

УДК 622.27;622.271.3

На правах рукописи

**ӘБДІКӘРІМОВА ГҮЛНҮР БАҚЫТБЕКҚЫЗЫ**

**Разработка научно-методических основ для создания единой системы  
геомониторинга за напряженно-деформированным состоянием массива  
горных пород на Качарском карьере**

6D070700-Горное дело

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)

Научный консультант:  
академик НАН РК,  
доктор технических наук  
Шамганова Л.С.

Зарубежный консультант:  
кандидат технических наук  
Панжин А.А. (Россия)

Алматы, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....</b>	<b>4</b>
<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>1 ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Актуальность проблемы .....	12
1.2 Исследование существующей практики методов оценки напряженно-деформационного состояния массива горных пород и средств геомеханического мониторинга.....	15
1.2.1 Геомеханический мониторинг геофизическими методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.....	18
1.2.2 Геомеханический мониторинг деформационными методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.....	24
1.2.2.1 Методом прямых измерений деформаций. ....	24
1.2.2.2 Методы моделирования геомеханических процессов и прогнозирование участков развития аварийных деформаций. ....	27
1.3 Горно-геологические, геомеханические и горнотехнические условия отработки Качарского месторождения.....	30
1.3.1 Инженерно-геологическая характеристика месторождения. Районирование карьера по геомеханическим условиям ведения горных работ.....	31
1.3.2 Гидрогеологическая характеристика месторождения.....	33
1.3.3 Анализ современных геодинамических движений Качарского карьера. Исследование напряженно-деформированного состояния горного массива Качарского карьера. ....	34
1.3.4 Обрушение юго-западного борта карьера.....	37
1.3.5 Система мониторинга состояния устойчивости прибортового массива Качарского карьера.....	39
1.3.6 Инженерно-геологические условия разработки горного массива Качарского карьера.....	41
1.4 Анализ и обобщение опыта исследований.....	41
1.5 Обоснование цели и задач исследований.....	45
Выводы по Главе 1.....	47
<b>2 Определение закономерностей распределения НДС и разработка методики прогноза нестабильных участков в прибортовом массиве Качарского карьера, вызванных действием напряжений с использованием численного моделирования НДС.....</b>	<b>48</b>

2.1	Закономерности формирования напряженного состояния массива.....	48
2.2	Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород.....	50
2.3	Критерии оценки устойчивости бортов и уступов карьера по результатам численного моделирования.....	52
2.4	Реализация численного моделирования напряженного состояния породного массива Качарского карьера.....	54
2.4.1	Разработка геомеханической модели Качарского месторождения.....	54
2.4.2	Оценка уровня действующих напряжений в массиве и приконтурной зоне Качарского карьера до проектной глубины численными методами.....	58
Выводы по Главе 2.....		67
<b>3</b>	<b>Организация единой системы геомониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород Качарского карьера.....</b>	<b>68</b>
3.1	Обзор существующих инструментов мониторинга и их эффективность.....	68
3.2	Поверхностные методы мониторинга.....	73
3.3	Методы подземного мониторинга.....	78
3.4	Организация единой системы геомониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород Качарского карьера.....	78
3.4.1	Оценка геомеханических рисков Качарского карьера.....	78
3.4.2	Выбор допустимых значений контролируемых параметров (смещений) .....	88
Выводы по Главе 3.....		90
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>		<b>91</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А - Распределение основных напряжений в направлении ЮЗ_СВ (по простирацию рудного тела) по результатам численного моделирования в программе RS2 RocScience.....</b>		<b>93</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>		<b>99</b>

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие документы и стандарты:

Правила присуждения ученых степеней, утвержденных приказом МОН РК от 31 марта 2011 года № 127.

ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;

ГОСТ 7.9-95 (ИСО 214 -76) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования.

ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АО «ССГПО» - Акционерное общество «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение»

ГГС - государственной геодезической сети

ГЛОНАСС - глобальная навигационная спутниковая система

ГМ - геомеханическая модель

ИГД им. Д.А. Кунаева - Институт горного дела им. Д.А. Кунаева

КарГТУ – Карагандинский технический университет

МКЭ - метод конечных элементов

НДС - напряженно деформационное состояние

ПО - программное обеспечение

СВ - северо-восток

СЗ - северо-запад

ССП - спектрального сейсмопрофилирования

ЦПТ - циклично-поточная технология

ЮВ - юго-восток

ЮЗ - юго-запад

GNSS (ГНСС) – Глобальная навигационная спутниковая система, предназначенная для определения местоположения

GPS - Global Positioning System - система глобального позиционирования

Hazard Map Series TDR- time domain reflectometer - рефлектометр

TARP (Trigger action response plan) - Планы триггерных действий и реагирования

WGS-84 (World Geodetic System 1984) - всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технологической проблемы.**

В настоящее время на многих крупных обрабатываемых месторождениях полезных ископаемых осуществляется переход к отработке глубоких горизонтов, характеризующихся действием более высоких, по сравнению с приповерхностными, напряжений, измененными деформационно-прочностными свойствами массивов горных пород, в результате чего на передний план выходят проблемы связанные с обеспечением устойчивости горных выработок [1].

В условиях активной эксплуатации и значительного увеличения глубины отработки месторождений полезных ископаемых необходим непрерывный мониторинг изменений окружающей среды, напряженно-деформированного состояния и выявление других отрицательных факторов. Напряженное состояние массива горных пород является основным фактором геомеханической ситуации при отработке глубокими карьерами. Для контроля развития геомеханической ситуации необходима организация периодического геомеханического мониторинга [2].

Под геомеханическим мониторингом понимается комплексная система регламентированных наблюдений, оценки и прогноза изменений геомеханического состояния массива горных пород при разработке полезного ископаемого в целях выявления опасных проявлений и выработки рекомендаций по управлению горным давлением [3].

В настоящее время действие тектонических напряжений установлено во многих районах мира, особенно в тектонически активных регионах [4].

Серьезную озабоченность, особенно при разработке глубоких карьеров, вызывает снижение риска обрушения откосов в массиве твердых пород с заметно хрупким поведением.

### **Основание и исходные данные для разработки темы.**

В настоящее время назрела необходимость учитывать реальное напряженно-деформированное состояние при освоении все более глубоких горизонтов месторождений твердых полезных ископаемых. В высоконапряженных, массивных и хрупких породах смещения могут быть сложно выявляемыми, вплоть до момента обрушения. Управление неустойчивыми откосами, вызванных действием НДС, является одним из наиболее важных вопросов при решении вопросов безопасности в Качарском карьере.

В качестве исходных данных для разработки темы исследований выбраны геомеханические условия процессов деформации земной поверхности Качарского карьера.

### **Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы.**

Качарское месторождение характеризуется сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями залегания. Длительные сроки открытой разработки месторождения и связанные с ней большие объемы

перемещения горной массы способствовали нарушению естественного напряженно-деформированного состояния земной коры в районе месторождения.

На Качарском карьере непредвиденный деформационный процесс, вызванный изменением НДС массива под действием геодинамических движений, вызвал значительные разрушения и временную остановку работы карьера в 2015 году и экономические потери. Юго-западный борт при строительстве бетонных подпорных стенок претерпел сильное деформирование в отметках минус 30 – минус 120 м. Причиной разрушения борта стали повышенные тангенциальные напряжения сжатия, действующие вдоль борта карьера на этом участке, вызывающие разрушения сдвигового характера.

**Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработке, патентных исследованиях и выводы из них.**

Высокий уровень проведения исследований будет обеспечен за счет применения современных программных средств и передовых методов, обработки результатов с использованием новейших программных продуктов, апробации полученных данных и их представления.

Все это свидетельствует о высоком научно-техническом уровне проводимых исследований.

Анализ научно-технической литературы и патентных источников в области сдвижений и деформаций земной поверхности при разработке рудных месторождений свидетельствует о высокой актуальности проведения исследований, направленных на выявление процессов деформации откосов горных пород, способных привести к их обрушению. Эта исследования особенно актуальны для карьеров, где добыча идет высокими темпами, и в то же время безопасность персонала и оборудования должны быть гарантированы.

**Сведения о метрологическом обеспечении диссертации.**

Диссертация выполнена на основе анализа исследований, выполненных отделом геомеханики Института Горного дела им. Д.А. Кунаева и технической службой Качарского месторождения в период 2018-2019 гг. Соискатель являлся одним из основных исполнителей при выполнении научно-исследовательского проекта на тему – «Исследование деформационных характеристик юго-западного борта Качарского карьера и разработка рекомендаций по параметрам конструктивных элементов борта в конечном положении»(1 этап - Период проектирования).

Лаборатория филиала РГП на ПХВ «Национального центра по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан» Института горного дела им. Д.А. Кунаева аккредитована в качестве субъекта научной и (или) научно-технической деятельности в соответствии со статьёй 23 Закона Республики Казахстан «О науке» от 24 декабря 2019 г.

Формирование единой геомеханической модели Качарского месторождения осуществлялось с использованием программного комплекса Datamine. Численное моделирование геомеханических процессов проводилось в программной среде RS2, разработанной компанией RocScience.

Расчет местоположения на поверхности карьера спутникового интерферометрического радара с синтезированной апертурой (InSAR) для мониторинга обрушений откосов выполнялось в программном обеспечении Planning Tool.

В табличных и графических данных использованы единицы измерений, соответствующие метрологическим правилам и нормам Международной системы единиц СИ.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.**

Диссертационная работа была выполнена Автором в рамках научно-исследовательских работ отдела геомеханики Института горного дела имени Д.А. Кунаева по грантовому финансированию за 2020-2022 гг. «Управление горным массивом для обеспечения безопасной отработки месторождения на основе комплексной геомеханической модели» АР08053358, по хоздоговору за 2018-2019 гг. «Исследование деформационных характеристик юго-западного борта Качарского карьера и разработка рекомендаций по параметрам конструктивных элементов борта в конечном положении» (1 этап - Период проектирования).

**Актуальность** – увеличение глубины открытых горных работ сопровождается ростом напряжений в горном массиве пород, в результате чего повышается риск обрушения бортов карьера, что приводит к существенным сбоям в его работе. Для уменьшения таких рисков реализуется система мониторинга состояния бортов карьеров, базирующаяся на современных средствах фиксации их изменения во времени [5].

Моделирование устойчивости, прогнозирование деформаций бортов и уступов карьеров и использование мониторинга деформации склонов до сих пор были отдельными задачами, которые выполнялись на разных этапах разработки проекта. Многие геотехнические исследования показали, что на сегодняшний день для многих видов обрушений в карьерах существует научное объяснение. Знание потенциально опасных по обрушениям зон позволяет на стадии проектирования и разработки горных работ установить места возможных обрушений и заранее принять меры по их предотвращению. При должном геотехническом исследовании состояния массива горных пород и наличии системы регламентируемых наблюдений, с научной точки зрения сбой можно прогнозировать [6].

В ходе исследований будет разработана научно-техническая методика геотехнического мониторинга поверхности прибортового массива Качарского карьера с учетом действия НДС.

На основе разработанной методики будет организована программа геомониторинга уступов Качарского карьера и системы раннего предупреждения, включающая методику прогноза деформаций, механизма сдвижений и разрушений прибортового массива борта карьера с учетом воздействия полей напряжений.

На базе геомеханической модели, созданной на основе геотехнической информации скального массива Качарского карьера будет выполнена оценка

его текущего геомеханического состояния приконтурного массива горных пород. Оценка текущего состояния приконтурного массива горных пород карьера с помощью ГМ позволит на начальном этапе составить «КАРТУ РИСКОВ 1», обусловленную горно-геологическими факторами. Результатом применения численного моделирования НДС массива станет выявление местоположения потенциально неустойчивых участков с последующим составлением «КАРТЫ РИСКОВ 2».

По итогам будет определен перечень опасных факторов на объекте с нанесением на план карьера. В программе геотехнического мониторинга массива скальных пород Качарского карьера для каждого объекта геотехнического мониторинга (домена) будет установлен состав, объемы, вид оборудования, периодичность наблюдений, определены пороговые диапазоны движения, которые будут вызывать определенное оперативное реагирование при их превышении и разработан план реагирования на действия по смещению.

**Объект исследования** – прибортовой массив Качарского карьера.

**Предмет исследования** – смещения, вызванные действием НДС.

**Цель исследования** - разработка научно-методических основ создания единой системы геомониторинга природного напряженного состояния массива скальных пород Качарского карьера для прогнозирования и раннего предупреждения критических деформаций откосов при действии тектонических полей напряжений с использованием современных систем мониторинга.

Для достижения поставленной цели ставятся следующие **задачи исследования:**

- оценка текущего состояния приконтурного массива пород Качарского карьера при помощи построения его геомеханической модели;
- определение закономерностей распределения НДС и разработка методики прогноза нестабильных участков в прибортовом массиве Качарского карьера, вызванных действием напряжений с использованием численного моделирования НДС;
- разработка программы комплексного геотехнического мониторинга Качарского карьера (выбор оборудования, местоположения, методика);
- определение значений порогов движения для ожидаемого поведения борта Качарского карьера, оценка события и определение плана оперативного реагирования на действия по смещению, вызванных действием НДС.

**Методы исследований:**

Методы исследований включали комплексные исследования, в которые входили:

- исследование существующей практики методов оценки напряженно-деформационного состояния массива горных пород и средств геомеханического мониторинга;
- анализ результатов ранее выполненных исследований по объекту;
- разработка научно-технической методики геотехнического мониторинга поверхности прибортового массива Качарского карьера с учетом действия НДС;

- оценка уровня напряженного состояния пород массива и карьерной выемки Качарского карьера до проектной глубины численными методами в 2-хмерной постановке;
- обзор существующих инструментов мониторинга и их эффективность;
- организация структуры геомониторинга с учетом действия напряженно-деформированного состояния массива горных пород Качарского карьера;
- определение значения порогов движения для ожидаемого поведения борта Качарского карьера;
- оценка события и определение планов оперативного реагирования.

**Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения:**

- в зоне тектонического разлома на отметках (-300) м – (-330) м Западного борта происходит переориентация главных напряжений в блоках массива. Зоны растягивающих и сжимающих напряжений сменяют друг друга;
- потенциально опасные по динамическому разрушению участки формируются в нижней части карьерной выемки Западного борта ниже отметки (-380) м и до дна карьера (выявлена закономерность распределения максимальных касательных напряжений  $\tau_{xy}$ );
- критерии опасной ситуации по итогам моделирования позволяют обоснованно выявлять зоны деформаций, вызванных тектоническими напряжениями.

**Научная новизна и важность полученных результатов.**

- определена закономерность смены областей растягивающих и сжимающих напряжений в блоках массива северо-западного борта в зоне тектонического разлома;
- для условий Качарского карьера разработаны научно-методические основы создания единой системы геомониторинга, которая включает прогнозирование и раннее предупреждение критических деформаций откосов карьера при действии тектонических полей напряжений с использованием современных систем мониторинга;
- разработана геомеханическая карта рисков (карта потенциально опасных участков) для Качарского карьера.

**Практическая значимость работы состоит:**

- по результатам исследований определена геомеханическая карта потенциально опасных участков Качарского карьера;
- разработана программа комплексного геотехнического мониторинга Качарского карьера.
- для каждого объекта геотехнического мониторинга (домена) Качарского карьера определен состав, объемы, вид оборудования, периодичность наблюдений для выполнения определенного метода мониторинга.
- определены значения порогов движения для ожидаемого поведения борта Качарского карьера, оценка события и определены планы оперативного реагирования.
- программа комплексного геотехнического мониторинга Качарского карьера обеспечит безопасные условия работы для персонала и оборудования;

- разработанные научно-методические основы создания единой системы геомониторинга за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород на Качарском карьере могут быть использованы на аналогичных рудниках РК при разработке систем мониторинга.

**Публикации и апробация работы.** Публикации включают 4 статей в рейтинговых журналах, таких как: "Mining of Mineral Deposits", процентиль 53, Q2; "Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук", процентиль 43, Q3; 4 статей в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК и РИНЦ, таких как: «Горный журнал Казахстана», «Известия вузов. Горный журнал» и "Маркшейдерия и недропользование»; 2 статей в сборниках международных конференций, форумов и конгрессах, таких как: "International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM", процентиль 17, Q3; (г. Албена, Болгария, 2020 г.); Труды Международной научно-практической конференции, посвященной к 115-летию член-корр. АН КазССР А.Ж. Машанова и 100-летию Академика АН КазССР Ж.С. Ержанова (г. Алматы, 2022 г.); 1 авторское свидетельство № 12049 от 17 сентября 2020 г. Рег. номер заявки 17650, от 16.09.2020 г.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованных литературы. Работа изложена на 104 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц, 47 рисунков, список литературы из 72 наименований.

# Глава 1. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Актуальность проблемы

В настоящее время на многих крупных обрабатываемых месторождениях полезных ископаемых осуществляется переход к отработке глубоких горизонтов, характеризующихся действием более высоких, по сравнению с приповерхностными, напряжений, измененными деформационно-прочностными свойствами массивов горных пород, в результате чего на передний план выходят проблемы связанные с обеспечением устойчивости горных выработок. В настоящее время проектная глубина некоторых карьеров в Казахстане и в мире превышает 500 м и даже может достигать 1000 м (Таблица 1.1) [5].

Таблица – 1.1 Характеристика глубоких карьеров

Название на русском (английском) языке	Страна	Глубина, м	Размеры, км x км	Добываемое полезное ископаемое
Эскондида Нотр (Escondida Notre)	Чили	500	1,6x1,4	Медная руда
Ковдорский ГОК	Россия	500	2,3x1,6	Железная руда
<b>Качарский карьер</b>	Казахстан	500	3x3	Железная руда
Сарбайский карьер	Казахстан	520	2,4x3,3	Железная руда
Бату-Хиджау (Batu Hijau)	Индонезия	550	2,5x2,2	Золото - медная руда
Сибайский карьер	Россия	600	2,0x2,0	Медно-цинковая руда
Мурунтау	Узбекистан	600	3,5x2,5	Золотая руда
Эскондида (Escondida)	Чили	620	3,8x2,7	Медная руда
Удачный	Россия	640	1,7x1,3	Алмазы
Палабора (Palabora)	ЮАР	700	1,9x1,7	Медная руда
Чукикамата (Chuquicamata)	Чили	850	4,3x3	Медная руда
Бингхем Каньон (Kennecott Bingham Canyon Mine)	США	1200	4x3,8	Медная руда

Горный массив до проведения в нем выработок находится в нетронутом равновесии: гравитационные и тектонические напряжения уравниваются друг с другом и сопротивлением горных пород (прочностью) на сжатие, составляя тензор напряжений нетронутого массива. Горные работы в карьере приводят к нарушению существующего поля напряжений, при этом некоторые напряжения уменьшаются (разгружаются), тогда как другие увеличиваются

(концентрируются). Изменение природных напряжений имеют серьезное влияние на поведение породного массива, окружающего выработки. Если природные напряжения в бортах откоса карьера велики и превышают прочность породного массива, тогда происходит его деформация и создаются большие зоны ослабленных пород, которые затем могут обрушиться под действием собственного веса [6].

Часто, при определенных условиях, эта реакция проявляется в виде динамических и газодинамических форм разрушения пород с интенсивным выделением энергии, что создает угрозы безопасности проведения работ. В создавшейся ситуации выходом является разработка специальных комплексных подходов к оценке уровня воздействий на окружающую среду, организация контроля ее состояния (мониторинга) с осуществлением своевременных прогнозов и разработкой необходимых профилактических мер по предупреждению и минимизации последствий различного рода негативных явлений [7].

Основным осложнением при увеличении глубины добычи является повышенный риск крупномасштабных разрушений горных конструкций (борта и уступы карьеров, горные выработки и очистное пространство шахт), вызванных действием тектонических полей напряжений, что подтверждается периодически происходящими мощными разрушениями в пространствах рудников.

Аварийные ситуации, связанные с обрушением бортов карьеров, возникают периодически. Так, на Березняковском золоторудном карьере (Челябинская область), в декабре 2016 г. обрушился борт карьера, а граница сдвига пород прошла в 22,5 м от нефтепровода компании «Транс-нефть-Урал». Характерным примером является обрушение борта золоторудного карьера «Кумтор» (Киргизия, 2004 г.), вследствие чего погиб один человек, было уничтожено буровое оборудование общей стоимостью свыше 300 тыс. долл. США, приостановлена добыча руды. Обрушение борта привело к значительному снижению производственных показателей на длительный период времени [8]. Крупнейшее в истории открытых горных работ разрушение борта произошло в 2013 г. На одном из самых глубоких в мире меднорудном карьере «Бингхем-Каньон» (Bingham-Canyon) в США, приведшем к обрушению около 150 млн т горной массы.

Так у нас в Казахстане непредвиденный деформационный процесс, вызванный изменением НДС массива под действием геодинамических движений, вызвал значительные и временную остановку работы карьера (рисунок 1.1). Причиной разрушения борта стали повышенные тангенциальные напряжения сжатия, действующие вдоль борта карьера на этом участке, вызывающие разрушения сдвигового характера.

Массив горных пород представляет собой иерархически блочную среду, что эта среда находится в постоянном движении под воздействием постоянных, в том числе и современных, геодинамических движений земной коры. Вследствие этих двух фундаментальных свойств массива горных пород, в нем происходит вторичное структурирование с образованием временно

консолидированных блоков. В итоге, в массиве горных пород формируется дискретное, неоднородное, мозаичное напряженно-деформированное состояние, в котором имеет место и анизотропия с большой разницей величин главных напряжений, и разная направленность действия напряжений на различных участках, и многие другие отличия от принятых в расчетных оценках положениях, определяющие состояние и поведение массива горных пород [7].



Рисунок 1.1 - Обрушение юго-западного борта Качарского карьера под строившейся подпорной стенкой на горизонте минус 30 м

В настоящее время на горных предприятиях РК мониторингом устойчивости бортов и уступов карьеров занимается в основном маркшейдерская служба. Измерения выполняются, как правило, вручную имеющимися на вооружении маркшейдерского отдела стандартными геодезическими приборами. Для более эффективного мониторинга необходимо использование новых технологий на основе специально разработанных технических средств, дополняемых организационными решениями.

Деформации прибортовой зоны карьера могут очень разрушительными, приводя к повреждению инфраструктуры, остановке горных работ и смертям персонала. Своевременное выявление ранних стадий неустойчивости откосов склона, имеет важное значение для надлежащего смягчения воздействия таких опасностей.

В условиях активной эксплуатации и значительного увеличения глубины отработки месторождений полезных ископаемых необходим непрерывный мониторинг изменений окружающей среды, напряженно-деформированного состояния и выявление других отрицательных факторов. Напряженное

состояние массива горных пород является основным фактором геомеханической ситуации при отработке глубокими карьерами. Для контроля развития геомеханической ситуации необходима организация периодического геомеханического мониторинга [2].10

Под геомеханическим мониторингом понимается комплексная система регламентированных наблюдений, оценки и прогноза изменений геомеханического состояния массива горных пород при разработке полезного ископаемого в целях выявления опасных проявлений и выработки рекомендаций по управлению горным давлением [9].11

В настоящее время действие тектонических напряжений установлено во многих районах мира, особенно в тектонически активных регионах [4].12

Управление неустойчивыми откосами является одним из наиболее важных вопросов при решении вопросов безопасности в карьерах. С этой целью обычно реализуются комплексные программы геомониторинга склонов и системы раннего предупреждения. Серьезную озабоченность, особенно при разработке глубоких карьеров вызывает снижение риска обрушения откосов в массиве твердых пород с заметно хрупким поведением.

**Актуальность** Увеличение глубины открытых горных работ сопровождается ростом напряжений в горном массиве пород, в результате чего повышается риск обрушения бортов карьера, что приводит к существенным сбоям в его работе. Для уменьшения таких рисков реализуется система мониторинга состояния бортов карьеров, базирующаяся на современных средствах фиксации их изменения во времени [5].

На сегодняшний день горнодобывающие компании на регулярной основе используют мониторинг деформации для управления геотехническими рисками, связанными с добычей полезных ископаемых.

**Основными задачами программы мониторинга борта являются [6]:**

- поддержание безопасных условий работы для персонала и оборудования;
- заблаговременное предупреждение о наличии потенциально неустойчивых зон для возможности изменения плана горных работ с целью минимизации влияния смещения пород в откосе;
- предоставление геомеханической информации для анализа механизмов развивающихся нарушений устойчивости, разработки планов корректирующих мер и проектирования последующих бортов;
- оценка устойчивости реализованной конструкции борта.

## **1.2 Исследование существующей практики методов оценки напряженно-деформационного состояния массива горных пород и средств геомеханического мониторинга**

Вопросы организации мониторинга геомеханического состояния массива горных пород представляют собой новейшее направление геомеханики, как науки, которое сейчас активно развивается и которое пока еще, с точки зрения общих подходов и применяемых терминов, не является

полностью сформированным. В настоящее время существуют различные точки зрения на задачи, методы проведения, общую организацию и последовательность этапов выполнения отдельных видов работ при разработке систем мониторинга состояния массива.

Мониторинг включает в себя комплексную систему периодических наблюдений за состоянием природной среды с целью выявления негативных изменений и выработки рекомендаций по их устранению. Диагностика массива горных пород основывается на всестороннем и систематическом изучении его состояния на всех стадиях ведения горных работ. Она включает анализ изменения геометрических размеров выработанного пространства по мощности и кратности подработки, различные инструментальные методы измерения физических параметров массива горных пород, включая сейсмику и сдвигание горных пород. В процессе диагностики выполняется анализ геологических и маркшейдерских документов; осуществляется регулярное обследование выработанного пространства на основе визуальных наблюдений за проявлениями горного давления; ведутся наблюдения за сдвижением земной поверхности и сейсмической активностью массива. По результатам диагностики устанавливаются причины изменения состояния массива.

Основными задачами диагностики являются: получение исходной информации о массиве; оценка текущего состояния массива горных пород; профилактическое обследование массива и прогнозирование геомеханических процессов, происходящих в нем; проведение необходимых наблюдений (измерений) по предупреждению внезапных обрушений. Знание потенциально опасных по обрушениям зон позволяет еще на стадии планирования и проектирования горных работ установить места возможных обрушений и заранее принять меры по их предотвращению.

В общем виде в структуру мониторинга входят датчики напряжений, смещений, геофизические датчики, компьютерные системы для обработки их показаний, компьютерные модели исследуемой области массива.

Применяемые в отечественной и зарубежной практике **методы оценки напряженно-деформационного состояния массива горных пород, подразделяются** на две существенно отличающиеся группы. К первой группе относятся методы, **основанные на измерениях параметров деформирования горных пород**. Ко второй группе относятся **геофизические методы**, в которых используются вариации естественных или наведенных искусственно геофизических полей.

**Деформационные (прямые) методы делятся на три группы:**

1. Методы разгрузки. Суть их состоит в следующем: массив горных пород нагружен первоначальными напряжениями. При снятии нагрузки из-за частичного или полного высвобождения сил происходит деформация (разгрузка). Величина деформаций определяется напряжениями, которые были в породе до ее разгрузки.

2. Методы возмущения основаны на измерении деформаций, возникающих в массиве за счет создания в массиве какой-либо полости

(скважины, щели, выработки и др.), либо изменения геометрии уже имеющейся полости.

3. Методы компенсации, основанные на измерении деформации массива за счет нагружения его участка массива известной нагрузкой.

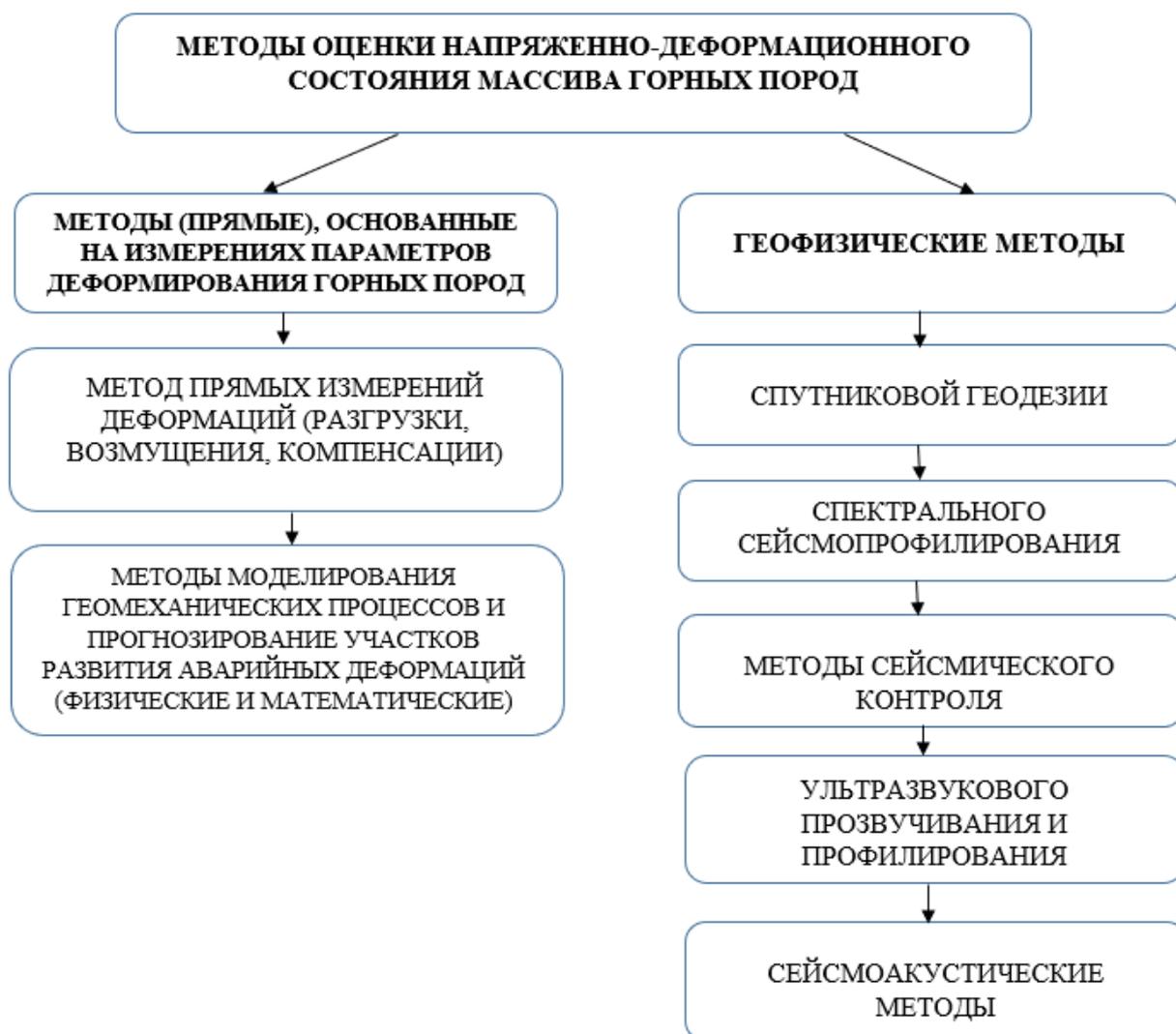


Рисунок 1.2 - Методы оценки напряженно-деформационного состояния массива горных пород

Геофизические (косвенные) методы изучения напряженного состояния получили широкое распространение в последние 25-30 лет. Основная идея любого из геофизических методов заключается в выделении большого однородного участка массива и изучения его геофизического разреза. Всякое отклонение наблюдаемого поля от теоретического интерпретируется как влияние действующих напряжений. Наиболее широко применяются в настоящее время методы электрометрии и сейсмометрии.

