

Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева

УДК 622.271: 622.83

На правах рукописи

СЪЕДИНА СВЕТЛАНА АНДРЕЕВНА

**Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при его
углубке**

6D070700 – Горное дело

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант
академик НАН РК,
доктор технических наук
профессор
Ракишев Б.Р.

Зарубежный консультант
доктор технических наук,
профессор
Асанов В.А. (Россия)

Алматы, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МАССИВОВ ПОРОД С УВЕЛИЧЕНИЕМ ГЛУБИНЫ ОТРАБОТКИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ	13
1.1 Краткая инженерно-геологическая и гидрогеологическая информация об объекте исследования	18
1.2 Основные факторы, влияющие на деформационные процессы Сарбайского карьера.....	24
Выводы по главе 1.....	28
2 ПРОВЕДЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ..	30
2.1 Методики определения физико-механических свойств горных пород..	30
2.2 Определение физико-механических свойств горных пород на глубоких горизонтах и анализ результатов лабораторных исследований.....	34
2.3 Изучение структурного строения массива горных пород	39
2.3.1 Изучение структурного строения массива горных пород по результатам геологических изысканий	39
2.3.2 Изучение структурного строения массива горных пород по результатам натуральных измерений	42
2.4 Влияние трещиноватости на устойчивость уступов	54
2.5 Определение риска возникновения деформаций в виде скольжение блоков по плоскостям ослабления в масштабе одного уступа	56
2.6 Определение расчетных прочностных характеристик пород Сарбайского карьера с учетом их трещиноватости	62
Выводы по главе 2.....	65
3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА	67
3.1 Методы расчета, применяемые в работе	67
3.2 Расчет устойчивости бортов Сарбайского карьера и выявление потенциально опасных участков	70
3.3 Результаты математического моделирования устойчивости бортов карьера.....	76
Выводы по главе 3.....	83
4 ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ	84
4.1 Общие сведения о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород рудных месторождений	84
4.2 Натурные измерения напряженно-деформированного состояния массива горных пород Сарбайского карьера	87
4.3 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния пород прибортового массива.....	91
4.4 Геомеханическая модель месторождения	97

Выводы по главе 4.....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
ПРИЛОЖЕНИЕ А	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	111

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

1. Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан послевузовское образование. Докторантура. Основные положения ГОСО РК 5.04.034 –2011
2. ГОСТ 8.417-81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.
3. ГОСТ 7.9-95 (ИСО 214 -74) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

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

КЗУ – коэффициент запаса устойчивости

НДС – напряженно-деформированное напряжение

ФМС – физико-механические свойства

ЮВРТ - Юго-Восточное рудное тело

ГК-П - гамма-гамма каротаж в плотностном варианте

КС каротаж сопротивления

ГК гамма-каротаж

ИГД им. Д.А. Кунаева – Институт горного дела имени Д.А. Кунаева

ВНИМИ – Всесоюзный научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела

ОАО «ВИОГЕМ» - Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу»

ИГД МЧМ СССР – Институт горного дела Министерства черной металлургии СССР

ИГД УРО РАН – Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь)

SAM - Stress Analysis Method (Метод анализа напряжений)

SRM - Strength Reduction Method (Метод редукции)

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технической проблемы. История разработки месторождений открытым способом указывает на тенденцию увеличения глубин отработки. В начале XX века горные работы осуществлялись в пределах осадочных пород, максимальная глубина карьеров того времени не превышала 100 м от поверхности, но уже спустя несколько десятилетий максимальные глубины отработки месторождений открытым способом достигали 200-300 м [1-3].

Дальнейший рост потребности в минеральном сырье повлек за собой усовершенствование техники и технологий, максимальная глубина ведения горных работ открытым способом стала достигать в отдельных случаях 400 м [2].

Из-за таких характеристик как высокая эффективность и производительность извлечения полезных ископаемых из недр открытым способом разработки остается лидирующим по процентному соотношению добываемых полезных ископаемых. По данным, приведенным в работах отечественных и зарубежных ученых, около 80 % всех добываемых полезных ископаемых приходится на открытый способ добычи [4-6].

Одними из основных вопросов при отработке полезных ископаемых открытым способом являются обеспечение безопасности при ведении горных работ и достижение рациональной отработки месторождений. Увеличение глубины разработки месторождений открытым способом обычно ведет к разному бортов карьера и увеличению объемов вскрыши. Другой вариант вовлечения в отработку глубоких горизонтов карьера без значительного увеличения себестоимости добычи полезного ископаемого является пересмотр первоначального проекта и увеличения конечного угла наклона борта [7, 8]. При этом варианте встает вопрос об обеспечении устойчивости борта карьера и выборе рациональных с точки зрения геомеханики параметров вновь проектируемых уступов на глубоких горизонтах.

Основным условием, необходимым для пересмотра первоначальных проектов отработки месторождений является информация о геомеханическом состоянии массива горных пород, в которой наряду с параметрами напряженно-деформированного состояния и геолого-структурных особенностей месторождения, являются и знания о физико-механических свойствах вмещающих руд и пород [7-10].

Разработанные и принятые на предприятиях методики в полной мере не охватывают все проблемы, возникающие при отработке глубоких карьеров [11-13]. Согласно этим нормативным документам, определение и обоснование параметров бортов и уступов карьеров должно быть выполнено методом расчета коэффициента запаса устойчивости используя классические методы предельного равновесия. Однако, данные методы не учитывают структурные нарушения массива горных пород, которые оказывают негативное влияние на устойчивость.

Также существующие в настоящее время теоретические подходы к обоснованию устойчивых углов бортов карьеров, как правило, не учитывают реального напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов скальных горных пород, полагая, что оно обусловлено только собственным весом вышележащих пород [14].

При расчете устойчивости бортов по методике 1972 г. во всех схемах учитывается только собственный вес оползневой призмы [11]. В скальных же массивах, где горизонтальные напряжения в большинстве случаев превышают вертикальные, пренебрежение деформациями разгрузки предопределяет возможное развитие аварийных ситуаций при глубинах карьеров более 200 – 250 м. Деформации разгрузки проявляются в деформации массива и возникновении трещин большой протяженности, субпараллельных откосам (трещины бортового отпора). В результате этих процессов начинается расщепление массива на крутопадающие «слои», которые опрокидываются и изгибаются [15].

Вопрос о необходимости совершенствовании существующих методик по обеспечению устойчивости действующих и проектируемых карьеров рассматривали в своих работах Трубецкой К.Н. [16], Рыльникова М.В. [16], Цирель С.В. [17], Зотеев О.В. [15].

В диссертационной работе применены современные методы анализа и математического моделирования на примере действующего горнодобывающего предприятия. Разработанный алгоритм действий возможен для включения в обновленную методику по обеспечению устойчивого состояния бортов и уступов глубоких карьеров.

Основание и исходные данные для разработки темы. Основанием для разработки темы диссертационной работы является геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при его углубке для введения в отработку глубоко залегающих руд. В качестве исходных данных для разработки темы исследований выбраны: геомеханические условия крупнейшего действующего железорудного месторождения Казахстана, обрабатываемого открытым способом.

Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы. Потребности в минеральном сырье из года в год возрастают, что введет за собой необходимость повышения производственных мощностей горных производств. Месторождения, имеющие простые горно-геологические условия и высокое содержание полезного компонента в рудах уже отработаны или близки к завершению работ. Поэтому современное развитие горнодобывающей отрасли характеризуется усложнением условий производства горных работ из-за увеличения глубины разработки и вовлечения в эксплуатацию месторождений со сложными горно-геологическими условиями. При увеличении глубины действующих карьеров вопросы устойчивости бортов превращаются в проблемы большой экономической значимости для горных предприятий [18, 19]. В связи с этим обоснование устойчивых параметров бортов и уступов глубоких карьеров

открывает новые возможности обработки глубоко залегающих руд для действующих предприятий.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработке, патентных исследованиях и выводы из них определяются полнотой проведенного обзора патентного поиска по проблеме обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, выбором современных методик исследований, программ и методов анализа устойчивости элементов карьеров, системой организацией и проведением натуральных и лабораторных исследований.

В диссертационной работе приведены результаты научного анализа современного состояния научно-технической проблемы и исследований по прогнозированию дальнейших направлений научных разработок в области обеспечения устойчивости бортов и уступов глубоких карьеров. Выявлено, что существующие универсальные методики не включают в себя комплексного подхода при решении проблем устойчивости для глубоких карьеров.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации. Достоверность полученных результатов подтверждается применением комплекса физико-механических методов исследования, натуральных измерений структурных особенностей массива, использованием методов математического моделирования устойчивости и напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

При проведении лабораторных и натуральных исследований в рамках данной диссертационной работы были использованы приборы, прошедшие государственную метрологическую проверку в период эксплуатации.

Лаборатория филиала РГП на ПХВ «Национального центра по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан» Горного института им. Д.А. Кунаева аккредитована в системе аккредитации Республики Казахстан на соответствии ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». Сертификат о поверке № ВА-03-02-00889 (действителен до 18.09.2019 г.).

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

Актуальность темы. В настоящее время на крупных месторождениях полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом, осуществляется переход к обработке глубоких горизонтов. При увеличении глубин обеспечение устойчивости бортов и уступов карьеров является одной из основных задач горного производства.

Прогнозирование деформационных процессов в прибортовой зоне карьеров возможно на основе комплексного подхода к анализу и обобщению данных, включающих изучение структурно-тектонического строения и прочностных свойств массива, инструментальные наблюдения за деформированием различных участков прибортового массива, оценку

напряженно-деформированного состояния, а также проведение геомеханических расчетов устойчивости.

Внедрение цифровых технологий в различные сферы деятельности, позволяет решить многие проблемные вопросы при отработке месторождений полезных ископаемых [20-24]. «Соколовско - Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» (ССГПО) уже встало на путь развития по программе «Цифровой Казахстан» запустив один из компонентов "Умного карьера" на основе системы диспетчеризации Modular, который позволяет увеличить производительность транспортного оборудования на 10% [25, 26].

Интеллектуальный («умный») карьер - совокупность систем автоматизированного управления и диспетчеризации процесса добычи полезных ископаемых, направленная на непрерывное улучшение управляемости, снижения издержек и улучшение условий и безопасности труда.

Одним из элементов таких систем управления должно стать создание цифровой геомеханической модели. Такая модель реализуется с помощью современного программного обеспечения, связывающего геологические, прочностные, структурные и геомеханические составляющие карьера в единую базу данных.

Структура базы данных представляет собой группу взаимосвязанных моделей, содержащих оцифрованное пространственно-координатное описание графических элементов (точек, линий, узлов, замкнутых контуров).

Новизна темы заключается в геомеханическом обеспечении устойчивости бортов карьера при его углубке. Выполненный анализ литературных источников в области обеспечения устойчивости бортов и уступов глубоких карьеров позволяет сделать вывод о том, что для современных карьеров характерно усложнение условий производства горных работ из-за увеличения глубины разработки и вовлечения в эксплуатацию месторождений со сложными горно-геологическими условиями. В этих условиях большое значение приобретают вопросы геомеханического обеспечения устойчивости глубоких карьеров. В связи с этим, впервые будет предложен комплексный подход к геомеханическому обеспечению устойчивости бортов карьера при его углубке.

В работе получены следующие новые научные результаты:

- установлены закономерности изменения структурного строения блочного массива (в виде зависимости коэффициента структурного ослабления от величины сцепления горных пород) и физико-механических свойств с увеличением глубины горных работ для Сарбайского карьера по результатам натурных и лабораторных исследований;

- определены зоны возможных деформаций бортов Сарбайского карьера при увеличении глубины его отработки на основе математического моделирования с учетом блочности строения массива и изменения физико-

механических свойств как по площади распространения, так и по глубине залегания пород;

- впервые разработана для Сарбайского месторождения цифровая база данных, состоящая из геологической, структурной, гидрогеологической моделей и результатов математического моделирования устойчивости и напряженно-деформированного состояния, представляющая собой трехмерную геомеханическую модель, на основе которой определены параметры бортов и уступов карьера, обеспечивающие безопасность ведения горных работ при увеличении глубины отработки до 700 метров.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.

Диссертационная работа выполнена в отделе «Геомеханики» Института горного дела им. Д.А. Кунаева в рамках выполнения научно-исследовательской работы по проекту «Проведение НИР по разработке рекомендаций по параметрам бортов и уступов Сарбайского и Южно-Сарбайского карьеров Сарбайского РУ АО «ССГПО», обеспечивающих их устойчивость и разработка Регламентов по устойчивости бортов и уступов Сарбайского, Южно-Сарбайского и объединённого Сарбайского и Южно-Сарбайского карьеров» с 2016 по 2018 гг. и при реализации научно-технической программы № BR05236712 «Технологическая модернизация горных производств на основе перехода к цифровой экономике» в рамках программно-целевого финансирования на 2018-2020 гг.

Цель исследования - геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при его углубке на основе геомеханической модели месторождения, включающей исходные горно-геологические данные, результаты математического моделирования и районирования.

Объектом исследования является Сарбайское железорудное месторождение, разрабатываемое открытым способом.

Предметом исследования являются геомеханические процессы, влияющие на устойчивость бортов и уступов карьера с увеличением глубины отработки.

Задачи исследований, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом:

– проведение лабораторных и натурных исследований массива горных пород, обработка и интерпретация полученных данных;

– математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород и определение коэффициентов запаса устойчивости бортов карьера;

– создание единой базы данных в виде геомеханической модели, которая включает результаты предыдущих и проведенных в диссертационной работе исследований массива горных пород;

– разработка рекомендаций по обеспечению геомеханической устойчивости бортов карьера в зависимости от горно-геологических, гидрогеологических, структурных особенностей месторождения.

Поставленные задачи последовательны и логичны, определяют внутреннее единство научно-исследовательской работы и направлены на достижение поставленной цели исследований.

Методологическая база исследований

К числу основных методов исследований и анализов, применяемых при выполнении диссертационной работы, относятся:

- испытание образцов на одноосное сжатие и растяжение на универсальной испытательной машине (VEB № 282/89);
- определение модуля упругости и коэффициента Пуассона по скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в образцах с использованием соответствующей ультразвуковой аппаратуры «Пульсар 2.2»;
- измерение действующих горизонтальных напряжений в прибортовом массиве на основе использования эффекта Кайзера горных пород при нагружении стенок скважины гидродомкратом Гудмана;
- расчет коэффициентов запаса устойчивости методом предельного равновесия способом бокового давления с помощью программы USTO DU;
- расчет коэффициентов запаса устойчивости методом предельного равновесия с помощью программы Slide компании Rocscience;
- расчет устойчивости откоса, основанный на методе редукции (Strength Reduction Method) с использованием метода конечных элементов в программном обеспечении Midas GTS NX;
- методом анализа напряжений (Stress Analysis Method) на основе конечных элементов в программном обеспечении Midas GTS NX;
- трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния методом анализа напряжений (Stress Analysis Method) на основе конечных элементов в программном обеспечении Midas GTS NX.

