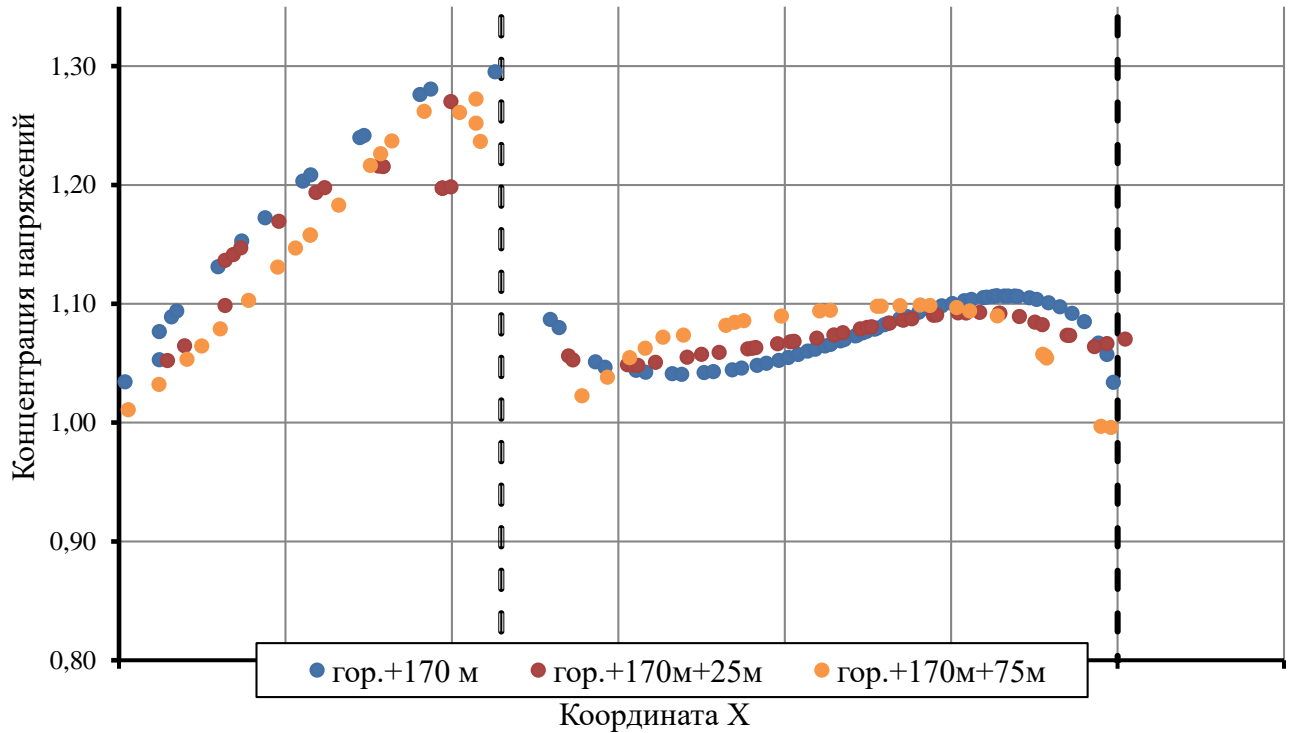


Рисунок 3.6 – Значение горизонтальной координаты при зафиксированном наклоне блока на 80 угл. секунд.

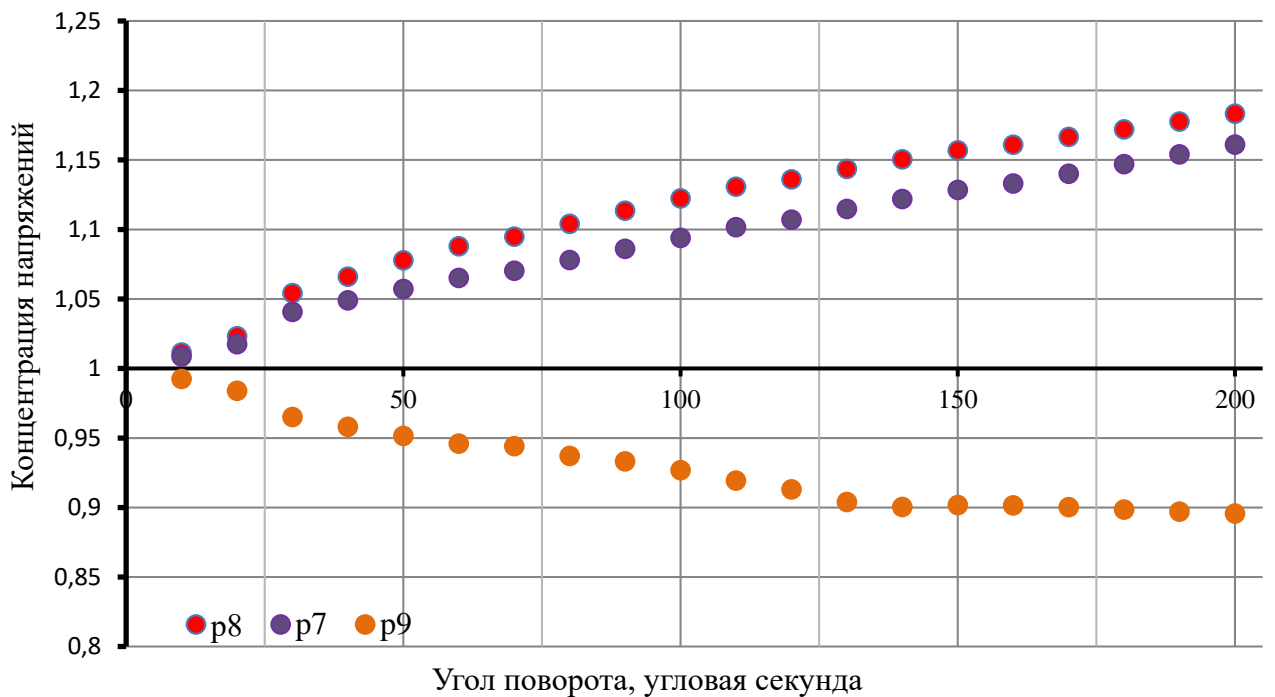


Рисунок 3.7 – График зависимости изменения концентрации напряжений от угла поворота  
Кривые, соответствующие точкам пересечения 7 и 8 разреза и горизонта +170 м, показывают рост напряжений в массиве с увеличением угла поворота.

Кривая, соответствующая точке пересечения 9 разреза и горизонта +170 м отображает разгрузку массива, что связано с находящейся рядом зоной шпреуштейнизации. Подобные зависимости можно получить для любой точки массива.

В результате поворота блока, изменяется поле напряжений что способно привести к образованию зон концентраций напряжений.

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.

### **3.2 Решение обратных геомеханических задач на основе физического моделирования**

Представление об образовании зон напряженного состояния в конкретной точке выработки возможно получить на основании контроля за состоянием приконтурного массива.

Деформационный мониторинг состояния приконтурного массива на основе применения трехкомпонентных датчиков позволяет получать данные о векторных величинах в режиме реального времени удаленным доступом.

В большинстве случаев, сопровождение инструментальных наблюдений за деформациями массива сопровождается решением обратных геомеханических задач на основе численного моделирования. Исследования Научного центра геомеханики и проблем горного производства показали что, в условиях Кировского рудника, в окрестностях горизонтальных скважин протекают нелинейные процессы деформирования массива. Эффективным методом решения подобных задач, особенно при нарушении сплошности массива и эволюции его структурных параметров, является метод моделирования на ЭМ.

Для рассматриваемых условий, на физической модели из ЭМ по заданным напряжениям с фиксируемыми соотношениями вертикальной и горизонтальной

составляющих, определялись соответствующие им деформации в скважине для установления соответствующих закономерностей. Рассматривались условия, характеризующиеся величинами соотношений максимальных и минимальных напряжений на границах моделей вне зоны влияния скважины 2:1.

Установление данных закономерностей может стать основой для интерпретации получаемых данных с трехкомпонентных датчиков и определения динамики изменения параметров напряжений при приближении фронта работ. Данный метод моделирования базируется на теории подобия, позволяющей выделить и обеспечить подобие геомеханических процессов при условии обеспечения критериев по основным параметрам, определяющим соответствие физических процессов, протекающих в модели и натуральных условиях [34].

Механическое подобие определяется заданием переходных множителей, его соблюдение является обязательным для моделирования явлений, связанных с горными условиями:

- масштабов для длины (геометрическое подобие);
- времени (кинематическое подобие);
- массы (динамическое подобие).

Геометрическое подобие выполняется при определении постоянного числа, заданного отношением линейных размеров области натурального массива к моделируемой области.

Кинематическое подобие обеспечивается за счет подобного движения частиц в двух системах (модели и природы) и определяется постоянным множителем.

Динамическое подобие обеспечивается отношением масс частиц, расположенных в пространстве и времени, равным постоянному множителю.

Обязательным условием подобия является также равенство определяющих критериев, составленных из величин, имеющих существенное значение в изучаемом процессе.

В настоящее время именно исследование геомеханических процессов с учетом трещинообразования, разрушений и блочного строения массива является

наиболее актуальной областью применения метода физического моделирования. Методы физического моделирования основываются на воспроизведении структуры и физико-механических характеристик массива, реального процесса добычи полезного ископаемого на заданной глубине залегания и исследовании протекающих геомеханических процессов.

Для изготовления модели должны быть заданы: геологический разрез исследуемого участка и масштаб моделирования.

Физическое моделирование на ЭМ включает несколько этапов, отраженных на рисунке 3.9:



Рисунок 3.9 – Основные этапы физического моделирования

– разработка ЭМ, обеспечивающих соблюдение критериев прочностного подобия одновременно по прочностным и деформационным параметрам;

- изготовление стенда, обеспечивающего формирование граничных условий во всем реальном диапазоне изменения гравитационных и тектонических составляющих напряжений;
- изготовление модели;
- разработка, изготовление и тарировка тензометрических силоизмерителей, служащих в качестве модели датчика;
- формирование модели скважины и установка в ней моделей деформометров;
- подключение деформометров и тензометрических балок к ИИС на основе LTR- крейт, ПО;
- установка фото- и видеоаппаратуры для фиксации процесса;
- нагружение модели при варьировании различных соотношений напряжений на границе модели и стенда.
- обработка измеренных значений деформаций и напряжений с единой временной шкалой.

При изучении процессов разрушения пород необходимо выполнять требования подобия в отношении механических констант прочности, определяющих предельные состояния породы перед ее разрушением. При подборе материала учитывалось требование механического подобия при моделировании процессов деформаций и разрушения пород.

При разработке ЭМ использовались следующие формулы (3.2) и (3.3) [28]:

$$R_{сжм} = R_{сжн} \cdot \alpha_l \cdot \alpha_p, \quad (3.2)$$

$$E_m = E_n \cdot \alpha_l \cdot \alpha_p, \quad (3.3)$$

где  $R_{сжм}$  и  $R_{сжн}$  – предел прочности на одноосное сжатие – соответственно в модели и натуре,  $E_m$  и  $E_n$  - модули упругости – соответственно в модели и натуре,  $\alpha_l$ –линейный масштаб моделирования,  $\alpha_p$ – масштаб плотностей.

Для анализа был выбран участок массива горизонта +170, исследуемая область составила 250 метра. Размеры ШxВxГ для стенда для моделирования

составили 0,56x0,74x0,2 метра соответственно. На основании этих параметров был определен линейный масштаб моделирования (3.4) [28]:

$$\alpha_l = \frac{l_m}{L_n} = \frac{0,54}{250} = 0,00216 \quad (3.4)$$

где  $l_m$  и  $L_n$  – линейные размеры модели и натуре соответственно.

В натуральных условиях моделируемые датчики были установлены в двух скважинах диаметром 76 мм на глубине 10 м. Скважины перпендикулярны друг другу и оси выработки. Одна скважина пробурена в кровле, другая в боку выработки на высоте 1.5 м от почвы.

В центральной части модели пройдена скважина диаметром 89 мм, соответствующая натурным условиям в геометрическом масштабе 1:1,17. Масштаб скважины укрупнен для исключения погрешностей при процессе моделирования. На основании глубины залегания исследуемого участка 630 метров от поверхности можно пренебречь масштабом плотностей в силу несущественного влияния на исследуемый процесс, а также из-за невозможности учесть его при разности линейных масштабов и дисперсности ЭМ.

По результатам испытаний керна  $R_{сжн}=80$  МПа. По результатам проведенных исследований и формулы 3.2 для изготовления модели был выбран материал прочностью 0,165 МПа.

В соответствии с расчетными параметрами ЭМ проводились исследования для подбора оптимальной рецептуры. Результат испытаний ЭМ приведен на рисунке 3.10.

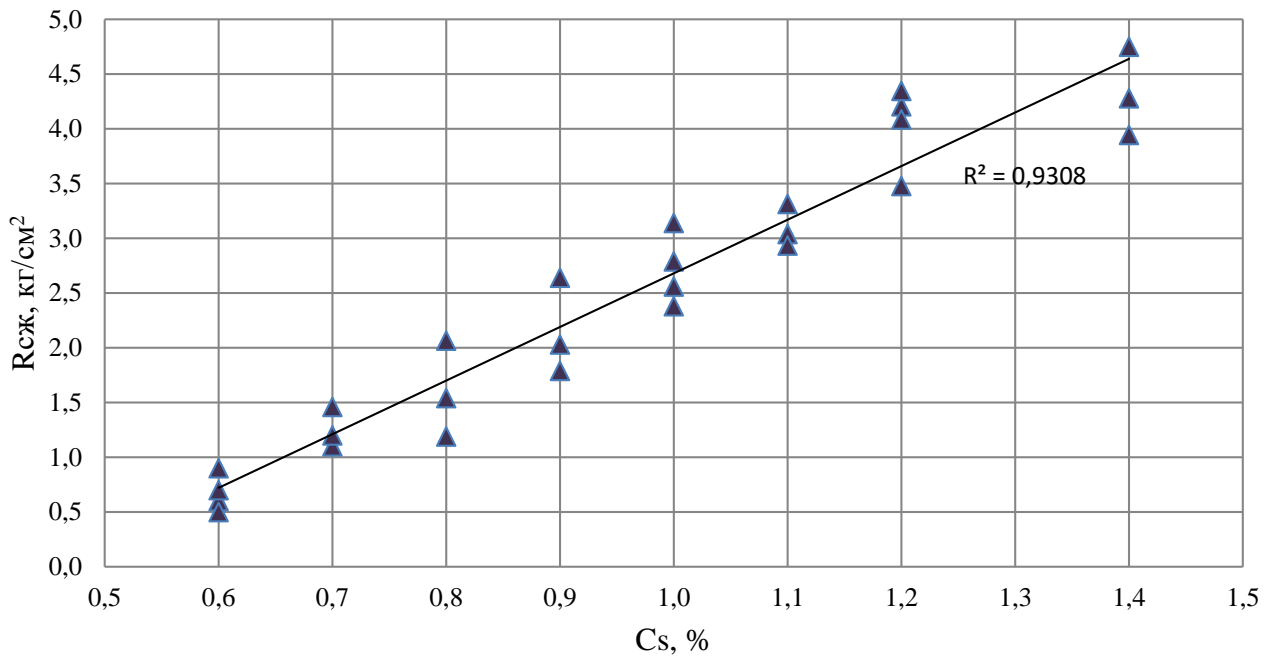


Рисунок 3.10 – Подбор рецептуры ДЭГ-1 для различного Cs

Образцы из ЭМ и их испытания на определение деформационных свойств изображены на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Образцы и их испытания на определение деформационных свойств

Основой ЭМ является кварцевый песок. ЭМ содержит связующее из смолы диэтиленгликоля ДЭГ-1, отвердитель полиэтилполиамина и пластифицирующую добавку глицерин. Для данного материала обеспечивалось одновременное подобие по прочностным и деформационным параметрам, а также равенство их отношений согласно формулам (3.4) и (3.5) [28]:

$$R_{сжм}/R_{сжн} = E_M/E_N, \quad (3.4)$$

$$R_{сжм}/E_M = R_{сжн}/E_N \approx 0,002, \quad (3.5)$$

где  $R_{сжм}$  и  $R_{сжн}$  прочности на одноосное сжатие— соответственно в модели и натуре,  $E_M$  и  $E_N$  - модули упругости – соответственно в модели и натуре.