С развитием вычислительной техники для оценки и прогнозирования НДС массива горных пород все больше значение приобретает математическое моделирование [10].

Ниже приведем конкретные примеры применения геомеханического мониторинга, основанные на измерениях параметров деформирования горных пород и геофизических методов.

### 1.2.1 Геомеханический мониторинг геофизическими методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом

Хорошо зарекомендовал себя в качестве средства геомеханического мониторинга устойчивости бортов карьеров метод **спутниковой геодезии**. Так специалистами Горного института Кольского научного центра РАН были применены для геомеханического мониторинга массивов горных пород в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» методы непосредственного измерения смещений с использованием методов спутниковой геодезии (GPS- и ГЛОНАСС-технологий) [11].

А) В 2006 г. на контуре карьера рудника «Железный» был заложен измерительный полигон из 6 фундаментальных пунктов (рисунок 1.3). Регулярные измерения с применением технологий GPS-измерений выполнялись с 2007 г. Места расположения фундаментальных пунктов были выбраны в соответствии с пространственным положением крупных структурных неоднородностей. Конструкция фундаментальных пунктов представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.3 - Схема расположения фундаментальных реперов геомеханического полигона в карьере рудника «Железный»

Для проведения наблюдений использовался комплект оборудования, состоящий из 4 приемников Lexion GGD и приемника Delta G3T, а также антенн JNS Choke Ring. После проведения измерений и выполнения обработки полученных результатов с использованием программы обработки Trimble Business Centre (ТВС) был создан рабочий проект для начального цикла

измерений. Для нанесения результатов определения смещений пунктов на планы горных работ выполняется перевод координат из геоцентрической системы координат WGS-84 в проекцию Гаусса – Крюгера. Для перехода от геодезических к нормальным высотам используется глобальная модель геоида EGM2008.

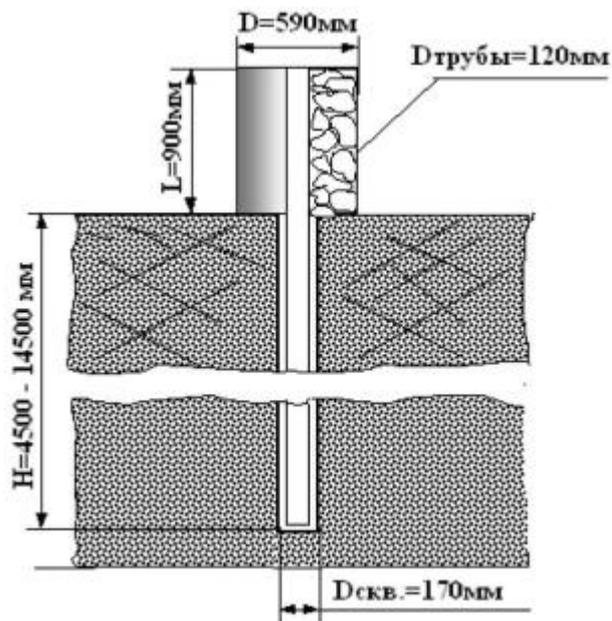


Рисунок 1.4 - Конструкция фундаментальных пунктов геомеханического полигона в карьере рудника «Железный»

На рисунке 1.5 показаны результирующие векторы плановых смещений пунктов внутреннего контура на общем плане карьера рудника «Железный» за весь период наблюдений.



Рисунок 1.5 - Схема смещений (в плане) фундаментальных пунктов внутреннего контура в период 26.09.2011 г. – 02.11.2016 г.

Для оценки степени их устойчивости бортов карьера применялся метод расчета величин обратных скоростей сдвижения фундаментальных пунктов полигона, разработанный японским исследователем Фукузоно. Типичные графики зависимости величины обратных скоростей от времени приведены на рисунке 1.6 [12].

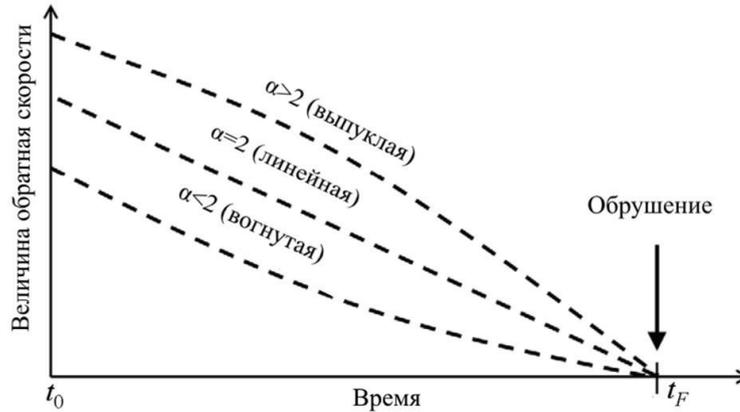


Рисунок 1.6 - График зависимости величины обратной скорости от времени

Для пунктов с максимальными результирующими смещениями (295Б и VI, рисунки 1.7, 1.8) были построены графики зависимости величины обратной скорости от времени, которые показали, что наблюдается сближение бортов карьера.

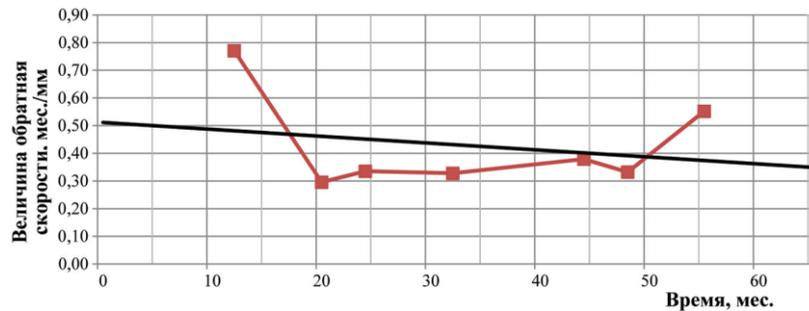


Рисунок 1.7 - Изменение величины обратной скорости по времени для пункта 295Б

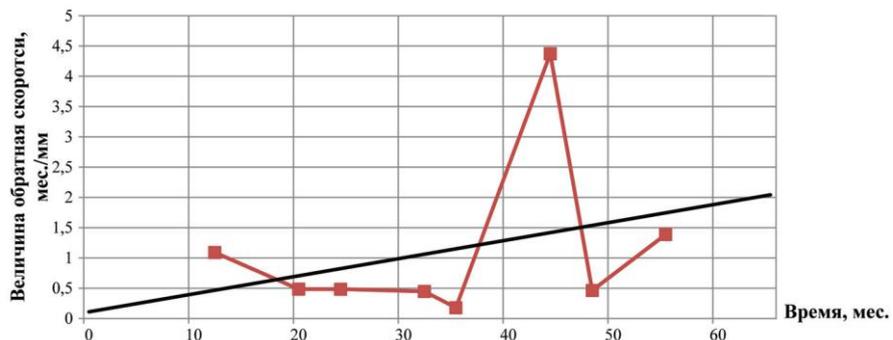


Рисунок 1.8 - Изменение величины обратной скорости по времени для пункта VI

Методы космической геодезии обладают дополнительными преимуществами, поскольку при этом достаточно легко решаются проблемы исходных пунктов, не требуется прямой видимости между контролируемыми пунктами и можно получать информацию о смещениях, практически, без ограничений по времени суток и климатических сезонов. Еще одним преимуществом методов космической геодезии являются возможности единовременного получения всех трех координат измеряемых смещений, однако при этом необходимо учитывать, что смещения по направлению одной из координат (Z) определяются на порядок менее точно по сравнению с двумя другими координатами (X и Y). Последние достижения в этой области позволяют говорить уже в целом о приемлемой точности измерений, а также о принципиальных возможностях получения данных дистанционным путем и в автоматическом режиме.

Параметры областей разрушения определяются в настоящее время, главным образом, с помощью геофизических методов, в частности, методов сейсмического контроля, ультразвукового прозвучивания и профилирования, сейсмоакустических методов, сейсмотомографии и др.

Изменения напряженно-деформируемого состояния массива горных пород провоцируют подвижность геоблоков с образованием структурно нарушенных областей [13-16], обладающих повышенной трещиноватостью и пониженной устойчивостью.

Б) Наиболее продуктивными и информативными методами структурного анализа массива горных пород являются геофизические методы. Для использования в карьере за счет своей мобильности и высокой информативности хорошо себя зарекомендовал метод спектрального сейсмопрофилирования, прошедший большое количество промышленных экспериментов на различных горных предприятиях.

Опыт использования в качестве инструмента геомеханического мониторинга геофизического метода спектрального сейсмопрофилирования (ССП) [17-18] показал, что с его помощью хорошо прослеживаются структурные особенности прибортового массива и при должной привязке профильных линий с высокой точностью можно проводить повторные наблюдения и тем самым контролировать изменения, происходящие во времени.

Специалистами Института горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург) было спрогнозировано развитие деформационных процессов на примере Качарского карьера с помощью геофизических методов [19-22].

Построенная с помощью геофизических методов геомеханическая модель Качарского карьера позволила проводить более детальный мониторинг состояния нарушенных участков при минимальных наблюдениях за устойчивым массивом. Сущность мониторинга заключается в исследовании структурного строения прибортового массива карьера методом спектрального сейсмопрофилирования, выявлением опасных по оползневым процессам участков и наблюдении за изменением структуры во времени. Метод

спектрального сейсмопрофилирования является оптимальным с точки зрения изучения прибортового массива за счет высокой мобильности производства измерений и хорошей информативности получаемых результатов.

Исследования структурно-тектонического строения Качарского карьера проводились в течение 2015 года [19].

Для определения характера нарушения на участке провала на горизонте -30 м юго-западного борта карьера были проведены исследования методом спектрального профилирования. Расположение профильных линий выбрано таким образом, чтобы можно было проследить изменения структурного строения прибортового массива после произошедших деформаций.

Схема расположения профильных линий приведена на рисунке 1.9.

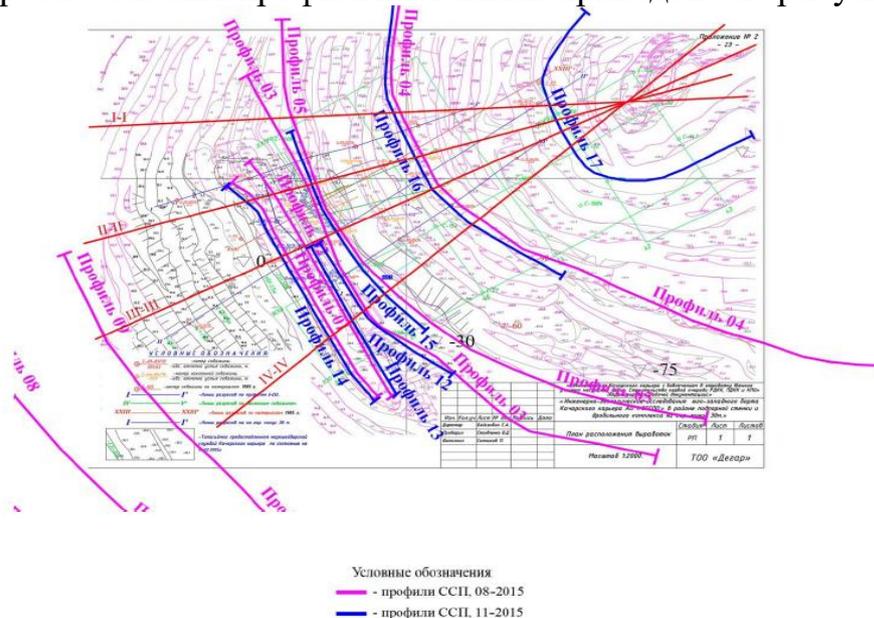


Рисунок 1.9 - Схема расположения профильных линий ССП

Всего было выполнено шесть профилей различной протяженности. Профилирование осуществлялось с шагом 5 метров, при этом точная пространственная привязка начала и окончания каждого профиля обеспечивалась с использованием спутниковых навигационных систем GPS.

Результаты измерений сравнивались по параллельным профилям, при этом выявлялись изменения структурных неоднородностей и массива и глубина распространения изменений. Полученные в результате интерпретации разрезы показали, что зона нарушений имеет ограниченное распространение в плане и глубина изменений местами проявляется ниже 100 метров от поверхности, что в случае развития оползневых процессов маловероятно. На рисунке 1.10 представлена схема развития нарушения борта, при этом следует отметить, что нижний профиль (№17) был пройден только после происшествия и проведенная по нему граница является достаточно субъективной.

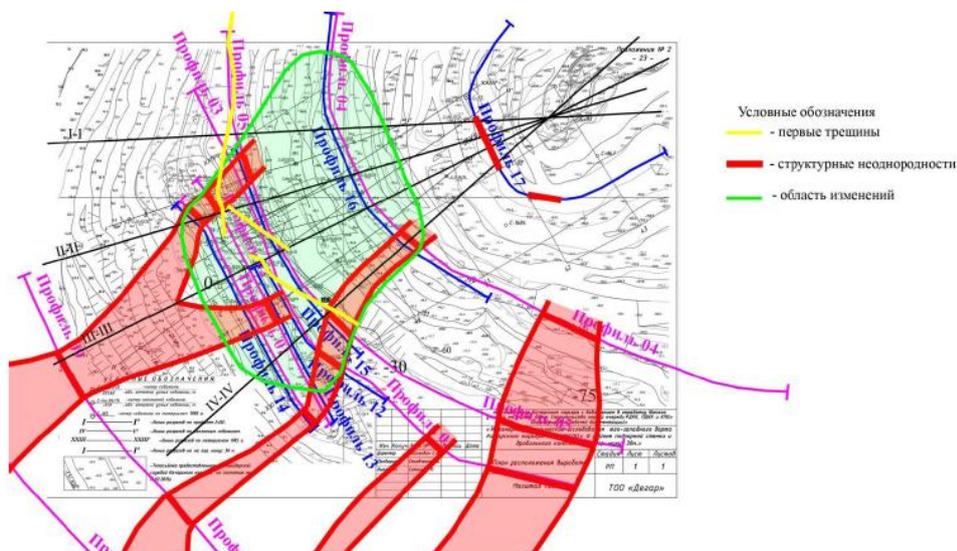


Рисунок 1.10 - Схема расположения выделенного измененного участка

По результатам геофизических работ сделаны следующие выводы:

1. На горизонте (- 33м) изменения структуры наблюдается на всю глубину зондирования (150 метров) по профильным линиям, находящимся северо-восточнее от построенного фундамента ДКК. По профилям №№01 и 14 (юго-западнее фундамента) изменения проявляются слабо и до глубины не более 100 метров.

2. На горизонте (-90; -100м) нарушенность после провала проявляется очень отчетливо, на всю глубину зондирования, в пределах обозначенных границ. Визуально прослеживается участок выпирания грунта ограниченных размеров.

3. На горизонте (-180м) предварительных измерений не проводилось, но по разрезу выделяются четкие структурные неоднородности, присущие материнской структуре, что говорит об отсутствии признаков процесса обрушения на данном горизонте.

4. В целом, область влияния обрушения на юго-западный борт ооконтурена в плане и представлена на рисунке 1.20, по структурным особенностям данный участок представляет собой неструктурированный массив с нарушенными связями и слабовыраженными поверхностями ослабления.

5. За период 08.15 – 11.15 гг. в районе деформации сформировалась область деформаций растяжения.

6. Структурные изменения выше горизонта -30 м методом ССП не обнаружены;

7. Структурные изменения на горизонте -180 – 200 м, свидетельствующие о формировании выпора методом ССП не обнаружены.

По результатам геомеханического мониторинга геофизическими методами было спрогнозировано, что деформационный процесс, вызванный изменением НДС массива под действием геодинамических движений, в настоящее время находится в стадии затухания.

Проведение геофизических исследований в мониторинговом режиме позволяет своевременно выявить развитие деформационных процессов.

## 1.2.2 Геомеханический мониторинг деформационными методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом

### 1.2.2.1 Методом прямых измерений деформаций

Метод разгрузки — наиболее разработанный и теоретически обоснованный способ измерений напряжений в массиве. Он основан на измерении упругих деформаций элемента породного массива при разгрузке этого элемента от действовавших в нем напряжений и упругом восстановлении им первоначальных размеров. По измеренным деформациям и упругим свойствам пород вычисляют действующие напряжения.

Определение горизонтальных напряжений массива Куржункульского карьера проводилось методом скважинной разгрузки на 2-х экспериментальных участках специалистами ГИ УрО РАН (г. Пермь) и ИГД (Алматы). Метод разгрузки является достаточно точным и методически обоснованным, что позволяет применять его для определения полного тензора напряжений изучаемого массива пород [23-24].

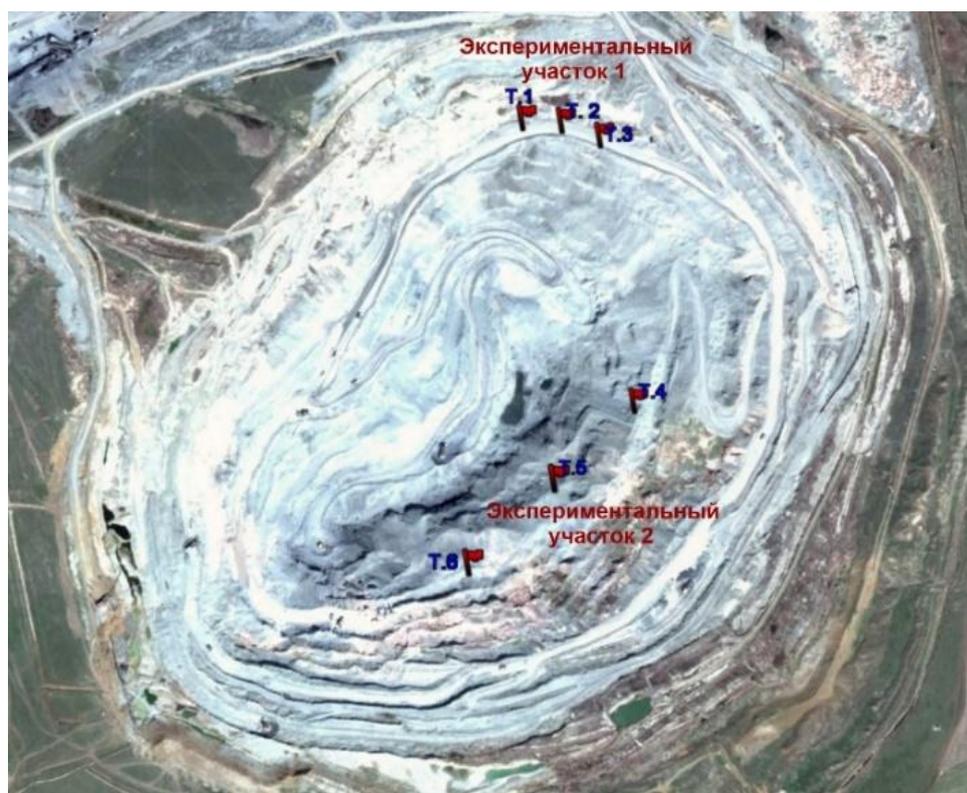


Рисунок 1.11 - Местоположение экспериментальных участков

Суть используемого скважинного метода измерения компонент поля напряжений заключается в разгрузке некоторой области массива пород бурением скважины и повторном нагружении ее стенок гидродомкратом Гудмана. При этом эффект Кайзера используется в качестве индикатора

восстановления породами околоскважинного пространства радиальной компоненты поля напряжений в направлении нагружения [25].

В процессе определения напряжений с использованием эффекта Кайзера производится нагружение стенок скважины гидродомкратом. При этом наряду с давлением в гидросистеме контролируется деформация стенок скважины и акустическая эмиссия в породах околоскважинного пространства.

По результатам экспериментов строятся графики изменения акустических параметров от напряжения. Характерные типы таких графиков приведены на рисунок 1.12.

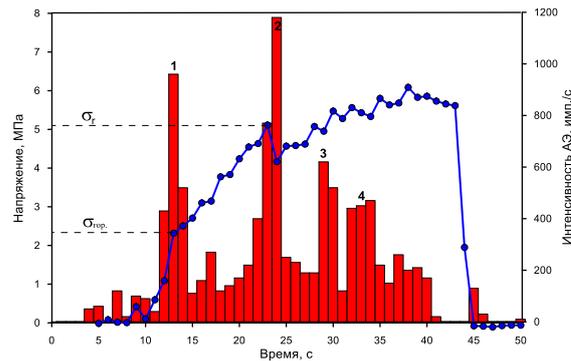


Рисунок 1.12 - Характерный график изменения параметров АЭ и давления гидродомкрата от времени при нагружении стенок скважины

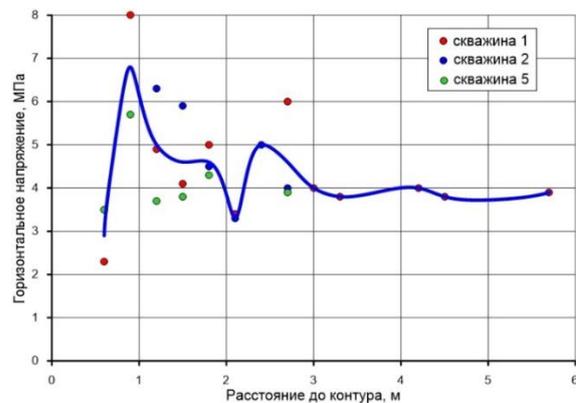


Рисунок 1.13 - Результаты определения напряжений на замерной станции № 1

Общие результаты измерения горизонтальных напряжений в бортах Куржункульского карьера приведены на рисунке 1.14.

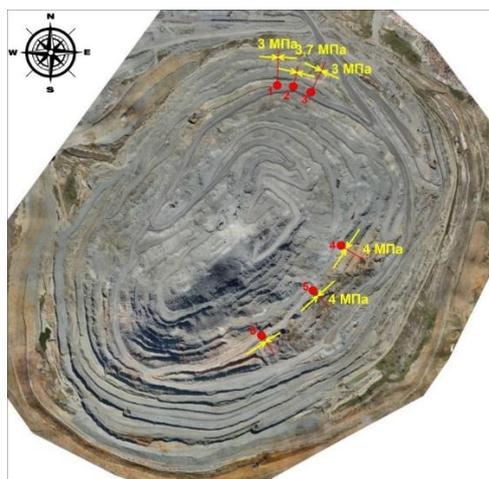


Рисунок 1.14 - Результаты определения горизонтальных напряжений в бортах Куржункульского карьера

В таблице 1.2 представлены усредненные данные измерений параметров напряженного состояния массива пород Куржункульского карьера методом разгрузки.

Таблица 1.2 - Параметры напряженного состояния массива пород Куржункульского карьера методом скважинной разгрузки

Параметры	Северный борт	Юго-восточный борт
Абс. отметка экспериментального участка, м	+100	+50
Высота борта участка измерений Н, м	(110+30)*	160
Измеренные значения напряжения в массиве пород методом разгрузки, МПа	$\sigma_x^{\max} = -7,4$	$\sigma_y^{\max} = -8,23$
	$\sigma_x^{\min} = -3,23$	$\sigma_y^{\min} = -4,0$
Среднее значение напряжения в массиве пород методом разгрузки, МПа	$\sigma_x^{\text{ср}} = -5,31$	$\sigma_y^{\text{ср}} = -6,11$
Расчетные значения напряжения, исходя только из собственного веса вышележащих пород, МПа ( $\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}} = -\eta\gamma H$ , $\sigma_z^n = -\gamma H$ )	$\sigma_z^n = -3,78$	$\sigma_z^n = -4,72$
	$\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}} = -1,32$	$\sigma_{\text{гор}}^{\text{ср}} = -1,72$
Значения тектонической составляющей Тх и Ту, МПа	Тх = -3,99	Ту = -4,39
$\sigma_{xy}^{\max} / \sigma_x^n$	$\sigma_x^{\max} / \sigma_x^n = 1,95$	$\sigma_y^{\max} / \sigma_x^n = 1,94$

\*- высота борта вместе с высотой отвала в этой части карьера

Сравнение расчетных и измеренных первоначальных величин напряжений в массиве показывает, что измеренные значения главных напряжений на экспериментальных участках  $\sigma_{x,y}^{max}$  превышают расчетные вертикальные напряжения в  $\sim 2$  раза (Таблица 4.2), т. е. напряженно-деформированное состояние породного массива Куржункульского карьера относится к гравитационно-тектоническому типу. При этом необходимо отметить, что пригрузка всего северного борта Куржункульского карьера отвалом №3 создало дополнительную внешнюю нагрузку, которое изменило напряженно-деформированное состояние прибортового массива.

Таким образом, по данным натурных измерений в пределах горизонтов +50 м до +100 м Куржункульского карьера:

- максимальная компонента поля напряжений действует в субгоризонтальной плоскости, действия горизонтальных напряжений превышают гравитационные в  $\sim 2$  раза;

- направления действия главных тектонических напряжений совпадают с направлениями главных тектонических нарушений в карьере.

### **1.2.2.2 Методы моделирования геомеханических процессов и прогнозирование участков развития аварийных деформаций**

В работах [26-27] сформулированы общие принципы организации типовой единой комплексной системы геомеханического мониторинга в условиях массивов скальных пород иерархично-блочной структуры при гравитационно-тектоническом поле природного напряженного состояния. При этом главная конечная цель заключается в разработке общей геомеханической модели исследуемой природно-технической системы, на основе которой можно решать любые геомеханические задачи.

Напряженно-деформированное состояние массива месторождений Ковдорского ГОК, как и Качарского карьера относится к гравитационно-тектоническому типу с достаточно высоким уровнем горизонтальных сжимающих напряжений. В работах [26-27] рассмотрены основные закономерности изменения напряженного состояния пород в массиве при открытой разработке месторождений в условиях гравитационно-тектонических полей напряжений.

Сущность предложенной методики состоит в анализе получаемой с использованием численного моделирования картины распределения напряжений и деформаций в прибортовом массиве пород. При этом используются три критерия опасной ситуации в соответствии с тремя рассматриваемыми компонентами напряжений - максимальной и минимальной компонентами главных напряжений ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$ ) и максимальными касательными напряжениями ( $\tau_{max}$ ). Полагается, что потеря устойчивости участком прибортового массива пород возможна при реализации одного из следующих

критериев. При превышении минимальной компонентой главных напряжений ( $\sigma_{\min}$ ) предела прочности при растяжении ( $\sigma_{\min} > \sigma_r$ ) возможно раскрытие природных или формирование техногенных трещин. При превышении максимальными касательными напряжениями ( $\tau_{\max}$ ) предела прочности на сдвиг с учетом нормативно заданного коэффициента запаса устойчивости вероятен сдвиг блоков пород по природным и техногенным трещинам.

При превышении максимальной компонентой главных напряжений ( $\sigma_{\max}$ ) 50 % предела прочности на одноосное сжатие пород ( $\sigma_{сж}$ ), слагающий рассматриваемый участок борта ( $\sigma_{\max} \geq 0,5 \sigma_{сж}$ ) вероятно разрушение участка массива пород в динамической форме. Эта методика удовлетворительно описывает возможность формирования в борту карьера ситуации, опасной с точки зрения потери устойчивости участками массива пород, и с ее помощью можно достаточно надежно выявить потенциально опасные участки возможных обрушений.

Основная идея заключается в учете изменения типа напряженно-деформированного состояния массива горных пород с глубиной для выявления потенциально опасных участков борта карьера. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород в районе отработки Ковдорского месторождения определено численным моделированием методом конечных элементов [28-29] для двух наиболее характерных вертикальных сечений.

Автором в составе исследовательской группы в 2021 году было выполнено по данной методике численное моделирование характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива Сарбайского карьера для проектной карьерной выемки до отметки (-660) м (рисунок 1.15) [30].

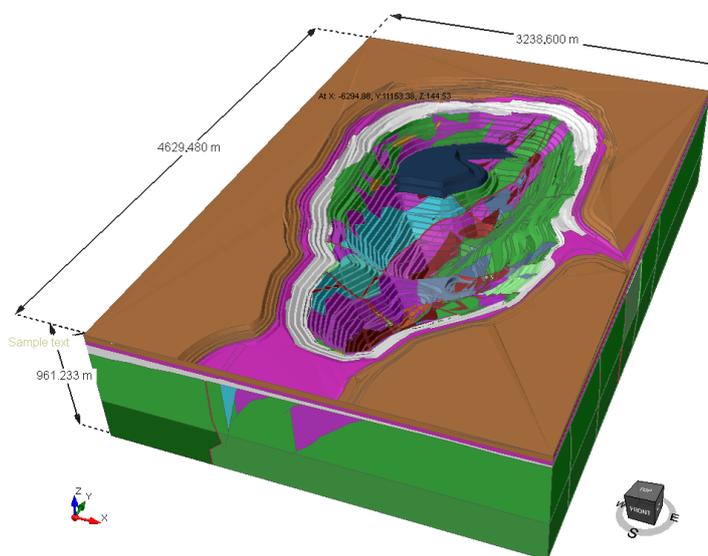


Рисунок 1.15 - Мелкомасштабная геомеханическая (геологическая) модель Сарбайского карьера

На рисунках 1.16 - 1.18 приведены результаты численного моделирования распределения основных напряжений в направлении Север-Юг (по

простирацию рудного тела) при углубке до (-660) м, полученные в программе RS2 RocScience.