Положения, выносимые на защиту

На защиту диссертационной работы выносятся следующие положения:

- состояние устойчивости уступов и бортов Сарбайского карьера предопределяется структурными особенностями и прочностными характеристиками скального массива, изменяющихся с глубиной карьера;
- зоны возможных деформаций, возникающие увеличении глубины отработки Сарбайского карьера до 700 м, определяются на основе математического моделирования с учетом особенностей пространственной изменчивости физико-технических свойств массива горных пород, как по площади распространения, так и по глубине залегания пород;
- геомеханическое обоснование устойчивости бортов и уступов Сарбайского карьера при его углубке обеспечивается на основе комплексного учета результатов натурных, лабораторных исследований и математического моделирования их состояния, представленных единой цифровой базой данных.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке единой базы данных, представленной геомеханической моделью месторождения, на основе которой возможно прогнозирование возникновения

деформационных процессов борта и уступов карьера при его дальнейшей отработке.

Результаты исследований внедрены на Сарбайском карьере АО «ССГПО» о чем получен соответствующий Акт (ПРИЛОЖЕНИЕ А) и при выполнении научно-исследовательских работ отдела (ПРИЛОЖЕНИЕ Б).

Публикации и апробация работы. Публикации включают четыре статьи в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и МОН РК; одну статью в рейтинговом «Горном журнале» (база Scopus); восемь статей в сборниках международных конференций, форумов и конгрессах.

Основные положения диссертационной работы и результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на 6 международных научно-практических конференциях: «Горные науки в индустриально-инновационном развитии страны» г. Алматы, «Инновационные технологии в геодезии, маркшейдерии и геотехнике» г. Караганда, «Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук» г. Новосибирск, «Всемирный Горный Конгресс» г. Астана, «Неделя горняка 2018» г. Москва, в том числе на VII Уральском горнопромышленном форуме в секции «Геомеханика в горном деле» доклад автора получил номинацию «Лучший доклад» (ПРИЛОЖЕНИЕ В).

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 123 наименований и приложений. Работа изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 28 таблиц.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МАССИВОВ ПОРОД С УВЕЛИЧЕНИЕМ ГЛУБИНЫ ОТРАБОТКИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Для развития современных карьеров характерно значительное увеличение глубины и переход к разработке глубоко залегающих руд, глубина отработки месторождений открытым способом перешагнула отметку в тысячу метров от земной поверхности (Таблица 1.1, Рисунок 1.1) [27 - 39].

Таблица 1.1 - Сведения о глубоких карьерах мира

Название	Страна	Добываемое полезное ископаемое	Начало добычи	Размер, км	Глубина, м
Бингем Каньон (Kennecott Bingham Canyon Mine)	США	Медь, молибден, золото	С 1863 г	4×3,8	1200
Чукикамата (Chuquibambilla)	Чили	Медь, золото, серебро, рений, селен	более ста лет до 2018 г. – затем переход на подземную добычу	4,3×3	850 м
Палабора (Palabora)	ЮАР	Медь		1,9×1,7	700
Карьер Фимистон/Fimiston 1	Австралия	золото	с 1893 г - 2018	3,8*1,5	660/360
Удачный	Россия	Алмазы	с 1971	1,7×1,3	640
Эскондида (Escondida)	Чили	Медь, золото, серебро	с 1990 г.	3,8×2,7	645 м
Мурунтау	Узбекистан	Золото		3,5×2,5	600
Сибайский карьер	Россия	Медь, цинк, сера	с 1939 г	2,0 2,0	600
Бату-Худжау (Batu Hijau)	Индонезия	Золото, медь		2,5*2,2	550
Грасберг/ Grasberg	Индонезия	медь/золото	1973 г - 2041 г		550 м
Эскондида Нотр (Escondida Notre)	Чили	Медь, золото, серебро		1,6*1,4	500
Ковдорский ГОК	Россия	Железная руда, апатит, бадделлит		2,3*1,6	500

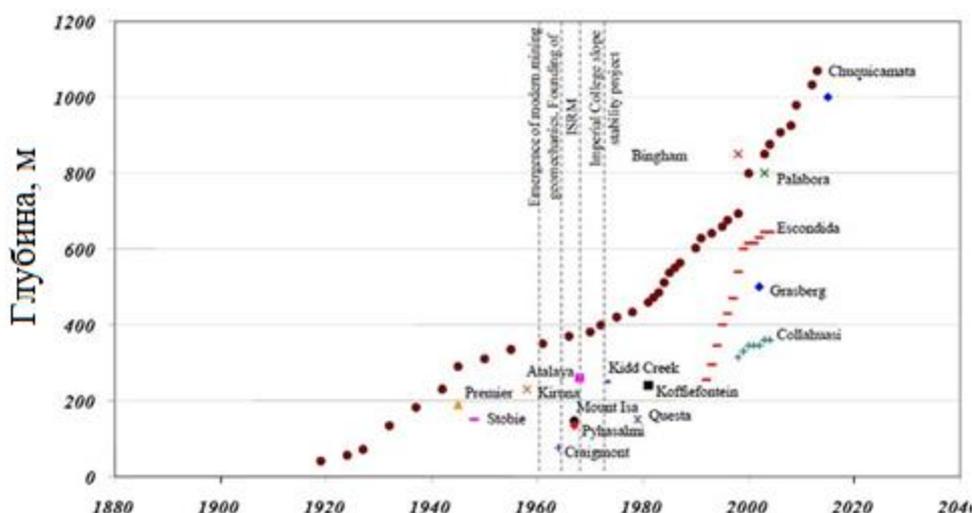


Рисунок 1.1 – Изменение глубины карьеров во времени

Для обоснования предельных параметров бортов и уступов глубоких карьеров необходимо проводить комплекс исследований наиболее значимых горно-геологических и горнотехнических факторов (Рисунок 1.2), которые включают в себя:

- изучение ФМС вмещающих пород;
- структурно-тектонические исследования;
- гидрогеологические исследования;
- численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива пород методом конечных элементов в объемной постановке.

В практике ведения открытых горных работ все факторы, влияющие на устойчивость бортов карьеров, можно разделить на четыре группы (Рисунок 2): инженерно-геологические, гидрогеологические, физико-географические, горнотехнические [18, 40 - 44].