Разработанный стенд (рисунок 3.12, а) обеспечивает формирование соотношений вертикальных и горизонтальных нагрузок, соответствующих натурным данным [75]. Средние и максимальные отношения горизонтальных и вертикальных напряжений по модели соответствуют значениям  $(\sigma_{гор} / \sigma_{верт})_{ср}=0,5$  и  $(\sigma_{верт} / R_{сж})_{max}=0,7$ . Расчетная схема модели и расположение датчиков давления отображены на рисунке 3.12, б.

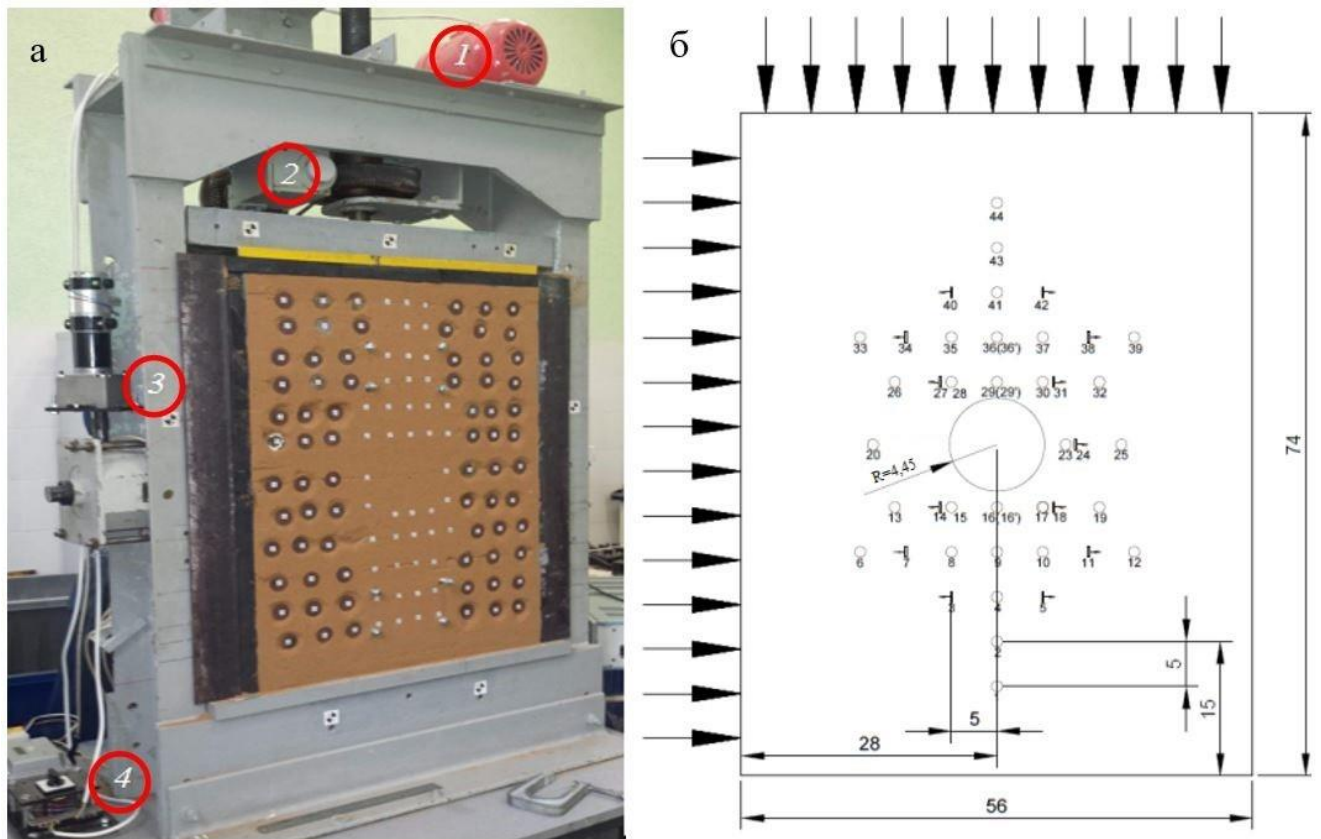


Рисунок 3.12 – Расчетная схема модели и расположение датчиков:

а – фото стенда: 1 – двигатель вертикальной пригрузки, 2 – пригрузочное устройство по вертикали, 3 – электрический исполнительный механизм с редуктором горизонтальной пригрузки, 4 – пульт управления; б – расчетная схема с расположением датчиков в теле модели

Для определения величин смещений использовался метод фотофиксации. Метод позволяет производить качественную оценку смещений на поверхности модели с установленными на ней и на стенде марками. На поверхности тела модели прикреплены марки типа квадрант, на стенде также прикреплены марки в качестве реперных.

В скважину в двух взаимно перпендикулярных направлениях устанавливались модели деформометров, представляющие собой тензометрические скобы (рисунок 3.13). Скобы устанавливались по осям действия максимальных (вертикальных) и минимальных (горизонтальных) напряжений на границе модели. Для формирования третьей компоненты задаваемых напряжений использовались два оргстекла, стягиваемые механическим способом через резиновую прокладку с заданной степенью сжатия 200 кг, соответствующей различным прижимным усилиям.

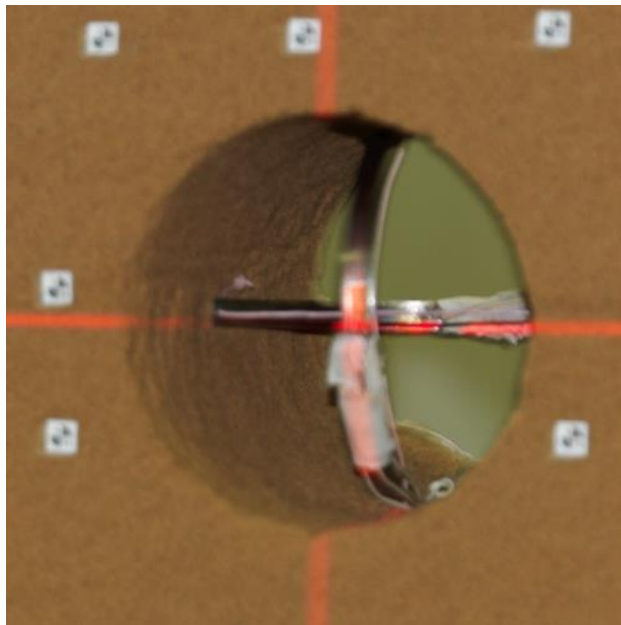


Рисунок 3.13 – Тензометрический деформометр, установленный в скважине

Эксперимент проводился по методике ступенчатого увеличения нагрузки по вертикальным и горизонтальным осям при сохранении в модели соотношения напряжений до проявления видимых признаков разрушения околоскважинного пространства.

Сбор информации с датчиков обеспечивался модулями регистрации широкополосных сигналов LTR-22, установленными в модульной системе для построения многоканальных измерительных систем LTR-EU-16.

Использовалось программное обеспечение «ACTestPro» для вывода на экран ПК сигналов с датчиков, подключенных к модулям LTR-22, по всем исследуемым каналам, математической обработки сигнала, как в режиме реального времени, так и после проведения эксперимента, обработки полученных в ходе эксперимента данных, экспорта графики в виде изображений и данные в виде электронных таблиц, визуализации и обработки информации в режиме реального времени и постобработки сигналов при помощи математических фильтров и функций.

Фоторегистратор HasselbladH5D-200MS (рисунок 3.14) для анализа статических и квазистатических смещений в моделях из ЭМ. Максимальное разрешение съемки 200 МПикс. На весь период испытаний местоположение устройств фото- и видеофиксации оставалось неизменным.



Рисунок 3.14 – Вид фоторегистратора Hasselblad H5D-200MS и видеореги­стратора NAC HX-3

Видеореги­стратор NAC HX-3 позволяет фиксировать смещения в модели в условиях динамических процессов, осуществляет съемку 2000 кадров/секунду при максимальном разрешении.

Контроль процессов смещения массива осуществлялся автоматизировано программным обеспечением ТЕМА Motion 2D с помощью марок типа квадрант, закрепленных на теле модели, через каждые 5 см. ТЕМА Motion 2D позволяет осуществлять экспорт, импорт, обработку фотофиксации и видеофайлов, применять пользовательские системы координат, анализировать координаты марок и исследуемые элементы модели на изображениях на сериях фотофиксации и

видеозаписях покадрово с помощью установленных алгоритмов слежения, вычисления линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений с использованием базовых координат и/или характерных точек и информации о скорости съемки.

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 скажины  $\sigma_n = 0 \div 0,14$ . (рисунок 3.15)

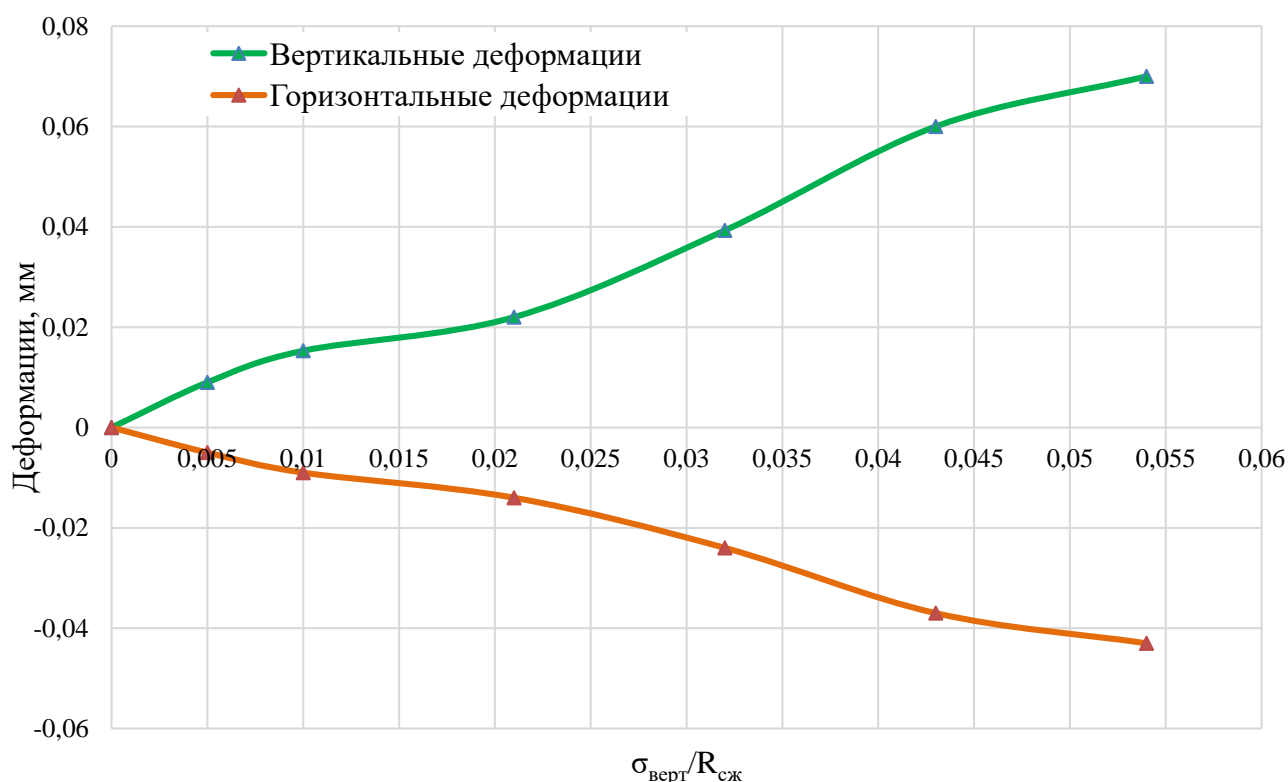


Рисунок 3.15 - Изменение вертикальных и горизонтальных деформаций на начальном этапе деформирования при отсутствии активных горизонтальных напряжений  $\sigma_{гор}=0$