По результатам моделирования углубление карьера до отметки (-660) м были определены участки проявления сдвиговых деформаций под действием касательных напряжений. Модель природного напряженно–деформированного состояния массива Сарбайского карьера при его углубке до (-660 м), полученная методом численного моделирования хорошо согласуется с данными, полученными по результатам экспериментальных измерений напряжений методом частичной разгрузки, которые были выполнены ИГД УрО РАН (г. Екатеринбург)

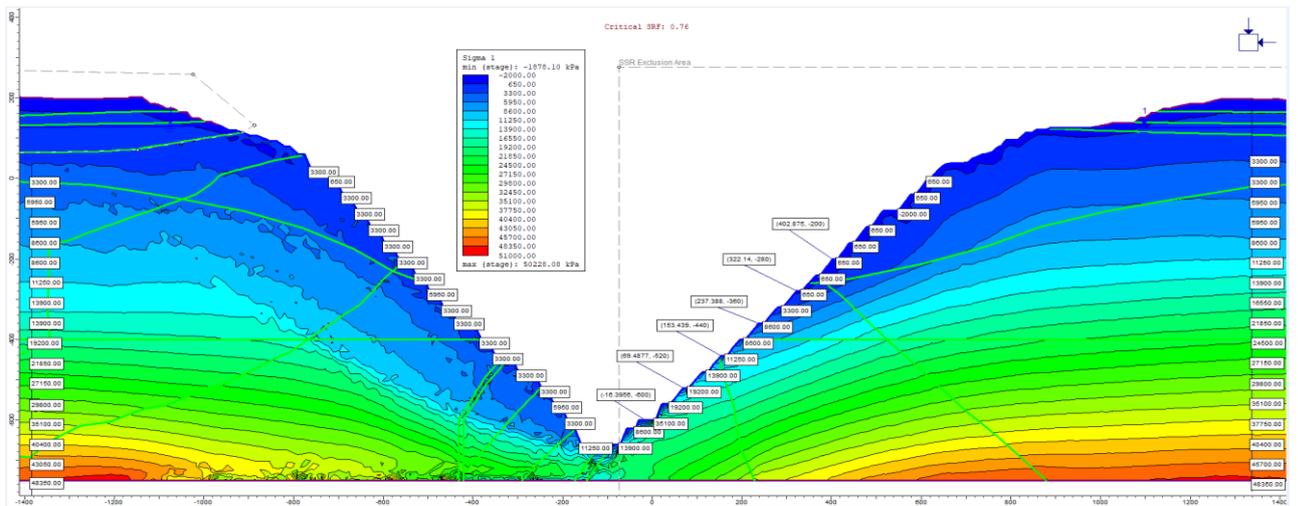


Рисунок 1.16 - Распределение максимальной компоненты напряжений  $\sigma_1$  в массиве и карьерной выемке Сарбайского карьера в направлении Запад-Восток (профиль 15)

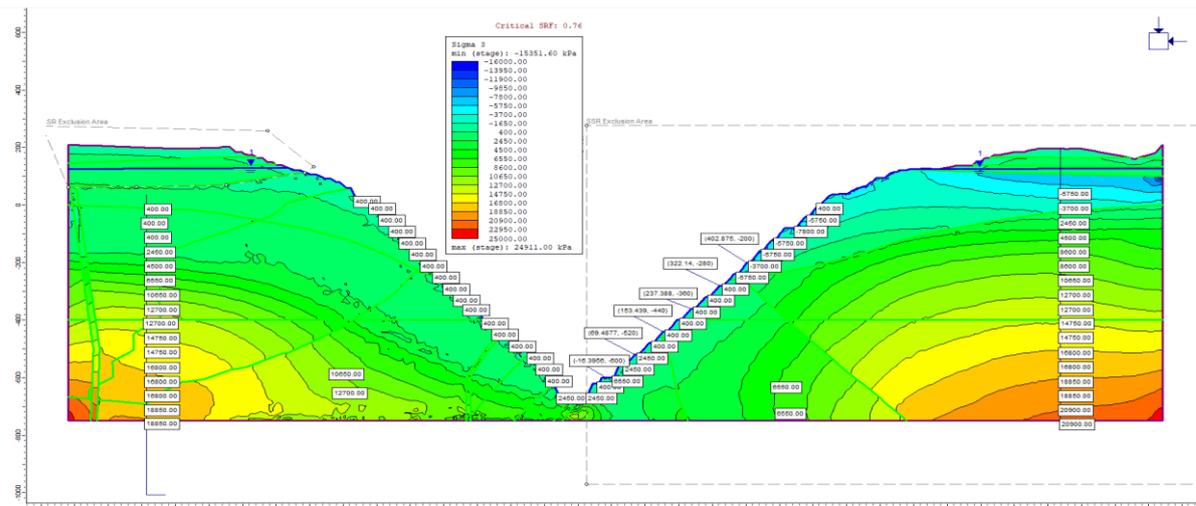


Рисунок 1.17 - Распределение минимальной компоненты напряжений  $\sigma_3$  в массиве и карьерной выемке Сарбайского карьера в направлении Запад-Восток (профиль 15)

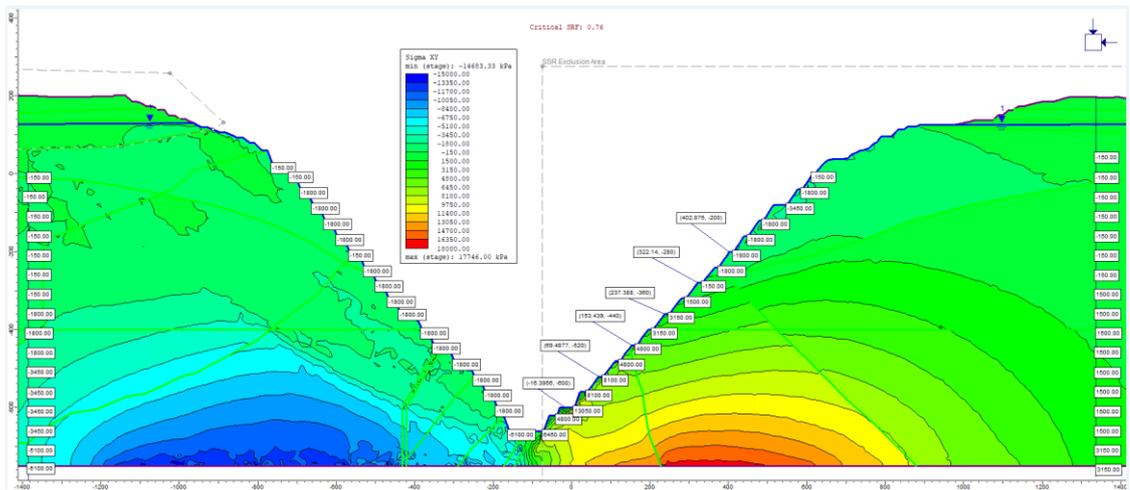


Рисунок 1.18 - Распределение максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в массиве и карьерной выемке Сарбайского карьера в направлении Запад-Восток

### 1.3 Горно-геологические, геомеханические и горнотехнические условия отработки Качарского месторождения

Карьер расположен в Костанайской области северного Казахстана, в 40 - 90 км к северо-западу и юго-западу от города Костанай. Месторождение входит в сферу деятельности «Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного производственного объединения» (АО «ССГПО»). Качарское месторождение обрабатывается одноименным карьером (Рисунок 1.19).



Рисунок 1.19 - Качарский карьер (Google, 2020)

### **1.3.1 Инженерно-геологическая характеристика месторождения. Районирование карьера по геомеханическим условиям ведения горных работ**

Согласно геологическому строению Качарского месторождения, на его территории выделяются два инженерно-геологических комплекса: скальные породы палеозойского возраста и рыхлые покровные отложения мезокайнозойского генезиса.

Рыхлые отложения обладают широким распространением, характеризуются почти горизонтальным залеганием и перекрывают палеозойский комплекс скальных пород. Мощность рыхлых отложений варьируется в пределах от 130 до 200 м, при этом среднее значение составляет около 160 м. Под рыхлыми отложениями залегают глины коры выветривания, характеризующиеся широким распространением. Их мощность достигает 35 м, при среднем значении порядка 5÷6 м.

Комплекс скальных пород палеозоя включает в себя осадочные породы, осадочно-вулканогенными, эффузивными и метасоматическими породами.

Породы имеют синклинальное и антиклинальное залегание. На месторождении выделяются три антиклинальные и одна синклинальная складки. Породы в различной степени трещиноваты. На месторождении выявлено 18 разрывных нарушений. Нарушения осложнены оперяющей трещиноватостью.

На основе геологического строения и физико-механических свойств палеозойских пород в пределах контура карьера выделено три инженерно-геологических участка (рисунок 1.20).

Участок №1 охватывает западный, северо-западный и юго-западный борта карьера. Этот участок характеризуется наиболее неблагоприятными условиями залегания осадочных пород (известняков), которые имеют угол падения в сторону выработанного пространства от 15° до 20°, а в нижней части борта — до 35°–50°.

Участок №2 включает южный и юго-восточный борта карьера, где условия более благоприятные. Борты сложены преимущественно эффузивными, метасоматическими и осадочными породами. Осадочные породы преобладают в нижней части южного борта, где угол падения в сторону выемки варьируется от 40° до 60°. Восточная часть борта в основном сложена эффузивными и метасоматическими породами.

Участок №3 включает северо-восточный и северный борта карьера. Этот участок состоит в основном из осадочно-вулканогенных пород (туфопесчаников) и эффузивных пород, реже встречаются осадочные породы. Туфопесчаники имеют пологое падение в сторону выемки или залегают горизонтально.

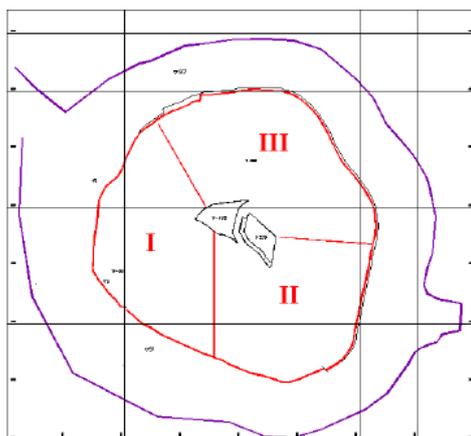


Рисунок 1.20 - Проектное районирование Качарского карьера по инженерно-геологическим условиям скальной толщи

Характеристика участков приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристика инженерно-геологических участков

Наименование участка	Наименование борта карьеров	Наименование пород, слагающих борта карьера	Угол падения пород в сторону выемки
I-й	Западный, северо-западный, юго-западный	Борта карьера сложены осадочными и эффузивными породами	Известняков от 15 <sup>0</sup> - 20 <sup>0</sup> вверху до 35 <sup>0</sup> - 55 <sup>0</sup> в нижней части
II-й	Южный, юго-восточный	Борта карьера сложены в основном эффузивными, метасоматическими и осадочными породами. Осадочные породы залегают в нижней части южного борта	Падение осадочных пород от 40 <sup>0</sup> до 60 <sup>0</sup>
III-й	Северо-восточный, северный	Участок сложен в основном осадочно-вулканогенными (туфопесчаники) и эффузивными породами	Туфопесчаники имеют пологое падение до горизонтального

В результате рейтингового районирования на территории карьера (рисунки 1.21-1.22), выполненного специалистами ИГД УрО РАН (г. Екатеринбург) выделено восемь участков, наиболее подверженных воздействию этих факторов. Цифры от 3 до 6 на выделенных участках соответствуют количеству негативных факторов. На территории, не попавшей в выделенные зоны, действуют один - два фактора [31].

Учету подлежали следующие шесть факторов:

- 1) Физико-механические и прочностные характеристики горных пород;
- 2) Угол падения напластования геологических пород в сторону выработанного пространства;
- 3) Области структурных ослаблений массива по результатам инженерно-геофизических исследований;

- 4) Границы кластеров напряженно-деформированного состояния и области концентрации деформаций от трендовых геодинамических движений;
- 5) Границы кластеров напряженно-деформированного состояния, области концентрации деформаций и интенсивности короткопериодных геодинамических движений;
- 6) Распределение фактических деформаций бортов и уступов по поверхности карьера.

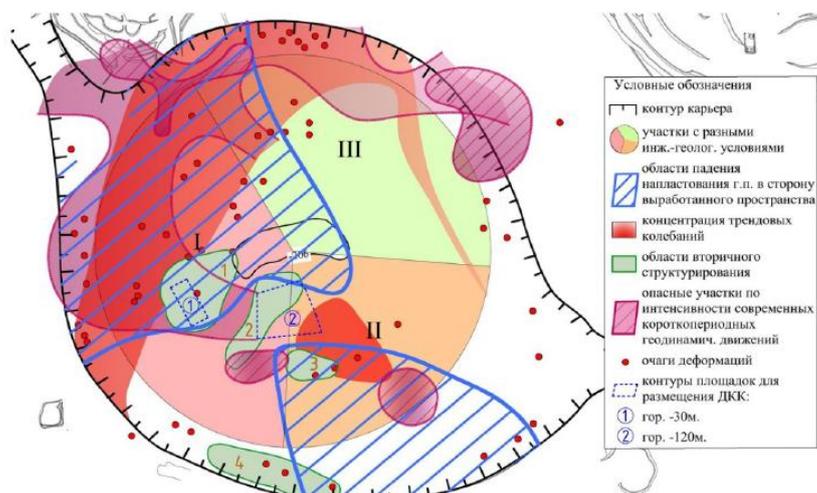


Рисунок 1.21 - Распределение негативных факторов по территории карьера

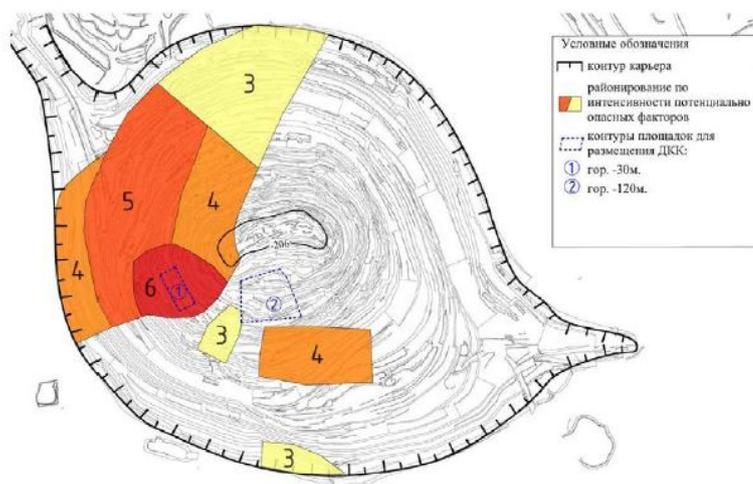


Рисунок 1.22 – Рейтинговое районирование территории карьера по количеству негативных факторов 3 и более

### 1.3.2 Гидрогеологическая характеристика месторождения

В гидрогеологическом отношении Качарское месторождение относится к категории сложных и имеет пять водоносных горизонтов, из которых все, кроме "верховодки", имели напорный характер. Все горизонты в карьере практически осушены, приток воды в карьер незначительный, до 45 ÷ 60 м/час

и происходит из первого и четвертого горизонтов в виде остаточной воды после осушения.

Первый горизонт грунтовых вод, расположенный близ поверхности, приурочен к четвертичным супесям и верхнеолигоценовым глинистым пескам. В качестве водоупора выступают глины чеганской свиты. Источник питания этого горизонта — атмосферные осадки. Распространение водного горизонта ограничено, он имеет местное распространение. Горизонт безнапорный, его залегание не превышает 4,5 м от поверхности земли. Коэффициент фильтрации песков варьируется в пределах от 0,012 до 0,38 м/сутки.

Второй водоносный горизонт приурочен к толщам опок и песчаников тасаранской свиты, с мощностью 55–70 метров. Этот горизонт содержит напорные пластово-трещиноватые воды. Пьезометрические уровни горизонта варьируются от 26 до 70 метров. Коэффициент фильтрации колеблется в пределах от 0,002 до 0,12 м/сут. Горизонт практически осушен.

Третий водоносный горизонт заключен в песчаниках нижнего маастрихта и в двух слоях мелкозернистых косослоистых песков сантона. Воды в этом горизонте напорные, при этом пьезометрические уровни находятся на глубинах от 12 до 17 метров, а величина напора воды над кровлей горизонта колеблется в пределах от 83 до 99,6 метров. Коэффициент фильтрации составляет от 0,006 до 0,009 м/сут. Этот водоносный горизонт практически осушен.

Скальные породы палеозойского фундамента содержат трещинные воды пятого водоносного горизонта. Величина напора над кровлей горизонта варьируется от 83,2 до 88,8 метров, а пьезометрические уровни устанавливаются на глубине от 21 до 38 метров от поверхности. Коэффициент фильтрации изменяется в пределах от 0,00005 до 0,05 м/сут, в зонах нарушений достигая 0,96 м/сут. По гидрохимическому составу воды этого горизонта схожи с водами четвертого горизонта.

В настоящее время пьезометрические напоры водоносного горизонта в пределах карьера значительно снижены, и на участке первоочередной обработки горизонт практически полностью сдренирован.

Максимальные водоприток в Качарский карьер могут достигать 3500 м/час. Общий водоприток по площади карьера составляет  $35 \div 55$  м/час. Наличие в покровной толще мезозойских отложениях четырех водоносных горизонтов, три из которых приурочены к песчано-глинистым отложениям, слабоустойчивым в обводненном состоянии, определили необходимость в выполнении комплекса специальных дренажных мероприятий при строительстве и эксплуатации карьера [32].

### **1.3.3 Анализ современных геодинамических движений Качарского карьера. Исследование напряженно-деформированного состояния горного массива Качарского карьера.**

Институтом горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург) в период с августа по ноябрь 2015 г. для определения параметров напряженно-деформационного поля и трендовых современных геодинамических движений по системе

геодезических пунктов, был выполнен комплекс геодезических и геофизических исследований Качарского карьера [33].

На каждом пункте, расположенном как в пределах месторождения, так и на удалении от него, были выполнены цикловые измерения пространственных координат методом спутникового позиционирования. В результате камеральной обработки результатов измерений и математического анализа определены смещения пунктов геодезической сети.

Результаты геодезического мониторинга представлены на рисунке 1.23.

Современные геодинамические движения по данным результатов экспериментальных исследований на многочисленных геодинамических полигонах носят циклический характер.

В зависимости от пространственно-временного масштаба наблюдательной системы и способа измерений выделяют два вида современных геодинамических движений – трендовые и цикличные короткопериодные движения. К трендовым движениям относятся смещения, наблюдаемые за периоды от полугода-года до нескольких десятков лет. Трендовые движения сохраняют в течение длительных промежутков времени относительное постоянство скорости и направленности, обычно приурочены к крупным тектоническим нарушениям или к границам вторичных структур, формирующихся в иерархически блочной среде массива горных пород.

К циклическим короткопериодным движениям относятся смещения, продолжительность циклов которых укладывается один и более раз в сеансы непрерывных наблюдений, длящихся по несколько часов.

Определение параметров циклических короткопериодных геодинамических движений выполняется путем непрерывного мониторинга спутниковыми методами системы реперов в течение нескольких часов. Измерениями фиксируются изменение пространственных координат пунктов мониторинговой сети. Интервал между дискретными измерениями может составлять от нескольких минут до нескольких десятков минут. Реализация непрерывного мониторинга комплексами спутниковой геодезии обеспечивает получение всех трех координат точки стояния прибора в заданный момент времени. При одновременном использовании нескольких приборов получается пространственное смещение точек, на которых стоят приборы, друг относительно друга с любым заданным временным интервалом (от нескольких десятков минут до нескольких часов). Точность измерения смещений между точками составляет 1-5 мм.

Полученные в результате инструментальных наблюдений деформации интервалов, величины и направления векторов сдвижений, с использованием математического аппарата механики сплошной среды были преобразованы в тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций (рисунок 1.28).

Согласно результатам исследований, в пределах изучаемого горного массива Качарского карьера выделяются два структурных блока, имеющих разнонаправленные взаимно перпендикулярные современные трендовые геодинамические движения – северо-западный и южный. Смещение северо-

западного блока на юг создает в области контакта структурных блоков в юго-западном борту карьера зону концентрации сжимающих напряжений и деформаций, способную вызвать сдвиговые трещины в массиве горных пород борта с нарушением первичной структуры и приведением сдвинувшегося массива в разрушенное состояние. Граница зоны сжимающих и растягивающих деформаций проходит по тектоническому нарушению северо-восточного направления. Величины вертикальных сдвижений в области карьера за период его существования находится в диапазоне от +0,391 м до -0,209 м. Оседания поверхности имеют плавное увеличение от западного борта карьера во все направления.

Векторы горизонтальных движений пунктов в целом имеют разнонаправленный характер и довольно небольшие значения от 0,003 м до 0,025 м.

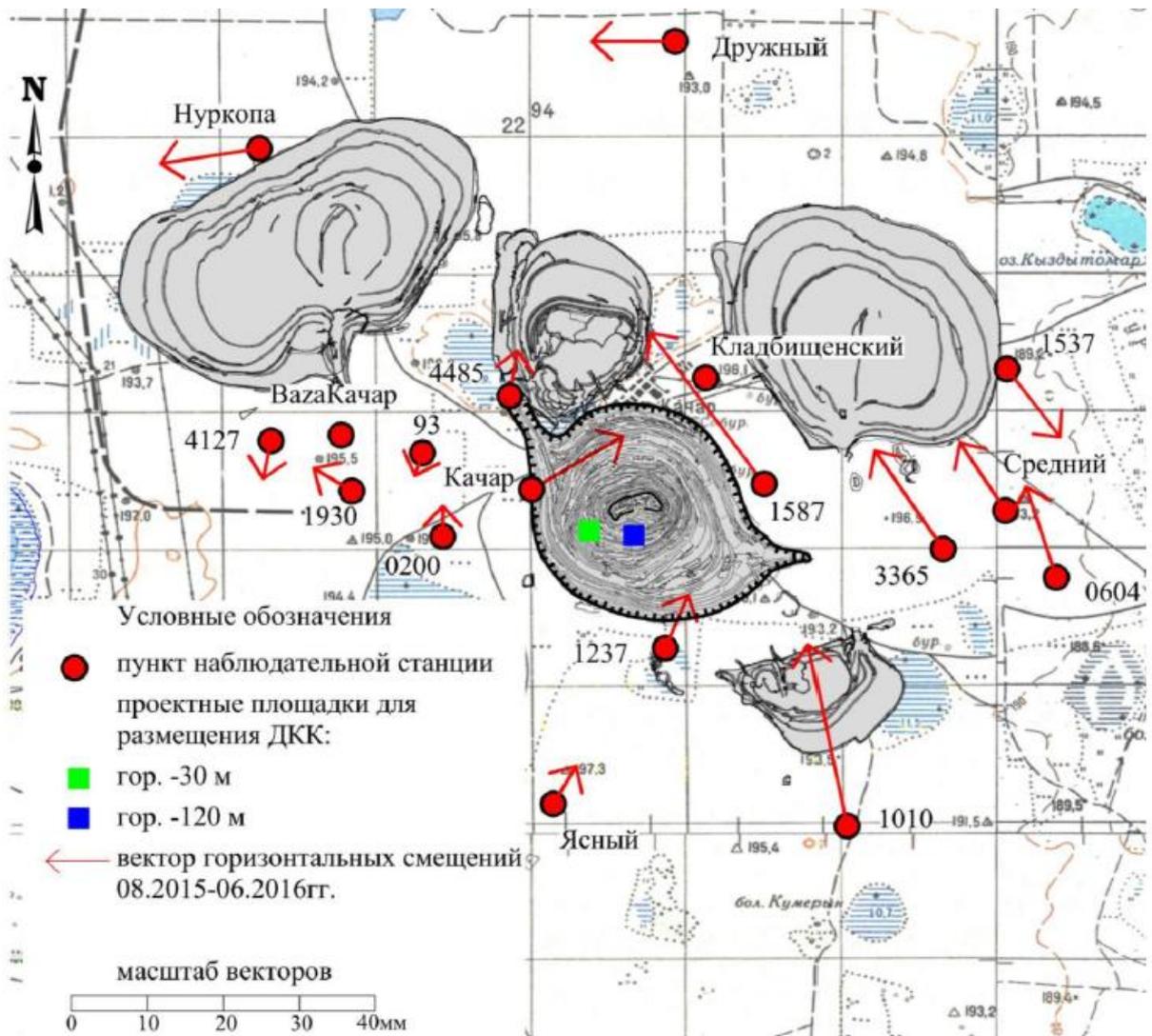


Рисунок 1.23- Векторы горизонтальных смещений пунктов наблюдательной станции Качарского карьера

Исходное и вторичное напряженно-деформированные состояния прибортовых массивов горных пород Качарского карьера имеют весьма неоднородное строение (рисунок 1.2.4), что приводит к микро-подвижкам крупных геологических блоков по тектоническим контактам, что может становиться причиной изменения гидрогеомеханической структуры прибортового массива и режима подземных вод.

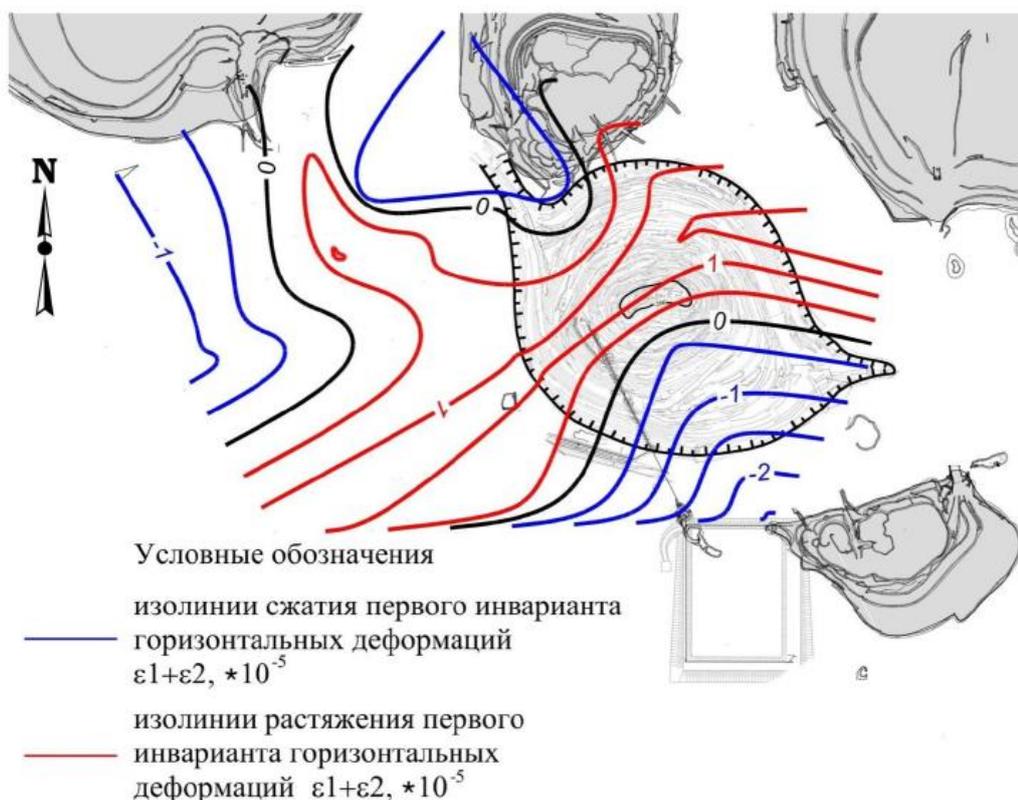


Рисунок 1.24 – Распределение изолиний первого инварианта горизонтальных деформаций в районе Качарского карьера

Анализ полученных результатов показывает, что западный борт карьера имеет более неоднородные деформационные характеристики в сравнении с другими бортами. Здесь располагаются зоны повышенных концентраций растяжений и сжатий, которые поочередно сменяют друг друга. Повышенные значения растягивающих деформаций имеют место в восточном борту карьера. Несколько повышенная концентрация сжимающих деформаций присутствует в северо-восточном борту карьера.

### 1.3.4 Обрушение юго-западного борта карьера

Первые факты обрушения на юго-западном борту карьера были зарегистрированы 1 ноября 2011 года. В карьере обрушился подпорный борт, и между горизонтами -23 м и -73 м образовались трещины растяжения. Обрушение произошло на участке длиной около 47 метров и глубиной около 42 метров.

В октябре 2015 года произошло следующее обрушение вслед за увеличением трещин растяжения, наблюдавшимся с начала 2015 года. Самая большая трещина длиной 300 м простиралась в северо-западном направлении, а еще две трещины длиной около 220 м — в юго-восточном.

Собранные в то время данные мониторинга указали, что ниже отметки -30 м произошло оползание горной массы с основанием на уровне -160 м. Оползающая горная масса продолжала двигаться со скоростью до 10 мм в сутки.

Анализ зоны обрушения 2011 и 2015 годов показал, что потеря устойчивости вызвана горизонтальной концентрацией напряжения. Анализ также показал, что весь юго-западный участок карьера подвержен образованию концентраций напряжений по мере углубления карьера.

Предполагается, что шесть структурных нарушений, выявленные в ходе геофизических работ на юго-западных откосах карьера, выполненных специалистами ИГД УРО РАН в 2015 году, [19] являются разломами или зонами разломов (рисунок 1.25).

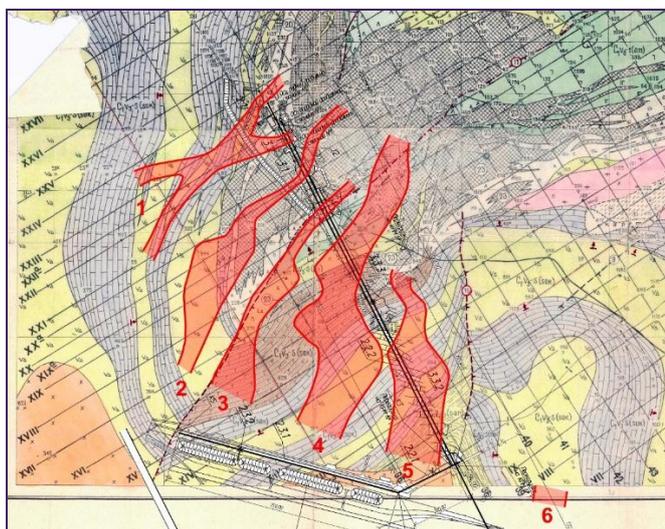


Рисунок 1.25 - Зоны влияния структурных нарушений, выявленных в ходе геофизических работ на юго-западных откосах карьера

Описание механизма обрушения в 2015 году в виде двунаправленного сдавливания показывает, что вокруг структурных нарушений произошло некоторое ослабление породного массива, и это может быть отдельным геотехническим доменом.

Причиной формирования аномальной зоны с высокими сжимающими тангенциальными напряжениями, вызвавшими сдвиговые нарушения на площадке горизонта минус 30 м Качарского карьера в 2015 году, явились взаимно перпендикулярные смещения соседних структурных блоков под влиянием современных геодинамических движений (рисунок 1.26) [19].



Рисунок 1.26 – Формирование области концентрации сжимающих напряжений на юго-западном борту Качарского карьера

### 1.3.5 Система мониторинга состояния устойчивости прибортового массива Качарского карьера на основе инструментальных наблюдений

Мониторинг состояния устойчивости прибортовых массивов Качарского карьера и отвалов на основе инструментальных наблюдений ведется специалистами КарГТУ с августа 2009 года с использованием GNSS технологий (рисунок 1.27) [34].