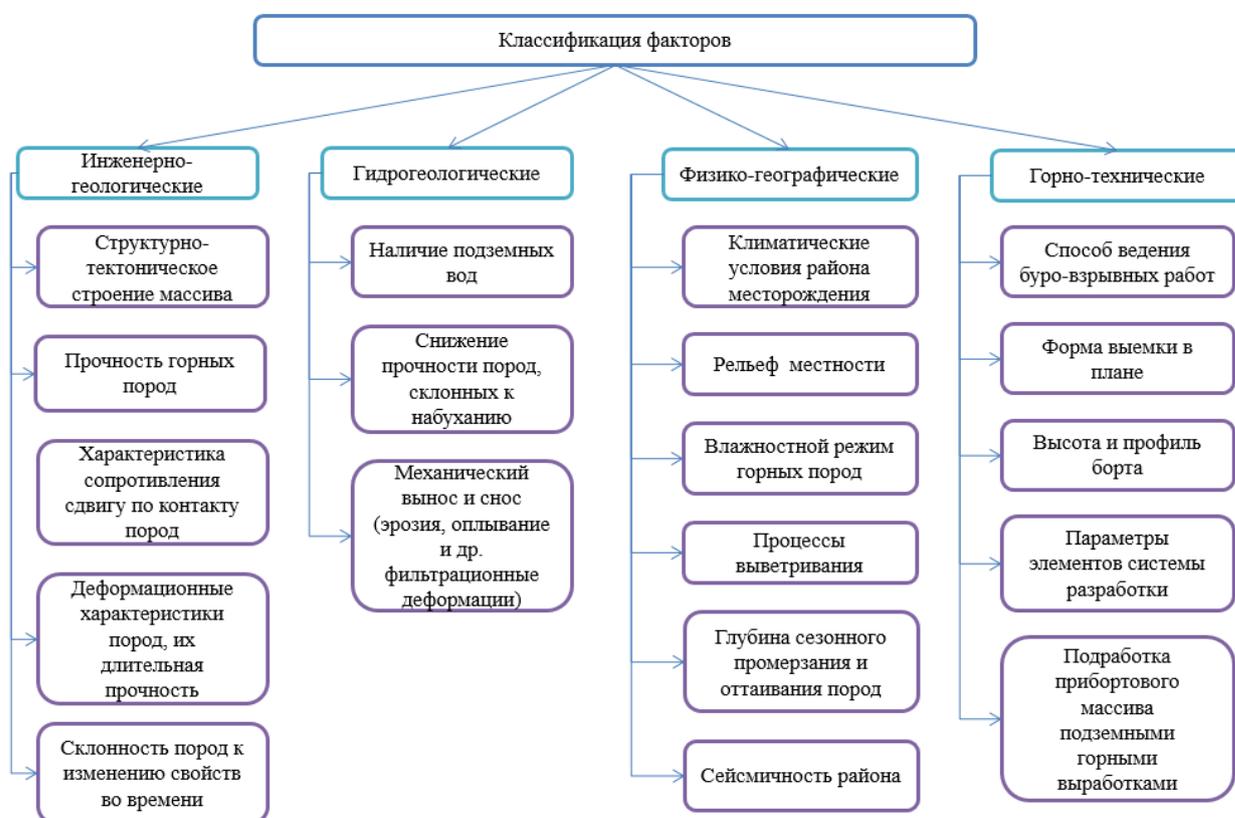


Рисунок 1.2 – Классификация факторов, влияющих на устойчивость уступов и бортов карьеров

Прогнозирование деформационных процессов возможно на основании комплексного подхода, включающего изучение структурно-тектонического строения и прочностных свойств массива, инструментальные наблюдения за деформированием различных участков прибортового массива, оценку уровня и направления действия тектонических сил, а также проведение геомеханических расчетов устойчивости [18, 45 - 47].

Производство горных работ в карьере в соответствии с проектной документацией не всегда гарантирует отсутствие деформаций бортов, локальных участков бортов и уступов, особенно при формировании предельного контура карьера. Причины возникающих нарушений устойчивости прибортового массива различны в зависимости от геологических, инженерно-геологических, гидрогеологических условий и параметров борта на конкретном участке карьерного поля [18, 45, 46]. Поэтому каждое месторождение полезных ископаемых с точки зрения геомеханики является уникальным и требует индивидуального подхода к определению влияющих на устойчивость факторов и оценки степени их влияния.

При открытой разработке месторождений имеют место разнообразные деформации бортов карьеров и отвалов в виде оползней, обрушений и обвалов, осыпей и оплывин, просадок [37, 48]. Как в своей работе отмечал Фисенко Г.Л.: «Четкой границы между отдельными видами деформаций не существует. Осыпи и обрушения различаются по относительной величине деформирующихся массивов, а обрушения и оползни – по скорости деформации, зависящей от наклона поверхности скольжения и от характера напряженного состояния пород по поверхности скольжения» [43].

В таблице 1.2 представлена классификация деформаций бортов карьера и условия их возникновения [43].

Таблица 1.2 – Классификация деформаций бортов карьера

Вид деформации	Характеристика	Причина	Условие возникновения
Осыпь	Отрыв отдельных частиц, кусков породы и скатывание их к подошве уступа	Выветривание Влияние взрывов	Угол откоса больше угла естественного откоса породы
Обрушение	Отрыв и быстрое смещение больших объемов породных масс, слагающих откос, активная стадия происходит практически мгновенно	Завышение угла откоса или высоты борта Наличие дизъюнктивных нарушений и трещин	Падение слоев, дизъюнктивных нарушений и трещин в сторону выемки
Оползень	Отрыв и медленное перемещение породных масс по поверхности скольжения под влиянием силы тяжести	Наличие в толще породы пластичных прослоек и слабых контактов Обводнение пород	При углах наклона положе 25-35°
Просадки	Вертикальное опускание прибортовых участков рыхлых пород без образования поверхности скольжения	Увлажнение высокопористых отложений Уплотнение отвалов или засыпанных карьеров Подработка подземным способом	
Оплывины	Перемещение потока насыщенных водой рыхлых породных масс	Отсутствие водоотводящих устройств Интенсивное выпадение атмосферных осадков	

По результатам исследования Гальперина А.М. две трети карьеров подвергаются деформационным процессам. При этом наблюдается тенденция возрастания случаев потери устойчивости откосов с увеличением глубины отработки. При ведении горных работ до глубины 100 м деформациям подвержена половина исследуемых карьеров, с переходом на большие глубины доля карьеров возрастает до 80 %. Выполненный в ВИОГЕМ анализ показал, что 75 % деформаций возникают в песчано-глинистых отложениях и только 25 % приходится на откосы, сложенные скальными и полускальными трещиноватыми породами [49]. В таблице 1.3 представлены результаты анализа видов деформаций и причины их возникновения на действующих карьерах мира [48 - 50].

Как отмечают в своих работах Умаров Ф.Я. и Рыбин В.В. с увеличением глубины действующих и проектируемых карьеров вопросы обеспечения устойчивости бортов и уступов превращаются в проблемы большой экономической значимости [2, 51].

Влияние различных факторов на устойчивость бортов и уступов карьеров рассматривалась во многих работах зарубежных и отечественных авторов. Неоценимый вклад в развитие геомеханики открытых горных работ внести такие ученые, как: Мельников Н.В., Ржевский В.В., Трубецкой К.Н., Фисенко Г.Л., Шпаков П.С., Попов В.Н., Гальперин А.М.

При разработке месторождений открытым способом актуальной задачей является обеспечение безопасности и эффективности горных работ. Решение этой задачи возможно на основе геомеханических исследований массива горных пород и математического моделирования.

Вопросами обеспечения устойчивости бортов и откосов карьера ученые занимаются не одно десятилетие. За это время сформировалось несколько основных школ с различными и смежными направлениями в решении вопросов устойчивости массивов горных пород.

Среди ученых, занимающихся устойчивостью при открытой добыче выделяют Фисенко Г.Л., Куваева Н.Н., Поклада Г.Г., Мочалова А.М., Зотева В.Г., Цимбаревича П.М., Галустьяна Э.Л., Попова В.Н., Гальперина А.М.

Несмотря на большое количество исследований проблема обеспечения устойчивости бортов карьера актуальна по сей день. Причиной невозможности определения единого стандартного подхода к решению этого вопроса заключается в совокупности различной степени влияния многих факторов, которые определяют индивидуальные особенности каждого месторождения. К таким факторам относят горно-геологические и гидрогеологические условия, изменение физико-механических свойств в пределах карьера, влияния взрывов и землетрясений, напряженно-деформированное состояние и т.д.

Выходом из сложившейся ситуации является разработка методик и рекомендаций, включающих в себя сбор необходимых исходных данных, интерпретацию полученных результатов исследования, математическое моделирование устойчивости.