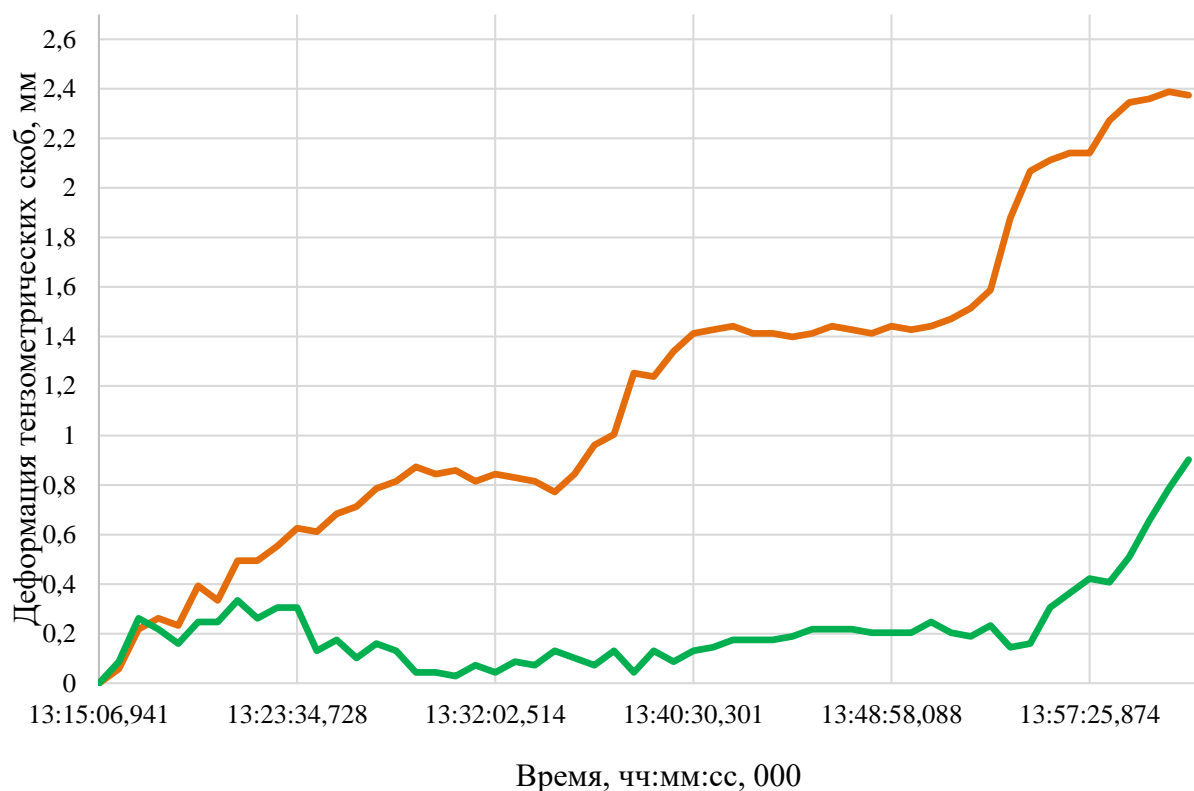
Анализ изменения деформаций на начальном участке деформирования при отсутствии активной горизонтальной составляющей показал, что в целом наблюдается сжатие контура вдоль линии действия максимальных напряжений и растяжение контура вдоль линии минимальных напряжений. Однако при этом

наличие напряжений вдоль оси скважины может существенно влиять на их соотношение.

На рисунке 3.16 – приведены временные зависимости изменения деформаций стенок скважины по линии действия максимальных и минимальных напряжений, на рисунке 3.17 – изменения этих же деформаций как функций максимальных действующих напряжений, пронормированных в долях прочностей массива на одноосное сжатие на основании формул (3.6) и (3.7):

$$\Delta Y1 = f_1 \cdot (\sigma_{\max} / R_{\text{сж}}) \quad (3.6)$$

$$\Delta Y2 = f_2 \cdot (\sigma_{\max} / R_{\text{сж}}) \quad (3.7)$$



— Деформации скважины по линии максимальных напряжений (скоба вертикальная), мм

— Деформации стенок скважины по линии минимальных напряжений (скоба горизонтальная), мм

Рисунок 3.16 – Временная зависимость показаний деформометров по физической модели из ЭМ

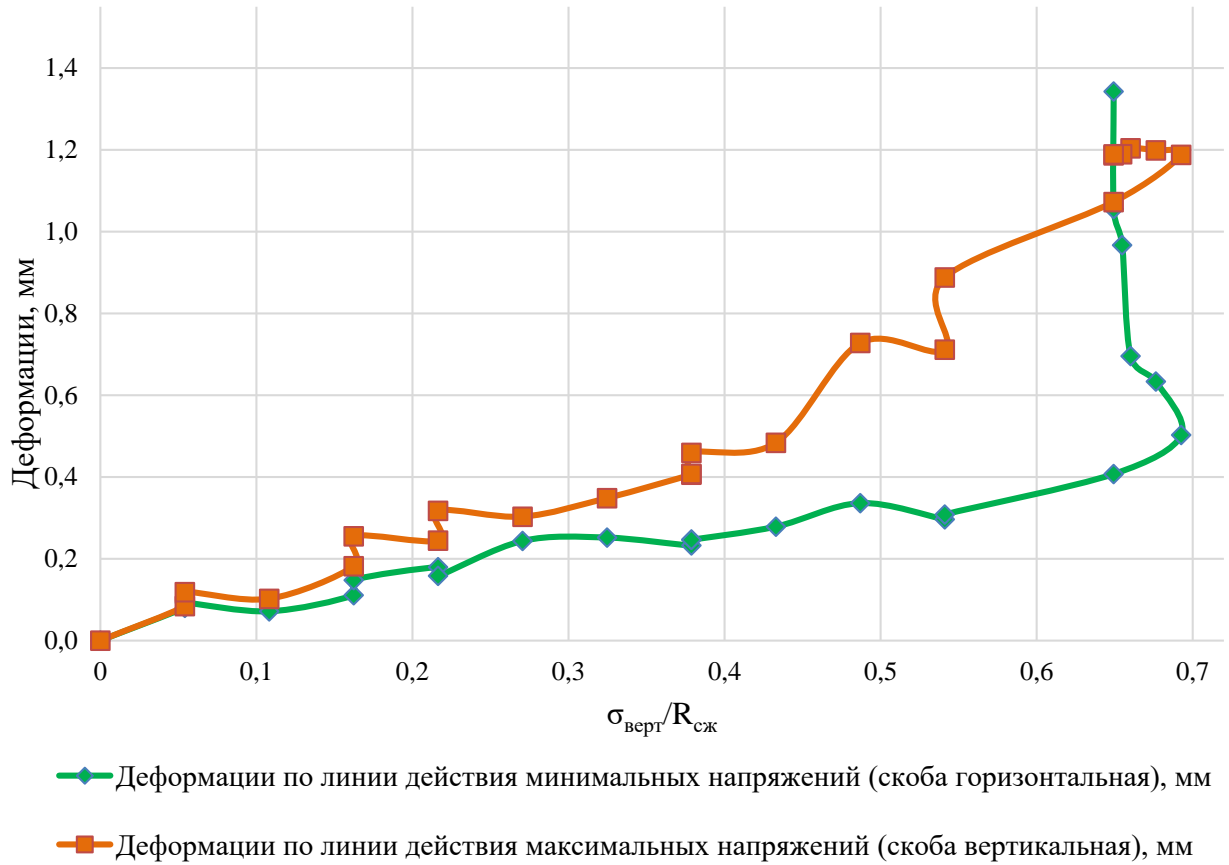


Рисунок 3.17 – Изменение деформаций скважины в модели из эквивалентных материалов

Участки скачкообразного характера соответствуют моменту разрушения.

На рисунке 3.18 отражены видимые результаты этапов нагружения и состояние пробуренной скважины.

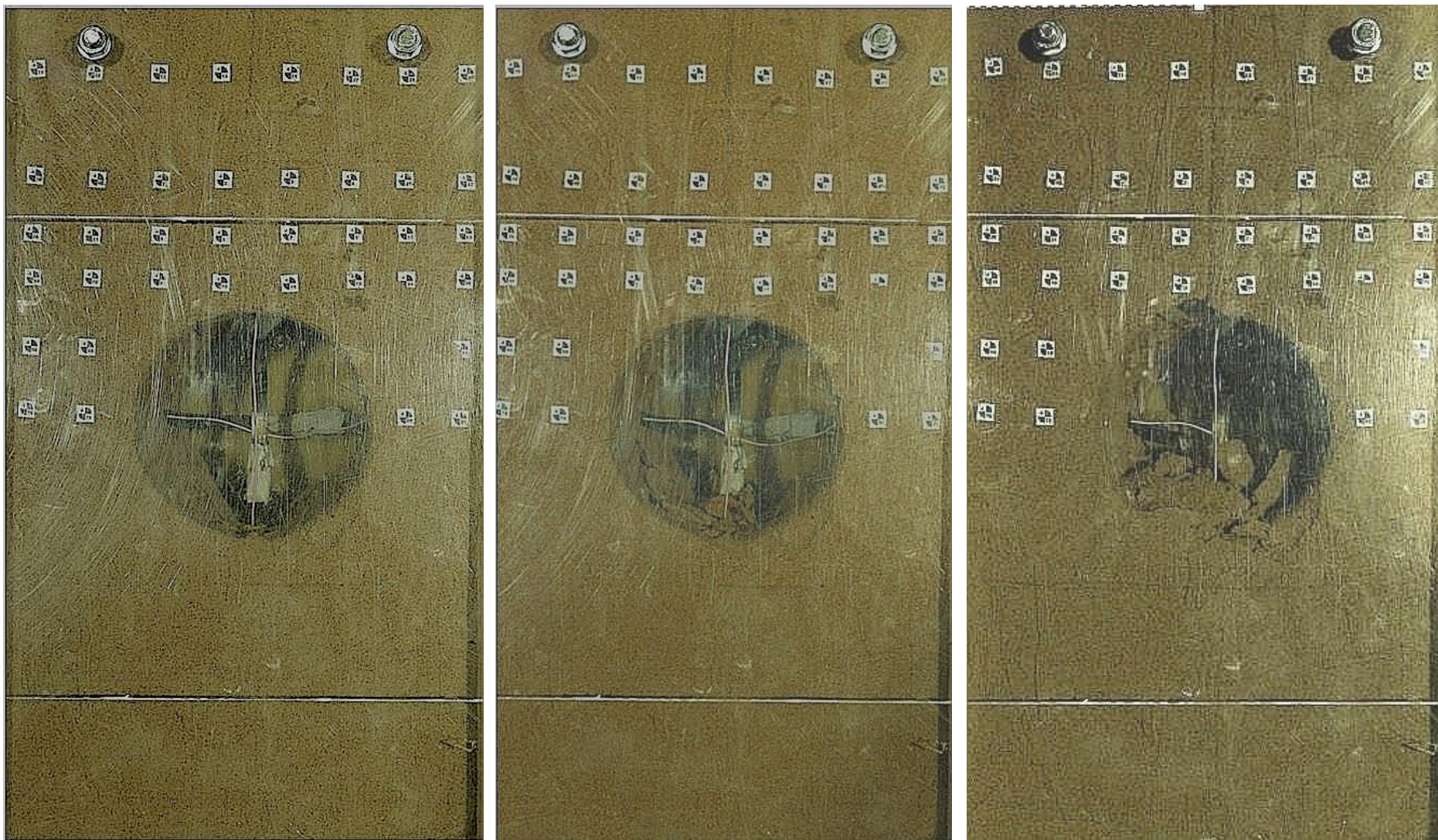


Рисунок 3.15 – Деформация скважины по время различных этапов нагружения модели

По результатам получаемых данных для условий расположения трехкомпонентного датчика с соотношением главных напряжений 2:1 были получены значения деформаций, соответствующих разрушения массива. Для породного массива выявлено нелинейное деформирование до величины смещения 350 мкм, для рудного – 300 мкм.

Разработанная методика обеспечивает выполнение поставленной задачи по установлению корреляционных зависимостей между деформациями контура скважины с величиной напряжений, действующих вне зоны ее влияния.

### **Выводы по Главе 3**

Разработан метод определения параметров регионального поля напряжений на основании данных системы мониторинга наклонов отдельных блоков массива, ограниченных тектоническими нарушениями, в комплексе с решением обратных геомеханических задач на основе численного моделирования.

Разработанная методика обеспечивает выполнение поставленной задачи по установлению корреляционных зависимостей между деформациями контура скважины с величиной напряжений, действующих вне зоны ее влияния.

Физическим моделированием выявлена связь между зафиксированными деформациями в горном массиве и действующими напряжениями, предшествующими моменту разрушения массива, для условий рудников АО «Апатит».

Установленные эмпирические связи между деформациями и напряжениями позволяют локализовать удароопасные участки массива в пределах тектонических блоков.

#### **4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ**

Комплексный деформационный мониторинг способен обеспечить прогноз опасных геодинамических явлений на конкретном участке и месторождении в целом. При организации комплексного деформационного мониторинга возникает необходимость решения задач нескольких уровней, а именно обеспечение локального и регионального мониторинга.

Локальный мониторинг включает изучение слабых динамических событий в непосредственной близости от горных выработок и может обеспечиваться на основе трехкомпонентных датчиков деформаций породы индукционного типа.

Региональный мониторинг включает изучение процессов движения структурного блока и возникающего регионального поля напряжений в результате указанных процессов. Региональный мониторинг может обеспечиваться на основе получаемых данных системой инклинометров.

В процессе проектирования системы комплексного деформационного мониторинга необходимо учитывать расположение и ранг тектонических нарушений на исследуемом участке, наличие и назначение горных выработок для размещения элементов системы, зоны влияния разломов и выработок.

Для создания проекта расположения элементов комплексной системы деформационного мониторинга блочного массива использовался участок Кукисвумчоррского месторождения. Участок выбран на основе анализа геодинамических явлений на АО «Апатит», основанный на журналах визуального осмотра выработок за период с 2015 - 2018 гг. Центры участков проявлений горного давления за 2017-2018 гг. отмечены на рудничных сетках (Рисунок 4.1). На участке горизонта +170 зафиксировано наибольшее количество проявлений горного давления, что отражает приближенную качественную оценку напряженного состояния в пределах обследуемого участка, выполненного на основе внешних признаков удароопасности возникающих на контуре выработок или скважин.

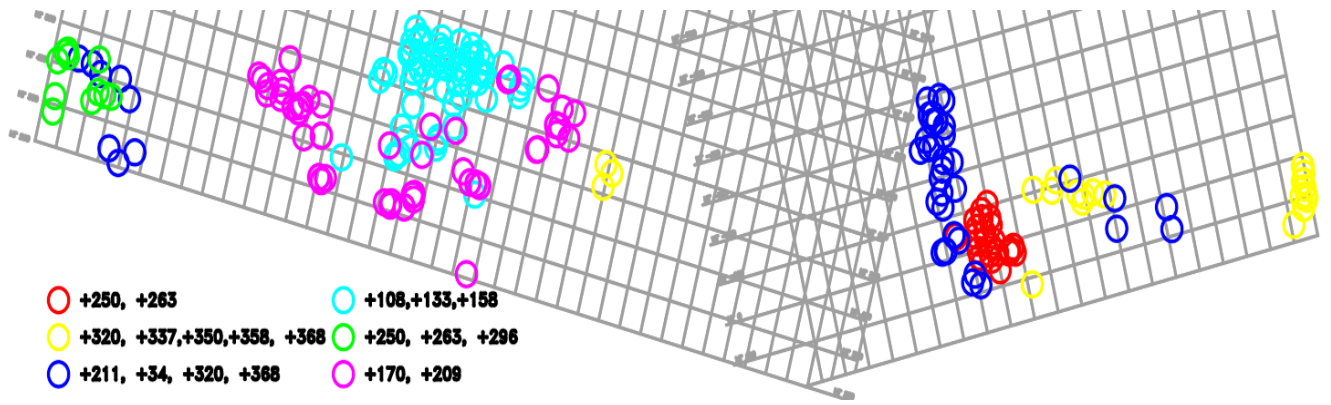


Рисунок 4.1 – Центры проявлений горного давления в выработках, зафиксированные методом визуального осмотра выработок нанесенные на рудничные сетки Кировского рудника.