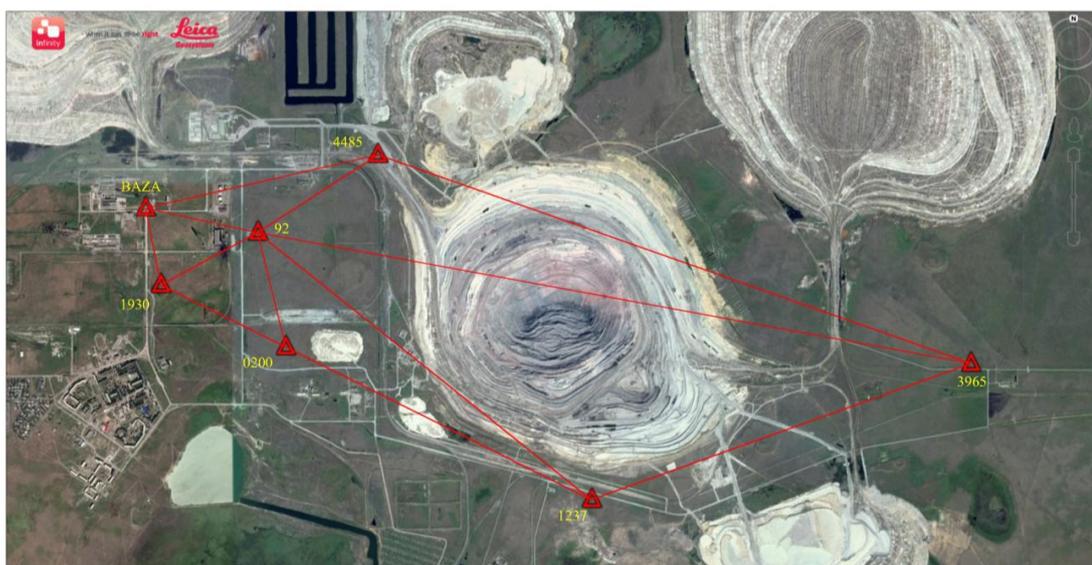


Рисунок 1.27 – Местоположение пунктов государственной геодезической сети (ГГС) опорных реперов наблюдательных станций Качарского карьера

Ниже приводится анализ имеющихся данных наблюдений за 2017 год. Были проведены три серии инструментальных маркшейдерско-геодезических

наблюдений, направленных на оценку состояния устойчивости откосов уступов, бортов и отвалов Качарского карьера АО «ССГПО. Для производства наблюдений за деформациями бортов Качарского карьера создано пять наблюдательных станций I, II, III, IV, V в виде профильных линий реперов, закладываемых на верхней площадке и уступах борта карьера перпендикулярно его верхней бровке.

**Наблюдательная станция I.** На юго-западном борту наблюдательная станция I, состоит из двух опорных реперов и 16 рабочих.

План наблюдательной станции I в качестве примера представлен на рисунке 1.28.

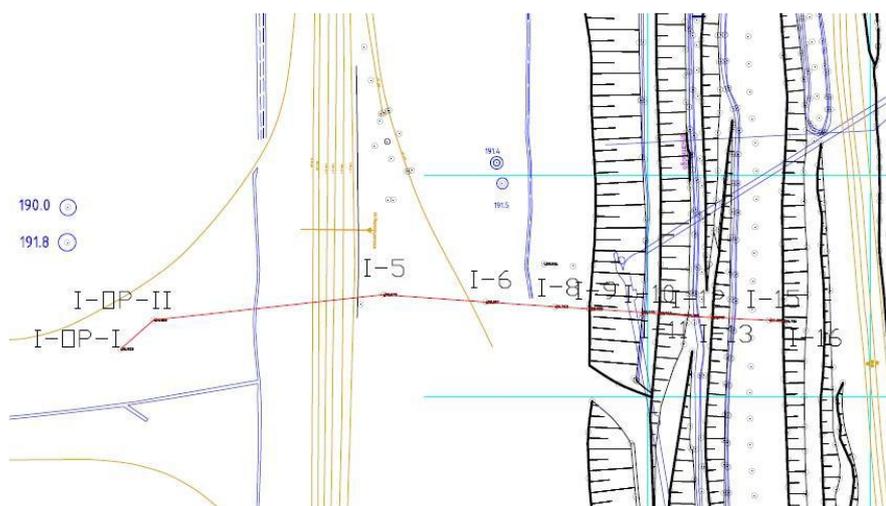


Рисунок 1.28 - План наблюдательной станции I Качарского карьера

**Наблюдательная станция II.** В районе обрушения на юго-западном борту до транспортной бермы предусмотрено создание площадной наблюдательной станции II, состоящей из двух опорных реперов и 43 рабочих

**Наблюдательная станция III.** На южном борту карьера до транспортной бермы предусмотрено создание площадной наблюдательной станции III, состоящей из двух опорных реперов и 14 рабочих.

**Наблюдательная станция IV.** На северо-востоке карьера по поверхности до верхних горизонтов предусмотрено создание площадной наблюдательной станции IV, состоящей из двух опорных реперов и 5 рабочих.

**Наблюдательная станция V.** На северо-западе карьера с поверхности до отметки + 15.00 предусмотрено создание площадной наблюдательной станции V, станция заложена только по поверхности и состоит из двух опорных реперов и 13 рабочих.

Анализ результатов наблюдений за сдвижением прибортового массива Качарского карьера за 2017 год показал, что устойчивое состояние откосов бортов карьера по профильным линиям обеспечивается.

### **1.3.6 Инженерно-геологические условия разработки горного массива Качарского карьера**

Инженерно-геологические условия разработки горного массива Качарского железорудного месторождения весьма сложные и определяются:

- наличием толщи рыхлых отложений мощностью до  $130 \div 200$  м;
- характерным для северо-западного, западного, юго-западного и южного бортов падением напластований сальных осадочных пород в сторону выработанного пространства под углом от  $30^\circ$  до  $60^\circ$ , наличием поверхностей ослабления по напластованиям;
- присутствием карстующихся, обводненных известняков в строении западного, юго-западного и южного бортов карьера. Особенно обводнены известняки в южной части карьера;
- наличием разрывных нарушений и зон повышенной трещиноватости в скальных палеозойских породах;
- наличием пяти водоносных горизонтов;
- интенсивным проявлением современной геодинамической активности, имеющей природно-техногенный генезис.

Согласно вышеперечисленному комплексу факторов наиболее неблагоприятные инженерно-геологические условия в пределах контура карьера наблюдается в районе юго-западного борта.

Южная часть карьера также характеризуется неблагоприятными инженерно-геологическими условиями из-за распространения здесь наиболее обводненных в контуре карьера карстующихся известняков, имеющих падение в сторону выработанного пространства. Детальные исследования напряженно-деформационной ситуации здесь не проводились.

Относительно благоприятные инженерно-геологические условия наблюдаются в северо-восточной и восточной частях карьера. Здесь отсутствуют известняки. Напластования пород имеют субгоризонтальное залегание.

### **1.4 Анализ и обобщение опыта исследований**

К недостаткам геомеханического мониторинга геофизическими методами при разработке месторождений открытым способом можно отнести сложность корреляции параметров искусственных геофизических полей с параметрами напряжений и деформации, что затрудняет их использование в решении практических горнотехнических задач.

Деформационные методы позволяют получить информацию о формировании энергонасыщенных зон, связанных с подготовкой разрушений. Горные удары, вызванные действиями повышенных напряжений, с физической точки зрения являются мгновенными (хрупкими) разрушениями некоторых объёмов пород, либо подвижками блоков структурных неоднородностей с выделением накопленной энергии.

Практически все породы, слагающие прибортовое пространство Качарского карьера, относятся к хрупким. Большинство обрушений горных пород (камнепады, обвалы и оползни) на крутых склонах, состоящих из прочных пород, указывают на типичное хрупкое поведение, и внезапное обрушение может также включать значительные объемы пород. Хрупкие разрушения при растяжении или сдвиге на крутых склонах обычно труднее всего предсказать в связи с внезапным характером и потенциальной быстротой ускорений.

Таким образом, для решения поставленной цели будут применяться системы мониторинга деформационного состояния массива горных пород, которые надежно коррелируются с напряженным состоянием горных пород.

На сегодняшний день современные компьютеры и улучшения в пользовательском интерфейсе 3D-программ способствуют переходу к использованию 3D-моделирования для оценки и прогнозирования НДС массива горных пород.

Для прогноза деформаций, механизма сдвижений и разрушений горных пород месторождений с учетом воздействия полей напряжений применяются численные методы для моделирования характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. Напряженно-деформированное состояние прибортового массива оценивается распределением напряжений и относительных деформаций в процессе ведения горных работ и при постановке борта в конечное положение. Численный анализ методом конечных элементов может анализировать как распределение напряжения, так и деформацию материалов в пределах склона, а также распределение порового давления.

Существенное достоинство численных методов – получение количественных результатов при решении задач, более полно учитывающих реальные условия работы объектов в отношении внешних воздействий, геометрических размеров, неоднородных включений и механических свойств массива горных пород [35].

Общие принципы организации типовой единой комплексной системы геомеханического мониторинга в условиях массивов скальных пород иерархично-блочной структуры при гравитационно-тектоническом поле природного напряженного состояния изложены в работе [7].

Общая концепция организации геомеханического мониторинга должна предусматривать выполнение следующих обязательных этапов:

1. Построение инженерно-геологической модели массива пород, на основе которой выполняется геомеханическое районирование массива пород, которая заключается в уменьшении разнообразия участков массива путем объединения их в комплексы с близкими показателями физико-механических свойств, а также с одинаковыми особенностями поведения пород при различных воздействиях на них (домены). Что позволяет на этой основе определения принципиальной структуры будущей общей геомеханической модели природно-технической системы обосновать основные методы мониторинговых наблюдений и общей схемы наблюдательных сетей.

2. Выбор приоритетных контролируемых параметров (напряжения и связанные с ними смещения).

3. Организация комплексной системы мониторинга состоит в проведении измерений параметров, выбранных на втором этапе.

4. Сопоставление расчетных и измеренных величин с целью верификации принятых моделей.

5. Расчет на моделях критических значений параметров, соответствующих переходу участков массива в опасное состояние.

6. Оценку современного состояния, контролируемого объекта путем сопоставления измеренных и критических значений наблюдаемых параметров.

7. Разработку технических мер по обеспечению эффективности и безопасности горных работ.

8. Контроль реализации разработанных технических мер и их корректировка.

Согласно мировым практикам [6] программа разработки научно-методических основ для создания единой системы геомониторинга массива горных пород глубоких карьеров должна включать следующие задачи:

- определение условий эксплуатации проектируемого объекта;
- оценка возможных механизмов, контролирующих нарушения устойчивости;
- определение измеряемых параметров и их возможных значений;
- разработка соответствующих систем мониторинга, включая выбор оборудования и его расположение;
- разработка методики измерений, включающей периодичность, сбор, обработку и интерпретацию данных, а также их представление;
- постановка задач по проектированию, построению эксплуатации систем мониторинга;
- планирование регулярной калибровки и технического обслуживания оборудования;
- разработка планов реагирования на инициирующие риск события и установление ответственности (подотчетности) для минимизации влияния сдвига пород.

Анализируя работы [6-7] для условий Качарского карьера предлагается следующая структура геомониторинга массива горных (рисунок 1.29):

К основным факторам, которые влияют на устойчивость откосов карьера относятся [36]:

- Наличие крупных геологических структур (также структуры различных рангов, слоистость, сланцеватость, слабые или дезинтегрированные породы и др.);
- последствия, вызванные грунтовыми водами (обводнение горных пород, поровое давление, снижение прочности пород при размокании и др.);
- природные- внутреннее напряжение, действующее на откосы карьера;

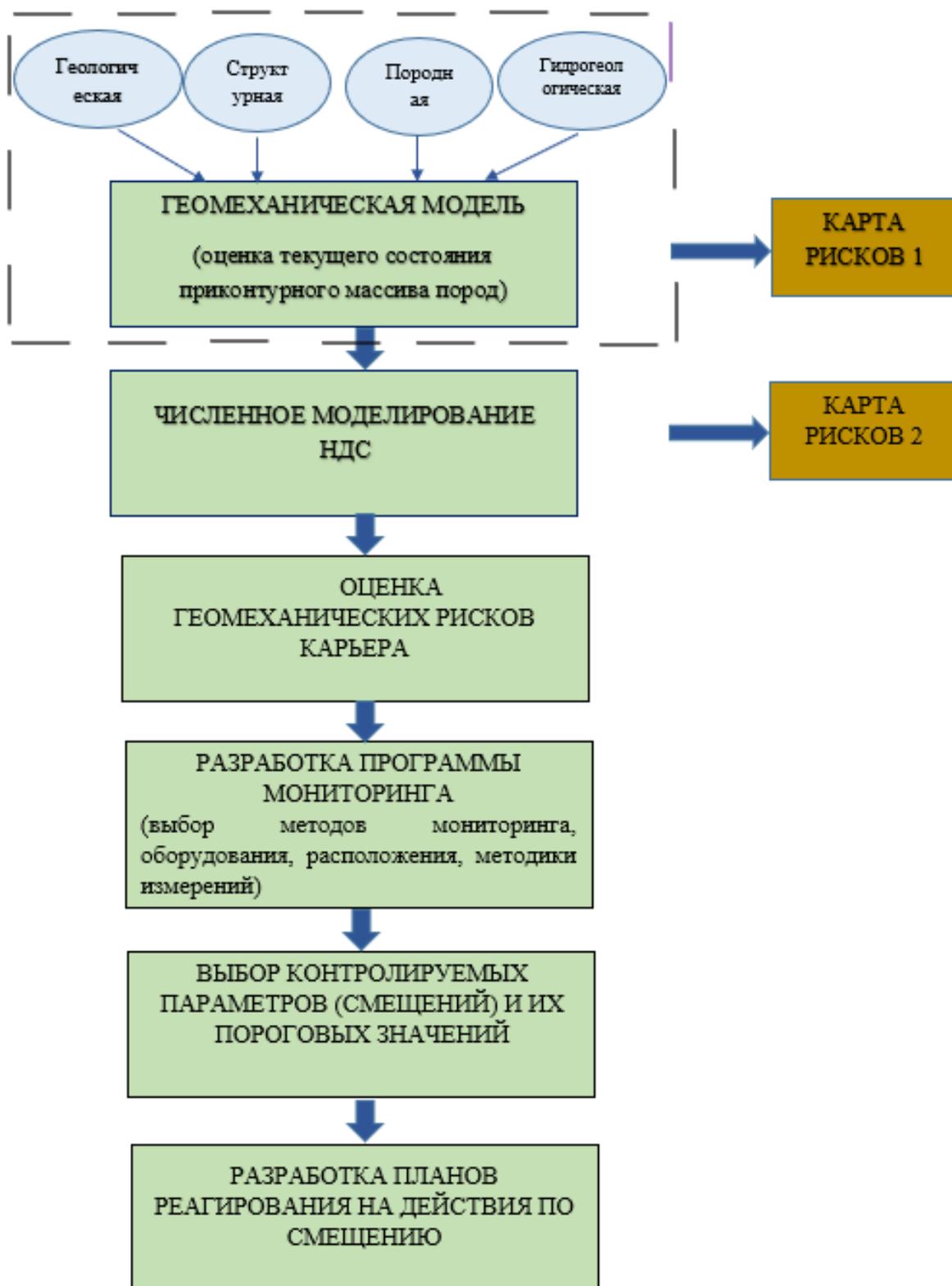


Рисунок 1.29 – Структура геотехнического мониторинга массива горных Качарского карьера

- общая прочность горного массива;
- техногенные (нагрузки от горнотранспортного оборудования, сейсмическое воздействие взрывов и др.);

- конечная конструкция борта.

Для оценки текущего состояния массива горных пород будет построена (актуализирована) геомеханическая модель (ГМ) рассматриваемого месторождения. ГМ представляет собой объединение геологических, структурных, гидрогеологических и породной моделей.

ГМ объекта исследования строится с помощью современных компьютерных программных продуктов (Datamine, Micromine, Leapfrog и др).

Оценка текущего состояния приконтурного массива горных пород карьера с помощью ГМ позволит на начальном этапе составить **«КАРТУ РИСКОВ 1»**, обусловленную горно-геологическими факторами. В ГМ будут включены ослабленные зоны в виде разломов, зон трещиноватости, обводенности, также карта будет включать структурно контролируемые зоны разрушений (плоскостные разрушения, клина, опрокидывания и вращения), выявленные по результатам кинематического анализа. Участки потенциальной опасности могут быть также идентифицированы с помощью данных структурного картирования уступов и визуальных наблюдений.

Для прогноза деформаций, механизма сдвижений и разрушений прибортового массива борта карьера с учетом воздействия полей напряжений будут применены численные методы 2D-моделирования характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива.

Результатом применения численного моделирования НДС массива станет выявление местоположения потенциально неустойчивых участков с последующим составлением **«КАРТЫ РИСКОВ 2»**.

Далее будет определен перечень опасных факторов на объекте с нанесением на план карьера. В программе геотехнического мониторинга массива скальных пород Качарского карьера для каждого объекта геотехнического мониторинга (домена) устанавливаются состав, объемы, вид оборудования, периодичность наблюдений, определены пороговые диапазоны движения, которые будут вызывать определенные оперативное реагирование при их превышении и разработан план реагирования на действия по смещению.

## **1.5 Обоснование цели и задач исследований**

**Основная цель данной работы** состоит в разработке научно-методических основ создания единой системы геомониторинга природного напряженного состояния массива скальных пород Качарского карьера для снижения геотехнических рисков при разработке карьера.

Для достижения поставленной цели ставятся следующие задачи исследования:

- оценка текущего состояния приконтурного массива горных пород Качарского карьера при помощи построения его геомеханической модели;

- определение закономерностей распределения НДС и разработка методики прогноза нестабильных участков в прибортовом массиве Качарского карьера, вызванных действием напряжений с использованием численного моделирования НДС;

- разработка системы мониторинга (выбор оборудования, расположение, методика);
- разработка планов реагирования на действия по смещению, вызванных действием НДС.

## Выводы по главе 1

1. Были рассмотрены применяемые в отечественной и зарубежной практике методы оценки напряженно-деформационного состояния массива горных пород.
2. Изучены преимущества и недостатки используемых технологий геотехнического мониторинга уступов и бортов глубоких карьеров Казахстана и зарубежных горнодобывающих предприятий открытой разработки.
3. Дан обзор текущего состояния геотехнических данных (модели, структуры и т.д.) Качарского карьера, также выполнен анализ результатов ранее выполненных исследований по объекту;
4. На основании анализа зарубежного и отечественного подхода к организации системы геотехнического мониторинга бортов и уступов глубоких карьеров, и имеющихся инженерно-геологических условий разработки горного массива Качарского карьера разработана структура геомониторинга поверхности карьера, включающая методику прогноза деформаций, механизма сдвижений и разрушений прибортового массива борта карьера с учетом воздействия полей напряжений.

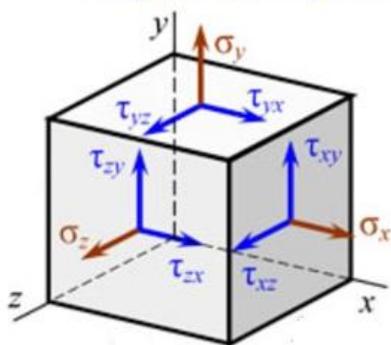
## 2 Определение закономерностей распределения НДС и разработка методики прогноза нестабильных участков в прибортовом массиве Качарского карьера, вызванных действием напряжений с использованием численного моделирования НДС

### 2.1 Закономерности формирования напряженного состояния массива

Существующие в массиве пород напряжения влияют на его свойства, характеристики и на условия ведения работ на месторождении. Величина и ориентация напряжений контролируют трещиноватость и ее распространение, вызывая деформации массива. Горные работы в карьере приводят к нарушению существующего поля напряжений, при этом некоторые напряжения уменьшаются (разгружаются), тогда как другие увеличиваются (концентрируются). Изменение природных напряжений имеют серьезное влияние на поведение породного массива, окружающего выработки. Если природные напряжения в бортах откоса карьера велики и превышают прочность породного массива, тогда происходит его деформация и создаются большие зоны ослабленных пород, которые затем могут обрушиться под действием собственного веса [6].

Горный массив до проведения в нем выработок находится в нетронутом равновесии: гравитационные и тектонические напряжения уравниваются друг с другом и сопротивлением горных пород (прочностью) на сжатие, составляя тензор напряжений нетронутого массива. Любое напряженное состояние полностью определяется тремя главными напряжениями ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ), а эти напряжения - шесть независимыми компонентами осевых напряжений ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ), которые образуют тензор напряжений (Рисунки 2.1, 2.2).

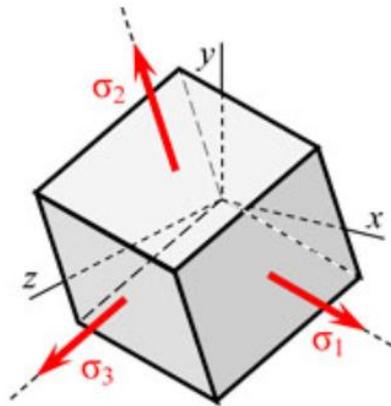
После проведения экспериментальных работ по измерению напряжений в массиве горных пород было установлено, что наряду с гравитационными напряжениями действует еще одна составляющая, которую назвали тектонической. Основоположником гипотезы гравитационно-тектонических напряжений является Н. Хаст [37] (таблица 2.1).



$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.1- Нормальные и касательные напряжения, действующие по

граням элементарного блока



$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.2- Положение элементарного блока, при котором по его граням действуют только нормальные напряжения. Количество независимых компонент тензора в этом случае уменьшается до трех

Таблица 2.1. Гипотезы формирования природных напряжений в массиве горных пород

Авторы	Напряжения	
Гейм, 1878 г.	$\sigma_x^n = \sigma_y^n = \sigma_z^n = -\gamma H$	
А.Н. Динник, 1926 г.	$\sigma_z^n = -\gamma H$ $\sigma_x^n = \sigma_y^n = -\eta \gamma H$	
Н. Хаст, 1960 г.	$\sigma_z^n = -\gamma H$ $\sigma_x^n = -\eta \gamma H + T_x = -\eta \sigma_z^n + T_x$ $\sigma_y^n = -\eta \gamma H + T_y = -\eta \sigma_z^n + T_y$	(2.1) (2.2) (2.3)

где,  $\sigma_x^n, \sigma_y^n, \sigma_z^n$ , – составляющие природных напряжений, МПа;

$\gamma$  – удельный вес пород, н/м<sup>3</sup>;

$H$  – мощность перекрывающих пород, м;

$\eta$  – коэффициент бокового распора (определяется коэффициентом Пуассона);

$T_x, T_y$  – главные составляющие тектонических напряжений, МПа.

Коэффициент бокового распора по А. Н. Диннику ( $\eta$ ) равен:

$$\eta = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (2.4)$$

$\mu$ - коэффициент Пуассона массива горных пород;

Проблема прогноза тектонического влияния на напряженное состояние массива горных пород является актуальной в геомеханике. Первоначальное напряженное состояние изменяется по мере разработки карьера. Выработанное пространство в массиве заставляет напряжение перераспределяться вокруг карьера. Результирующие основные напряжения вокруг карьера переориентируются по сравнению с исходным напряженным состоянием.

Знание закономерностей распределения напряжений в горных породах позволяет обеспечить безопасную и эффективную эксплуатацию месторождений в разнообразных горно-геологических и горнотехнических условиях [38].

Характерными признаками тектонически-напряжённых массивов являются специфические проявления горного давления в подземных выработках, дискование керна и азимутальные искривления стволов буровых скважин, а также аномально высокие величины компонентов поля напряжений по одному из горизонтальных (или близких к нему) направлений [39].

До сих пор нет разработанных теоретических методик анализа тектонического напряженного состояния массива горных пород.

Методы, позволяющие изучать напряженно-деформированное состояние массивов горных пород, можно условно разделить на три категории:

1) натурные исследования в массиве- основаны на определении параметров тектонических напряжений непосредственным их измерением;

2) лабораторные эксперименты- основаны на положениях теории подобия и заключается в замене пород природного массива искусственными материалами;

3) теоретические (расчетные) исследования- для построения математической модели, описывающей напряженно-деформированное состояние массивов горных пород, могут быть использованы как аналитические, так и численные методы.

Наиболее точное описание напряженно-деформированного состояния массива горных пород возможно при помощи натуральных наблюдений, непосредственных замеров напряжений и деформаций. Для этих целей широкое применение получили методы разгрузки, гидроразрыва и ультразвуковой метод. Наиболее разработанным экспериментальным методом измерения напряжений в массивах горных пород является метод разгрузки. Он основан на использовании характеристик упругого восстановления формы элемента массива при искусственном нарушении его связи с основным массивом.

Скальный массив горных пород, имеющий блочную структуру со сложной иерархией структурных нарушений, представляется в геомеханической модели в виде упругой однородной изотропной среды с деформационными характеристиками, определяемыми на базах, соответствующих задачам сдвижения горных пород.

## **2.2 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород**

Для прогноза деформаций, сдвижений и разрушений горных пород месторождений с учетом полей напряжений часто применяются численные методы для моделирования характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. Их комплексирование с натурными методами прогноза позволяет осуществить выбор геомеханически обоснованных более безопасных технических решений.

Существенное достоинство численных методов – получение количественных результатов при решении задач, более полно учитывающих реальные условия работы объектов в отношении внешних воздействий, геометрических размеров, неоднородных включений и механических свойств массива горных пород.

Анализ напряженно-деформированного состояния подработанного массива основывается на упругопластической модели для условий плоского деформированного состояния (ПДС) или трехмерных постановках. Для решения задачи об определении напряженно-деформированного состояния подработанного массива с учетом его упругопластического поведения используется метод конечных элементов [40-42].

Идея МКЭ в приложении к решениям задач теории упругости заключается в том, что рассматриваемая область сплошной среды представляется в виде совокупности конечного числа отдельных элементов, связанных в узловых точках конечным числом узловых связей. Каждому элементу предписываются конкретные свойства, определяемые упругими и геометрическими характеристиками среды таким образом, чтобы сохранить свойства первоначальной среды при нахождении деформаций и напряжений в каждом ее составном элементе. Наличие конечного числа узловых связей элементов дает возможность с помощью методов матричной алгебры проанализировать работу всего сооружения.

Примерами комплексов программ, моделирующих НДС являются пакеты программ ANSYS, RS2 RocScience, ABAQUS, PLAXIS 2-3D, MIDAS GTS NX 2-3D и др. Устойчивость откосов анализируется на основе решения задач теории упругости, полученных численными методами, в основном с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

В целом методику прогнозирования НДС методом конечных элементов можно представить в виде следующей последовательности:

1. Создание трехмерной конечно-элементной модели на основании геологической модели месторождения в ПО Datamine. Протяженность породного массива моделируют в пределах некоторых границ. Границы модели выбираются в соответствии с принципом Сен-Венана, согласно которому зона влияния особенности распространяется на расстояние не более трех ее характерных размеров;

2. Выделение расчетной области (плоской или объемной) с линейными размерами;

3. Назначение сетки разбивки. Вся модель конструкции или отдельной ее части делится на множество конечных элементов, соединенных между собой в вершинах. Достоверность расчетов по МКЭ зависит от многих факторов, в том числе и от количества конечных элементов;

4. Задание граничных условий. В качестве граничных условий задается полный тензор первоначальных напряжений, слагающийся из тектонических напряжений, и гравитационных напряжений (веса пород), изменяющихся по глубине по итогам изучения естественного напряженного состояния. Соответствие расчетного поля напряжений реальному

геомеханическому состоянию массива во многом зависит от обоснованного выбора размеров модели и граничных условий. Всем узлам на внешней границе задается фиксированное граничное условие нулевого смещения. Задание граничных условий позволяет отразить влияние внешних факторов на формирование напряженно-деформированного состояния. В расчетной схеме учитываются основные особенности строения подработанного массива, действие массовых сил, граничные условия: статические и кинематические;

5. Выбор характера деформирования материала (упругий, пластический и пр.) и критерия разрушения (Кулона-Мора, Друкера-Прагера, Хука-Брауна и др.);

6. Задание расчетных параметров. Исходными данными для расчёта сдвижений и деформаций в окрестности выемки являются, прежде всего, геологические и структурно-тектонические особенности, физико-механические свойства вмещающих пород, а также параметры борта карьера. Базовые физико-механические свойства элементов геологического разреза, определяющие исходное поле напряжений и упругопластическое деформирование пород, включают: удельный вес пород, деформационные характеристики (модуль деформации и коэффициент Пуассона) и прочностные параметры (предел прочности при одноосном растяжении и сжатии).

7. Расчет напряжений (деформаций, перемещений), графическое представление и предварительное представление результатов расчета;

8. Повторные решения при необходимости изменения густоты сетки разбивки на определенных участках исследуемой области, при корректировке деформационных характеристик для нелинейных задач и т.п.;

9. Окончательное представление результатов.

### **2.3 Критерии оценки устойчивости бортов и уступов карьера по результатам численного моделирования**

Основной анализ напряженно-деформированного состояния выполнен для наиболее информативных компонент тензора напряжений: главных напряжений  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$  и максимального касательного напряжения —  $\tau_{max}$ .

Считается, что потеря устойчивости участком прибортового массива пород карьера по результатам численного моделирования возможна при реализации одного из следующих критериев [43]:

- при превышении максимальной компонентой сжимающих напряжений  $\sigma_{max}$  50% предела прочности на одноосное сжатие пород ( $\sigma_{сж}$ ), слагающих рассматриваемый участок борта ( $|\sigma_{max}| \geq 0.5 |\sigma_{сж}|$ ) массив переходит в предельное состояние;

- при превышении минимальной компонентой напряжений  $\sigma_{min}$  растягивающих напряжений предела прочности на растяжение:  $\sigma_{min} > \sigma_p$  возможно раскрытие природных и формирование техногенных трещин;

- при превышении максимальными касательными напряжениями  $\tau_{max}$  предела прочности на сдвиг вероятен сдвиг блоков пород по природным и техногенным трещинам.

Согласно теории предельного равновесия, условие неразрушения по поверхности скольжения, например, по I-I (рисунок 2.3) определяется неравенством:

$$\tau_{max} < [\tau_0] + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad (2.5)$$

где  $\tau_{max}$  - действующие максимальные касательные напряжения;  
 $\tau_0, \varphi$  - сцепление и угол внутреннего трения разрушаемого материала;  
 $\sigma_n$  - нормальная составляющая напряжения, действующая на площадку скольжения.