Таблица 1.3 – Причины и виды деформаций действующих карьеров

Месторождение	Расположение	Добыча	Параметры карьера	Деформации	Причины
Коунрадское месторождение	Центральный Казахстан	медь, молибден, серебро	2,0*1,7 глубина 570 м	в период с 1974 по 2002 гг. зафиксировано более 50 деформаций отдельных уступов в виде обрушений	Трещиноватость массива, Воздействие БВР Длительный срок стояния в предельном контуре
Саякское меднорудное месторождение Саяк-1 Тастау	Центральный Казахстан	медь	1,3*0,78 Глубина 265 м 1,0*4,0 Глубина 150	Выполаживание откосов	На отдельных участках выделяют перемятые мелкообломочные породы
Акжал	Казахстан	Свинец, цинк	Глубина 240 м	Присутствуют	Сильно трещиноватые породы
Михайловский ГОК 1. Михайловский карьер 2. Лебединский и Стойленский карьеры	Россия, Курская область		1.	1. Оплывины 2. Оползневые деформации, обрушения, суффозия и оплывины	1. Гидрогеологические условия 2. угол наклона уступа, интенсивность трещиноватости и ориентировка трещин относительно поверхности уступа, способы заоткоски уступов, технология буровзрывных работ, климатические условия района, вещественный состав горных пород.
Никопольский марганцевый бассейн	Украина			Оползни вскрышных уступов	Обводненность
Карьеры «Фортуна» и «Фрехен»	Германия	Бурый уголь	Глубина более 200 м	Оползни, в песчано-глинистых породах встречаются разрывные нарушения	Фактор длительной прочности глинистых пород и их контактов с другими литологическими разностями.

1.1 Краткая инженерно-геологическая и гидрогеологическая информация об объекте исследования

Сарбайское железорудное месторождение расположено в северо-западной части Костанайской области Республики Казахстан, в 9 км к северу от г. Рудного и в 47 км к юго-западу от областного центра - г. Костаная. Разработка месторождения открытым способом началась в 1960 года [52]. Карьер вскрыт двумя траншеями: юго-восточной до отметки 125 м (глубина 70 м), связывающей карьер с фабрикой и отвалом, и северной траншеей на глубину 15 м, по которой транспортируется только порода в отвал [18]. Нижние горизонты вскрыты железнодорожными тоннелями по тупиковой схеме: I-я очередь в отметках 0 м ÷ минус 80 м; II-я очередь в отметках минус 40 м ÷ минус 120 м [8].

Карьер достиг конечных контуров по северному и северо-западному бортам от поверхности до горизонта минус 380 м и минус 280 м; по юго-западному – до горизонта минус 200 м; по южному борту в зоне углубки – до горизонта минус 260 м. Отметка дна карьера находится на горизонте минус 390 м (Таблица 1.4). Абсолютные отметки дневной поверхности понижаются в юго-восточном направлении в среднем от 200 м до 189 м [8].

Главной особенностью месторождения является его двухъярусное строение. Палеозойские (главным образом, каменноугольные) отложения образуют складчатый фундамент, а перекрывающие их с резким угловым несогласием горизонтально залегающие рыхлые мезозойско-кайнозойские отложения - платформенный чехол мощностью 150 ÷ 230 м. [8, 18].

Таблица 1.4 – Параметры Сарбайского карьера

Параметр	Существующий параметр	Проектный параметр с учетом углубки
Отметка дна карьера, м	Минус 390 м	Минус 500 м
Ширина, м	2400 м	2400 м
Длина, м	3450 м	3450 м
Высота уступа:		
Рыхлые породы	10-13 м	10-13
Скальные породы	40 м	40 м
Угол наклона уступа:		
Рыхлые породы	25-50°	25-50
Скальные породы	55°-65°	55-70°

Месторождение сложено мощной толщей рыхлых песчано-глинистых отложений мезокайнозойского возраста, залегающих на скальных породах, представленных разнообразными эффузивно-осадочными, интрузивными, метасоматическими породами и рудными телами (Рисунок 1.3).

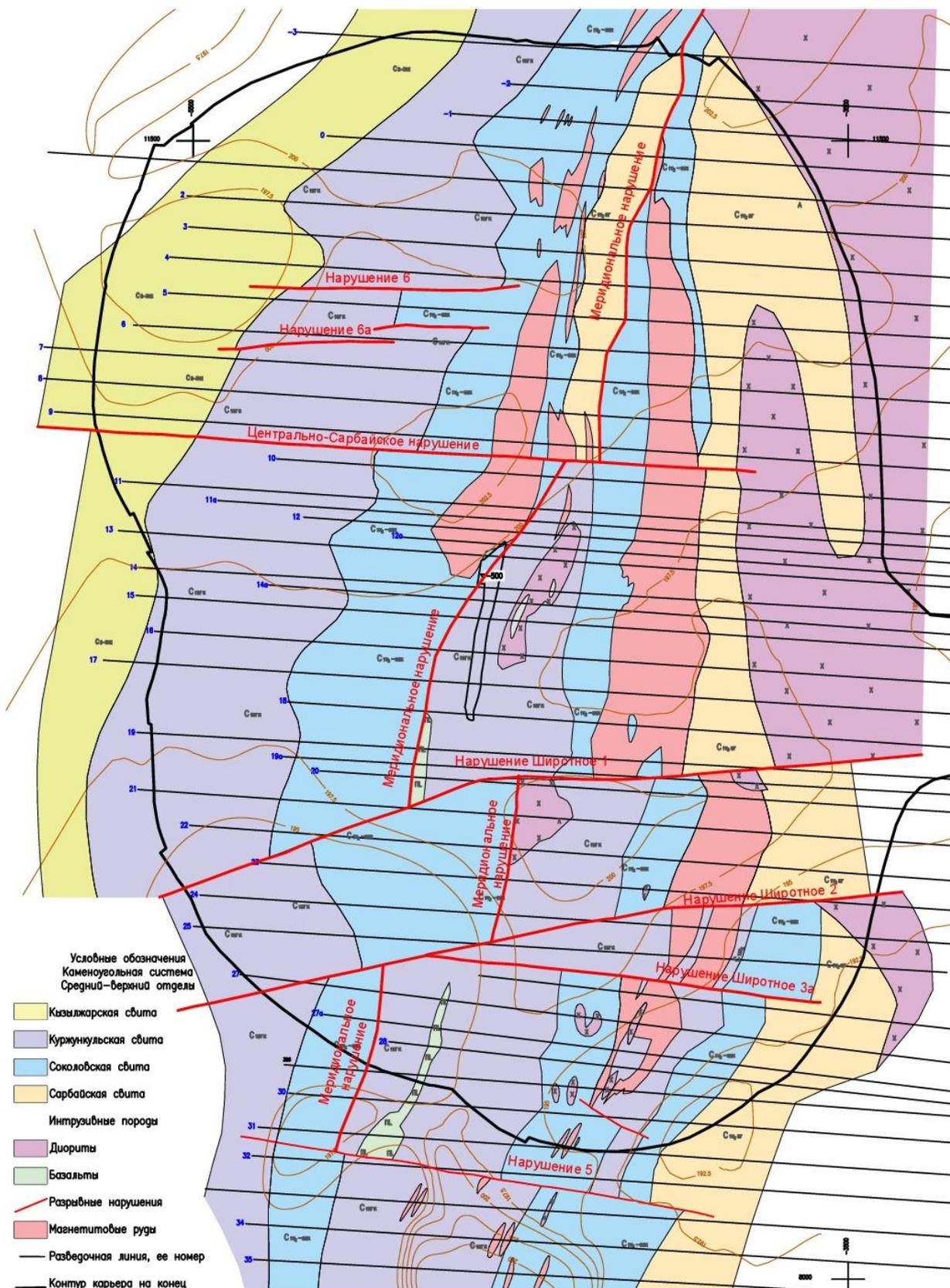


Рисунок 1.3 – Геологическая карта Сарбайского месторождения

На месторождении выделяют четыре рудные залежи:

1. **Западное рудное тело** прослеживается с севера на юг на 2150 м, в центральной части имеет меридиональное простирание, на севере и юге - северо-восточное. Залегание согласно с вмещающими породами, углы падения составляют 40 - 50°, редко до 60 - 65°.