На рисунке 4.2. предлагается достаточный набор и расположение элементов системы, позволяющих получать данные для прогноза опасных геодинамических явлений на выбранном участке.

Инклинометры установлены вне зоны влияния разломов, на краях и в центре каждого блока. За пределами исследуемой области предлагается устанавливать дополнительные инклинометры для верификации поворота блоков и смещений участков массива.

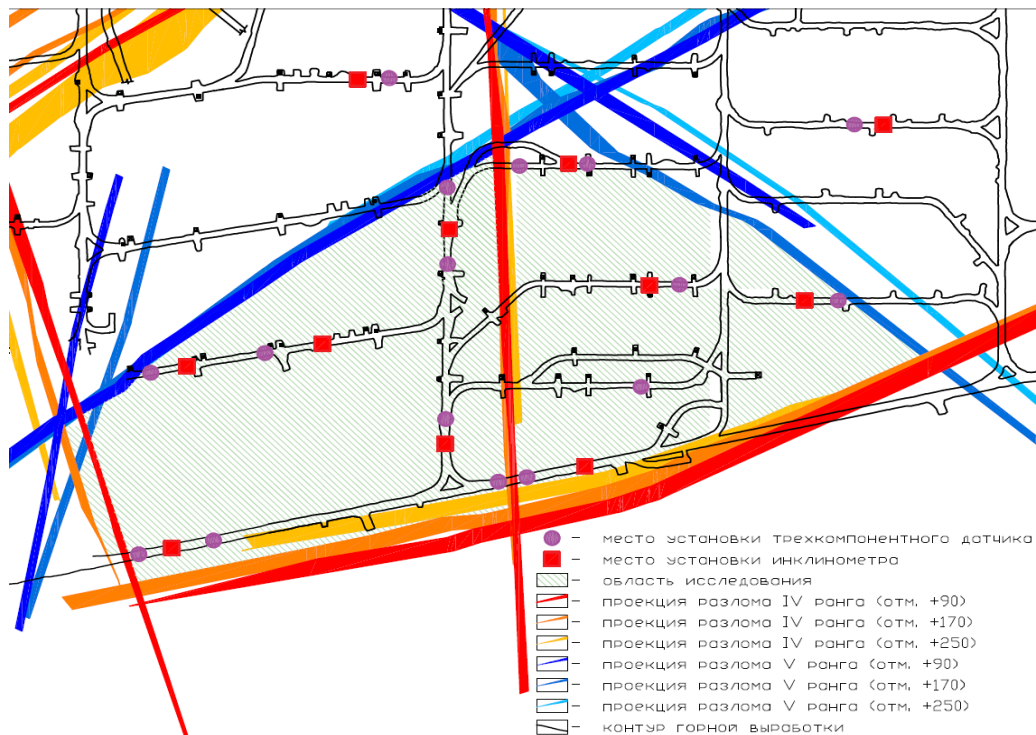


Рисунок 4.2 – Проект расположения элементов комплексной системы деформационного мониторинга

Около инклинометров размещаются трехкомпонентные датчики деформации породы. Размещение датчиков должно осуществляться в зонах влияния разломов и вне таких зон для определения удароопасности. Вместе с этим, выбор места заложения скважин проводится с учетом результатов визуального осмотра выработок, а установка датчиков сопровождается видеоэндоскопическим исследованием.

Подробная схема установки элементов системы деформационного мониторинга на примере одной выработки показана на рисунке 4.3. Бурение скважин под установку трехкомпонентных датчиков деформации породы на схеме осуществляется в боку выработки и вне зоны ее влияния, что обеспечивает простоту монтажа и обслуживания.

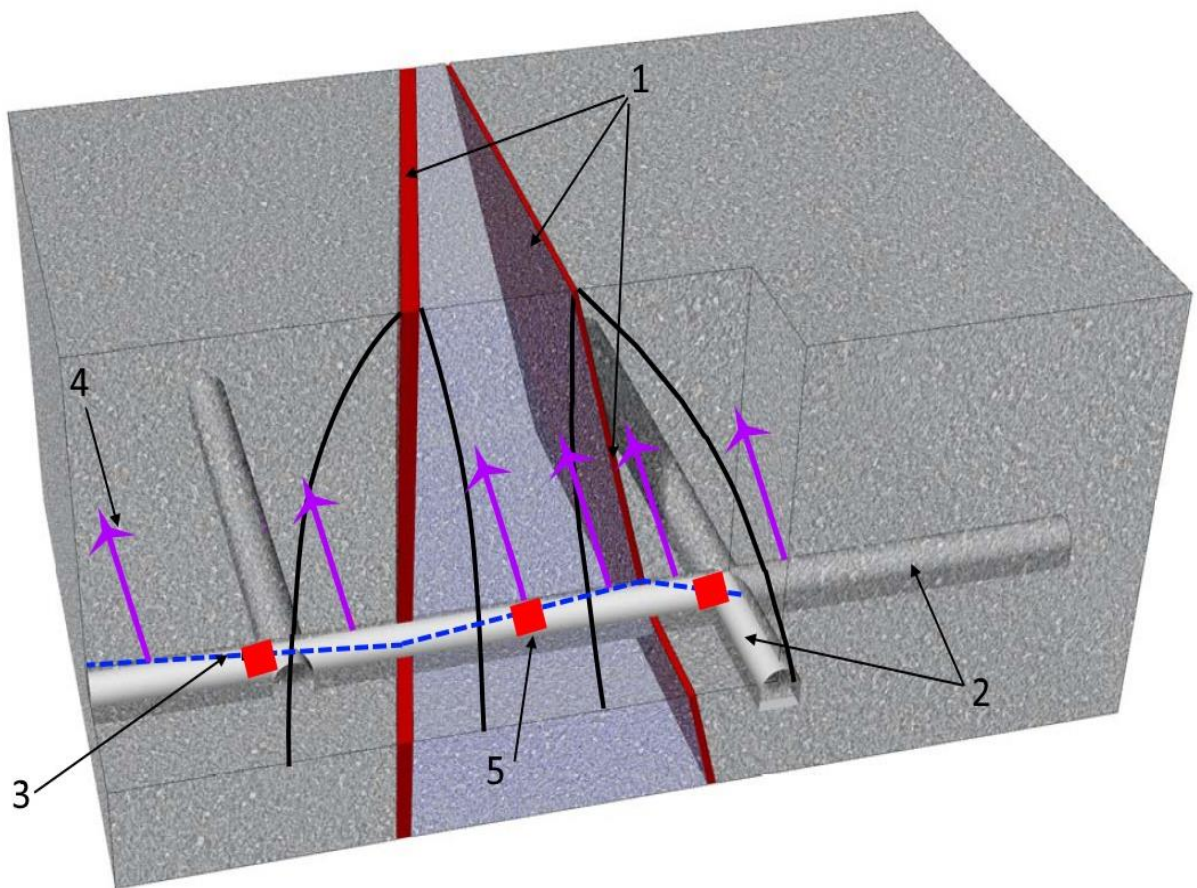


Рисунок 4.3 – Схемы расположения элементов комплексной системы деформационного мониторинга: 1 – структурный блок и разломы, формирующие его в массиве, 2 – горные выработки, 3 – смещения исследуемого блока, регистрируемые инклинометрами, 4 – трехкомпонентные датчики деформации породы, 5 – инклинометры

В условиях действующего горнодобывающего предприятия не всегда существует техническая возможность размещения элементов, согласно выполнению условий наличия пройденной выработки, ее близость к краю блока и в то же время удаленности от зоны влияния тектонического нарушения. Для таких случаев проблема для каждой позиции размещения элемента системы устраняется индивидуально инженерным решением, и выбираются ближайшие координаты возможного размещения.

Данная система обеспечивает получение данных о перемещениях структурных блоков и деформаций скважин в близости от горных выработок, тем самым, позволяет оценивать протекающие процессы динамических событий на разных масштабных уровнях. Проект расположения комплексной системы деформационного мониторинга предназначен для автоматизированного сбора информации о деформациях при статическом нагружении массива и динамических подвижках структурных блоков.

Как было отмечено в главе 1, для полноты и достоверности данных НДС массива и всего геодинамического процесса необходимо использование локальных, региональных методов мониторинга выработках и сейсмических наблюдений. Регистрация сейсмических событий дает возможность характеризовать пространственно-временное распределение сейсмической энергии, локализовать участки массива, но не позволяет оценить процессы накопления или сброса энергии. Сейсмические события совместно с зафиксированными деформациями являются фактическим подтверждением результатов реализации возникающего напряженного состояния на различных масштабных уровнях.

#### **4.1 Сопоставительный анализ данных мониторинговых систем**

Важным этапом обеспечения геодинамической безопасности на рудниках является исследования природы возникновений сейсмических событий. Данные о региональной сейсмичности на территории Мурманской области описаны в работах авторов [22-23,44-45]. ЦГМ выполняет функции по сбору, обработке и

накоплении сейсмической информации, региональному прогнозу удароопасности на основе непрерывной регистрации сейсмичности, мониторингу сейсмичности на подземных рудниках АО «Апатит» в соответствии с Указаниями [80].

При выявлении зон 1 степени региональной удароопасности работы приостанавливаются, люди выводятся из опасных участков. Проводятся профилактические мероприятия. Процессы массовых взрывов проводятся под непрерывным, детальным сейсмическим контролем.

Многолетний анализ, способствует выявлению зон, неподвергающихся сейсмической активности с целью составления плана развития горных работ, проведения прогноза и предотвращения последствий проявлений горного давления, и зон повышенной удароопасности. Краткосрочный анализ способствует обеспечению безопасности горных работ, проводимых на данный момент.

Схема программно-аппаратного комплекса центра геофизического мониторинга, размещенного на промплощадке Кировского рудника представлена на рисунке 4.4.

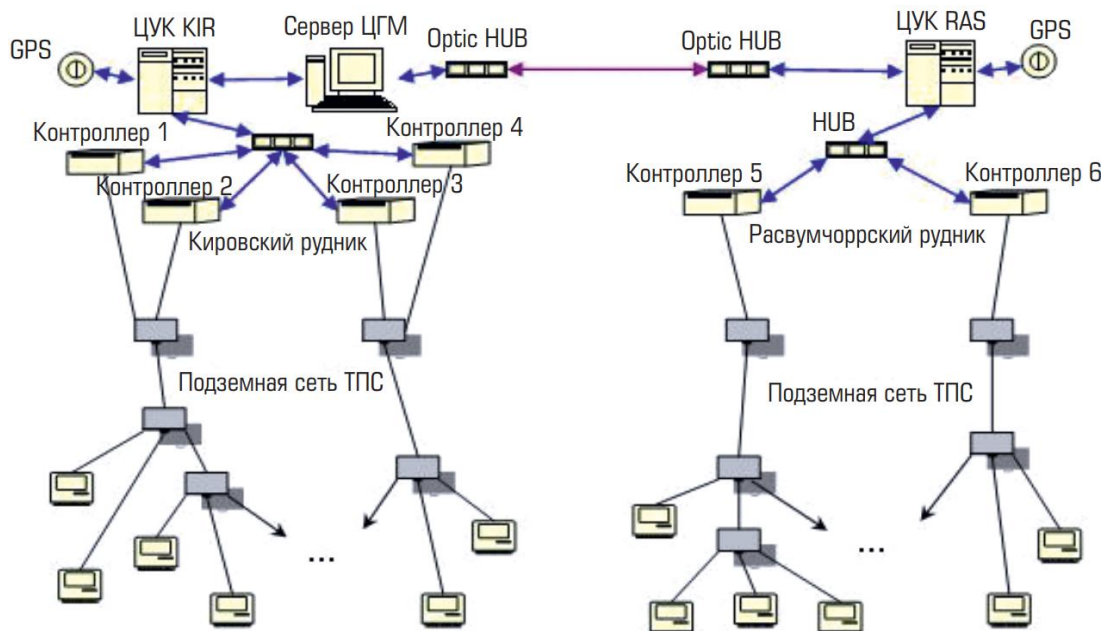


Рисунок 4.4 – Схема телеметрической системы сбора информации центра геофизического мониторинга АО «Апатит» [45]

Центральный управляющий компьютер (Далее - ЦУК) с GPS-часами, способными поддерживать синхронизацию со спутником при потере сигнала на протяжении 12 часов, Подземная сеть телеметрической подсистемы сбора (Далее - ТПС) информации, включающая в себя контроллер телеметрии и подземные сеймопункты.

Результаты регионального прогноза передаются в службу прогноза и предупреждения горных ударов Кировского рудника. Оборудование ЦГМ включает: – 42 подземных сеймопунктов, размещенных в подземных выработках Кировского и Расвумчоррского рудников; – цифровую кабельную телеметрию; – поверхностный программно-аппаратный комплекс сбора, обработки и обобщающего анализа на Кировском и Расвумчоррском рудниках [43]. Проекция сеймопавильонов Кировского рудника нанесены на рисунке 4.5.