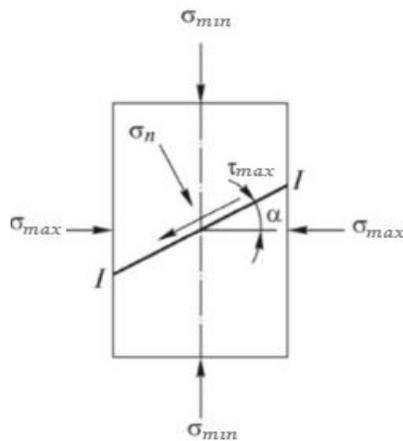


Рисунок 2.3- Схема действия напряжений при разрушении в форме скола (сдвига)

Нормальная составляющая определяется формулой:

$$\sigma_n = \sigma_{min} \cos^2 \alpha + \sigma_{max} \sin^2 \alpha \quad (2.6)$$

где,  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  – соответственно максимальные и минимальные главные напряжения;

$\alpha$  – угол наклона поверхности скольжения к линии действия минимального главного напряжения  $\sigma_{min}$ . Максимум касательных напряжений получается при  $\alpha = 45^\circ$ .

Коэффициент прочности участка в зоне разрушения определяется как:

$$n = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min}) \operatorname{tg} \varphi + 2C}{2\tau_{max}} \quad (2.7)$$

где  $\varphi$  - угол внутреннего трения, градус

$C$  – сцепление в массиве, т/м<sup>2</sup>

## 2.4 Реализация численного моделирования напряженного состояния породного массива Качарского карьера

### 2.4.1 Разработка геомеханической модели Качарского месторождения.

Снижение риска обрушения откосов карьера требует знаний структурной геологии, свойств массива горных пород и влияния воды и других внешних сил в контролируемой зоне. Для понимания геомеханических условий была разработана 3хмерная геомеханическая модель карьера.

Создание трехмерной конечно-элементной модели на основании структурно-геологической модели месторождения было реализовано в ПО Datamine. На рисунке 2.4 приведен общий вид трехмерной модели Качарского карьера в конечном контуре [44].

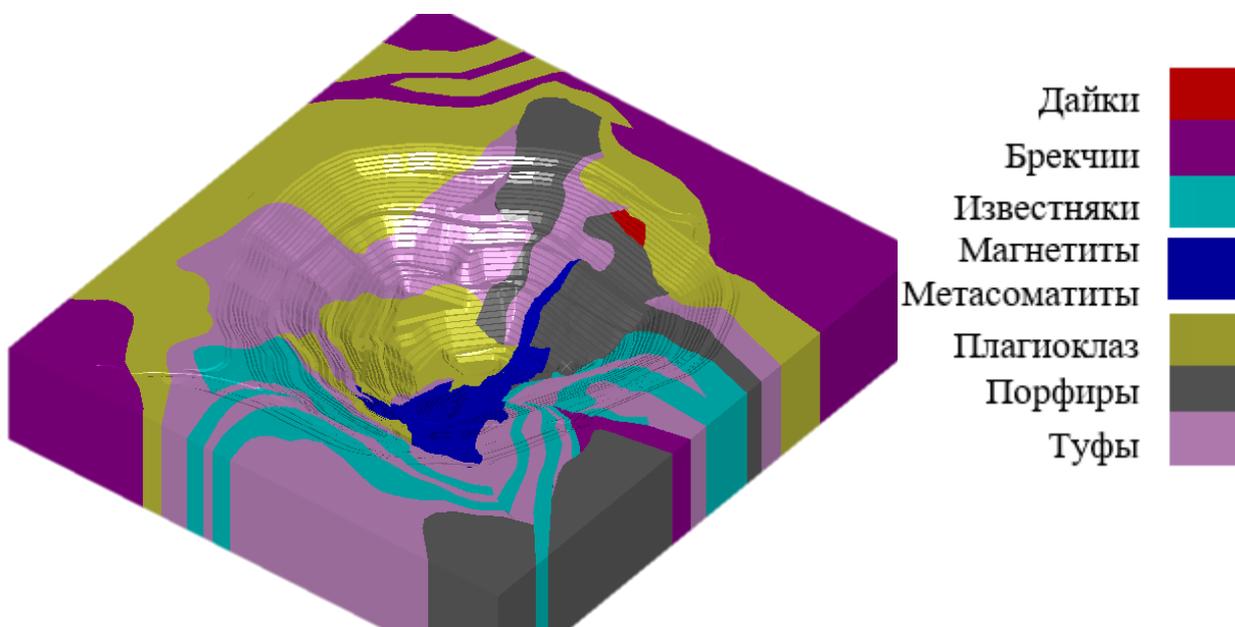


Рисунок 2.4 - Общий вид трехмерной модели Качарского карьера

При построении модели Качарского месторождения в трехмерном пространстве использовались данные как геотехнических, так и исторических разведочных скважин. Для разработки модели разломов были применены исторические геологические поперечные и продольные разрезы, планы, а также топографические поверхности нарушений. Всего было смоделировано 10 ключевых литологий. В таблице 2.2 показаны основные типы пород, классифицированные в массиве карьера. С помощью каркасов структурной модели блокам модели присвоены коды геомеханического домена.

В целом геомеханическая модель представляет собой компьютерное изображение месторождения с указанием геологических зон, заполненных

блоками, которым присваиваются значения рейтинговых параметров массива и другие характеристики.

1. Задание расчетных параметров для моделирования поля напряжений.

Расчетные физико-механические свойства выделенных литотипов горного массива Качарского карьера полученные в ходе различных исследований приведены в Таблица 2.2. В модель также были включены разломы (структурные нарушения).

Таблица 2.2 - Физико-механические характеристики пород Качарского карьера, принятые к расчету при моделировании

Геологический домен	Код домена в модели	Коэффициент Пуассона $\mu$	Удельный вес, $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Расчетные показатели в массиве		
				Сцепление, $C_m$ МПа	Угол внутр. трения $\varphi$	Модуль деформации, МПа
Покрывающие породы	Q	-	1.80	0.040	17.0	5.5
Разломы	FAULT	-	1.90	0.010	22.0	1200
Кора выветривания	WEATH	0,34	1.87	0.010	22.0	1500
Брекчия	BRX	0.23	2.65	0.64	32.0	50000
Известняки	LST	0.25	2.69	0.60	37.0	50000
Метасоматиты	META	0,23	2.81	0.80	38.0	50000
Руда	ORE	0.21	4.08	0.99	33.7	37000
Плагиоклаз	PLAG	0.27	2.66	0.40	32.0	25000
Туф	TUFF	0.23	2.60	0.83	37.3	50000
Порфириты	PRF	0.26	2.71	112.24	33	55000

Численное моделирование характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива Качарского карьера было выполнено для проектной карьерной выемки до отметки (-570) м (проект АО «Гипроруда» 2007 года [45-46]).

2. Выделение расчетной области и назначение сетки разбивки.

Вся расчетная модель борта карьера по литологическим разностям разбивалась на множество конечных элементов, соединенных между собой в вершинах, которым далее присваивались их физико-механические характеристики (Рисунок 2.5). Достоверность расчетов по МКЭ зависит и от количества конечных элементов. Сетка конечных элементов расчетных схем содержит 17698÷30964 элементов. Расчет деформаций модели ведется с учетом изменения (взаимных перемещений) координат узлов по обновляемой сетки элементов.

4. Задание граничных условий:

- вдоль боковых границ и в основании расчетной модели всем узлам задаются фиксированные граничные условия (запрещение перемещений). Поверхность расчетной области остается свободной для деформаций и смещений;

- значения гравитационных напряжений на участках массива горных пород, изменяется по глубине карьера и соответствует весу налегающих пород;
- напряженное состояние массива скальных пород Качарского месторождения соответствует гравитационно-тектоническому типу.

Величины и направления действия региональных или локальных напряжений могут иногда определяться ориентацией активных разломов, поэтому направления действия главных тектонических напряжений в расчетах взято совпадающим с направлениями главных тектонических нарушений в карьере как северо-западный и юго-восточный (северо-западный и южный по итогам исследований трендовых геодинамических движений ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург).

Начальное напряжённое состояние массива было смоделировано с использованием коэффициента бокового давления грунта по двум разнонаправленным направлениям главных напряжений:  $\lambda_1=2,03$  и  $\lambda_2=1,31$  (ввиду того, что для Качарского карьера прямых измерений напряжений в массиве не проводилось, значения  $\lambda$  оценивались на основе опыта и региональных значений напряжений).

- для анализа деформирования пород прибортового массива Качарского карьера использована модель упругопластической среды, основанная на критерии Мора-Кулона. Теория Мора - Кулона – это математическая модель, которая описывает, как материалы, в частности хрупкие, реагируют на напряжение сдвига и нормальное напряжение.

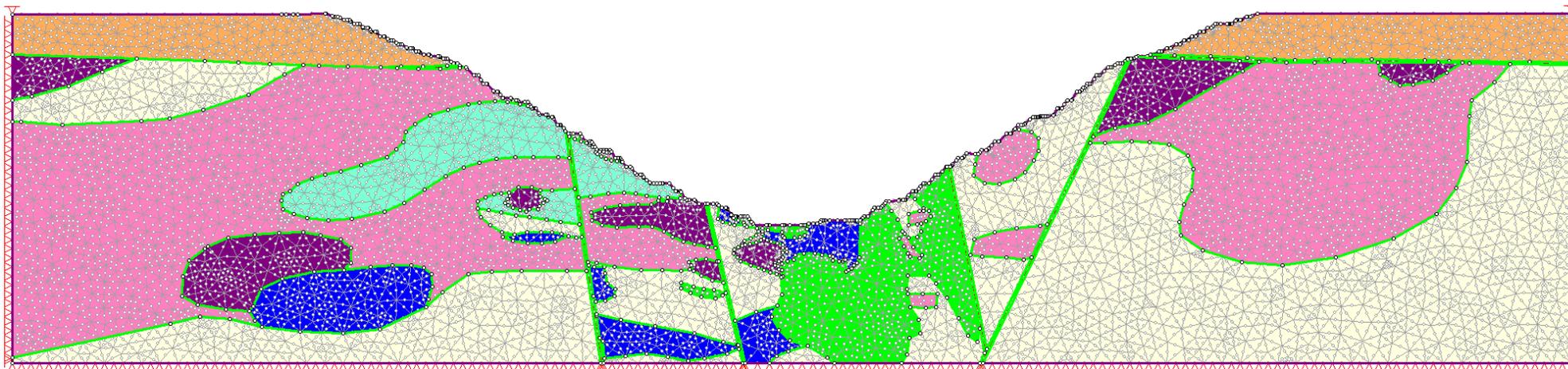


Рисунок 2.5 - Конечно-элементная модель откоса борта Качарского карьера в направлении СЗ и ЮВ бортов (профиль 51) после дискретизации и построения сетки

Геологический домен	Код домена в модели	Цветовая кодировка
Покрывающие породы	Q	Orange
Разломы	FAULT	Red
Кора выветривания	WEATH	Brown
Брекчия	BRX	Purple
Известняки	LST	Cyan
Метасоматиты	META	Blue
Магнетиты	MAGN	Green
Плагиоклаз	PLAG	Yellow
Туф	TUFF	Pink

## 2.4.2 Оценка уровня действующих напряжений в массиве и приконтурной зоне Качарского карьера до проектной глубины численными методами

Согласно исследованиям Протодяконова [47] установлено, что на прочность горной породы оказывает влияние лишь соотношение максимального и минимального напряжений ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ), в плоскости которых действует максимальное касательное напряжение ( $\tau_{xy}$ ).

Оценка уровня напряженно-деформированного состояния вмещающих пород Качарского карьера выполнена для двух наиболее характерных перпендикулярных сечений: в направлении СЗ\_ЮВ (вкрест простирания рудного тела, профиль 51) и в направлении ЮЗ\_СВ (по простиранию рудного тела, профиль XX).

Буквенные обозначения главных напряжений по их величинам, принятые в расчетах:

- $\sigma_1$ - главное максимальное напряжение
- $\sigma_2$ - главное промежуточное напряжение
- $\sigma_3$  - главное минимальное напряжение
- $\tau_{xy}$  - максимальное касательное напряжение.

При интерпретации результатов моделирования напряжения считается, что выходные сжимающие напряжения имеют положительные значения ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ), а растягивающие напряжения являются отрицательными ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ).

Для касательных напряжений, согласно правилам знаков, используемых в механике твердых тел, знак показывает направление вращения рассматриваемого элемента (при  $\tau > 0$  по ходу часовой стрелки).

В Приложении А (Рисунки 1-3) приведены распределения главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ,  $\tau_{xy}$  в направлении бортов СЗ\_ЮВ (профиль 51) от глубины Качарского карьера, полученные по результатам численного моделирования в программе RS2 RocScience.

**Распределение максимальной компоненты напряжений  $\sigma_1$  в массиве и карьерной выемке в направлении бортов СЗ\_ЮВ (профиль 51):** значения максимальной компоненты поля напряжений  $\sigma_1$  в массиве пропорционально увеличиваются с глубиной, от 5,5 МПа (отметке 0 м) до 31,5 МПа (отметка (-600) м). Уступы СЗ борта карьера в отметках (-100) - (-330) м формируются под действием растягивающих напряжений 0,2 МПа, ниже и до проектируемой глубины 770 м находятся под действием сжимающих в абсолютном значении напряжений, до 3,1-4,7 МПа на сопряжении борта и дна карьера. Закономерность распределения максимальной компоненты напряжений  $\sigma_1$  для карьерной выемки СЗ борта носит неравномерный характер, зоны растягивающих и сжимающих напряжений сменяют друг друга в зоне разлома 11. Действующая вблизи карьерной выемки пород СЗ борта максимальная компонента напряжений  $\sigma_1$  влияет на конфигурацию борта (способствует деформациям в виде сдвиговых трещин) до горизонта (-330) м. Противоположный ЮВ борт в целом находится в более спокойных

геомеханических условиях и характеризуется относительно невысоким уровнем напряжений.

Зона концентрации сжимающих напряжений  $\sigma_1 = 44,5-57,5$  МПа в СЗ и ЮВ бортах формируются в глубине массива на расстоянии 1270-1450 м от дна карьера на горизонтах (-800) м-(-1000) м, что составляет не более  $0,40\sigma_{сж}$ .

**Распределение минимальной компоненты напряжений  $\sigma_3$  в массиве и карьерной выемке в направлении бортов СЗ\_ЮВ (профиль 51)** - в СЗ борту карьера в отметках (-100) - (-330) м исходные тектонические напряжения, способствуют возникновению области действия растягивающих напряжений (0,6–0,8 МПа), которые ниже значений пределов прочности на растяжение, залегающих здесь туфов и известняков.

В целом значения минимальной компоненты напряжений в массиве пропорционально увеличиваются с глубиной от 1,3 МПа до 17,8 МПа для отметки (-570) м и являются сжимающими.

**Распределение максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в массиве и карьерной выемке в направлении бортов СЗ\_ЮВ (профиль 51)** - Абсолютные значения максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в приконтурной зоне СВ борта достигают значений 1,17 МПа и концентрируется в точках пересечения откоса с подошвой уступа. Значения максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в приконтурной зоне ЮВ борта концентрируются на отметке (-510) м, сложенными плагиоклазами, и равны 1,54 МПа.

По итогам моделирования в направлении борта СЗ были определены наиболее напряженные площадки, где наблюдается негативное влияние касательных напряжений на прибортовой массив, что может привести к превышению предела прочности на сдвиг при максимальных касательных напряжениях ( $\tau_{max}$ ) (таблица 2.3). Для этих участков выполнена проверка условия неразрушения по (2.5) и расчет КЗУ деформируемого участка по (2.7).

На рисунке 2.6 приведены графики распределения главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ,  $\tau_{xy}$  в направлении СЗ\_ЮВ (вкрест простирания рудного тела) от глубины карьера.

Изменение тектонических напряжений в массиве отвечает почти линейной закономерности.

Максимальные горизонтальные напряжения сжатия вблизи приконтурной зоны ниже, чем в массиве, что может способствовать образованию трещин пород в прибортовой части карьера.

Предсказываемый численной моделью распределение главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  хорошо согласуется с наблюдениями (Рисунок 2.7).

Таблица 2.3 - Оценка влияния касательных напряжений  $\tau_{xy}$  на прибортовой массив Качарского карьера в направлении бортов СЗ\_ЮВ по итогам численного моделирования

Борт	Опасные участки для развития деформаций, горизонты м	Выполнение условия неразрушения $\tau_{xy} < [c] + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$		Расчетный КЗУ участка	Прогнозируемое состояние участка
		Действующие максимальные касательные напряжения $\tau_{xy}$ , МПа	Расчетный предел прочности на сдвиг, МПа		
СЗ	-570	1,17	1,8	1,53	Устойчивое
ЮВ	-510	1,54	1,46	0,94	Вероятное развитие сдвиговых деформаций

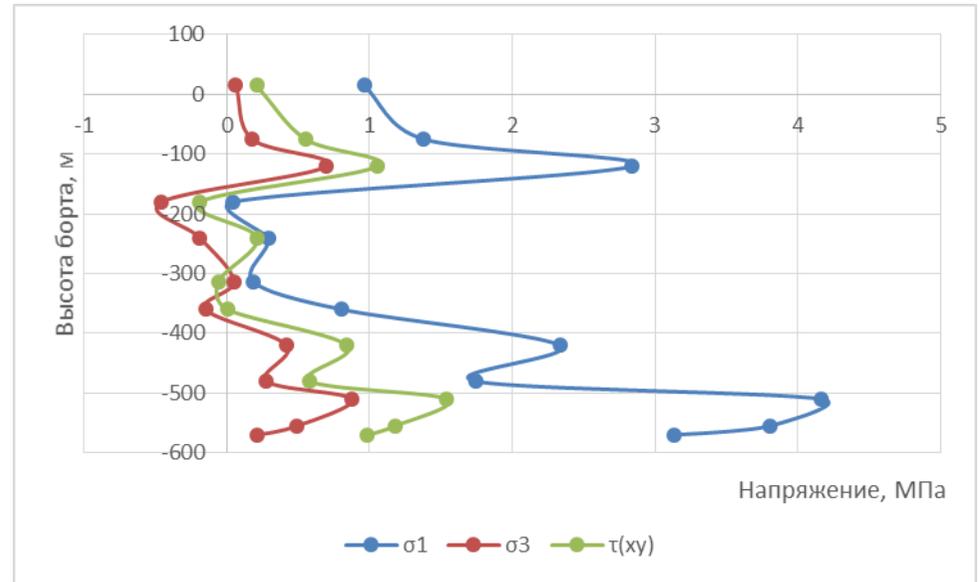
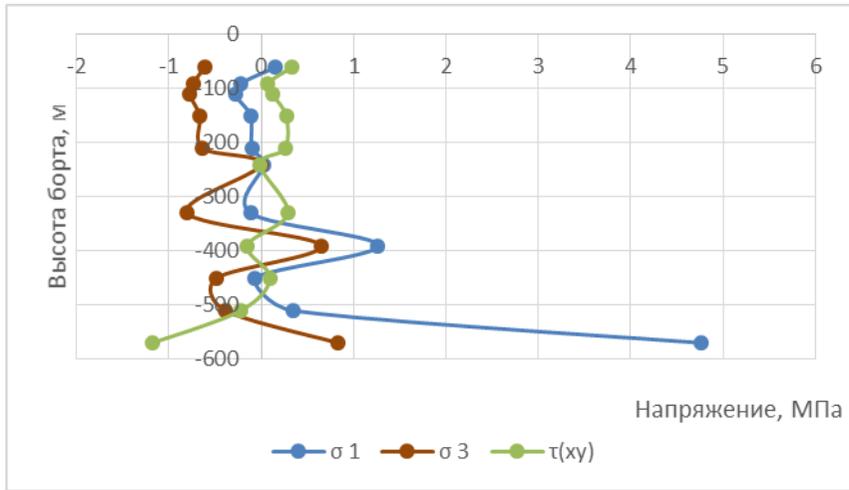
Анализ распределения главных  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  и максимальных касательных напряжений  $\tau_{xy}$  СЗ\_ЮВ бортов Качарского карьера до отметки (-570) м по результатам численного моделирования показывает:

1. В отметках (-300) м – (-330) м СЗ борта Качарского карьера происходит переориентация главных напряжений в блоках массива. Зоны растягивающих и сжимающих напряжений сменяют друг друга в зоне разлома 11.

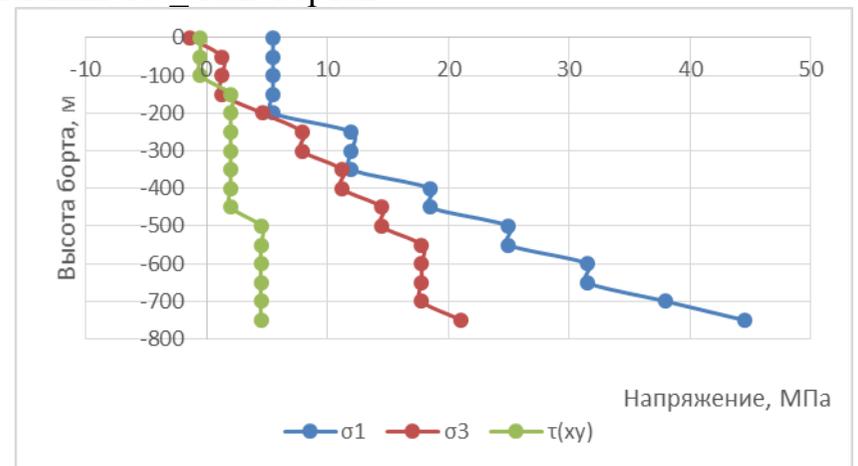
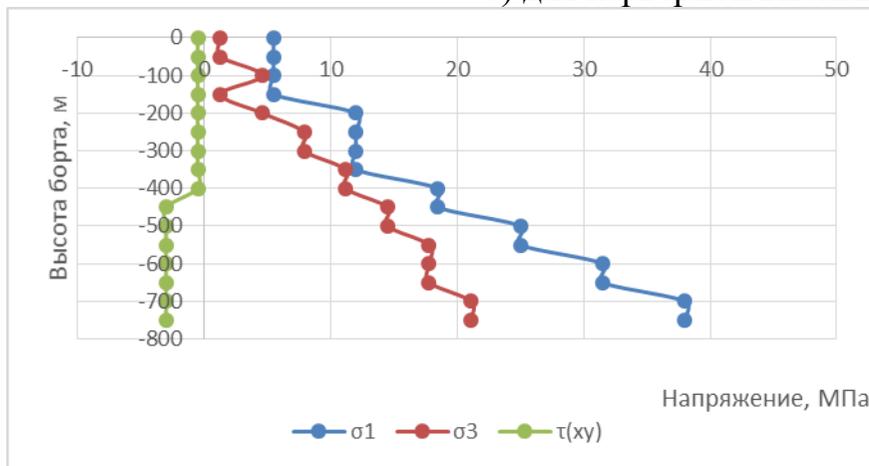
2. Закономерность распределения максимальной компоненты напряжений  $\sigma_1$  для карьерной выемки СЗ борта носит неравномерный характер, Действующая вблизи карьерной выемки пород СЗ борта максимальная компонента напряжений  $\sigma_1$  влияет на конфигурацию борта (способствует деформациям в виде сдвиговых трещин) до горизонта (-330) м.

3. Наибольшие касательные напряжения СЗ борта (до 1,54 МПа) концентрируются на горизонтах (-510) – (-555) м, сложенными непрочными плагиоклазами. Данный участок будет являться потенциально опасным по динамическому разрушению.

4. Результаты численного моделирования имеют хорошую сходимость с данными геофизических исследований ИГД УрО РАН (г. Екатеринбург).



а) для карьерной выемки в направлении СЗ \_ ЮВ бортов



б) для массива в направлении СЗ \_ ЮВ бортов

Рисунок 2.6 - Графики распределения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ,  $\tau_{xy}$  от глубины карьера по результатам моделирования

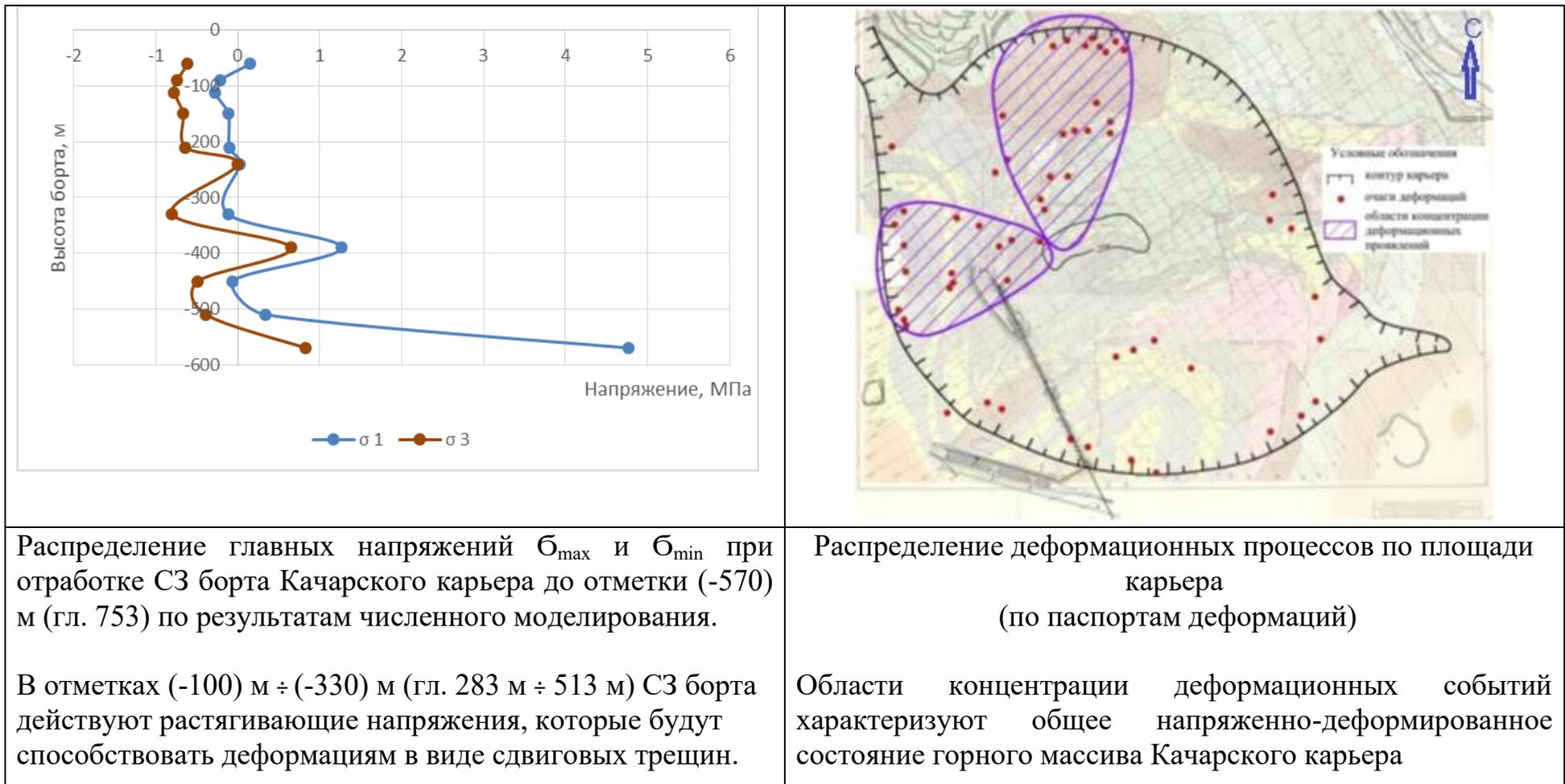


Рисунок 2.7 - Сравнение результатов численного моделирования НДС и распределения деформационных процессов по площади карьера СЗ борта Качарского карьера

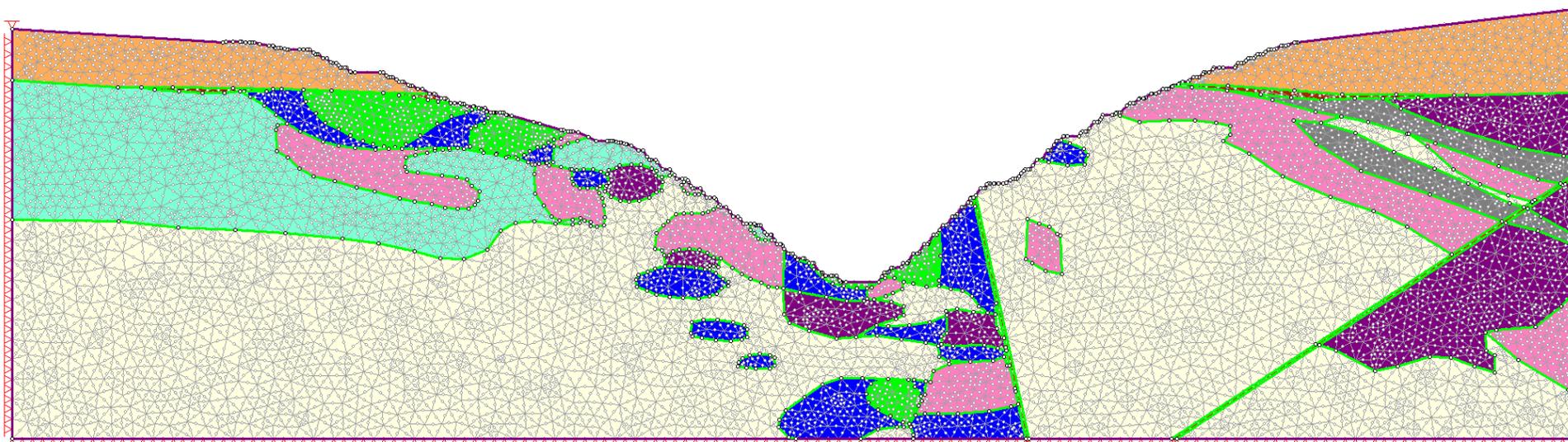
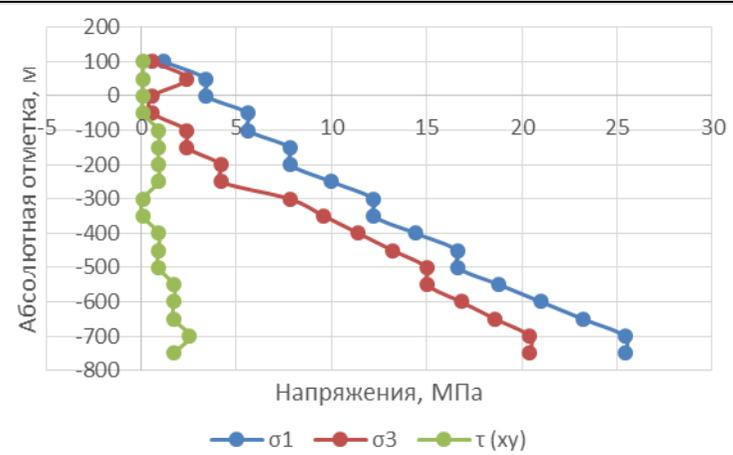
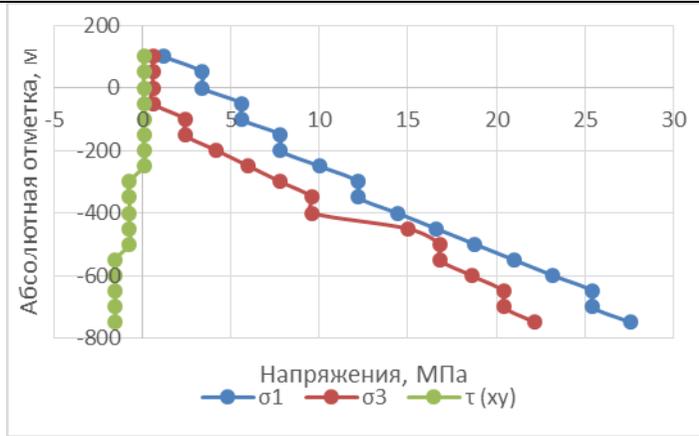
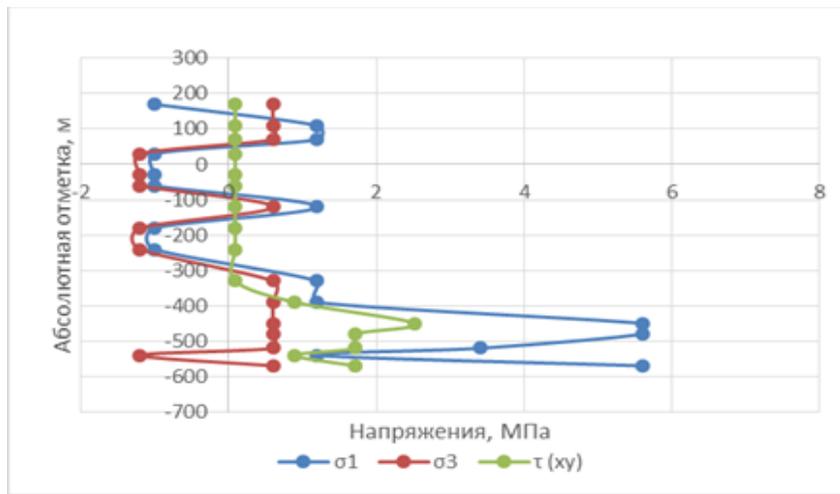
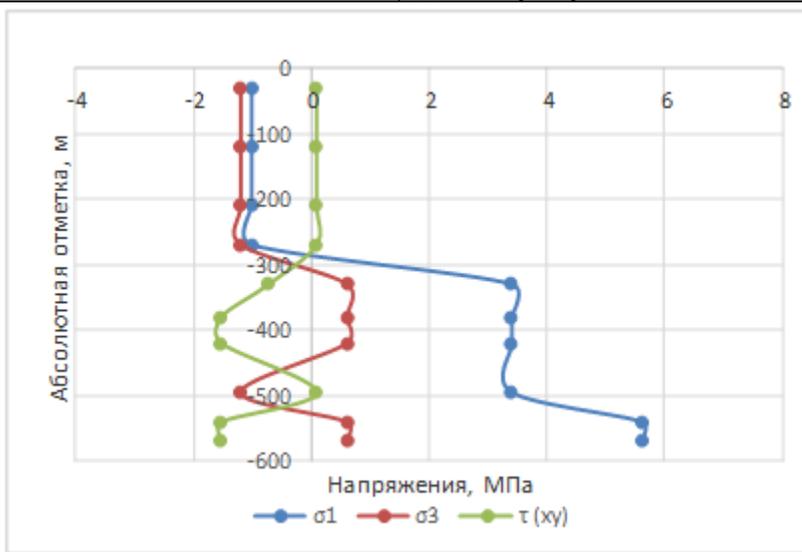


Рисунок 2.8 - Конечно-элементная модель откоса борта Качарского карьера в направлении ЮЗ\_СВ бортов (профиль XX) после дискретизации и построения сетки

Геологический домен	Код домена в модели	Цветовая кодировка
Покрывающие породы	Q	
Разломы	FAULT	
Кора выветривания	WEATH	
Брекчия	BRX	
Известняки	LST	
Метасоматиты	META	
Магнетиты	MAGN	
Плагиоклаз	PLAG	
Туф	TUFF	
Порфириты	PRF	



а) для карьерной выемки в направлении ЮЗ-СВ бортов



б) для массива в направлении ЮЗ-СВ бортов

Рисунок 2.9 - Графики распределения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ,  $\tau_{xy}$  от глубины карьера в направлении ЮЗ-СВ бортов

На рисунке 2.9 приведены графики распределения главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ,  $\tau_{xy}$  в направлении ЮЗ\_СВ (по простиранию рудного тела) от глубины карьера.