2. **Восточное рудное тело** прослеживается в субмеридиональном направлении с севера на юг на протяжении 1800 м. Максимальную (до 185 м) мощность рудное тело имеет в южной оконечности, максимальная протяженность 1800 м. Рудное тело залегает согласно с вмещающими породами. На верхних горизонтах углы падения составляют 40 - 50°, иногда до 60 - 65°, северной части падение более крутое до 75 - 80°, в южной части углы падения возрастают на самых больших глубинах до 60 - 80°. Восточное рудное тело сильно тектонически нарушено. Непрерывность оруденения значительно нарушается секущими телами диоритов и диорит-порфиритов.

3. **Юго-Восточное рудное тело (ЮВРТ)** ограничено на севере и юге разрывными нарушениями широтными I и II. ЮВРТ разделено, прорывающим его крупным дайкообразным телом диоритов, на верхнюю и нижнюю части, протяженность по падению безрудного интервала около 300-320 м. Протяженность по падению верхней части составляет соответственно 500 и 300 м при мощности 140-150 м. Протяженность по падению нижней части рудного тела составляет около 600-500 м.

4. **Южное рудное тело** располагается в южной части месторождения в виде линейного штокверка прожилково-вкрапленных магнетитовых руд. Штокверк имеет северо-восточное простирание с протяженностью более 1650 м. Линейный штокверк наиболее часто имеет в разрезе неправильно пластообразную форму с частыми резкими разрывами и пережимами. Нередко отмечается несколько неправильно пластообразных и линзовидных рудных тел. Максимальная мощность рудной залежи в целом достигает 80-85 м.

Общими чертами западной, восточной и юго-восточной рудных залежей являются: пластообразная форма, залегание, согласно с вмещающими породами, западное падение, наличие зональности, проявляющейся в убывании интенсивности оруденения от висячего бока к лежащему.

Важнейшей структурной особенностью месторождения является его блоковая структура, обусловленная наличием многочисленных разрывных нарушений, среди которых выделены три системы.

К первой системе относится наиболее крупное Меридиональное разрывное нарушение (Рисунок 1.3). Оно прослеживается через все месторождение и уходит далеко за его пределы. Простирание его субмеридиональное (от 340° до 250°, падение западное под углом 50-60°, на глубине угол падения возрастет до 70°. Нарушение представляет собой правый взбросо-сдвиг, оно делит участок месторождения на Западный и Восточный блоки, при этом Западный блок надвинут на Восточный. Амплитуда вертикального перемещения около 1100-1350 м, горизонтального 750 м.

Углы падения отложений Сарбайской, Соколовской и Куржункульской свит в западном блоке оставляют 40° - 50° , редко до 60° - 65° . Аналогичное залегание пород характерно и для верхних горизонтов большей части Восточного блока. Для самой северной части Восточного блока характерны более крутые (до 70° - 85°) углы залегания пород. В самой южной части Восточного блока (между разведочными линиями 16 и 23) намечается сильное возрастание углов падения пород на больших глубинах (до 60° - 80° против 40° - 50° на верхних горизонтах тех же разведочных линий).

Ко второй системе относятся крупноамплитудные близширотные разрывные нарушения. Они совершенно определенно моложе Меридионального нарушения, поскольку многократно и весьма значительно смещают его. Субширотные нарушения разделяют участок месторождения на серию вытянутых в широтном направлении блоков.

Нарушение Широтное 1 представляет собой левый взбросо-сдвиг, разделяющий Восточное и Юго-Восточное рудные тела. Амплитуда горизонтальных перемещений по нему на поверхности палеозойского фундамента меняются в пределах 150-350 м. В районе разведочной линии 19а устанавливается его крутое (до 80°) северное падение с амплитудой вертикального перемещения до 75 м.

Нарушение Широтное 2 является границей собственно Сарбайского и Южно-Сарбайского месторождений. Оно обрывает с юга Юго-восточное рудное тело, южное продолжение которого не установлено. По характеру перемещений это крутопадающий на север взброс, амплитуда вертикального перемещения по нему в западной части месторождения (разведочная линия 25) составляет 350 м. Вполне вероятно, что продолжение ЮВРТ южнее нарушения Широтное 2 находится на большой глубине и имеющимися неглубокими буровыми скважинами не вскрыто.

Нарушение 3а, оперяющее нарушение Широтное 2, по характеру горизонтальных смещений представляет собой ярко выраженный правый сдвиг с горизонтальной амплитудой на поверхности палеозойского фундамента около 500 м.

Расположенное южнее нарушение 5 представляет собой, вероятно, крутопадающий на север вертикальный сброс с очень небольшой амплитудой вертикальных перемещений.

Складчатая структура осложнена значительным количеством разрывных нарушений, среди которых наиболее крупными являются Северное, Центральное и Южное. Кроме названных наиболее крупных разрывных нарушений на месторождении имеется большое количество более мелких разрывов, нередко смещающих рудные тела. Все нарушения сопровождаются зонами дробления.

Сарбайское железорудное месторождение относится к слоистым месторождениям с четко выраженными и закономерно расположенными поверхностями ослабления большой протяженности в виде напластования, контактов слоев или сланцеватости [18].

Гидрогеологические условия обработки месторождения весьма сложные. Рудные тела залегают в водоносном комплексе скальных пород палеозоя и перекрыты мощной толщей песчано-глинистых отложений мезокайнозоя, содержащих четыре водоносных горизонта (комплекса):

- водоносный горизонт четвертичных и неогеновых отложений;
- водоносный горизонт олигоценых отложений;
- водоносный комплекс мел-палеогеновых отложений;
- палеозойский водоносный комплекс.

Горизонты распространены практически повсеместно. Долевое участие среднегодового притока в карьер с учетом притоков в дренажные шахты составляют:

- неоген-эоценовый водоносный горизонт - 10,6 %;
- меловой водоносный горизонт - 63,1 %;
- палеозойский горизонт - 26,3%.

Осушение четвертичного и олигоценого водоносных горизонтов осуществляется горизонтальным трубчатым дренажом горизонтов (на отметках 195 м, 185 м, 174 м), мелового - дренажом и горизонтальными скважинами в карьере (на отметках 120 -118 м, 80-95 м), сквозными фильтрами и восстающими скважинами по контуру подземного дренажного комплекса.

Региональным водоупором в пределах месторождения являются чеганские глины, остальные водоупоры относительны и обуславливают наличие гидравлической связи между горизонтами. Питание водоносных горизонтов осуществляется за счет атмосферных осадков и перетекания из вышележащих горизонтов.