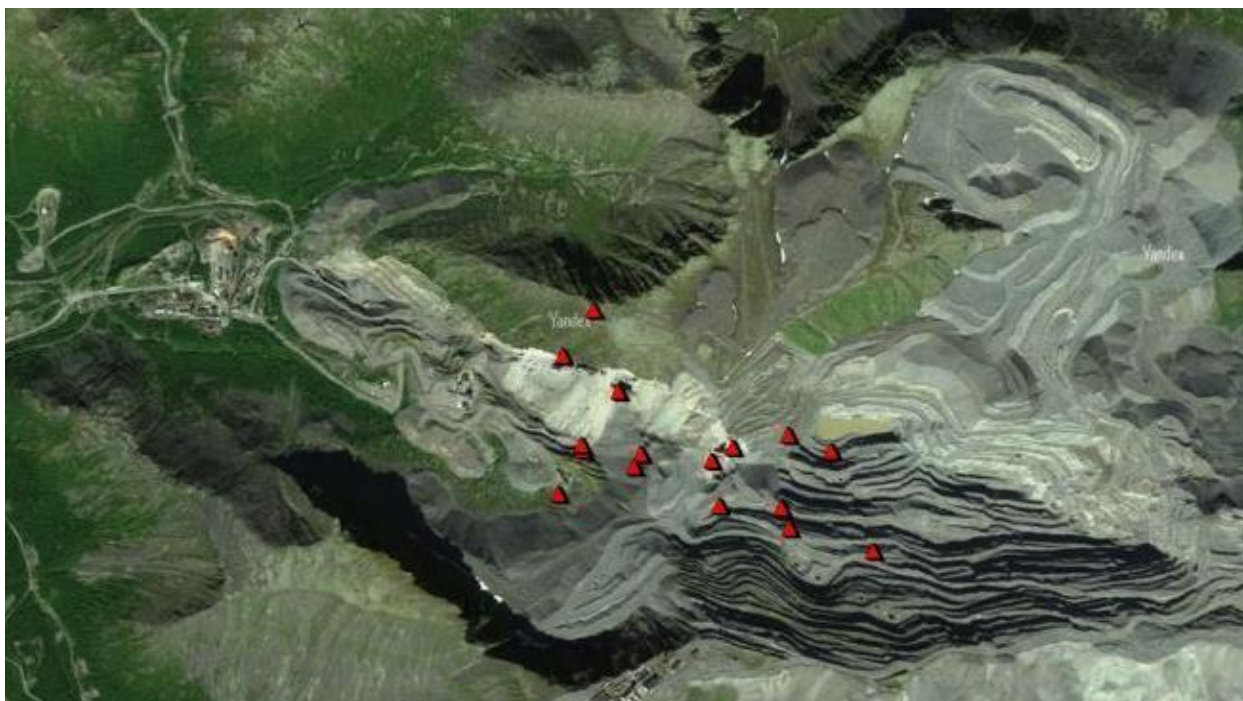


Рисунок 4.5 – Расположение (проекция на дневную поверхность) сеймопавильонов АСКСМ Кировского рудника

В процессе изучения динамики сейсмоактивности рудников в зоне контроля специалистами ЦГМ установлено, что наблюдается пространственная неравномерность распределения зон сейсмоактивности и их временная миграция.

Анализируемые данные представляли собой:

– информационный массив о зарегистрированной информации сейсмических событий, зафиксированных ЦГМ в период с 01.01.2013 по 31.05.2018г;

– информационный массив о зарегистрированной информации энергии взрывов в период с 01.09.2018 по 01.08.2019;

– Показаний инклинометрической системы, установленной на опытном участке Кукисмумчоррского месторождения с 01.09.2018 по 01.08.2019;

При анализе данных учтено более 25тысяч зафиксированных сейсмических событий на Кировском руднике. Наблюдения показывают, что сейсмические события распределены по отдельным разломам и участкам разломов крайне неравномерно, поэтому корректная оценка сейсмической активности разломов производится отдельно для разломов различных рангов.

Исследование проводилось с учетом мощности и локации протекающего сейсмического события, находящихся в пределах исследуемого исследуемой зоны. На рисунке 4.6 приведена анализируемая область, сейсмические события и взрывы принадлежат области ограниченной разломами, по высотной отметке от +30 до +741.зона анализа заштрихована зеленым цветом, ограниченная проекциями горизонтальных сечений разломов.

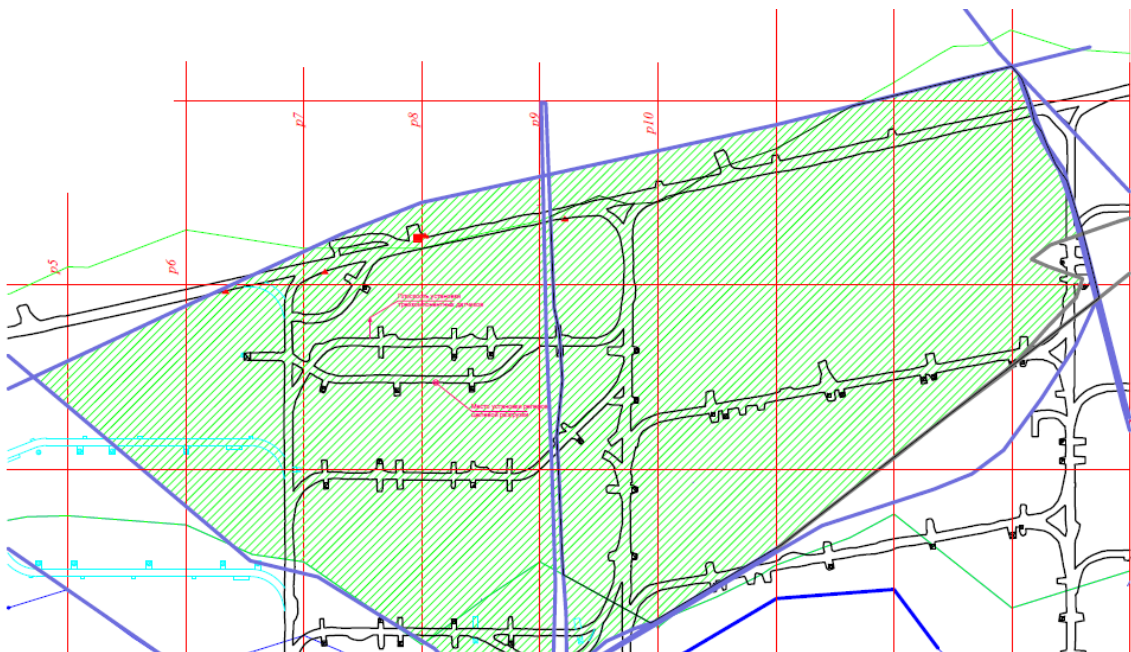


Рисунок 4.6 – Область ограничения анализа сейсмических данных и взрывных работ

Сейсмические события разделялись на категории по количеству выделяемой энергии. На рисунке 4.7 отражен результат проведенного анализа, выявлено типичное распределение, подтверждающее достоверность фиксируемых данных в пределах зоны анализа.

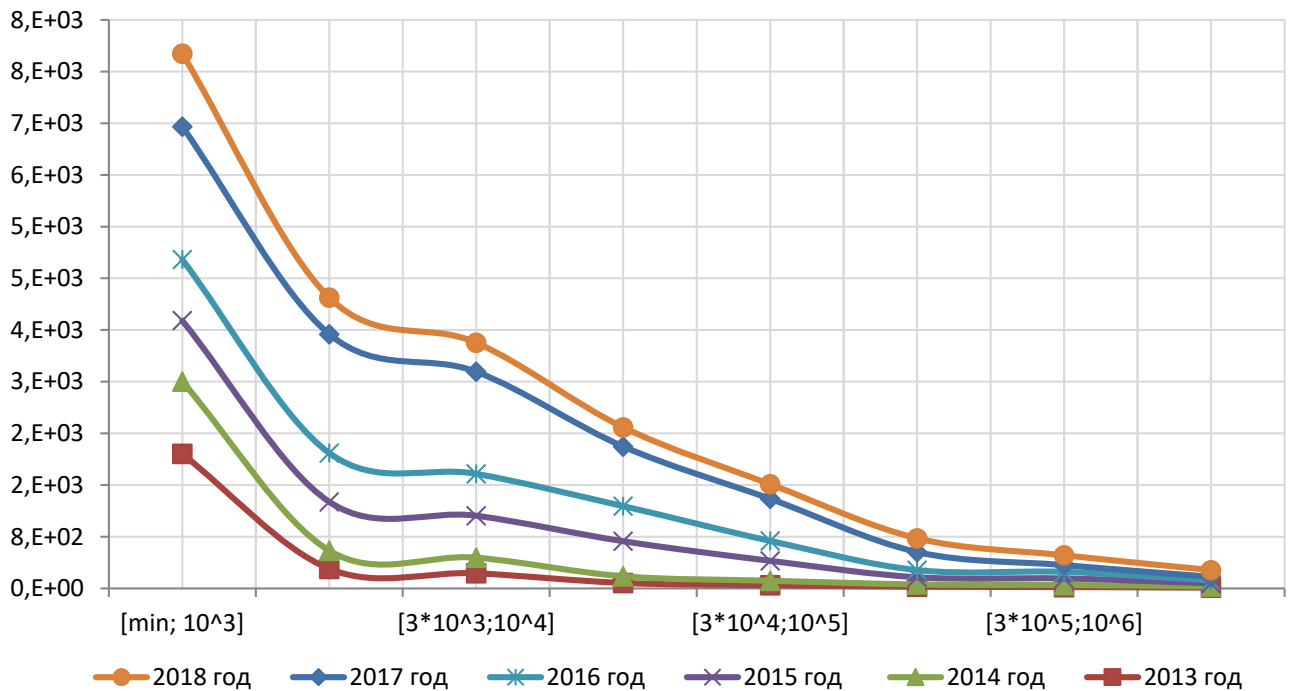


Рисунок 4.7 – Распределение сейсмических событий по количеству выделяемой энергии

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 могут являться мощным энергетическим воздействием на окружающий массив пород, с одной стороны, может привести к подготовке опасного сейсмического события, а с другой – активизировать подготовленное ранее сейсмическое событие. Проведено сопоставление значений данных (фрагмент приведен на рисунке 4.8.), представленных в виде десятичного логарифма от энергий сейсмических событий и взрывов.

При сопоставлении данных сейсмических событий с данными взрывных работ было установлено отсутствие корреляции в пределах исследуемой зоны и при дальнейшем анализе данные взрывных работ не учитывались.

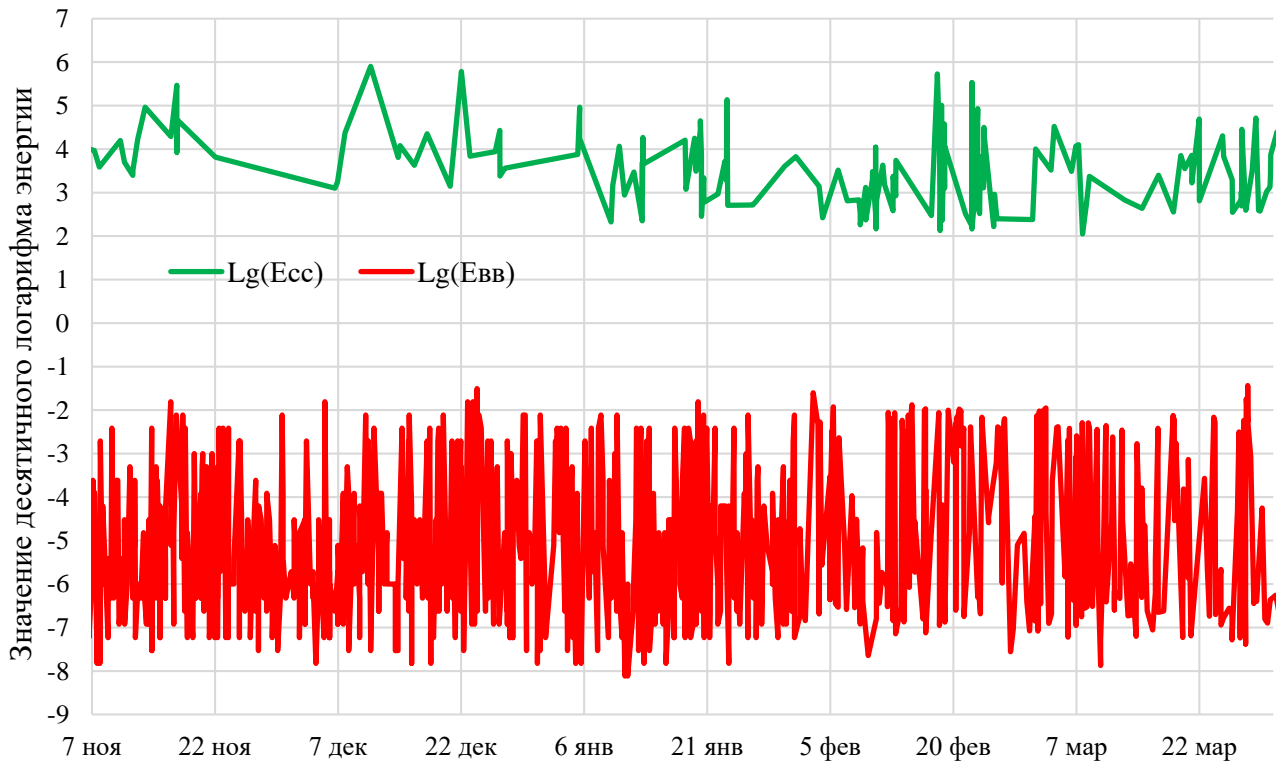


Рисунок 4.8 – Взаимосвязь сейсмособытий и взрывов на Кировском руднике

Для получения более точной 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 прогноза. При этом именно деформационный мониторинг (и рассчитанные по его данным напряжения) позволяет интерпретировать данные сейсмического мониторинга, а комплексное использование дает возможность получать корреляцию подвижек структурных блоков с сейсмическими событиями на уровне тектонических блоков.

Для сравнения данных углов поворота, зафиксированных системой инклинометров, с данными сейсмического мониторинга системы АСКСМ,

ведущегося на Кировском руднике, построены графики с нанесением на них значений энергии сейсмических событий.

Обобщенные данные значений углов наклона от среднеарифметического значения по времени, при сравнении с данными сейсмических событий, полученные за период 07.11.2017 – 28.04.2018, приведены на рисунке 4.9.