В Приложении А (Рисунки 4-6) приведены распределения основных напряжений в направлении ЮЗ\_СВ (по простиранию рудного тела), полученные по результатам численного моделирования в программе RS2 RocScience.

**Распределение максимальной компоненты напряжений  $\sigma_1$  в массиве и карьерной выемке в направлении ЮЗ\_СВ бортов (профиль XX) -** Значения максимальной компоненты поля напряжений в массиве  $\sigma_1$  повышаются с глубиной до 21 МПа на отметке (-570) м. Действующие в массиве пород сжимающие напряжения не разрушают саму породу и являются сжимающими, что способствует увеличению их прочности с глубиной.

В приповерхностных областях верхних уступов ЮЗ и СВ бортов карьера (отметки (+30) м - (-300) м) возникают области растягивающих напряжений с абсолютными значениями, не превышающими 1 МПа, которые не распространяются на глубину. Здесь повышается вероятность формирования и раскрытия трещин отрыва. Значения максимальной компоненты поля напряжений  $\sigma_1$  на сопряжении борта и дна карьера достигают 5,6 МПа.

**Распределение минимальной компоненты напряжений  $\sigma_3$  в массиве и карьерной выемке в направлении ЮЗ\_СВ бортов (профиль XX) -** Возникающие в ЮЗ\_СВ бортах карьера исходные тектонические напряжения, (1,2 МПа) ниже значений пределов прочности на растяжение, залегающих здесь пород. В целом значения минимальной компоненты напряжений в массиве пропорционально увеличиваются с глубиной от 0,6 МПа до 18,8 МПа для отметки (-570) м и являются сжимающими.

**Распределение максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в массиве и карьерной выемке в направлении ЮЗ и СВ бортов (профиль XX) -** Абсолютные значения максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в приконтурной зоне ЮЗ\_СВ бортов до отметки (-300) м остаются постоянными и равны 0,9 МПа, на сопряжении борта и дна карьера достигают 2,3 МПа.

По итогам моделирования в направлении ЮЗ\_СВ бортов были определены наиболее напряженные площадки, где фиксируется неблагоприятное воздействие касательных напряжений на прибортовой массив, что может привести к превышению предела прочности на сдвиг при максимальных касательных напряжениях ( $\tau_{max}$ ). (Таблица 2.4). Для этих участков выполнена проверка условия неразрушения по (2.5) и расчет КЗУ деформируемого участка по (2.7).

Таблица 2.4 - Оценка влияния касательных напряжений  $\tau_{xy}$  на прибортовой массив Качарского карьера в направлении ЮЗ и СВ бортов по итогам численного моделирования

Борт	Опасные участки для развития деформаций, горизонты м	Выполнение условия неразрушения $\tau_{xy} < [c] + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$		Расчетный КЗУ участка	Прогнозируемое состояние участка
		Действующие максимальные касательные напряжения $\tau_{xy}$ , МПа	Расчетный предел прочности на сдвиг, МПа		
ЮЗ	-380	1,53	1,6	1,04	Близко к предельному
	-570	2,3	2,41	1,04	
СВ	-450	2,52	3,01	1,19	Устойчивое

Анализ распределения максимальных касательных напряжений  $\tau_{xy}$  в направлении ЮЗ\_СВ бортов (профиль XX) по итогам численного моделирования показывает, что потенциально опасным по динамическому разрушению участок формируется в нижней части карьерной выемки ЮЗ борта (отметки -380 м до -570 м).

## Выводы по главе 2

Анализ распределения главных  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  и максимальных касательных напряжений  $\tau_{xy}$  бортов Качарского карьера до отметки (-570) м по результатам численного моделирования НДС в выбранных сечениях показывает:

1. В приконтурных зонах уступов скальной части бортов Качарского карьера (кроме ЮВ борта) до отметки (-300) м возникают области растягивающих напряжений с абсолютными значениями, не превышающими 1 МПа, которые не распространяются на глубину. Здесь повышается вероятность формирования и раскрытия трещин отрыва и разрушения массива;

2. В отметках (-300) м – (-330) м Западного борта Качарского карьера происходит переориентация главных напряжений в блоках массива. Зоны растягивающих и сжимающих напряжений сменяют друг друга в зоне разлома 11;

3. Анализ распределения максимальных касательных напряжений  $\tau_{xy}$  по итогам численного моделирования показывает, что потенциально опасные по динамическому разрушению участки формируются в нижней части карьерной выемки (отметки (-380) м до (-570 м)) ЮЗ борта и на горизонтах (-510) – (-555) м СЗ борта, сложенными непрочными плагиоклазами;

4. Результаты численного моделирования имеют хорошую сходимость с данными геофизических исследований ИГД УрО РАН (г. Екатеринбург).

### 3 Организация единой системы геомониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород Качарского карьера

#### 3.1 Обзор существующих инструментов мониторинга и их эффективность

Методы мониторинга бортов карьера можно классифицировать на две основные группы: методы поверхностного и подземного мониторинга законтурного массива, которые, в свою очередь, делятся на методы качественного и количественного мониторинга.

Система мониторинга бортов на больших карьерах обычно включает комбинацию этих компонентов, один из которых обеспечивает первичный мониторинг, лежащий в основе управления устойчивостью. инструменты подземного мониторинга позволяют получить дополнительные, более надежные и более подробные данные. Измерения подземных деформаций могут также потребоваться в случае, когда предполагается, что подвижки могут быть не обнаружены при помощи инструментов наземного мониторинга.

Таблица 3.1 - Методы мониторинга бортов карьера

Стандартные методы мониторинга	
Методы поверхностного мониторинга	Методы подземного мониторинга
<ul style="list-style-type: none"><li>- визуальный осмотр;</li><li>- измерения поперечных трещин (вручную или с помощью проволочного экстензометра);</li><li>- маркшейдерский мониторинг;</li><li>- GPS;</li><li>- фотограмметрия;</li><li>- лазерное сканирование;</li><li>- наземный или спутниковый радар (InSAR);</li><li>- наклонометры и электронные уровни</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>инклинометры;</li><li>-TDR-рефлектометры (time domain reflectometer, TDR);</li><li>-экстензометры;</li><li>- термисторы;</li><li>- микросейсмические датчики;</li><li>- пьезометры;</li><li>- геофизические георадары.</li></ul>
аэрофотосъемка	

Системы мониторинга деформации откосов существуют в различных формах, начиная от элементарных одномерных проводных экстензометров до сложного электронного оборудования, включая георадары. Назначение и область применения на карьерах, а также преимущества и недостатки средств мониторинга бортов и уступов приведены в таблице 3.2 [48].

Таблица 3.2 – Назначение и область применения средств мониторинга бортов и уступов на зарубежных карьерах

Средства мониторинга	Назначение	Область применения	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4	5
Тахеометры-автоматы	Средне и долгосрочный прогноз состояния наблюдаемого объекта	Локальный мониторинг призм на бровках уступов, а также зданий и сооружений в зоне сдвига массива	Высокая точность съёмки обеспечивает возможность детального отображения вектора смещения контрольной точки в трёхмерном пространстве, позволяя количественно и наглядно оценить направление и величину перемещений по координатным осям. Возможность использования для маркшейдерских замеров. Простота эксплуатации и работа в автоматическом режиме. Получение информации о долгосрочных тенденциях деформации массива	Необходимость замеров по отдельным точкам и периодичность замеров - несколько часов. Необходимость установки и обслуживания отражательных призм и привязки призм к маркшейдерской сети. Повреждение или утрата призм в процессе ведения взрывных работ представляет собой одну из распространённых проблем, снижающих надёжность и полноту мониторинга деформаций. Невозможность раннего предупреждения о деформациях массива. Невозможность эффективной работы в условиях плохой видимости
Радары	Оперативный и среднесрочный прогноз устойчивости бортов карьера.	Стационарные и мобильные установки непрерывного контроля сканированием больших площадей опасных участков борта карьера	Измерение без установки отражателей с расстояния до 5 км и высокая точность измерений (до 0,1 мм) в режиме реального времени с периодичностью в	Ограничение минимальных размеров элементарной сканируемой площадки: для радара MRS фирмы Reutech mining - 4*4 м; для радара IBIS ArcSAR - 0,75*8,6 м на расстоянии 2 км.

1	2	3	4	5
		<p>независимо от погодных условий и загрязнённости атмосферы карьера</p>	<p>несколько минут. Полностью автономная система с дистанционным управлением и диагностикой. Автоматизированный анализ данных с возможностью круглосуточного функционирования в любых метеоусловия, автоматическая атмосферная корреляция. Обеспечивается простая настройка и идентификация зон наблюдения, а также задание уровней тревоги и оповещения. Система позволяет оперативно выполнять привязку в локальной системе координат, интегрироваться с трёхмерными планами горных работ и отображать положение геологических аномалий. Поддерживается экспорт данных в универсальные горно-геологические программные комплексы.</p>	<p>Обнаружение сдвижения массива горных пород происходит только параллельно радиоволне (лучу). Невозможность раннего предупреждения о деформациях массива.</p>

1	2	3	4	5
Лазерные сканеры	Средне и долгосрочный прогноз состояния бортов карьера на основе обнаружения тенденций подвижки массивов за длительный промежуток времени	Площадной мониторинг в зоне повышенного риска деформации массива или точечный мониторинг зданий и сооружений в карьере	Получение детальной (расстояние между точками сканирования от 1 см) 3-мерной модели участка карьера. Сканирование видимой поверхности с расстояния до 6 км. Портативное, простое в эксплуатации оборудование. Возможность интегрирования с фотографиями. Экспорт	Невозможность работы в условиях атмосферных осадков и плохой видимости. Требуется время на обработку огромного массива информации. Невозможность раннего предупреждения о деформациях массива. Необходимость создания системы для хранения и управления данными.
Системы спутниковой геодезии	Прогноз устойчивости бортов карьера в средне- и долгосрочной перспективе и построение его деформационной модели	Площадной мониторинг опорных реперов, установленных по периметру карьера, с выявлением тенденции развития и границ участков деформаций	данных в горно-геологические пакеты. Возможность использования для подсчета объемов, построения разрезов и т.п. Возможность интегрирования со сканирующими системами. Круглосуточная работа в любую погоду. Минимальный набор легко обслуживаемого оборудования	Зависимость от работы спутниковой системы
Сейсмографы	Раннее предупреждение о возможной деформации массива по результатам микросейсмических проявлений	Объемный мониторинг зоны повышенного риска деформации массива	Раннее предупреждение о деформациях массива	Неопределенность в идентификации результатов измерений

1	2	3	4	5
Комплекс геофизических средств измерений	Раннее предупреждение о возможной деформации массива на основе заблаговременного выявления изменений физических характеристик массива перед его разрушением	Участки борта карьера с аномальными собственными колебаниями в зоне повышенного риска деформации массива	Раннее предупреждение о деформациях массива. Определение ослабленных зон и границ смещения массива. Применение апробированных методов и средств измерений	Необходимость проведения предварительных исследований для устранения неопределенности в идентификации результатов измерений
Специальные средства	Оценка ситуации в реальном режиме времени	Мониторинг любой видимой поверхности	Оценка ситуации в реальном времени	Необходимость в специальном оборудовании и специалистах для его обслуживания

## 3.2 Поверхностные методы мониторинга

**Обычные методы (Классические).** Обычные методы включают картирование трещин растяжения вдоль откосов. В этих методах в основном используется геолого-структурная съемка откосов. Визуальные осмотры проводятся путем планового наблюдения за откосом, карьером, подъездными путями. Трещины растяжения образуются в местах высокого напряжения и являются признаками крайне неустойчивых склонов. Картирование и мониторинг напряжения трещины, образующиеся вдоль откосов, является традиционным и надежным средством выявления крупных обрушений. Такие традиционные геотехнические инструменты и варианты съемки будут по-прежнему занимать свое место в мониторинге склонов, в дополнение к новейшим системам мониторинга [49].

**Методы наземного мониторинга.** Методы мониторинга движения поверхности включают цифровую фотограмметрию, роботизированные тахеометры, глобальные системы позиционирования, безотражательный LiDAR и радиолокационный мониторинг. Эти методы контролируют движения по поверхности склона. Мониторинг, может быть, либо сканированием всей поверхности склона или отдельными точками вдоль участков мониторинга на регулярной основе.

**Цифровая фотограмметрия.** Использование цифровой фотограмметрии является наиболее распространенным и простым методом дистанционного зондирования для определения движений горных пород. Цель цифровой фотограмметрии состоит в том, чтобы идентифицировать широкое смещение цели, полученное путем сравнения сфотографированных изображений с помощью цифровой камеры [50]. С помощью таких цифровых фотографий также можно оценить геометрические свойства объектов (форма и положение), прогресс, протяженность и причиной деформации откосов [50-51].

Различают наземную, аэро- и космическую фотограмметрию.

Цифровая фотограмметрия обеспечивает безопасное и подробное картирование геологических структур, особенно в недоступных и опасных местах, с получением трехмерного изображения. Используемое специальное программное обеспечение импортирует фотографии в единую систему координат, после чего они объединяются и преобразуются в трехмерный объект с точностью ориентации  $1^\circ$ . Например, лазерный сканер Riegl значительно упрощает этот процесс, так как сделанные фотокамерой высокого разрешения снимки просто совмещаются с полученным облаком точек скана. Таким образом, окончательное трехмерное изображение состоит из двух частей – трехмерного облака точек (точная цифровая копия реального карьера на дату съемки) и фотографии (рисунке 3.1).

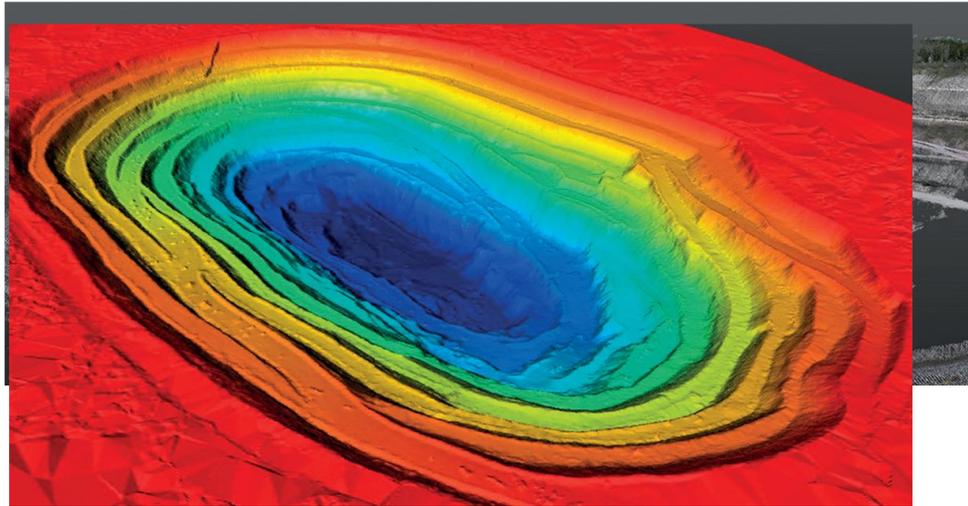
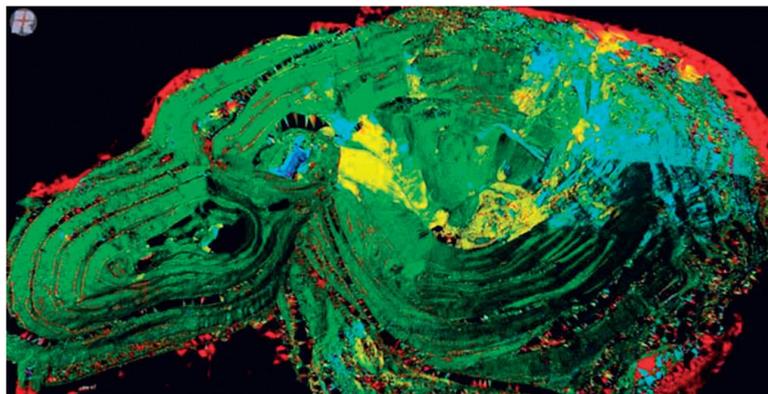


Рисунок 3.1 - Облако точек скана (а) и 3D модель (б) меднорудного карьера УГМК, полученные при геодезической съемке (2013 г.) с помощью 3-мерного лазерного сканера Leica Geosystems (Швейцария) с целью разработки методики мониторинга геомеханических процессов в его бортах

Такое комбинированное изображение используется для последующей интерпретации геологических и потенциально опасных структур (разломы, трещины, дайки, геологические контакты пород). Это дает дополнительную возможность идентифицировать потенциальные плоскости «скольжения» или вывалы (обрушения) пород на нижележащие уступы, а также дает дополнительную информацию службе мониторинга о местах установки призм, увеличении плотности лазерного сканирования или фокусировании радарной установки.

Фотографическая съемка одних и тех же участков и сопоставление сканов, полученных с одинаковых точек в разные моменты времени, обеспечивает качественный мониторинг динамики деформационных процессов в случае, если они не были обнаружены другими методами. Внедрение методов лазерного сканирования в ОАО «Гайский ГОК» существенно дополнило классическую наблюдательную станцию и позволило получить объемную модель деформирования бортов этих карьеров (рисунок 3.2) [52].



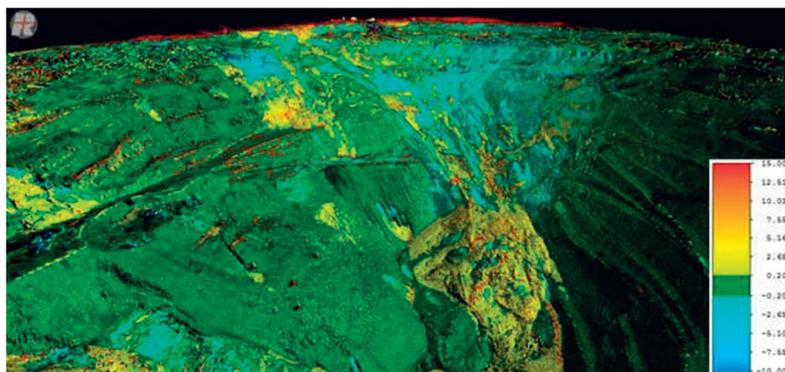


Рисунок 3.2 - Результаты сравнения двух серий лазерного сканирования (в метрах) бортов открытого рудника Гайского ГОКа

На рисунке 3.2 участки голубого цвета указывают на просадки поверхности в верхней части деформирующегося северного борта, желтого цвета – на подток оползневых масс на нижних горизонтах. Изменения, фиксируемые в юго-западной части карьера, обусловлены ведением горных работ (выемка горной массы, отсыпка внутреннего отвала). Локальные деформации уступов верхних горизонтов видны на юго-восточном борту [48].

**Тахеометры** [48] используются как средство локального мониторинга уступов карьеров, зданий и сооружений по положению специальных отражательных призм, устанавливаемых в зоне повышенного риска сдвижений массива (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 - Тахеометр-автомат (а) на борту карьера и отражающие призмы на опасном участке (б)

Последние серии роботизированных тахеометров оснащены встроенной фотограмметрической камерой, которая также может делать цифровые изображения станций мониторинга вместе с движением призмы. Роботизированные тахеометры, оснащенные приемниками GNSS, все чаще используются для автоматизированной, точной, эффективной съемки при мониторинге склонов глубоких карьеров [53-54]. Другим важным преимуществом метода является то, что он может быть либо фиксированным, либо портативным. Тахеометр можно закрепить в точке для непрерывного

контроля уклона на заданные временные интервалы или его можно переместить из одной точки в другую вручную для мониторинга движение неподвижных призм [55].

**Глобальная система позиционирования (GPS).** В последние годы GPS предоставила альтернативный метод мониторинга геометрических смещения поверхностных движений. Наличие дифференциального GPS (DGPS) обеспечивает информация в режиме реального времени о состоянии устойчивости склона, а также о скорости деформации круглосуточно. Метод имеет большое преимущество, когда речь идет о рудниках открытого типа с установкой серии приемников по районам наблюдения. Но использование GPS ограничено характеристиками окружающей среды, таких как растительность и горы, а также при сценарии быстротечного обрушения. В настоящее время оборудование GPS используется в сочетании с фотограмметрией [56].

**Системы спутниковой геодезии** применяются для средне- и долгосрочного прогноза состояния бортов карьера на основе обнаружения тенденций подвижки массивов за длительный промежуток времени. Подобная система применяется в карьерах № 1 и № 3 ОАО «Гайский ГОК» [57]. Для этого по периметру карьеров создана сеть из 21 контрольной точки, координирование которых осуществляется с помощью GPS-ГЛОНАСС Trimble R8 [51]. Использование этой системы спутниковой геодезии позволило получить векторы горизонтального смещения контрольных реперов и построить деформационную модель карьера.

В октябре 2015 г. компания Trimble представила новую – 4.5 версию системы мониторинга деформаций Trimble® 4D Control™, которая обеспечивает возможность создания комплексных систем мониторинга с использованием GNSS приемников, оптических тахеометров и геотехнических датчиков [56].

**Радарный мониторинг склонов** — это современная технология, которая полностью преобразовал геотехническую оценку риска в карьерах [58-59]. Георадар за последние 10 лет получил широкое применение как передовой инструмент для критически важного с точки зрения безопасности мониторинга карьеров при открытых горных работах [60]. Луч радара, испускаемый антенной, установленной на стационарной или подвижной платформе, сканирует поверхности склона как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях (рисунок 3.4). Мониторинг бортов карьера осуществляется непрерывно в режиме online с установленной пользователями периодичностью. Кроме того, можно оценить величину деформации при широком охвате по площади в любых погодных условиях.

Возможность визуализации радарной карты на 3D модели карьера и настройки карт опасностей с уровнями тревог позволяет своевременно принять критически важные решения при обнаружение деформационных процессов.

Радар (InSAR) в открытых карьерах обеспечивает возможность обнаружения как крупных быстрых обвалов склонов, так и небольших деформаций склонов, длящихся годами [60]. Преимущество системы SSR заключается в том, что он может обнаруживать и предупреждать движения

пластов с точностью до миллиметра, обеспечивая достаточное время эвакуации ресурса из критических зон [61].



Рисунок 3.4 - Радиолокационная система (ArcSAR от IDS GeoRadar) [62]

Использование интерферометрического радара с синтезированной апертурой для мониторинга склонов (InSAR) становится все более осуществимым и получает широкое распространение [63].

Использование радара направлено на обеспечение мониторинга почти в реальном времени с выдачей высокоточной информации о перемещении и скорости на большой площади склона. Радар обеспечивает высокое разрешение и даже полное покрытие склона с полностью дистанционного мониторинга. То есть устраняется необходимость доступа персонала к различным местам на склоне для установки.

Благодаря постоянному совершенствованию технологий и средств связи существует возможность для улучшения конструкции склонов и безопасности персонала, работающего вблизи склонов, с интеграцией моделирования и программного обеспечения для мониторинга и работы над функциональной совместимостью между ними.

Недавние достижения позволили интегрировать данные мониторинга деформации радиолокационного датчика с процесс численного моделирования с помощью оптимизированного рабочего процесса. Теперь пользователи могут импортировать данные о деформации, полученные с радиолокационных систем, и отображать эти данные вместе с трехмерной числовой моделью.

Улучшенное использование радиолокационных данных, предоставляемых наложениями радиолокационных карт, позволит выполнять

расширенную калибровку и уточнение входных параметров модели, позволяющее повысить надежность численных моделей.

Ограничения при использовании радаров с синтезированной апертурой:

- система не эффективна при определении камнепадов и обрушений с высокими скоростями (более 130 мм/ч);
- деформации на горизонтальной поверхности;
- влияние погодных условий на качество данных (метель, сильный ливень, плотное облако пыли при ведении горных работ).

### **3.3 Методы подземного мониторинга**

Системы подземного мониторинга более затратны, чем наземного, главным образом, за счет необходимости бурения скважин. Однако при необходимости определить местоположение поверхности скольжения или исследовать распространение подземных подвижек пород инструменты подземного мониторинга позволяют получить дополнительные, более надежные и более подробные данные. Измерения подземных деформаций могут также потребоваться в случае, когда предполагается, что подвижки могут быть не обнаружены при помощи инструментов наземного мониторинга.

Для откосов в грунте или вскрышном слое идеальными инструментами для подземных измерений являются инклинометры, хотя для грубых замеров могут также использоваться датчики сдвига. Если ожидается, что деформация откоса происходит вдоль узких зон сдвига, следует отдать предпочтение экстензомерам.

Подвижки, представляющие опасность для откосов в скальных породах, часто меньше, чем для откосов в грунте, и, как правило, приурочены к определенным поверхностям. Поэтому в данном случае более подходящими представляются инструменты для определения сдвиговых подвижек, а необходимая точность измерений деформаций, как правило, выше. Из-за этих требований предпочтение отдается кабельным датчикам-рефлектометрам (time domain reflectometry, TDR) и другим датчикам сдвига, стационарным скважинным экстензомерам и стационарным инклинометрам, хотя иногда, особенно в случаях прогнозируемых нарушений в массиве породы, также применяются портативные инклинометры. Многоточечные экстензометры, рефлектометры TDR и стационарные инклинометры позволяют проводить оперативный мониторинг подземных деформаций и, при необходимости, могут быть связаны с системой сигнализации [6].

## **3.4 Организация единой системы геомониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород Качарского карьера**

### **3.4.1 Оценка геомеханических рисков Качарского карьера**

По результатам исследований разработана геомеханическая карта потенциально опасных участков (рисунок 3.5).