Водопонизительная система карьера состоит из подземного дренажного комплекса и внутрикарьерных дренажных устройств. Характеристика водоносных горизонтов и комплексов приведена в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Характеристика водоносных горизонтов

Наименование водоносных горизонтов и комплексов	Литологический состав пород	Абс. отм. статич. уровня	Коэффициент фильтрации, м/сут.	Мощность вод. гор-та, м	Хим. состав подземных вод
1	2	3	4	5	6
Четвертично-неогеновый	Пески, супеси, водоупором являются пестроцветные неогеновые глины	187-198	0,02-2,0 Средний 0,5	0,5-6,0	Гидрокарбонатные натриевый, минерализация 0,3 - 0,8 г/л
Олигоценый	Разнозернистые пески, водоупор- чеганские глины	184-190	1,5 - 5,0, Средний 4,0	1,5-6,0	Хлоридно-гидрокарбонат-ные, натриевые, минерализация 0,3 - 0,8 г/л
Мел-палеогеновый	Песчаники, пески, опоки, нижний водоупор- глины коры выветривания или лигнитовые глины	150-155	Пески-10, Опоки-0,3-0,7	Пески – 15-70 м Опоки – 5,0-10,0	

Продолжение таблицы 1.5

Наименование водоносных горизонтов и комплексов	Литологический состав пород	Абс. отм. статич. уровня	Коэффициент фильтрации, м/сут.	Мощность вод. гор-та, м	Хим. состав подземных вод
1	2	3	4	5	6
Палеозойский	Осадочно-метаморфические, эффузивно-интрузивные породы, известняки, условная отметка относительного водоупора – 260 м	150-155	До гор-та (-35) м – 0,3, в интервале(-35) м-(-135)м – 0,016, до гор-та (-260)м – 0,0005	≈340, наиболее водо-обильна верхняя зона 40-50	Сульфатно-хлоридные-натриевые, минерализация 8,0-15,0 г/л

Внутрикарьерные дренажные устройства включают: горизонтальный трубчатый дренаж, дренажные канавы, горизонтальные скважины, два зумпфа на дне карьера с передвижными насосными станциями, напорные трубопроводы от зумпфов и насосных станций, ливнесточную сеть.

Рабочим проектом по реконструкции системы осушения основным и единственно возможным дренажным сооружением для понижения уровней в меловом водоносном горизонте признаны горизонтальные водопонизительные скважины. По состоянию на 01.01.2015 г. подземный дренажный комплекс Сарбайского карьера включает шахтный ствол "Южный-Сарбайский", подземные дренажные выработки на горизонте +30 м, протяженностью 7,8 км с восстающими скважинами и сквозными фильтрами. Шахтный ствол «Северный-Сарбайский» затоплен, оборудование демонтировано. Затоплены подземные дренажные выработки по северному борту карьера, относящиеся к стволу «Северный-Сарбайский», вода самотеком перетекает к водосборникам ствола «Южный-Сарбайский».

На шахтном стволе "Южная-Сарбайская" находятся 2 насосные станции (на горизонте +30м и +10м). Насосной станцией горизонта 30 м производится откачка дренажных вод из системы осушения Сарбайского карьера. Насосной станцией горизонта 10 м производится откачка воды из системы осушения Южно-Сарбайского карьера. Приток воды к водопонизительной системе Сарбайского карьера (Таблица 1.6).

Поступающие в подземную дренажную систему подземные воды с прибортовых дренажей и атмосферные воды выдаются на поверхность через существующий водоотливной ствол «Южный Дренажный». Воды, не перехваченные прибортовым дренажом, подземные воды палеозойского комплекса и атмосферные осадки собираются на дне карьера в зумпфы для перекачки в подземную дренажную систему и транспортировки самотеком к водосборникам Южного дренажного ствола.

Подземный дренажный комплекс Сарбайского карьера в настоящий момент не выполняет роль опережающего осушения эоцен-мелового водоносного комплекса и верхней наиболее обводненной части палеозойского фундамента и недостаточно обеспечивает надежный перехват подземных вод, что приводит к серьезным осложнениям при ведении горных работ.

Таблица 1.6 – Приток воды к водопонизительной системе Сарбайского карьера

Месяц	Карьерные воды		Шахтные воды		Всего приток к зумпфам		Зумпф №1		Зумпф №2	
	м3/час	т.м3	м3/час	т.м3	м3/ч	м3/мес	м3/ч	м3/мес	м3/ч	м3/мес
I	821,4	611122	185	137640	78,3	58260	37,3	27750	41,0	30510
II	796,6	554400	185	124320	156,6	108960	0,0	0	156,6	108960
III	918,5	683364	185	137640	226,0	168150	8,9	6630	217,1	161520
IV	948,3	682776	185	133200	154,7	111390	4,3	3060	150,5	108330
V	980,1	729194	185	137640	166,7	124050	0,0	0	166,7	124050
VI	869,9	626328	185	133200	158,4	114060	0,0	0	158,4	114060
VII	897,6	667814	185	137640	204,0	151800	0,0	0	204,0	151800
VIII	854,7	635896	185	137640	139,9	104085	0,0	0	139,9	104085
IX	822,3	592056	185	133200	119,7	86180	0,0	0	119,7	86180
X	810,0	602640	185	137640	134,7	100200	0,0	0	134,7	100200
XI	855,5	615960	185	133200	126,6	91170	0,0	0	126,6	91170
XII	882,3	656431	185	137640	189,2	140760	0,0	0	189,2	140760
сред.	871,4	650714	185	135050	154,6	113255	4	3120	150	110135
за год		7657981		1620600		1359065		37440		1321625

1.2 Основные факторы, влияющие на деформационные процессы Сарбайского карьера

Для определения участков, подверженных деформациям и выявления причин их возникновения, в диссертационной работе используются результаты ранее проводимых наблюдений за бортами и уступами карьера, выполненные маркшейдерской и геомеханической службами АО «ССГПО», а также результаты мониторинга, выполненные Карагандинским государственным техническим университетом (Таблица 1.7) [54 - 57].

По результатам георадарного зондирования, GPS мониторинга, анализа геологического, тектонического строения месторождения и гидрогеологических условий выявлено, что:

1. Горнотехнические условия в пределах северо-западного борта в породах переходной зоны покровных и скальных пород Сарбайского карьера указывают на то, что катастрофические обрушения бортов карьера, захватывающие сразу несколько уступов, с перемещением обвальной массы на значительные расстояния вполне вероятны.

2. Обрушения частей уступов с перемещением обвалившихся и оползших пород на один, реже два горизонта, возможны как на северо-западном, так и на юго-западном борте, и в ряде случаев могут быть предсказуемы в местах, отмеченных как опасные зоны. Наиболее опасными горизонтами в вертикальном разрезе являются горизонты, расположенные в зоне границы меловых песков и коры выветривания палеозойских пород.

3. На северном борту широко развиты оползневые процессы в мезокайнозойских породах в следствии обводненности массива.

4. На северо-западном участке карьера в коре выветривания происходили деформационные процессы в виде обрушения уступов, сложенных глинами коры выветривания.

5. На западном борту карьера прослежено многочисленными скважинами от разведочной линии 19 меридиональное нарушение, которое представлено зоной тектонических раздробленных пород (нормальная мощность составляет 30 - 50 м) и внутри зоны хлоритизированные раздробленные породы с зеркалами скольжения чередуются со слабо нарушенными породами (Рисунок 1.4).

6. На восточном участке отвала наблюдается сезонное образование обводненных участков в основании первого яруса.