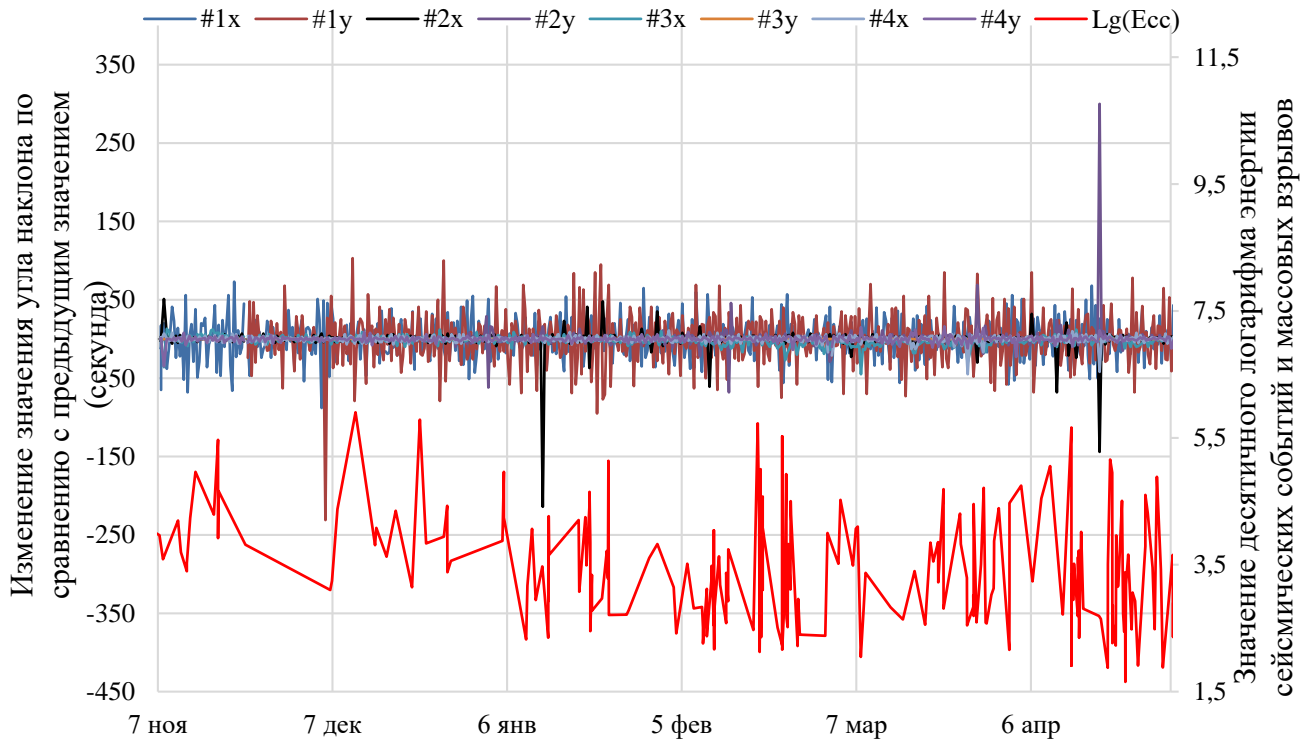


Рисунок 4.9 – График изменения отклонения текущего значения угла наклона от предыдущего значения по времени, при сравнении с данными взрывных работ и текущих сейсмических событий

Для удобства восприятия значения энергии сейсмических событий и взрывов приведены как десятичный логарифм от энергии ( $\lg(E)$ ). Сейсмические события, выбранные для отображения.

При обработке данных, полученных с датчиков, использовались следующие принципы:

- исключение больших перепадов значений на одном датчике при отсутствии подобных значений на других датчиках в то же время;
- приведение всех измерений к единой системе координат. В качестве единой системы координат (Далее – СК) была принята прямоугольная СК с осью OX направленной вдоль оси вентиляционно-откаточного штрека, и перпендикулярной

осью OY (рисунок 4.10). Общие положительные направления принятой СК совпадают с направлением СК АСКСМ-ОКр.

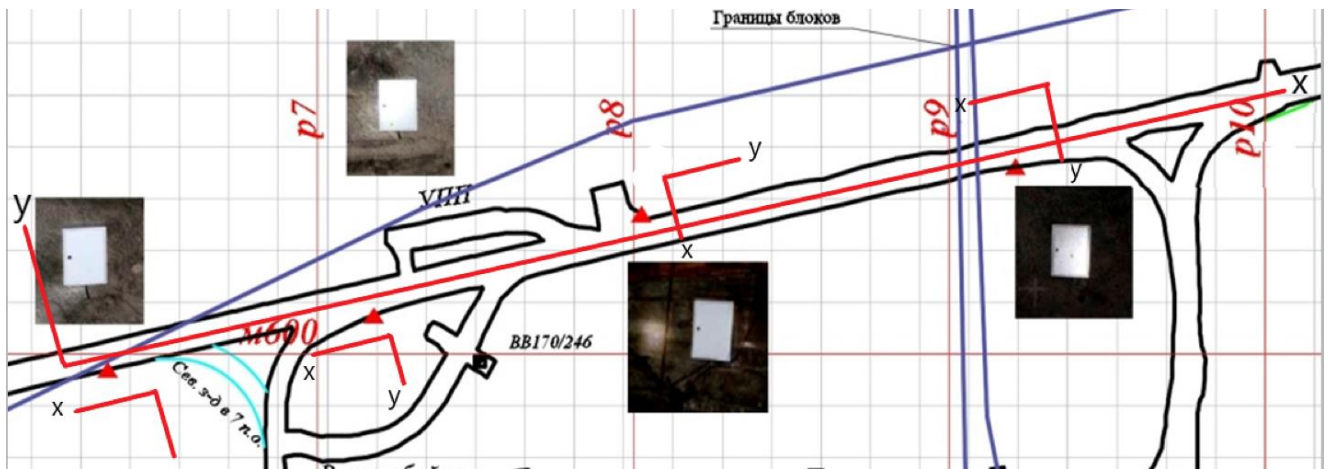


Рисунок 4.10. – Единая система координат

Для получения точных данных для анализа была выбрана область, лежащая в пределах структурных блоков, внутри которых установлены датчики измерения угла наклона.

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.

Для анализа данных использовались два параметра:

– отклонение текущего значения угла наклона от среднеарифметического, рассчитанное по формуле (4.1):

$$\Delta\alpha_x^i = \overline{\alpha_x} - \alpha_x^i; \quad \Delta\alpha_y^i = \overline{\alpha_y} - \alpha_y^i, \quad (4.1)$$

где  $\overline{\alpha_x}, \overline{\alpha_y}$  - среднеарифметические значения угла наклона по осям OX и OY соответственно;  $\alpha_x^i; \alpha_y^i$  – текущие значения углов наклона, по осям OX и OY соответственно.

– изменение значения угла наклона по сравнению с предыдущим значением, рассчитанное по формуле (4.2):

$$\Delta\alpha_x^j = \alpha_x^{j-1} - \alpha_x^j; \quad \Delta\alpha_y^j = \alpha_y^{j-1} - \alpha_y^j, \quad (4.2)$$

где  $\alpha_x^j, \alpha_y^j$  текущие значения углов наклона, по осям ОХ и ОУ соответственно;  $\alpha_x^{j-1}, \alpha_y^{j-1}$  – значения углов наклона, предшествующие текущим значениям, по осям ОХ и ОУ соответственно.

В связи с большим анализируемым временным периодом большим количеством данных для более подробного анализа были рассмотрены временные отрезки с наибольшим зафиксированным углом наклона (более 100 секунд):

- с 01 по 15 декабря 2017 г (рисунок 4.11);
- с 05 по 19 января 2018 г (рисунок 4.12);

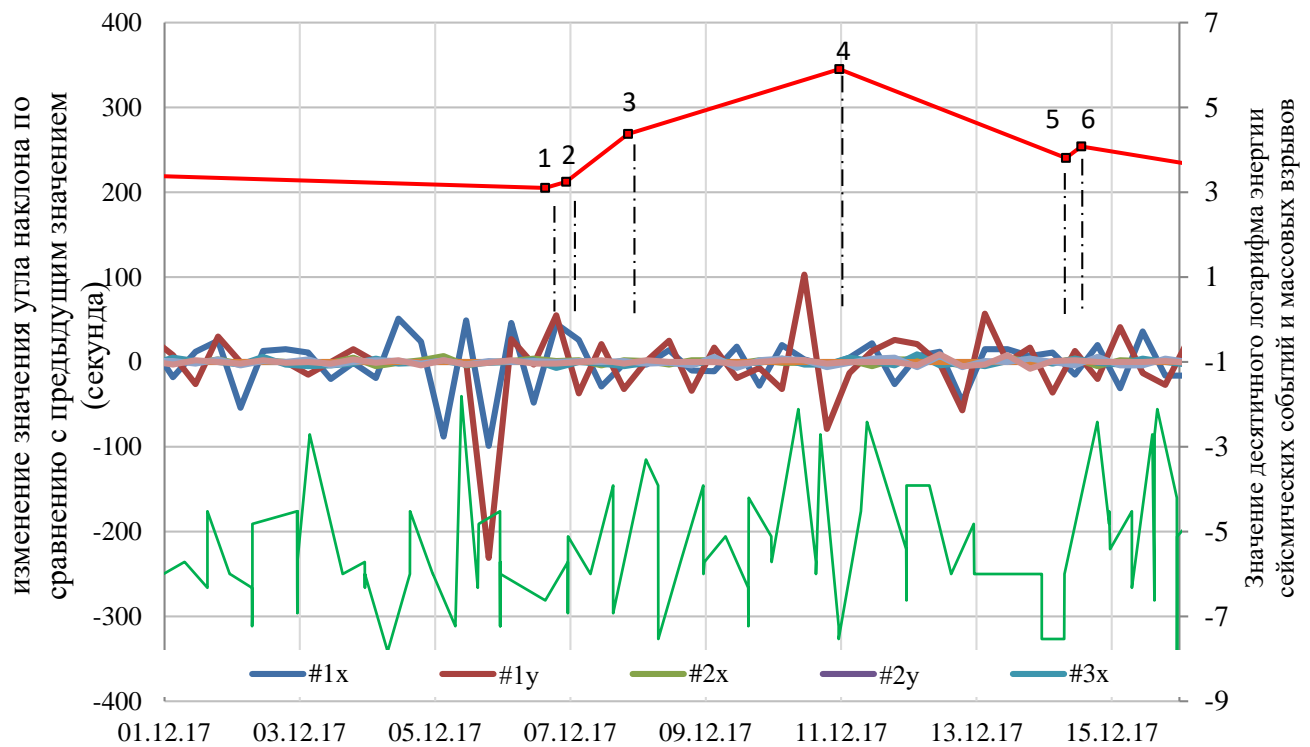


Рисунок 4.8 – График изменения отклонения текущего значения угла наклона от предыдущего значения по времени, при сравнении с данными взрывных работ и сейсмособытий с 01.12.2017 по 15.12.2017

На рисунке 4.11. представлены три явления:

- происходящие во время сейсмического затишья изменения наклонов (до 200 секунд), предвещающие нарастание сейсмической активности (отрезок 1,2);
- сильные (100 секунд) изменения наклонов на пике сейсмоактивности при самом мощном сейсмособытии (около 1000 кДж) (отрезок 3,4);

– более мелкие изменения наклонов на спаде сейсмической активности, по-видимому, означающие установление нового стабильного состояния массива (отрезок 4,5).

Анализа взрывных работ, значимой корреляция между углом наклона и энергией взрывов не наблюдается.

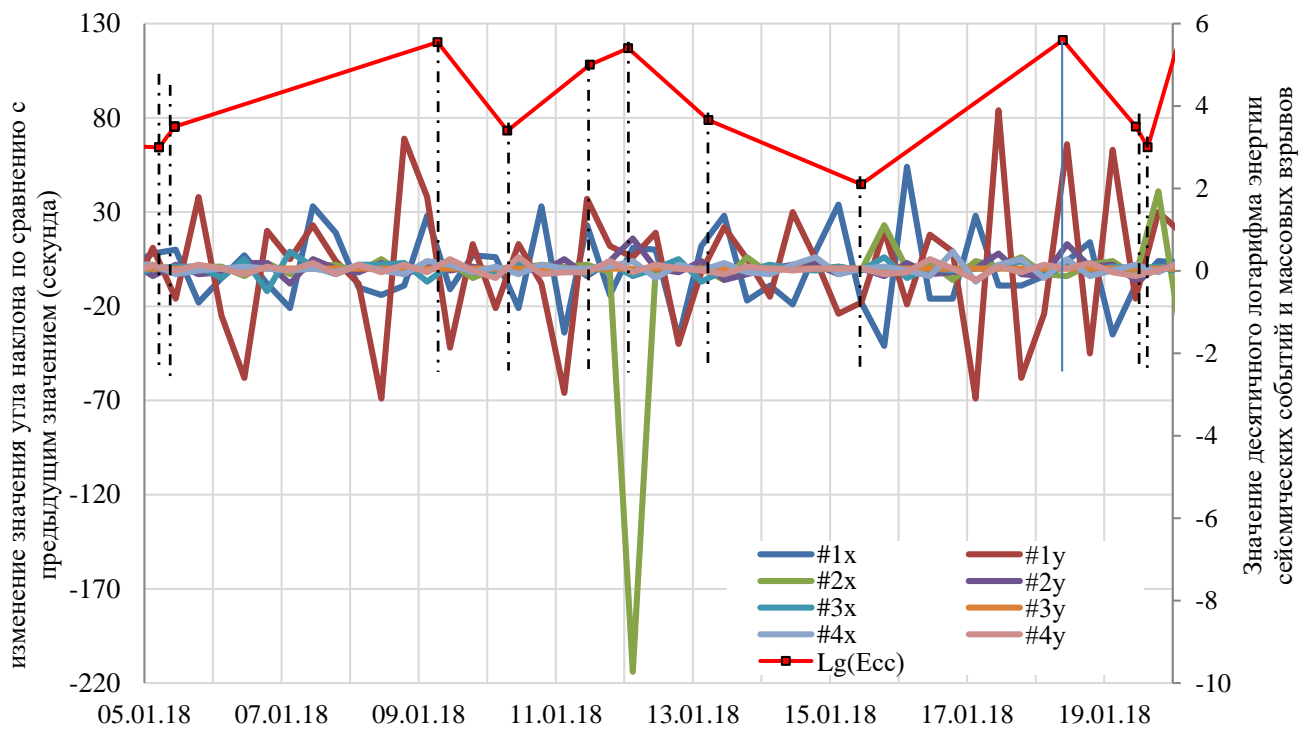


Рисунок 4.12 – График изменения отклонения текущего значения угла наклона от предыдущего значения по времени, при сравнении с данными взрывных работ и сейсмособытий с 05.01.18 по 19.01.18

На рисунке 4.12 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. Самым сильным сейсмическим событиям могут отвечать одновременные с ними подвижки блоков.

Как видно из графиков, большие зафиксированные углы наклона структурного 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.

#### 4.2 Интерпретация полученных результатов на основе разработанных методов прогноза удароопасности на основе деформационного мониторинга.

На основании проведенного анализа полученных данных физического моделирования установлены зависимости смещения контура скважины от прироста напряжений (Рисунок 4.13).