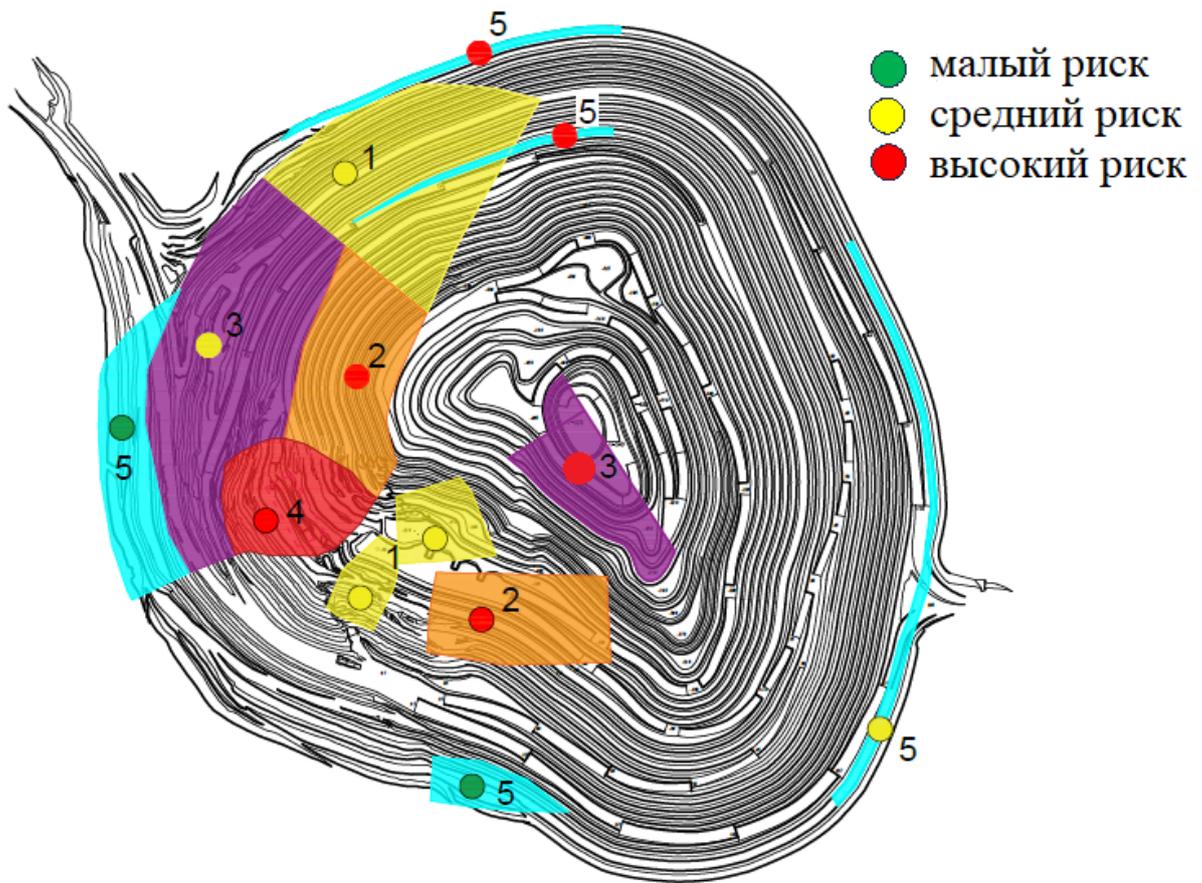


Рисунок 3.5 - Карта геотехнических рисков проектного контура Качарского карьера

Районирование территории карьера по зонам опасности включало также в себя анализ геологических данных с 1951 по 1985 годы. В таблице 3.3 приведен перечень участков Качарского карьера, опасных в геомеханическом отношении.

Методы мониторинга уступов бортов карьера можно разделить на три категории: (1) визуальный осмотр, (2) поверхностные измерения и (3) подземные измерения. Все месторождения открытой разработки используют похожий подход для прогнозирования и раннее предупреждение критических деформаций откосов глубокого карьера.

Исходя из проведенного анализа современных методов и средств мониторинга отечественных и зарубежных источников при открытой разработке полезных ископаемых, а также геомеханического состояния Качарского карьера в таблице 3.4 приведены предлагаемые методы мониторинга выделенных объектов геотехнического мониторинга и их частота.

В программе геотехнического мониторинга массива скальных пород Качарского карьера для каждого объекта геотехнического мониторинга устанавливаются состав, объемы, вид оборудования, периодичность наблюдений. Также в программе указываются предельно допустимые значения контролируемых параметров, полученные на основании принятых проектных решений и результатов поверочных расчетов.

Таблица 3.3 - Перечень участков Качарского карьера, опасных в геомеханическом отношении

№	Перечень опасных факторов на объекте	Условное обозначение
1	Участки структурного ослабления по результатам инженерно-геологических и геофизических исследований, кинематический анализ	
2	Границы участков НДС (области, где наблюдались сдвигения откосов с быстрой скоростью смещения)	
3	Границы участков НДС потенциально опасные по динамическому разрушению (определенные по данным короткопериодических геодинамических движений и численного моделирования)	
4	Фактические деформации откосов карьера	
5	Деформации вследствие подпитки грунтовыми водами	

Частота мониторинга зависит от таких факторов, как геометрии бортов карьера, скорости деформации, размера и последствий потенциального отказа, от методов, используемых для мониторинга. Частота мониторинга обычно увеличивается при выявлении областей нестабильности.

Рекомендуемая частота мониторинга исходя из опыта мониторинга аналогичных зарубежных карьеров для прочных, хрупких пород:

- еженедельный мониторинг при движениях 2–5 мм/сут;
- ежедневное наблюдение в зонах, испытывающих движения 10-50 мм/день;
- непрерывный мониторинг, когда движения превышают 50 мм/день.

Методы поверхностного мониторинга выполняются, как правило, за всеми объектами геотехнического мониторинга Качарского карьера для решения следующих задач:

- определение планово-высотного положения;
- определение величины развития деформаций.

При поверхностных измерениях фиксируют смещения, осадки, крены и т. д., как на дневной поверхности, так и на глубине в грунтовом массиве

Ниже приводится подробное описание состава работ программы геотехнического мониторинга Качарского карьера.

**Визуальный** мониторинг должен быть важным компонентом программы мониторинга бортов Качарского карьера.

Визуальный мониторинг ведется за всеми объектами геотехнического мониторинга. Программа визуального контроля должна быть ограничена уступами карьера с низким уровнем риска.

Визуальные осмотры сосредоточены на мониторинге трещин разрыва и осыпаний уступов бортов карьера карьера. Наиболее серьезные неустойчивости откосов сопровождается развитием трещин растяжения поверхности откосов и

измеримого перемещения. Открытая трещина напряжения, которая видна невооруженным глазом, обычно первый признак того, что склон приближается к неустойчивому состоянию. На каждой трещине в месте наибольшего развития рекомендуется устанавливать трещиномеры, маяки и т. д. с отметкой датой осмотра.

Периодичность визуального осмотра зависит от состояния горного массива и риска, связанный с неустойчивостью склона. Однако неформальный мониторинг осуществляется всеми персоналом, работающего в карьере на постоянной основе.

Визуальный осмотр включает картирование трещин растяжения вдоль откосов, в основном используется геолого-структурная съемка откосов. Визуальные осмотры проводятся путем планового наблюдения за откосом, карьером, подъездными путями.

Задачей визуальных наблюдений является фиксация по внешним признакам дефектов и деформаций для выделения наиболее слабых и поврежденных зон (участков), на которых для установления их фактического состояния необходимо проведение дополнительных инструментальных наблюдений (одноразовых работ). Визуальные наблюдения выполняются за всеми объектами геотехнического мониторинга.

Состав работ визуальных наблюдений включает:

- обнаружение и фотофиксацию деформаций;
- измерение простейшими способами;
- описание и занесение в реестр (ведомости, полевые журналы и т. д.);
- установление необходимости дополнительных инструментальных наблюдений.

Визуальный мониторинг необходим, но не обязательно достаточен для удовлетворения потребностей соответствующую программу мониторинга бортов карьера.

Для рыхлой части Качарского карьера рекомендуется:

- **геодезические наблюдения** (маркшейдерская съемка) традиционными методами инструментальных наблюдений, основанные на установлении координат ряда жестко закрепленных точек – реперов (наблюдения ведутся специалистами КарГТУ с 2009 г).

Маркшейдерская съемка выполняется стандартным способом мониторинга откосов бортов больших карьеров. При этом используются традиционные методы общей съемки и привязки, которыми из всех специалистов рудника лучше всего владеют маркшейдеры.

В зависимости от методики и порядка проведения мониторинга для определения абсолютного положения и отклонений выбранных пунктов на поверхности борта карьера в 1-м, 2-х и 3-х измерениях могут использоваться геодезические методы.

При применении методов съемки для сбора полевого материала используются такие геодезические приборы и инструменты, как нивелиры, теодолиты, тахеометры, GPS приемники, аэрофотоаппараты или их сочетание.

Полученные данные обрабатываются для определения положения снимаемых точек в определенной системе отсчета, например, в местной или относительной системе координат. Смещения точек определяются путем сравнения координат по данным двух или более съемочных периодов.

Традиционные методы съемки доказали свою полезность при проведении мониторинга бортов карьеров и оседания пород.

При применении геодезических методов в целях мониторинга необходимо измерение горизонтальных и вертикальных углов и расстояний до серии объектов наблюдений. Результаты таких измерений используются при расчетах пространственных или ортогональных (x, y, z) координат точек на участке деформирования или вокруг него. Поинтервальные измерения позволяют определить смещения в трехмерном пространстве относительно точек устойчивого участка и рассчитать скорости и направление сдвижения для чего применяется триангуляция или трилатерация [6].

Данные геодезического мониторинга распечатываются и анализируются после каждой серии измерений. При обнаружении подвижки периодичность мониторинга по вторичным точкам будет от ежечасной до еженедельной, в зависимости от размера разрушений и скорости перемещения.

GPS является намного более экономичной, точной и менее трудозатратной технологией для проведения контрольной съемки, чем традиционные геодезические методы, особенно если сеть измерений охватывает сравнительно большую площадь. Основными требованиями при этом являются дифференциальная система и высококачественное оборудование.

- гидрологические наблюдения (пьезометрический мониторинг) производятся для определения уровней грунтовых вод, вычисления порового (гидростатического) давления в геологической среде и оценки его влияния на возникновение опасных природных процессов (оползни, обвалы и др).

Состав работ гидрогеологических наблюдений включает:

- бурение скважин под устройство скважинных пьезометров и индикаторов подземных вод и т. д.;

- устройство обсадной трубы в стволе скважины;

- установка измерительного оборудования для проведения наблюдений;

- снятие показаний с помощью считываемого устройства;

- занесение результатов измерений в журналы и акты снятия показаний;

Гидрогеологические наблюдения производятся, как правило, с помощью скважинных пьезометров и индикаторов подземных вод. Места расположения которых определяются по результатам инженерных изысканий.

**Гидрологический мониторинг** откосов скальной части Качарского карьера включает в себя:

- еженедельные замеры фактического уровня воды в разведочных скважинах в паводковый период (в остальное время 1 раз в 2 недели) - визуальное или фотографическое картирование просачиваний подземных вод в бортах карьера;

- ежемесячная обработка всех данных гидрогеологического мониторинга.

Для подтверждения данных по водопонижению, необходимо визуальное сопоставление пьезометрических уровней (по последним данным) по отношению к критическим участкам, с точки зрения геомеханической оценки. При многочисленных расхождениях между фактическими и критическими уровнями воды необходимо заново интерпретировать гидрогеологические данные или уведомить руководство рудника о том, что система водоосушения не может обеспечить желаемых уровней.

Для доменов скальной части по мере необходимости также могут быть назначены геофизические наблюдения (например, сейсмическое профилирование) – для расчленения разреза, изучение положения геологических границ, обусловленных сменой литологического состава, состояния, степени трещиноватости, влагонасыщенности; изучение оползневых и карстовых участков; изучение физико-механических свойств, их анизотропии.

Для зон нестабильности скальной части Качарского карьера рекомендуются методы мониторинга, используемые для измерения геометрии скального склона и/или движения горных пород, а именно радарные системы наблюдения за деформациями бортов карьеров.

Радар – прибор, способный обнаруживать присутствие объектов и измерять расстояние между ними и собой (рисунок 3.6). Каждый радар оснащен передатчиками (TX) и приемниками (RX). Передатчик радара генерирует электромагнитный сигнал. Радиолокационная антенна позволяет распространять сигнал через пространство со скоростью света ( $C$ ). Цель на расстоянии  $R$  отражает часть радиолокационного сигнала к приемнику (RX). Расстояние до цели оценивается по измерению времени, прошедшего между отправкой и получением сигнала [62].

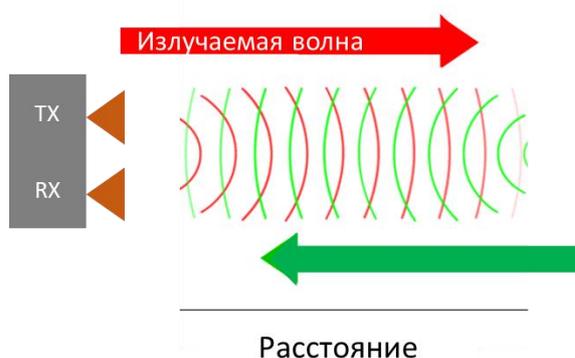


Рисунок 3.6 – Принцип измерения радарными установками

Площадь покрытия обусловлена ограничениями по вертикали, горизонтали и дальности действия. Зона действия радара определяется типом антенн, установленных на датчике радара, и типом используемого радара. Например, антенны радара, установленные на датчике радара ArcSAR, обеспечивают горизонтальное покрытие до  $360^\circ$ , вертикальное –  $60^\circ$ , дальность до 5 км.

Радарные системы имеют высочайшую точность измерений (погрешность до 1 мм). В комплекте с оборудованием поставляется программное обеспечение

для обработки данных, реализована функция распознавания горного оборудования, находящегося в зоне контроля, а также защита от вибраций в карьере (рисунок 3.7).

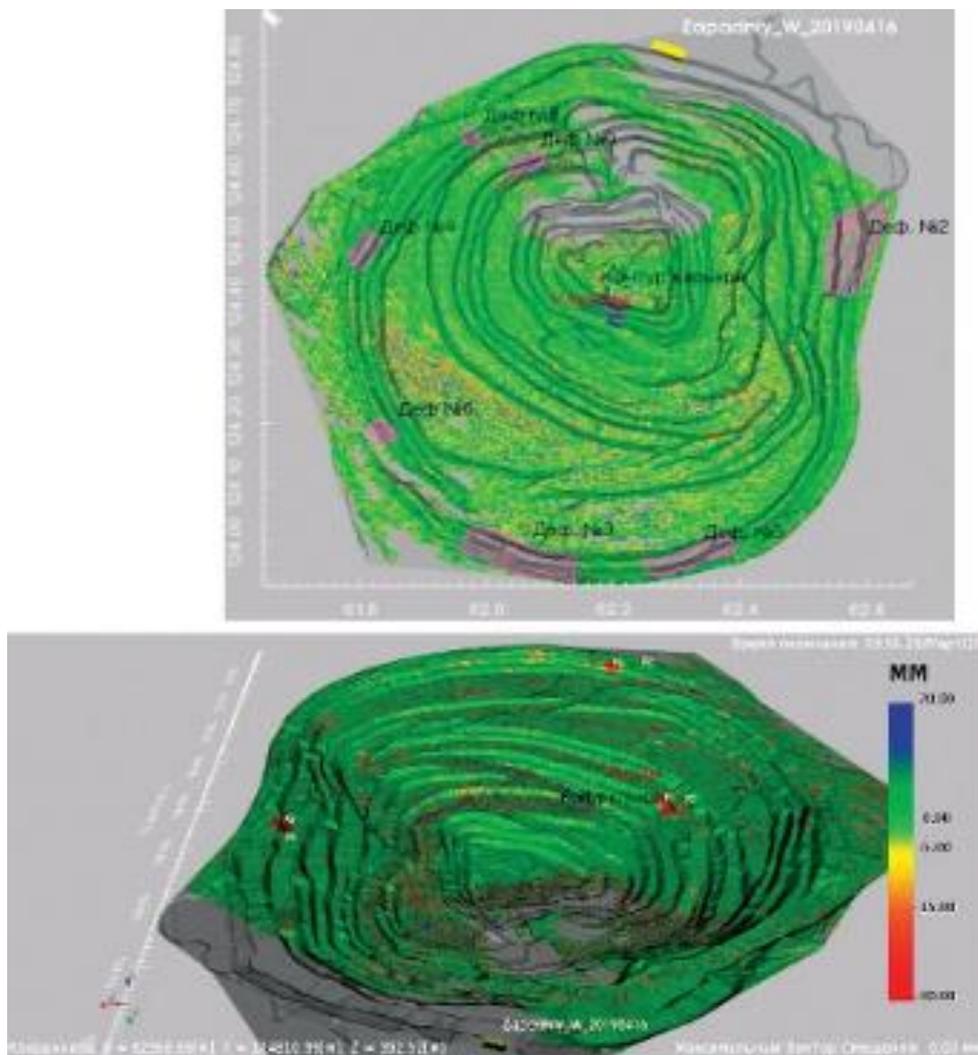


Рисунок 3.7 – Вид карты деформаций (интеграция радарных данных и цифровой модели местности) [63]

Главным достоинством применения радара для мониторинга бортов карьера – это возможность настройки оповещения о происходящих деформациях – TARP. Цель внедрения TARP (Trigger action response plan) - оказать помощь персоналу в установлении предварительно запланированного порядка мероприятий контроля, которые должны быть выполнены при достижении уровня сигнализации или при инициировании действия.

Для различных случаев и целей можно использовать карты опасностей (Hazard Map) и временные ряды опасностей (Hazard Map Series) [64].

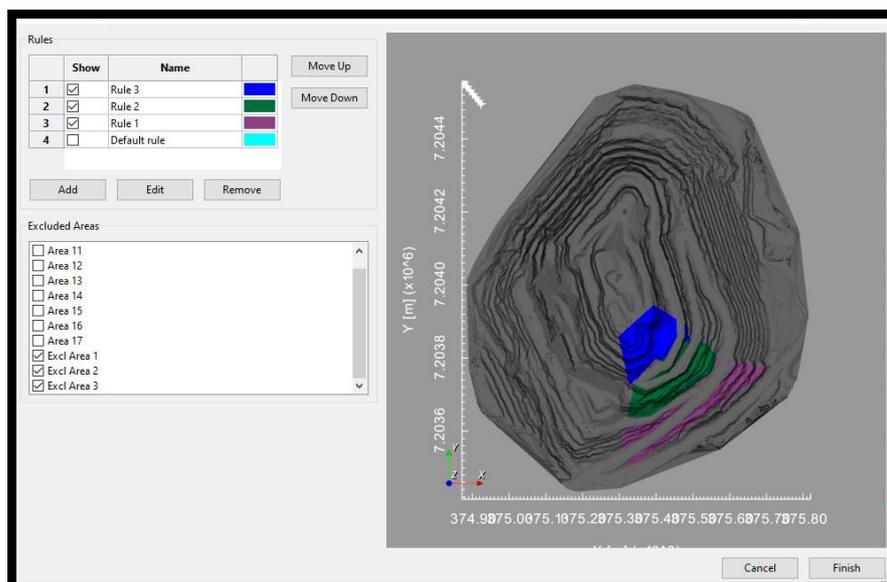


Рисунок 3.8 – Окно настройки карт опасностей (IDS GeoRadar)

В зависимости от заданных настроек будут срабатывать тревоги, при достижении указанных пороговых значений скоростей.

Достоинства - высокая точность, погрешность не выше 1 мм; работает при любых погодных условиях, высокая дальность измерения; покрытие большой площади при мониторинге.

Недостатки – высокая стоимость; ограничения при мониторинге камнепадов (быстрых деформаций).

Главным условием выбора местоположения радара в карьере – это обеспечение попадания в зону видимости радара опасных участков. Также важно: для установки радара выбрать участок с минимальными рисками возникновения деформаций; обеспечить возможность подведения к радару сети 220Вт и доступа персонала.

Учитывая ранее составленную карту геотехнических рисков проектного контура Качарского карьера (рисунок 3.5) выбрано следующее расположение радаров (рисунок 3.9).

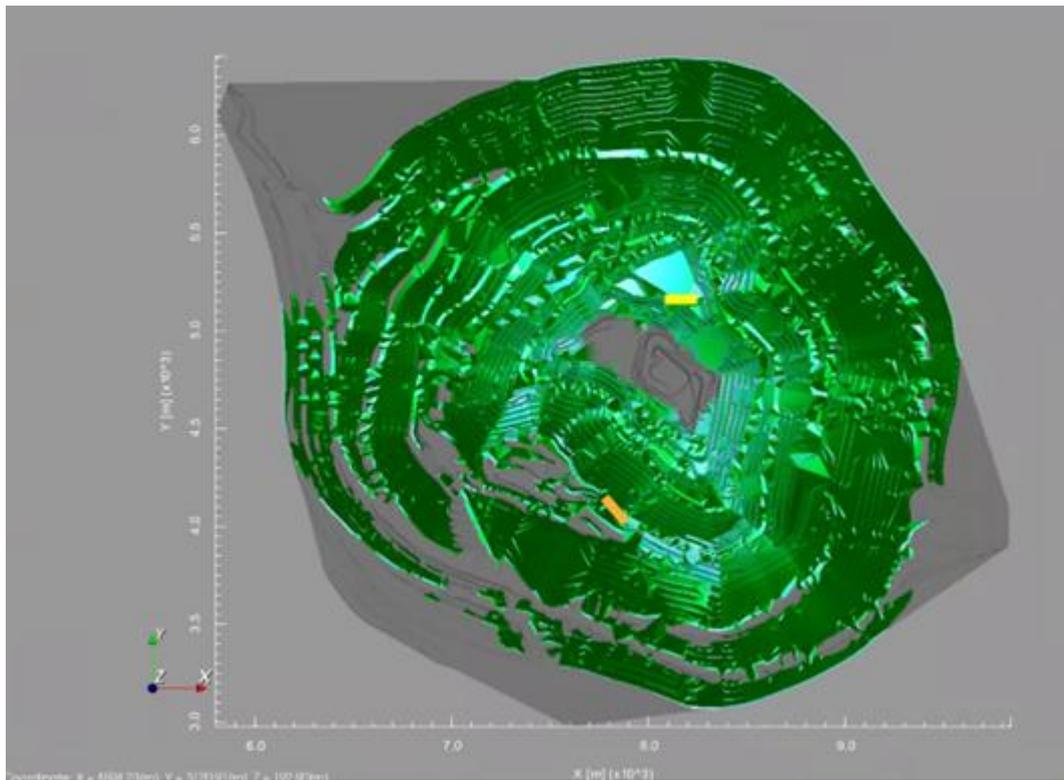


Рисунок 3.9 – Пример зоны покрытия радаром поверхности карьера в программе Planning Tool

Таблица 3.4 - Программа комплексного геотехнического мониторинга Качарского карьера

Объекты геотехнического мониторинга	Методы мониторинга и частота наблюдений							
	Визуальный осмотр		методы мониторинга, используемые для измерения геометрии склона или движения		Геодезические измерения		Гидрологические наблюдения	
	Частота измерений	Вид оборудования	Частота измерений	Вид оборудования	Частота измерений	Вид оборудования	Частота измерений	Вид оборудования
Зоны нестабильности (участки 2,3,4,6)	непрерывно	простейшие инструменты (линейки, мерные рулетки, др), цифровые фотокамеры высокого разрешения	on-line	Радарный контроль	-	-	1 раз в 15 дней (в паводковый период раз в неделю)	Разведочные скважины
Породы рыхлой части карьера	непрерывно		Ежедневно (если рабочий уступ)		Ежедневно для рабочих уступов		1 раз в месяц	Скважинный пьезометр
Отчетность	Журнал наблюдений за бортами, зарисовка и обследование трещин, извещение об угрозе в установленном порядке		При срабатывании системы сигнализации диспетчер извещает персонал в опасной зоне, геомеханика. Эвакуация из опасной зоны при срабатывании любой системы оповещения		Подготовка ежемесячного отчета. Эвакуация из опасной зоны при срабатывании любой системы оповещения		Данные пьезометров и порового давления отображаются в виде сводных графиков или на гидрогеологических разрезах	

### 3.4.2 ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ (СМЕЩЕНИЙ)

Для карьера важно установить пороговые диапазоны движения, которые вызывают определенные оперативное реагирование при их превышении. Помимо аналитических или численных методов прогнозирования смещений уступов борта карьера, пороговые значения в первую очередь должны быть основаны на данных смещений из прошлого опыта работы карьера или других подобных карьеров.

Предлагается использовать 3 порога движения для ожидаемого поведения борта карьера для принятия оперативных решений:

1 Порог **ОБЫЧНЫЙ**- движения, которые, как ожидается, произойдут в карьере в ответ на добычу полезных ископаемых. Эти движения включают упругие и некоторые пластические смещения стенки карьера.

2 Порог **ВНИМАНИЕ**- означает движения (скорости), превышающие обычно ожидаемые.

3 Порог **ОСТАНОВКА** - смещения в уступах карьера близки к обрушениям, и добыча полезных ископаемых на участке обрушения должна прекратиться

В таблице 3.5 приведены значения порогов движения для ожидаемого поведения борта Качарского карьера и принятия оперативных решений.

Значения порогов движения, используемые с применением радарных систем наблюдения за деформациями бортов карьеров, могут меняться по мере накопления опыта использования этой технологии на карьере

Таблица 3.5 - Пороги движения для ожидаемого поведения борта Качарского карьера и планы реагирования на действия по смещению

Пороги движения для ожидаемого поведения борта карьера и принятие оперативных решений				
Уровень опасности	Пороговые значения и Критерии	Меры оперативного реагирования на превышение критериев безопасности (TARP)	Возможные результаты	Ответственные лица
обычный 	Нормальные движения те, которые, как ожидается, происходят в карьере при добыче полезных ископаемых. Наблюдаются трещины до <b>5</b> см, ширина не меняется со временем, размеры обломков до 10 см, уменьшение ширины бермы до 20%	Контроль в обычном режиме	горные работы не останавливаются	инженер-геомеханик / горный мастер
внимание 	Порог предупреждения возникает, когда движение бортов карьера начинает ускоряться или если движения, продолжаются с неослабевающей скоростью. Наблюдаются трещины <b>5-10</b> см, появляются новые трещины за короткий период, осыпи, откос уступа увлажнен, просадки, размеры обломков 10-50 см, уменьшение ширины бермы до 50%	Определение границ опасной зоны. Приостановка горных работ, анализ механизма разрушения и разработка оперативных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня (например, осушение). Усиление мониторинга движения массива и частоте мониторинга.	движения постепенно уменьшаются и стабилизируются на уровне, позволяющем возобновить добычу полезных ископаемых на этом участке. Возобновление работ по решению технического руководителя организации на основании мониторинга ситуации	инженер-геомеханик / главный горняк
остановка 	Порог остановки назначается для ситуаций, когда: повышение ширины трещин раскрытия <b>&gt;10</b> см, частые осыпи, угроза обрушения, присутствует нетипичных водопритоков, значительное скопление горной массы с размерами обломков свыше 50 см, уменьшение ширины бермы <b>&gt; 50%</b>	Немедленная эвакуация. Определение границ опасной зоны. Все виды работ на опасном участке и смежных, расположенных в зоне влияния опасного, должны быть остановлены. Проведение дополнительных исследований и разработка оперативных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня	движения продолжают ускоряться до тех пор, пока не происходит разрушение уступов карьера. Возобновление работ с уведомлением территориального органа государственного горного надзора.	инженер-геомеханик/ главный горняк

### **ВЫВОДЫ по главе 3**

1. По данным отечественных и зарубежных источников выполнен анализ современных методов и средств мониторинга при открытой разработке полезных ископаемых, рассмотрены преимущества и недостатки составных элементов мониторинга.

2. По результатам исследований выполнено районирование территории Качарского карьера по зонам опасности и разработана карта рисков.

3. В специализированном ПО Planning Tool были определены оптимальные места установки радаров для мониторинга бортов Качарского карьера, охватывающие зоны геотехнических рисков.

4. Разработана программа комплексного геотехнического мониторинга Качарского карьера.

5. Для каждого объекта геотехнического мониторинга Качарского карьера определен состав, объемы, вид оборудования, периодичность наблюдений для выполнения определенного метода мониторинга.

6. Определены значения порогов движения для ожидаемого поведения борта Качарского карьера, оценка события и определены планы оперативного реагирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качарский карьер на сегодняшний день является одним из ведущих карьеров АО «ССГПО», который активно эксплуатируется и наращивает добычу. Глубина карьера достигает более 500 м. Месторождение характеризуется сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями залегания.

В работе выполнен геотехнический анализ неустойчивости приконтурного массива Качарского карьера, вызванный различными видами отказов, в том числе и действием НДС. Производство горных работ при разработке глубокого карьера сопровождается нарушением начального напряженного состояния породных массивов. Возникающие в прибортовом массиве деформации растяжения и сжатия горных пород определяют появление дополнительных напряжений, которые нарушают начальное напряженное состояние массива горных пород. В напряженных, хрупких породах смещения могут быть сложно выявляемыми, вплоть до момента обрушения.

Целью исследования была разработка научно-методических основ создания единой системы геомониторинга природного напряженного состояния массива скальных пород Качарского карьера для прогнозирования и раннего предупреждения критических деформаций откосов при действии тектонических полей напряжений с использованием современных систем мониторинга.

В ходе исследований была разработана научно-техническая методика геотехнического мониторинга поверхности прибортового массива Качарского карьера. Предложенная структура геомониторинга поверхности Качарского карьера включает методику прогноза деформаций, механизма сдвижений и разрушений прибортового массива борта карьера с учетом воздействия полей напряжений.

Для прогноза деформаций, сдвижений и разрушений горных пород месторождений с учетом полей напряжений были использованы численные методы для моделирования характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. Реализация численного моделирования напряженного состояния породного массива Качарского карьера была выполнена в ПО RS2 RocScience. Прогноз напряжений и деформаций в прибортовом массиве Качарского карьера обеспечивает достоверную геомеханическую оценку состояния бортов карьера на различных этапах его отработки. Разработанная численная модель может быть откалибрована на основе фактических данных напряжений на месте.

По результатам исследований:

- определена геомеханическая карта потенциально опасных участков Качарского карьера, в том числе вызванных действием НДС;
- разработана программа комплексного геотехнического мониторинга Качарского карьера, которая включает прогнозирование и раннее предупреждение критических деформаций откосов карьера при действии

тектонических полей напряжений с использованием современных систем мониторинга;

- для каждого объекта геотехнического мониторинга Качарского карьера определен состав, объемы, вид оборудования, периодичность наблюдений для выполнения определенного метода мониторинга.

- определены значения порогов движения для ожидаемого поведения борта Качарского карьера, оценка события и определены планы оперативного реагирования.

- программа комплексного геотехнического мониторинга Качарского карьера служит для выявления смещений склонов и определения адекватных профилактических мер на случай возможных оползневых чрезвычайных ситуаций для обеспечения безопасных условий работы для персонала и оборудования;

- разработанные научно-методические основы создания единой системы геомониторинга за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород на Качарском карьере могут быть использованы на аналогичных рудниках РК при разработке систем мониторинга.