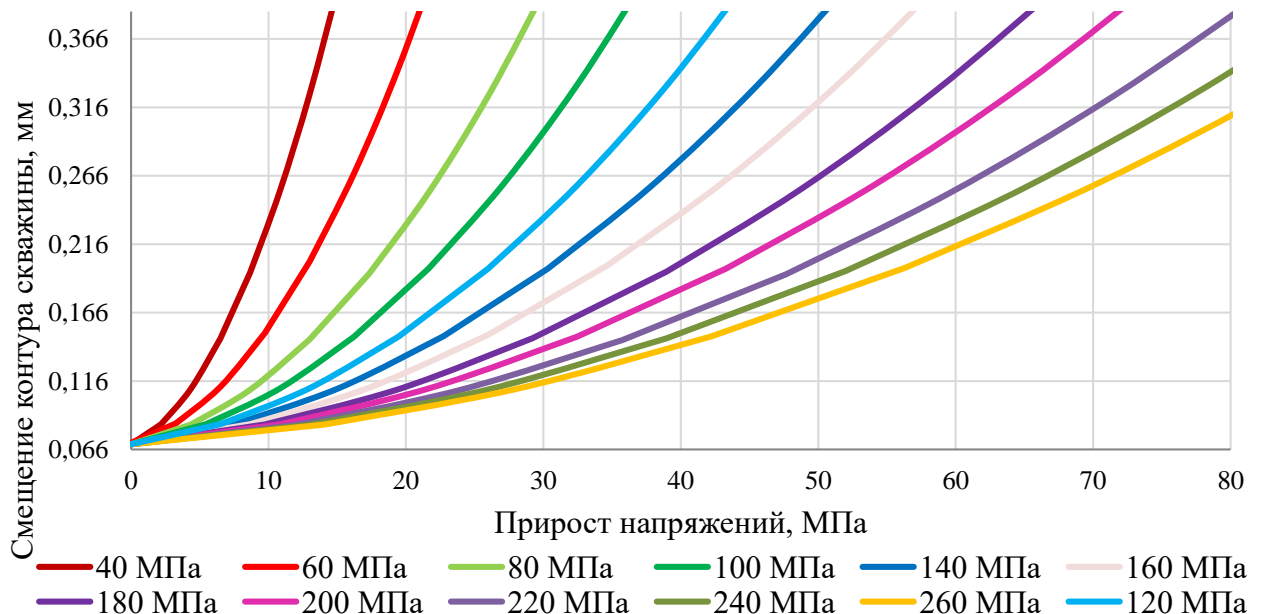


Рисунок 4.10 – Зависимость смещений контура скважины от прироста напряжений в массиве

Полученные зависимости достаточно точно аппроксимируются полиномами второй степени, достоверность аппроксимации составляет  $R^2=0,9818$ .

Критерием возможности возникновения горных ударов для условия Кукисвумчоррского месторождения 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  $\approx 30$  МПа, на гор.+250 м  $\approx 40$  МПа, на гор.+170 м и +90 м получены напряжения, равные соответственно  $\approx 50$  МПа и  $\approx 60$  МПа.

На основании действующих максимальных напряжений по указанным отметкам горизонтов выполнен расчет величин возможного прироста напряжений (Таблица 4.1), для горных пород с различными пределами прочности при одноосном сжатии, в зависимости от качественной характеристики.

Таблица 4.1 – Значения критического прироста напряжений возникновения горных ударов

	Критический прирост напряжений, МПа				
60					0
80				0	10
100			0	10	20
120		0	10	20	30
140	0	10	20	30	40
160	10	20	30	40	50
180	20	30	40	50	60
200	30	40	50	60	70
220	40	50	60	70	80
240	50	60	70	80	90
260	60	70	80	90	100

На основании полученных данных и их сопоставления со значениями смещения контура скважины получены критериальные зависимости для определения удароопасности (Рисунок 4.11).

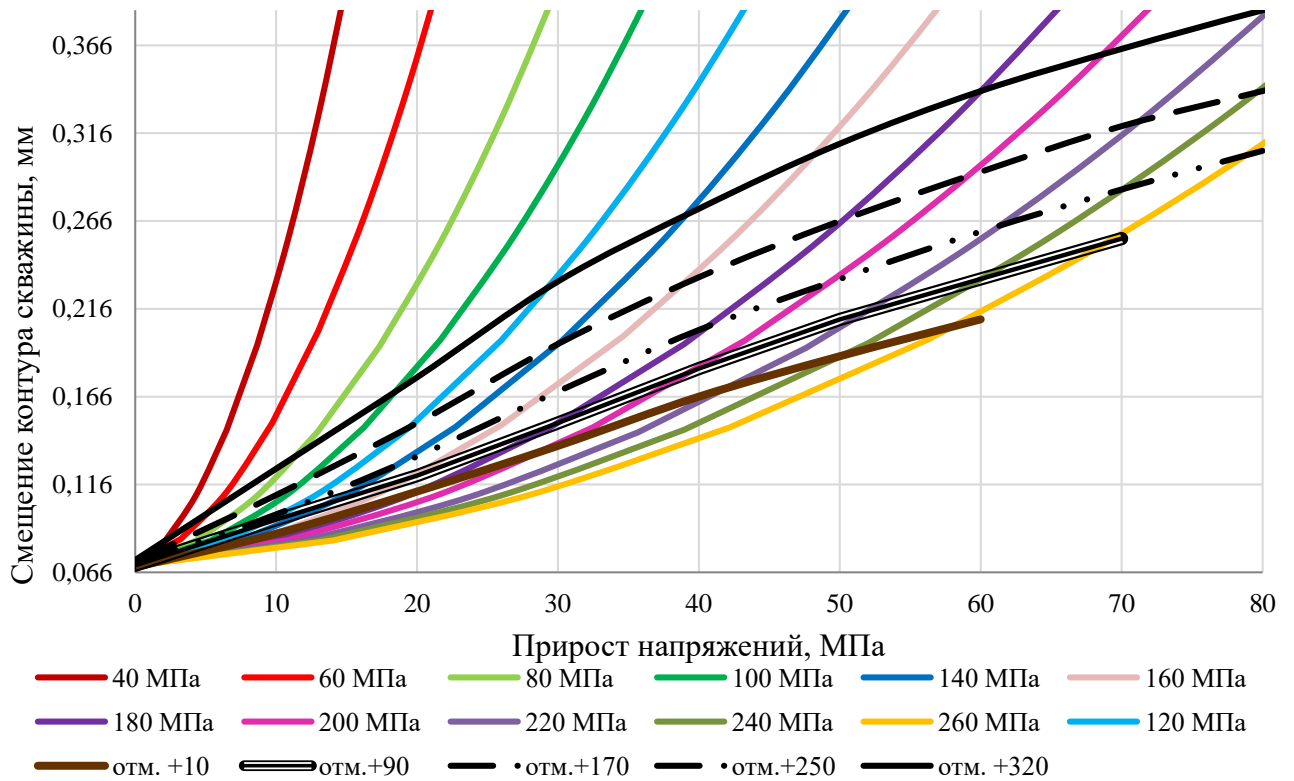


Рисунок 4.11 – Зависимость смещений контура скважины от прироста напряжений в массиве с нанесенными критериями возможности возникновения горных ударов по высотным отметкам

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

Результаты исследований позволяют устанавливать корреляционные зависимости между деформациями контура скважины с величиной напряжений, возникающих в массиве. Установление таких корреляционных связей позволяет интерпретировать показания натуральных деформометров (трехкомпонентных датчиков). Определены критериальные значения деформаций, при которых возможны динамические формы проявления горного давления.

Основной задачей комплексной системы деформационного мониторинга является определение пороговых значений деформаций, при которых возможны динамические формы проявления горного давления.

#### **Выводы по главе 4**

Для прогноза геодинамических явлений в выработках необходимо контролировать квазистатические и динамические процессы с изменениями напряжений (деформационный мониторинг с помощью трехкомпонентных датчиков, инклинометров и измерения напряжений). Для этого важно устанавливать взаимосвязи между значением напряжений, удельной энергией сейсмических событий, энергией взрывных работ и углом поворота геолого-структурного блока.

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

Для получения более точной 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 прогноза. При этом именно деформационный мониторинг (и рассчитанные по его данным напряжения) позволяет интерпретировать данные сейсмического мониторинга, а комплексное использование дает возможность получать корреляцию подвижек структурных блоков с сейсмическими событиями на уровне тектонических блоков.

## 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 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, происходящих 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 уровне.

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 локализовать 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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аверин, А.П. Интегрированная система мониторинга за динамическими процессами на горном предприятии / А.П. Аверин, Ю.А. Филиппов // Новые идеи в науках о Земле: Доклады IX Международной конференции. – 2009 – Т. 2. – С.129.
2. Адушкин, В.В. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия - к волнам маятникового типа в напряженных геосредах / В.В. Адушкин, В.Н. Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – №2. – С. 3-27
3. Асминг, В.Э. Уточнение и проверка скоростной модели распространения сейсмических волн на Кольском полуострове и севере Скандинавии / В.Э. Асминг, С.В. Баранов, И.А. Кузьмин // Север 2003: проблемы и решения / Под ред. В.Т. Калининкова. Изд-во: Апатиты: КНЦ РАН, 2004. – С. 109-118.
4. Баклашов, И.В. Геомеханика: учебник для вузов. В 2 т. / И.В. Баклашов // М.: Московский государственный горный университет, 2004. – 208 с.
5. Баловцев, С.В. Современный подход к геомеханическому мониторингу при эксплуатации месторождений полезных ископаемых на больших глубинах / С.В. Баловцев, Р.В. Шевчук // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №4. – С. 16-20.
6. Барышников, В.Д. Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений полезных ископаемых / В.Д. Барышников, Д.В. Барышников, Л.Д. Гахова, В.Г. Качальский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – №5. – С. 61-73.
7. Жиров, Д.В. Анализ системы «тектоника – НДС – сейсмичность» с использованием 3D геолого-структурных моделей апатит-нефелиновых месторождений Хибин / Д.В. Жиров, С.А. Климов, А.В. Маринин, Л.А. Сим, А.М. Жирова // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН.

Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов. – Москва, 2016. – С. 27-38.

8. Галаганов, О.Н. Деформационный мониторинг как индикатор техногенного влияния на геолого-экологическую среду / О.Н. Галаганов, Т.В. Гусева, И.С. Крупенникова, А.Н. Мокрова, В.И. Осика, В.П. Передерин, Н.К. Розенберг // Мониторинг. Наука и технологии. – 2015. – № 2. – С. 15–24.

9. Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона. Труды IX Всероссийской Ферсмановской научной сессии, посвящённой 60-летию Геологического института КНЦ РАН. Апатиты, 2-3 апреля 2012 г. / Ред. Ю.Л. Войтеховский. – Апатиты: Изд-во К&М. – 2012. – С. 380.

10. Геомеханический мониторинг состояния массива геодезическими методами на полигонах ОАО «Апатит». Отчет. – ГОИ КНЦ РАН, Апатиты. – 2009. – С. 160.

11. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2006 году. – Москва. – 2007. – С. 508.

12. Господариков, А.П. Вычислительный комплекс для расчета прогнозируемых смещений контура протяженной горной выработки / А.П. Господариков, М.В. Максименко, А.А. Сидоренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №5. – С. 36-42.

13. Господариков, А.П. Разработка нелинейных математических моделей и численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород / Записки горного института. – 2016. – Т. 219. – С. 382-386.

14. Гребёнкин, С.С. Управление состоянием массива горных пород: Учебное пособие / С.С. Гребёнкин, В.Л. Самойлов. // – Д.: ВИК, 2010. – 191 с.

15. Гурьев, А.А. АО «Апатит». Флагману горно-химической промышленности России – 85 лет / А.А. Гурьев, М.К. Рыбников, В.В. Давыденко Б.В. Левин // Горный журнал. – 2014. – №10. – С.4-10.

16. Гурьев, А.А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогатительных мощностей АО "Апатит" на основе лучших инженерных решений ПАО «ФосАгро» / А.А. Гурьев // Записки Горного института. – 2017. – Т. 228. – С. 662-673.

17. Демин, В.Ф. Аналитическое моделирование геомеханических процессов в приконтурном массиве горных выработок / В.Ф. Демин, Н.А. Немова, Т.В. Демина // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – С. 74-97.

18. Еременко, В.А. Исследование влияния увеличения объема выработанного пространства на интенсивность динамических явлений / В.А. Еременко, Е.А. Лобанов, Б.Б. Татарников, А.А. Котляров // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 8-й Международной школы молодых ученых и специалистов. Институт проблем комплексного освоения недр, 2011. – С. 41-46.

19. Еременко, В.А. Мониторинг напряженно-деформированного состояния структурно нарушенного и удароопасного массива горных пород / В.А. Еременко, М.В. Рыльников, Е.Н. Есина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – С. 105-116.

20. Еременко, В.А. Разработка метода оперативного мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород / В.А. Еременко, Д.Л. Негурица, Е.Н. Есина // Современные проблемы механики, энергоэффективность сооружений и ресурсосберегающие технологии. Сборник трудов научной школы - семинара молодых ученых и студентов с международным участием, Москва, 2011. – С. 280-289.

21. Жирова, А.М. Анализ непрерывных рядов сейсмичности в массиве пород рудника Расвумчорр (Хибины): первые результаты / А.М. Жирова, Д.В. Жиров // Труды Ферсмановской научной сессии. ГИ КНЦ РАН, 2014. — № 11. – С. 132-136.

22. Жукова, С.А. Влияние природных факторов на проявление техногенной концепция сейсмичности / Ю.В. Федотова, С.А. Жукова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.

Материалы шестой Международной сейсмологической школы. – Обнинск, 2011. – С. 340-343.

23. Жукова, С.А. Оценка влияния природных факторов на проявление сейсмичности Хибинского массива / С.А. Жукова, А.В. Самсонов // Горный журнал. – 2014. – №10. – С.47-51. 172

24. Журавлев, Е.И. Прогноз состояния опасности геодинамических явлений на шахтах в системе мониторинга массива горных пород / Е.И. Журавлев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №9. – С. 107-112.

25. Захаров, В.Н. Обеспечение безопасности горных работ - задача фундаментальной и прикладной науки / В.Н. Захаров, А.З. Вартанов, О.Н. Малинникова, И.В. Петров, А.В. Федаш// ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В Мельникова Российской академии наук» (ИПКОН РАН). – № 4. – 2017.– С. 8-16.

26. Звонарь, А.Ю. Особенности решения проблем прогноза и предупреждения горных ударов на Хибинских апатито-нефелиновых руд / Ю.А. Звонарь, И.В. Сальников, А.В. Пантелеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №1. – С. 207-214

27. Зубков, А.В. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования / А.В. Зубков, Ю.Г. Феклистов, Я.И. Липин, С.В. Худяков, Р.В. Криницын // Проблемы недропользования. – 2016. – №4. – С. 41-49.

28. Зуев, Б.Ю. Основы физического моделирования геомеханических процессов: Учебное пособие / Б.Ю. Зуев. // СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. – С.37

29. Зуев, Б.Ю. Анализ современных методов и средств мониторинга при подземной разработке полезных ископаемых / Л.А. Гладкова, Б.Ю.Зуев, Р.С. Истомин, М.А. Логинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №4. – С. 19-24.

30. Зуев, Б.Ю. Научно-методические основы физического моделирования нелинейных геомеханических процессов при подземной разработке полезных

ископаемых / Б.Ю. Зуев, А.И. Пальцев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №5. – С. 18-28.

31. Зуев, Б.Ю. 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 / СПб.:Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – С. 37.

32. Зуев, Б.Ю. Разработка методов и технических средств определения статических и динамических напряжений в физических моделях слоистых и блочно-иерархических горных массивов. / Б.Ю. Зуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №4. – С. 351-355.

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

34. Зуев, Б.Ю. 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.

35. Зуев, Б.Ю. 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

36. Козырев, А.А., Деформационные предвестники техногенного землетрясения на объединенном Кировском руднике ОАО "Апатит" / М.М. Каган, К.Н. Константинов, Д.В. Жиров // Труды Всероссийской конф. "Геодинамика и

напряженное состояние недр Земли", посв. 80-летию акад. М.В. Курлени. Т. II. ИГД СО РАН, 2011. С. 228–234

37. Козырев, С.А. Проявление техногенной сейсмичности при производстве массовых взрывов на подземных рудниках ОАО «Апатит» / С.А. Козырев, Е.А. Усачев // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 238-245.

38. Козырев, А.А. Изменения деформаций и наклонов геоструктурного блока в процессе подготовки и реализации техногенного землетрясения / А.А. Козырев, М.М. Каган, К.Н. Константинов, Д.В. Жиров // Записки Горного института. – 2013. – Т.199 – С. 230-235.

39. Козырев, А.А. Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород / А.А. Козырев, Э.В. Каспарян, Ю.В. Федотова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №4. – С. 168-191.

40. Козырев, А.А. Методические принципы учета природных факторов при оценке техногенной сейсмичности Хибинского массива / А.А. Козырев, С.А. Жукова, А.В. Самсонов, А.В. Волков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №5. – С. 56-56.

41. Козырев, А.А. Мониторинг деформационных процессов массива пород методом высокоточных геодезических наблюдений / А.А. Козырев, Э.В. Каспарян, В.А. Мальцев, Е.Э. Каспарян, Л.С. Каткова // Сборник трудов конференции. Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых и освоения подземного пространства Северо-Запада России. – 2001 – С. 87-96.

42. Козырев, А.А. Оценка геодинамической и сейсмической ситуации в районе Саамского разлома / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева, А.В. Пантелеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 247-258.

43. Козырев, А.А. Результаты мониторинга напряжений и деформаций блоковых структур массива горных пород по данным деформационных измерений на геодинамическом полигоне Кировского рудника ОАО «Апатит» / А.А. Козырев,

М.М. Каган, К.Н. Константинов, И.Г. Панасенко // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2013. – №1. – С.11-15.

44. Козырев, А.А. Саамский разлом (Хибины) – аномальный характер современных деформаций / А.А. Козырев, Э.В. Каспарьян, Д.В. Жиров, Ю.Г. Смагина // Вестник МГТУ. –2009. – № 4. – С.702-707.

45. Корчак, П.А. Методика получения исходных данных для обеспечения сейсмического мониторинга на подземных рудниках ОАО «Апатит» / П.А. Корчак, С.А. Жукова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №10. – С. 15-20.

46. Корчак, П.А. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» / П.А. Корчак, С.А. Жукова, П.Ю. Меньшиков // Горный журнал. – 2014. – № 10. – С. 42-46.

47. Леонтьев, А.В. Основные направления исследований при организации геомеханического мониторинга природно-технических систем / А.В. Леонтьев // Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 2. – С. 201-204.

48. Леонтьев, А.В. Деформационный мониторинг движений породного массива на железорудных месторождениях горной Шории / А.В. Леонтьев, Т.В. Лобанова // Гео-Сибирь. – 2014. – Т.2. – № 4. – С. 133-138

49. Лобанова, Т.В. Деформационный мониторинг процессов накопления напряжений для контроля удароопасности массива при отработке Таштагольского месторождения / Т.В. Лобанова, В.А. Квочин, В.К. Климко // Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 2. – С. 148-153.

50. Ляшенко, В.И. Развитие научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений. / В.И.Ляшенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №3. – С. 109-135.

51. Медведева, И.З. Формирование инновационного потенциала компании «ФОСАГРО» с использованием проектного подхода / И.З. Медведева // Ученые записки Череповецкого государственного университета. – 2016. – №1. – С.29-34

52. Мельников, Н.Я. 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.

53. Мещанинов, С.К. Методы моделирования и управления надежностью функционирования горных выработок. Д.: Национальный горный университет. 2011. – 360 с.

54. Модернизация автоматизированных подсистем контроля состояния массива пород и разработка цифровой геодинамической схемы района апатитовых рудников. – Отчет Горного института Кольского НЦ РАН, Кировск-Апатиты. – 2004

55. Морозов, К.В. Первые результаты эксплуатации автоматизированной системы подземного деформационного мониторинга массива горных пород на руднике «Глубокий» ОАО «ППГХО» / К.В. Морозов, В.И. Экгарт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №7. – С. 516-523.

56. Опарин, В.Н. Разработать, изготовить и внедрить многоканальный продольный деформометр для детального контроля напряженно-деформированного состояния пород вокруг подземных выработок. – Новосибирск. // Отчет СО ИГД РАН, научный руководитель В.Н Опарин, 2000

57. Опарин, В.Н. Экспериментальные испытания многоканального оптоэлектронного продольного деформометра / В.Н. Опарин, В.Ф. Юшкин, А.А. Акинин и др. // ФТПРПИ. — 2000 — № 6. –263 С.

58. Осика, И.В. Мониторинг деформационных процессов на крупных промышленных предприятиях / И.В. Осика, А.Н. Демидкова, К.Н. Константинов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 1. – С. 60-66.

59. Осика, И.В. Применение геофизических датчиков из кварцевого стекла в системах контроля строительных сооружений и крупных механизмов / И.В. Осика, Б. М. Кочетков, Е.И. Павлов, И.П. Качан, В.А., Пчелинцев // Наука и технические разработки. – 2017. – № 1. – С. 19-32.

60. Официальный сайт «ОАО Авангард» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.avangard.org>
61. Официальный сайт ОА «Сенсор Системс Солюшнс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sensor-systems.ru>
62. Панин, В.И. Исследование закономерностей перераспределения полей напряжений при обработке глубоких горизонтов подземных рудников ОАО «Апатит» и разработка экспертных систем выбора технических решений по повышению безопасности и эффективности горных работ / Панин В.И и др. – Заключительный отчет по договору №26107. – Горный институт КНЦ РАН – Апатиты. – 2012. – 30с.
63. Панин, В.И. Управление геодинамическими рисками при ведении горных работ в геодинамически активных районах / В.И. Панин, А.А. Козырев // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения Северо-Запада России. – Материалы Всероссийской конференции. – Петрозаводск. – Институт геологии КарНЦ РАН. – 2007. – С. 287-290.
64. **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 : заявлено 13.06.2018 : опубликовано 12.02.2019 / Цирель С.В., Мельницкая М.Е., Лодус Е.В.; заявитель Санкт-Петербургский Горный университет. – с.6.
65. **Патент № 2106493 Российская Федерация, МПК E21C 39/00 (2006.01).** Способ оценки предельного напряженного состояния горных пород и устройство для его осуществления : N 1382955 : заявлено 26.09.1995 : опубликовано 10.03.1998 / Репко А.А, Рева В.Н., Карташов Ю.М, Сеницын А.В.; заявитель Сибирское отделение института горного дела. – с.7.
66. Петров, В.А. Геодинамическое моделирование рудоносных геологических структур (на примере района Стрельцовского урановорудного поля)

/ В.А. Петров, А.Б. Лексин, В.В. и др. // Геология рудных месторождений. – 2017. – Т. 59. – №3. – С.173-200.

67. Пожиленко, В.И. Геология рудных районов Мурманской области / В.И. Пожиленко, Б.В. Гавриленко, Д.В. Жиров, С.В. Жабин. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. – 359 с.

68. Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях. Материалы научно-практической конференции, посвященной 25-летию Горного института Уро РАН и 75-летию основателя и первого директора института члена-корреспондента РАН Аркадия Евгеньевича Красноштейна. – П: Горный институт УрО РАН, 2014. – 412 с.

69. Проведение высокоточных нивелирных, светодальномерных и GPS-наблюдений для контроля за проявлением геодинамических процессов в районе совместных работ Центрального и Расвумчоррского рудников (сев.-зап. борт карьера и 6 рудоспуск) с целью обеспечения безопасности ведения горных работ. Отчет. – ГОИ КНЦ РАН, Апатиты. – 2012. – 429 с.

70. Протосеня, А.Г. Оценка прочности блочного горного массива методом численного моделирования / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербило // Горный журнал. – 2016. – № 1. – С. 47-55.

71. Разработка и внедрение подземной автоматизированной системы сбора данных для получения пространственно-временных характеристик процесса деформирования пород в районе влияния очистной добычи на руднике «Глубокий» ОАО «ППГХО» Этапы 1-3: отчеты по договору / Морозов К.В. и др. – СПб, 2014. – 15-21с.

72. Рассказов, И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И.Ю. Рассказов. – М.: Горная книга. – 2008. – 329 с.

73. Рассказов, И.Ю. Исследование удароопасности на подземных рудниках Дальнего Востока и Забайкалья / И.Ю. Рассказов // Проблемы недропользования. – 2018. – №3. – С. 128-139.

74. Руководство по региональному прогнозу удароопасности на основе непрерывной регистрации сейсмичности в условиях Объединенного Кировского рудника / Коллектив авторов // ОАО «Апатит». – Кировск, 2007. – 33 с.

75. Сашурин, А.Д. Диагностика геодинамической активности с целью обеспечения безопасности объектов недропользования / А.Д. Сашурин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №6. – С. 274-278.

76. Сидоров, Д.В. Оценка напряженного состояния рудного массива при ведении горных работ в зонах мелко-амплитудных тектонических нарушений / Д.В. Сидоров, Н.И. Косухин, А.Н. Шабаров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №12. – С. 142-148.

77. Сидоров, Д.В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения / Д.В. Сидоров, М.И. Потапчук, А.В. Сидляр // Записки Горного института. – СПб. – 2018. – Т.534. – С. 604–611

78. Сим, Л.А. Связь тектонических напряжений и техногенных землетрясений на примере месторождения Плато Расвумчорр (Хибинский интрузив) / Л.А. Сим, Д.В. Жиров, П.А. Корчак, С.А. Жукова // Материалы второго Всероссийского семинара-совещания. под редакцией В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. – М. – 2013. – С. 292-300.

79. СП 23.133330.2018. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 (С Изменением N1).

80. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, В.В. Рыбин и др. // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Акционерное общество «Апатит». Апатиты: ООО «КазМ», 2016. – 112 с.

81. Федотова, Ю.В. Оценка уровня геодинамической безопасности на Апатитовых рудниках. / Ю.В. Федотова, В.И. Панин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №4. – С. 344-353.

82. Фрейдин, А.М. Подземная разработка рудных месторождений: учебное пособие / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов; под ред. чл.-корр. РАН В.Н. Опарина. – Часть 1. – Новосибирск: ИГД СО РАН – НГУ, 2012. – 208 с.
83. Цирель, С.В. Оценка технико-экономической эффективности применения мероприятий по безопасному ведению горных работ / А.А. Просветова, В.А. Носков, С.В. Цирель // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №11. – С. 291-296.
84. Шабаров, А.Н. Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах / А.Н. Шабаров, С.В. Цирель, К.В. Морозов, И.Ю. Рассказов // Горный журнал. –2017.–№9. – С. 59-64.
85. Шабаров, А.Н. О решении проблемы прогноза и предотвращении геодинамических явлений на шахтах России. / А.Н. Шабаров// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №7. – С. 279-284.
86. Шабаров, А.Н. Обеспечение геодинамической безопасности при подземной разработке месторождений / А.Н. Шабаров, С.В. Цирель // Горный журнал. – № 9. – 2017 . – С. 65-70.
87. Шабаров, А.Н. Оценка производственного приемлемого риска в горнодобывающей отрасли / А.Н. Шабаров, Г.И. Коршунов, Е.Г. Булдакова З.Н. Черкай // Записки Горного института. – СПб. – 2012. – Т.197. – С. 276–278.
88. Шабаров, А.Н. Современная тектоника и геодинамика Хибин / В.М. Тряпицин, А.Н. Шабаров. – Кострома. – 2007. – 146 с.
89. Шапошник, Ю.П. Обеспечение геодинамической безопасности при разработке Хибинских месторождений / Ю.П. Шапошник, А.Ю. Звонарь, С.А. Можаяев, М.В. Аккуратов // Записки горного института. – Т. 1888. – 2010. – С. 104-108.
90. Шаров, Н.В. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы: Кн.1. Землетрясения / Н.В. Шаров, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукин. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, – 2007. – 381 с.

91. Шеховцов, В.С. Основы научных исследований в горном деле: учебное пособие 2-е изд., перераб. и доп. / В.С. Шеховцов. – Новокузнецк.: изд-во СибГУУ, 2006. – 136 с.
92. Широков, В.Н. Систематизация методов изучения напряжённого состояния массивов горных пород по информационному критерию / В.Н. Широков // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – 2014. – С. 639-645.
93. Шкуратник, В.Л. Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко. – М.: МГГУ, 2012. – 112 с.
94. Юшкин, В.Ф. Измерительная система мониторинга деформационно-электромагнитных процессов в массивах горных пород / В.Ф. Юшкин, Г.И. Кулаков, Е.В. Соколов, С.В. и др. // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы. — Новосибирск: ИГД СО РАН. – 2010. – Т. 1. – С. 144-151.
95. Яковлев, Д.В. Автоматизированные системы контроля проявлений горного давления, основанные на регистрации динамики деформаций контролируемых объектов в условиях изменяющихся напряжений (АСКГД) / Д.В. Яковлев, А.Е. Удалов, Г.Л. Мильман // Сборник научных трудов ВНИМИ. – 2012. – С. 52-63.
96. Asanov, V.A. Tool control method of strain-stress state of marginal salt rocks / V.A. Asanov, V.V. Anikin, N.K. Beltyukov, A.V. Evseev, V.N. Toksarov // Eurasian Mining. – 2013. – № 2. – P. 20-24.
97. Chen, L.W. Numerically modeling the influence of rheological properties on tectonic deformation of Tibet plateau / Chen L.W., Zhang, Z.M., Ye, J.Y., et al// J. Geodesy Geodyn. 2011. Volume 31 (3). P. 17-28.
98. Figueiredo, B. Determination of the stress field in a mountainous granite rock mass / Figueiredo B., Cornet F.H., Lamas L., Muralha J. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2014. – V. 72. – P. 7–48.

99. Hoek, E. Strength of rock and rock masses / *ISRM News Journal*. – 1994. – V. 2. – P. 4–16.
100. **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.
101. Slawomir, J.Gibowicz. Seismicity induced by mining: Ten years later / Slawomir J.Gibowicz, Stanislaw Lasocki// *Advances in Geophysics*. – 2001. – V. 44. – P. 39-181.