Распределение основных напряжений в направлении ЮЗ\_СВ (по простиранию рудного тела) по результатам численного моделирования в программе RS2 RocScience

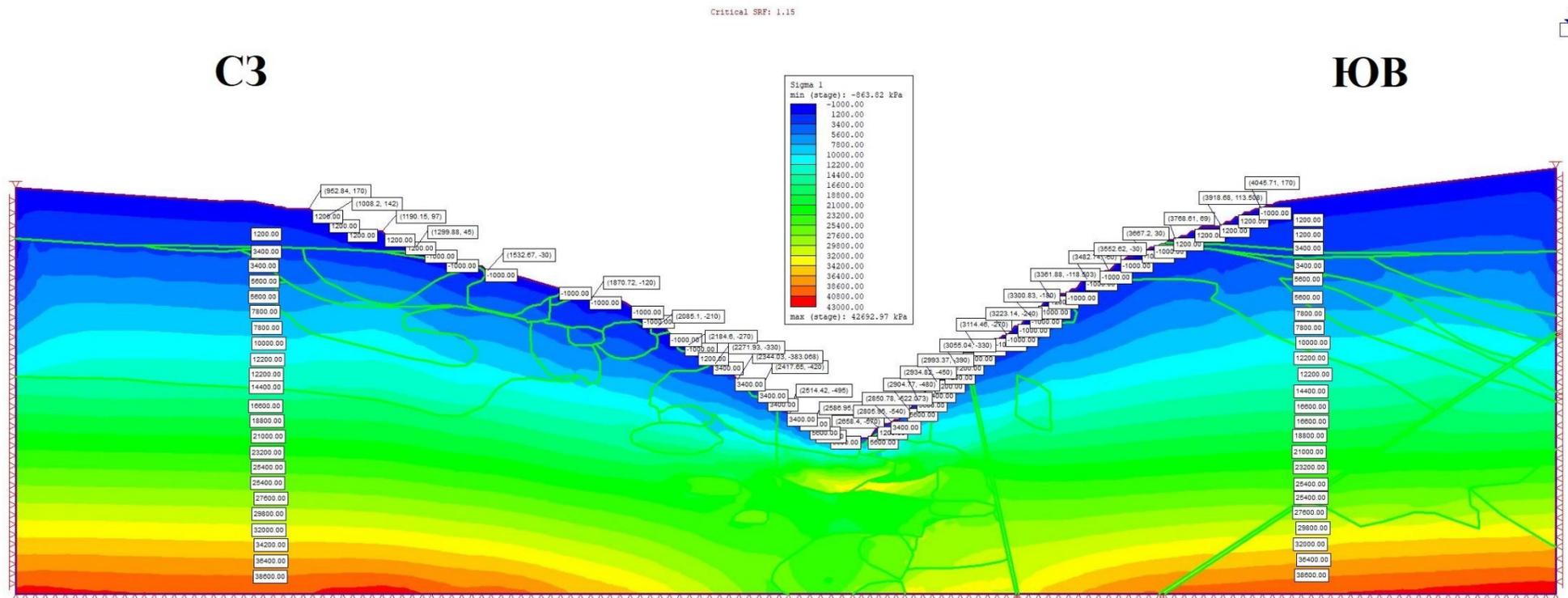


Рисунок 1- Распределение максимальной компоненты напряжений  $\sigma_1$  в массиве и карьерной выемке Качарского карьера в направлении СЗ\_ЮВ (профиль XX)

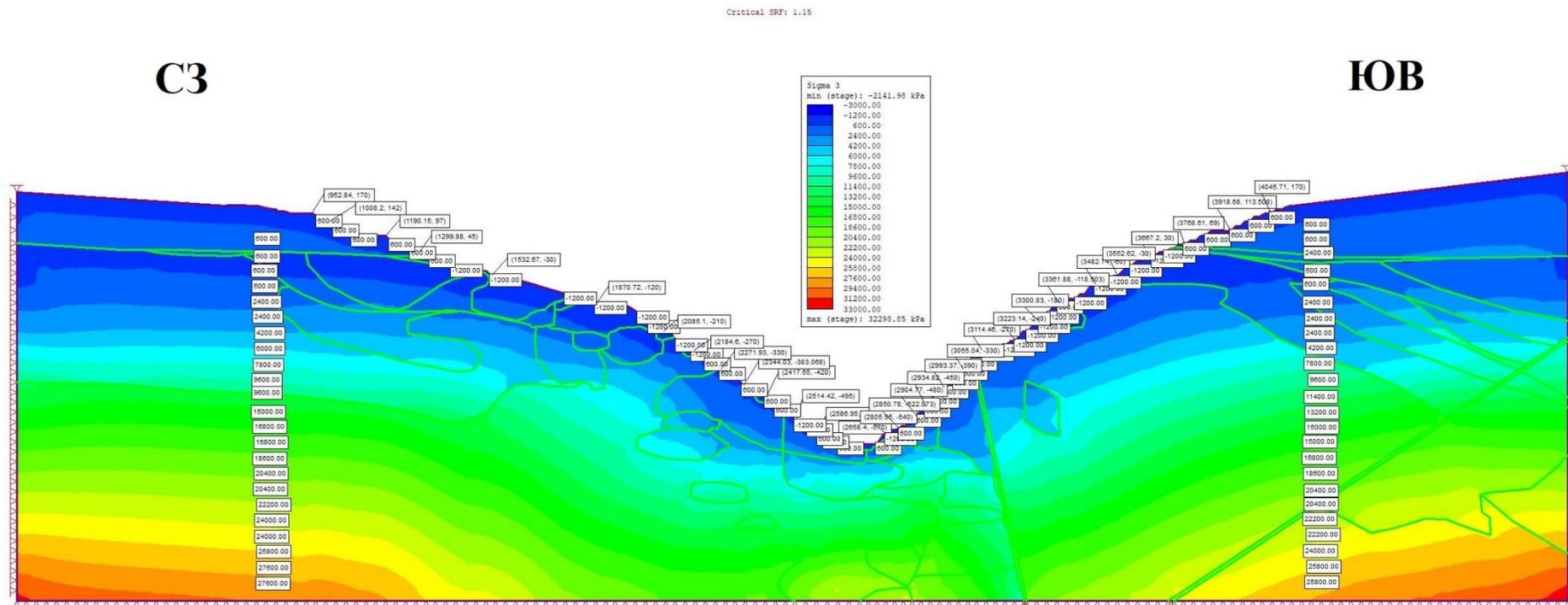


Рисунок 2- Распределение минимальной компоненты напряжений  $\Sigma_3$  в массиве и карьерной выемке Качарского карьера в направлении СЗ\_ЮВ (профиль XX)

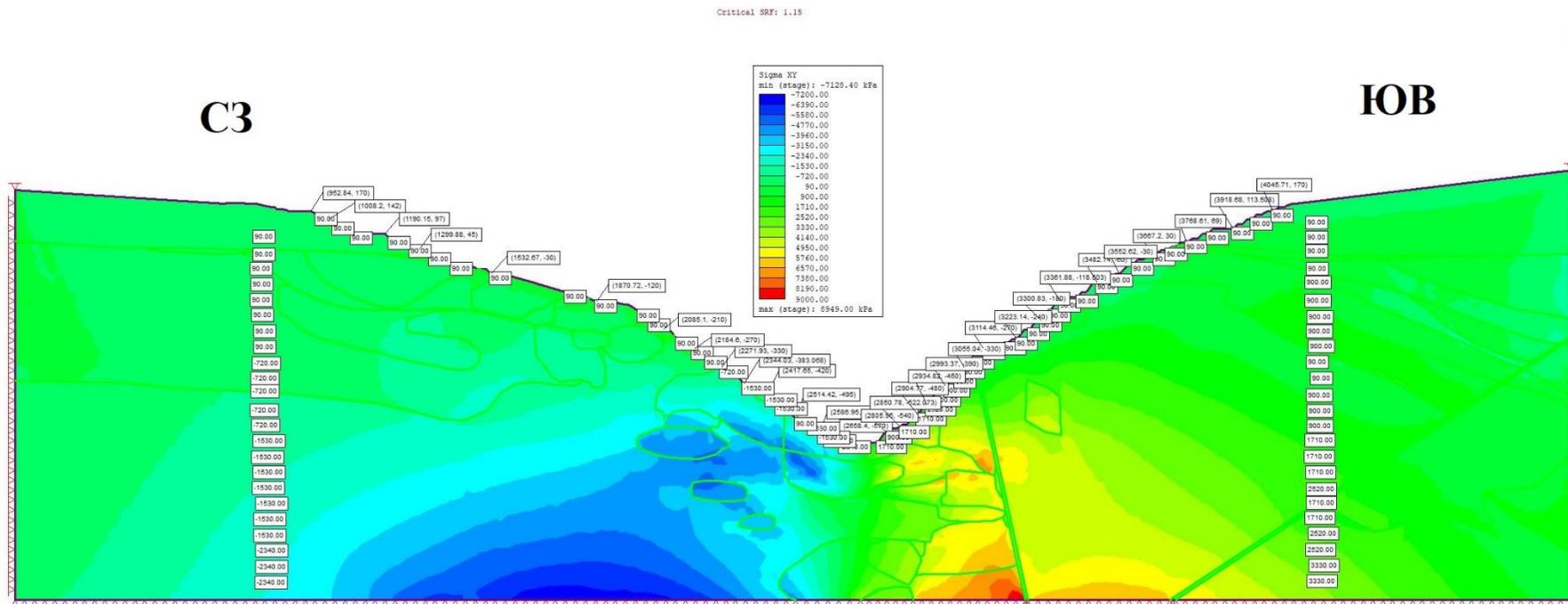


Рисунок 3- Распределение максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в массиве и карьерной выемке Качарского карьера в направлении С3\_ЮВ (профиль XX)

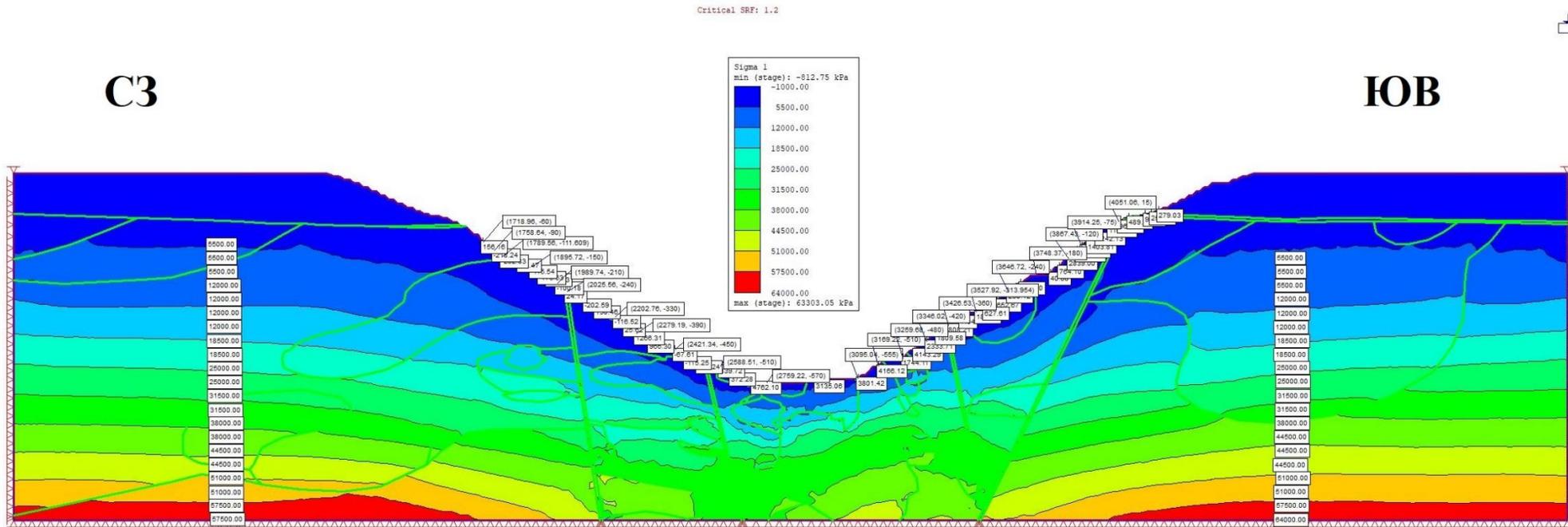


Рисунок 4- Распределение максимальной компоненты напряжений  $\sigma_1$  в массиве и карьерной выемке Качарского карьера в направлении СЗ\_ЮВ (профиль 51)

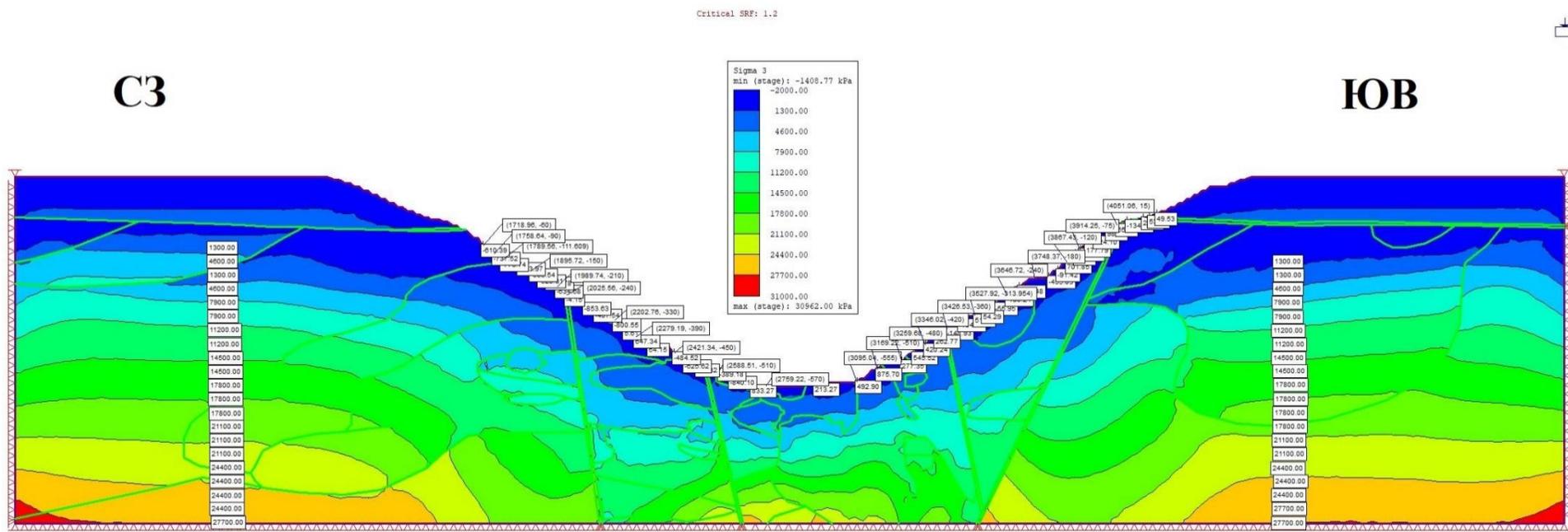


Рисунок 5- Распределение минимальной компоненты напряжений  $\Sigma_3$  в массиве и карьерной выемке Качарского карьера в направлении СЗ\_ЮВ (профиль 51)

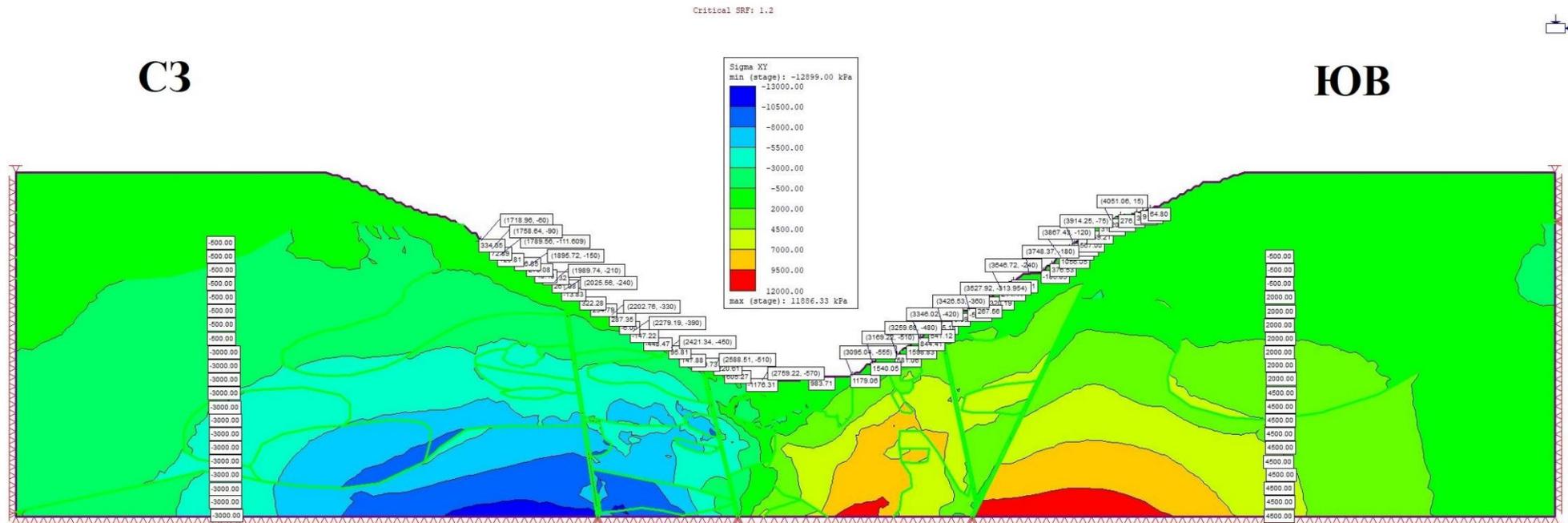


Рисунок 6- Распределение максимальной касательной компоненты напряжений  $\tau_{xy}$  в массиве и карьерной выемке Качарского карьера в направлении СЗ\_ЮВ (профиль 51)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Рыбин В. М. Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. ГИ КНЦ РАН, Апатиты, 2016.

2 Определение природного и техногенноизмененного напряженно-деформированного состояния горного массива на ССПО/ Панжин А.А.// Геомеханика в горном деле доклады всероссийской научно-технической конференции с международным участием 1-3 октября 2013 г.–Екатеринбург. 2014. –С. 8-17.

3 Анализ современных методов и средств мониторинга при подземной разработке полезных ископаемых/ Зуев Б.Ю., Гладкова Л.А., Истомин Р. 2012.

4 Напряженное состояние массива горных пород с ростом глубины залегания месторождений/ Неверов С.А.//Физические процессы горного производства. Вестник КузГТУ 2012. –С. 3-7.

5 Организация комплексной системы мониторинга устойчивости бортов и уступов глубоких карьеров с использованием современного геодезического оборудования/ Резниченко С. С., Сытенков В. Н., Наимова Р. Ш.// Горная промышленность. №3 (139) 2018. –С. 95. 2017.

6 Руководство по проектированию бортов карьера/ Стейси П. и др.; под ред. Дж. Рида, Стейси П.; пер. с англ. Бентхен А.С. –Екатеринбург. Правовед. Полиметалл. 2015. - 527 с.

7 Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород/ Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Федотова Ю.В.

8 Геотехнические проблемы на высокогорном руднике «Кумтор» и их экономические и экологические последствия/ Торгоев И.А.// Современные проблемы механики сплошных сред. Журнал Института геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики– Вып. 17. Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии. –Бишкек. 2013. –С. 151–176.

9 Анализ современных методов и средств мониторинга при подземной разработке полезных ископаемых/ Зуев Б.Ю., Гладкова Л.А., Истомин Р. 2012.

10 Методы оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород/ Цыцорин И.// Малышевские чтения. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород. 2019.

11 Опыт применения методов космической геодезии для геомеханического мониторинга массивов горных пород при открытых горных работах/Розанов И.Ю., Кузнецов М.А., Достовалов Р.Н.

12 A new method for predicting the failure time of a slope/ Fukuzono T.//Proceedings of the IVth International Conference and Field Workshop on Landslides. –Tokyo. Japan.

13 Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей/ Адигамов А.Э., Юденков А.В.//Горный информационно-аналитический бюллетень №8. –С. 93–103., 2021. DOI: 10.25018/0236149320218093.

14 Slope stability assessment and effect of horizontal to vertical stress ratio on the yielding and relaxation zones around underground open slopes using empirical and finite element methods/ Sepehri M., Apel D., Liu W.//Archives of Mining Science 2017. Vol. 62, No 3. –P. 653 – 669.

15 Monitoring geodynamic activity in the Victoria Land, East Antarctica: Evidence from GNSS measurements/ Zanutta A., Negusini M., Vittuari L., Cianfarra P., Salvini F. et al.//Journal of Geodynamics. Vol. 110. 2017. –P. 31 - 42.

16 Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры/ Тагильцев С.Н.//Известия вузов. Горный журнал № 7. 2018. –С. 55 - 60.

17 Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок/Мельник В.В.// Горный информационно-аналитический бюллетень. № 10. 2005. –С. 69 - 74.

18 Физика и практика спектральной сейсморазведки/ Гликман А.Г. 2018. URL: <https://newgeophys.spb.ru/ru/book/> (дата обращения 11.01.2022).

19 Отчет НИР «Экспертная оценка о характере и причинах развития деформационных явлений по берме горизонта -30 м, -90 м, -105 м и -180 м западного борта Качарского карьера в зоне строительства подпорной стенки конвейерного подъемника». Екатеринбург. 2015.

20 Геоинформационные технологии сопровождения процессов горного производства/ Соколов И.В., Корнилков С.В., Панжин А.А.//В книге: Цифровые технологии в горном деле. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. Апатиты, 2023. С. 62-63.

21 Исследование современных геодинамических движений и эволюции деформационных полей на земной поверхности при недропользовании маркшейдерско-геодезическими методами/Панжин А.А., Панжина Н.А., Сашурин А.Д., Мельник В.В., Балек А.Е., Далатказин Т.Ш., Усанов С.В., Панжин А.А., Криницын Р.В., Озорнин И.Л., Харисов Т.Ф., Коновалова Ю.П., Замятин А.Л., Григорьев Д.В., Ведерников А.С., Усанова А.В., Зубков А.В., Сосновская Е.Л.//В книге: Геомеханические аспекты недропользования. Екатеринбург, 2022. С. 119-165.

22 Методические основы оценки исходного напряженно-деформированного состояния для районирования территорий по риску природно-техногенных катастроф на объектах недропользования/Панжин А.А., Сашурин А.Д., Панжина Н.А., Шпаков П.С.//Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 4. С. 297-308.

23 Отчет НИР по теме «Экспериментальное исследование природного напряженно-деформированного состояния массива горных пород Куржункульского карьера»/ 2018 г.

24 Отчет НИР по теме «Проведение НИР по разработке рекомендаций по параметрам бортов и уступов Куржункульского карьера Куржункульского РУ АО «ССГПО», обеспечивающих их устойчивость, разработка Регламента по устойчивости бортов и уступов Куржункульского карьера, разработка Регламента по определению параметров внешних автомобильных отвалов № 3, № 4 и внутреннего отвала Куржункульского карьера»/ Алматы. 2018 г.

25 Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов памяти в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана / Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л.//Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2010. – № 10.

26 Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками: монография / Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В., Козырев С.А. и др.//Апатиты. КНЦ РАН. 2019. –С. 431. ISBN 978-5-91137-391-7.

27 Исследование напряженно-деформированного состояния пород в бортах глубокого карьера при действии тектонических напряжений/ Аветисян И.М. Апатиты. 2013.

28 Метод конечных элементов в технике/ Зенкевич О. –Москва. Мир. 1975.

29 Метод конечных элементов в механике/ Фадеев А.Б. –Москва. Недра. – С. 198.

30 Отчет НИР по теме «Разработка Регламента по устойчивости бортов и уступов объединённого Сарбайского и Южно-Сарбайского карьеров с учётом их углубки соответственно до абсолютной отметки (-660) м и (-400) м»/ Алматы. 2021 г.

31 Отчет НИР «Качарский карьер АО «ССГПО». Исследования и разработка технологического регламента по обеспечению устойчивых параметров уступов и бортов карьера на конечном контуре. Обоснование варианта ликвидации аварийного положения и и продолжения работ по строительству ДКК циклично-паточной технологии разработки». Разработка рекомендаций по оптимизации технологических параметров уступов и бортов

карьера и снижению деформаций законтурного массива от взрывных работ/Этап 7 (Промежуточный). Алматы. 2016.

32 ОТЧЕТ НИР «Создание системы мониторинга состояния устойчивости прибортовых массивов карьеров (Сарбайского, Соколовского, Качарского, Куржункульского) и отвалов на основе инструментальных наблюдений» 3-й цикл (1 этап) Том III. Качарский карьер. Караганда, 2017г.

33 Отчет НИР «Качарский карьер АО «ССГПО». Исследования и разработка технологического регламента по обеспечению устойчивых параметров уступов и бортов карьера на конечном контуре. Обоснование варианта ликвидации аврийного положения и продолжения работ по строительству ДКК циклично-поточной технологии разработки»/ этап 1 (промежуточный).

34 Существующие системы мониторинга и необходимость обновления нормативно-методологической базы для обеспечения безопасности горных работ на карьерах/ Балтиева А.А., Шамганова Л.С., Абдыкаримова Г. Б., Панжин А. А.// «Известия вузов. Горный журнал», № 7. Екатеринбург. 2019. С. 92-100. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-7-92-100>

35 Современное программное обеспечение для решения задач геомеханики/ Усманов С.Ф.// Вестник КРТУ. Том 8. 2008. №1. –С. 81-84.

36 Cotesta, L., J. Xiang, B. Paudel, R. Sterrett, J. Sjöberg, T. Dilov, I. Vasilev and Z. Yalamov. "Advanced three-dimensional geomechanical and hydrogeological modelling for a deep open pit", in: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Dight, P. M. (ed.), pp. 1383–1398. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2020. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2025\\_95](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2025_95).

37 Хаст Н., Нильсон Т. (1967) Измерение напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин. “Проблемы инженерной геологии”, вып. 4. М., “Наука”. 163 с.

38 А. М. Фрейдин, С.А. Неверов, А.А. Неверов исходное поле напряжений в массивах горных пород.и его изменение с ростом глубины залегания. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук № 1, т. 1, 2014 г

39 Казикаев Д.М., Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Иофис М.А.Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2016. — 490 с.: ил.

40 Бате, К., Вилсон, Е., 1982. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Стройиздат, М.

41 Карташов Ю. М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. - М.: Недра, 1979.

- 42 Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975.
- 43 Глубокие карьеры: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2015. - №11 (специальный выпуск 56). - 544 с. – М.: издательство «Горная книга».
- 44 3D block modeling of geomechanical properties of ore deposits using modern GMISS/ Khairullaev A.M., N.O. Berdinova, S.A. Syedina, G.B. Abdikarimova, Altayeva A.A.// News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. №6, November – December 2022. SJR 0.323, CiteScore 2020 1.5, SNIP- 1.121, ISSN 2224-5278, <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170X.169>
- 45 Отчет о НИР АО «Гипроруда» 2007 г. Проект АО «ССГПО» Реконструкция Качарского карьера с вовлечением в отработку Южного участка месторождения». Пояснительная записка. Этап 1. Основная технические решения.
- 46 Numerical modeling of the stress-strain state of the Kurzhunkul open-pit mine/ Sedina S. A., Berdinova N.O., Abdikarimova G. B., Altayeva A. A., Toksarov V.N.// News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. №6, November – December 2021. P. 110-117. SJR 0.323, Q3, CiteScore 2020 1.5, SNIP- 1.121, 40 процентиль <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.126>, ISSN 2224-5278
- 47 Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород: Справочное пособие / Протождяконов М. М., Тедер Р. И., Ильницкая Е. И. и др. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
- 48 Организация комплексной системы мониторинга устойчивости бортов и уступов глубоких карьеров с использованием современного геодезического оборудования/ Резниченко С.С., Сытенков В.Н., Наимова Р.Ш. // Рациональное освоение недр. – 2017. - №2. – С. 56-67.
- 49 Survey and geotechnical slope monitoring considerations/ Cawood F.T., Stacey T.R.// Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 106. 2006. –P. 495-502.
- 50 A study of the application of digital photogrammetry to slope monitoring systems/ International journal of rock mechanics & mining sciences. Ohnishi Y., Nishiyama S., Yano T., Amano K. 2006. Vol. 43. –P. 756-766.
- 51 Use of digital terrestrial photogrammetry in rocky slope stability analysis by distinct elements numerical methods/ International journal of rock mechanics & mining sciences. Firpo G., Salvini R., Francioni M., Ranjith P.G. 2011. Vol. 48. –P. 1045-1054.

52 Практика использования технологии лазерного сканирования в наблюдениях за деформациями бортов карьеров/ Кольцов П.В., Иванов Ю.С.// Маркшейдерия и недропользование. 2015. № 1. –С. 45–47.

53 LEICA GeoMoS Automatic Deformation Monitoring System. – URL: [http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-GeoMoS\\_4802.htm](http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-GeoMoS_4802.htm).

54 Monitoring of open pit mines using GNSS satellite receivers and robotic total stations/ Brown N., Kaloustian S., Roeckle M. 2007.

55 Analysis of large-scale rock slope/ Ph.D. thesis, Lulea university of technology. Sweden. Sjoberg J. 1999.

56 Status and Developments of Slope Monitoring Techniques in Opencast Mines/INDOROCK 2016: 6th Indian Rock Conference 17-18 June 2016. Vinoth S., Ajay Kumar L., Mishra A.K. –P. 765-781.

57 A study of the application of digital photogrammetry to slope monitoring systems/ Ohnishi Y., Nishiyama S., Yano T., Matsuyama H., Amano K.// International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2006. Vol. 43. –P. 756–766.

58 Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity on rock cuts/ Sturzenegger M., Stead D.// Engineering Geology. 2009. Vol. 106. –P. 163 –182.

59 Review of surface mine slope monitoring techniques/ Osasan K.S., Afeni T.B. //Journal of Mining Science 46(2). 2010. –P. 177–186.

60 Recent advances in slope monitoring radar for open-pit mines/ Farina P., Coli N., Coppi F., Babboni F., Leoni L., Marques T., Costa F.// Proceedings of mine closure solutions. Brazil. –P. 1-8.

61 The use of slope stability radar (SSR) in managing slope instability hazards/ Harries N.J., Roberts H.// Rock mechanics: Meeting society's challenge and demands. Proceedings of first Canada US rock mechanics symposium-ARMA - 07 - 007. –P. 53-59.

62 <https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar/ibis-arcsar-lite-or--performance>

63 Utilising satellite-based techniques to identify and monitor slope instabilities: the Fagraskogafjall and limnes landslides / Larkin H., Magnall N., Thomas A., Holley R., McCormack H.// Slope stability 2020 – PM dight Australian centre for geomechanics. Perth.

64 А.З. Капасова, Е. Бахыт, А.Б. Аманбаева. Карагандинский государственный технический университет (г. Караганда, Казахстан). Радар жүйесі арқылы ашық карьерде үздіксіз мониторинг жүргізу тәсілі (Способ ведения непрерывного мониторинга на открытом карьере с помощью радарной системы)// Горный журнал №5 2020.С. –22-25.