Рисунок 1.4 - Зона перемятых пород откосов Западного борта

Таблица 1.7 - Основные виды нарушений устойчивости Сарбайского карьера

<i>Карьер Сарбайский</i>	Осыпи	Обрушения	Оползни	Оплывины
<i>Участки</i>	1. Северный борт, базисами смещения обычно являются поверхности берм и дно дренажных траншей в основании откосов.	1. Западный борт - 30 мая 2007 г, обрушение уступов -180/-200/-220 м	1. Западный борт 2. Восточный борт 3. Восточный борт 4. Южный борт	1. Северный борт
<i>Параметр</i>	1. Оползни относятся к типу фронтальных – длина оползней 5-10 м, ширина – 20-40 м. Мощность захваченных оползнями пород зависит от высоты откоса и может достигать 5-8 м.	1. 30 мая 2007 г, обрушение уступов - 180/-200/-220 м	1. По механизму смещения оползни относятся к типу консистентных. В головной части оползней хорошо выражена стенка срыва 2. Ширина оползней по фронту до 30 м, длина 5-7 м, величина вертикального смещения (по стенке срыва) до двух метров, неоползшая часть пронизана закольными трещинами. 3. Оползень №1 сходен с оползнем №2. Размеры оползня №2 в плане 30x70 м2, мощность тела оползня до 1,5-2,5 м. Вся оползневая масса сместилась к основанию откоса. 4. В глинистой зоне коры выветривания на откосе с абсолютными отметками 82-107 м наблюдаются два оползня.	1. При длительном стоянии откоса обвално-осыпные накопления могут занимать половину его высоты.
<i>Причины развития проявленных факторов</i>	1. Геологическое строение - олигоценовые пески и элювий чеганских глин	1. Геологическое строение - в смещении участвуют глины коры выветривания вишнево-красные, перемятые, в отдельных участках сохранившие текстуру материнских пород.	1. Под влиянием постоянного увлажнения подземными водами верхнемелового горизонта глины, ранее твердые, перешли в текучепластичное состояние. Вместе с глинами на их поверхности смещаются вниз по склону, разрушаясь по мере удаления от стенки срыва, блоки туронских песков и нижнемелового базального конгломерата. 2. В смещение вовлечены верхи глинистой остаточной коры выветривания, а также перекрывающие ее горизонты переотложенной коры выветривания. 3. Восточный борт карьера сложен породами, подверженными интенсивной трещиноватости. На образование оползней влияет: неравномерная, динамическая нагрузка от груженых вагонеток и от взрывов производимых в карьере, атмосферные осадки. 4. Откосы уступов Южного борта карьера сложены породами, подверженными интенсивной трещиноватости и имеет место сосредоточенные выходы воды, приуроченные к трещинам.	1. При этом щебенка распадается на мелкую листоватую дресву, которая при насыщении водой переходит в текучепластичную массу, образуя оплывины. Горизонтальный дренаж не всюду исправлен, отдельные колодцы разрушены или засыпаны песком, что вызывает увлажнение откосов бортов и приводит к образованиям оплывин и промоин.

На рисунке 1.5 представлена обобщенное районирование Сарбайского карьера по основным влияющим на устойчивость факторам, основанное на анализе предыдущих исследований.

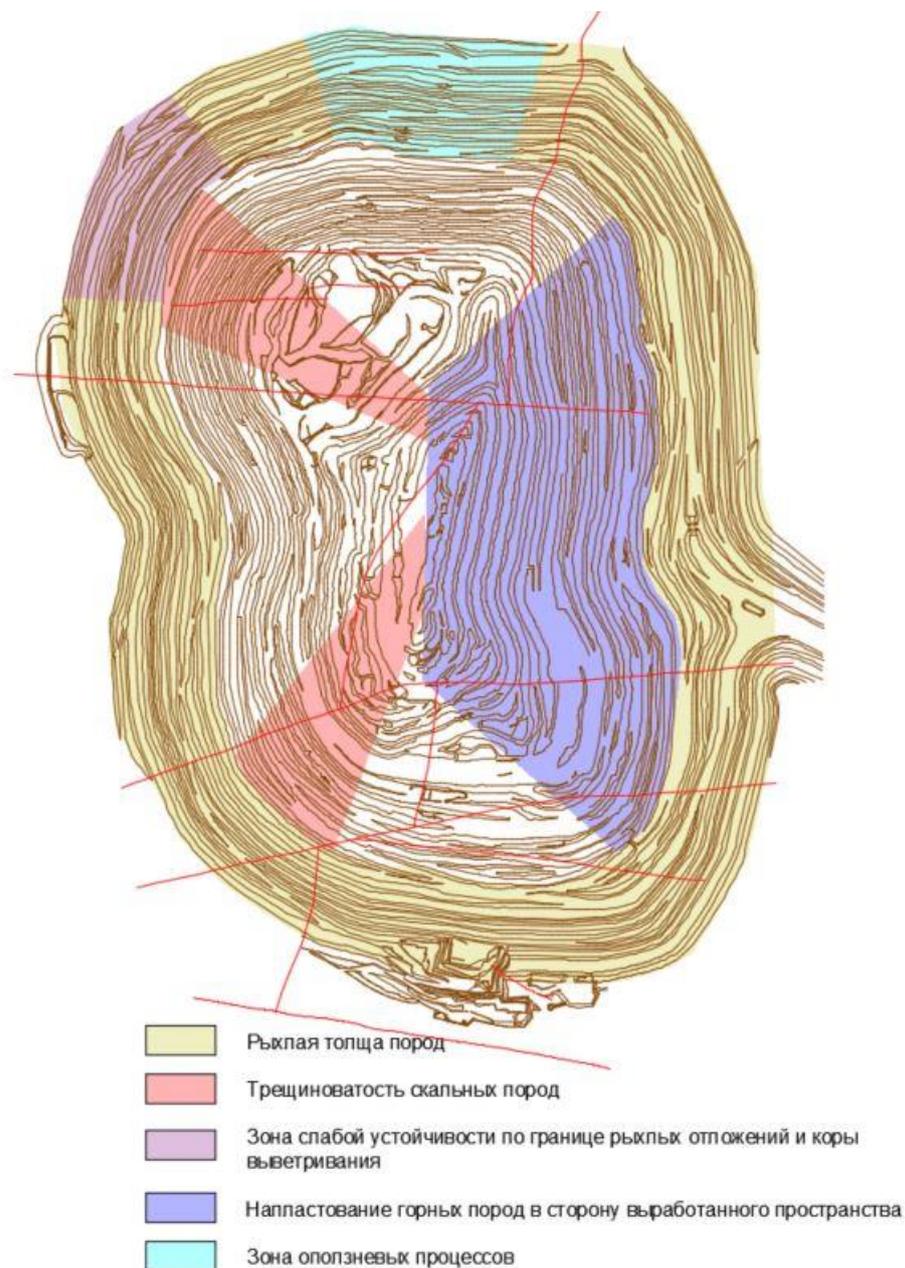


Рисунок 1.5 – План карьера с определением основных влияющих на устойчивость факторов

Геомеханическое состояние Сарбайского карьера характеризуется:
- прочностными свойствами пород. Прочностные свойства вмещающих пород во многом определяют характер процесса сдвижения и численные значения угловых параметров. Вмещающие породы на Сарбайском месторождении имеют высокую крепость. Коэффициент крепости по Протодьяконову 14-17 и более [58].

- тектоническими нарушениями. Наиболее крупные тектонические нарушения выявлены на Юго-Восточном участке, также к тектоническим нарушениям можно отнести дайки, пересекающие рудные тела по простиранию на локальные участки. Крупные тектонические нарушения вызывают сползания, если углы их падения превосходят углы трения пород и будут способствовать проявлению более крутых углов на промежуточных этапах разработки.

- обводненностью рыхлой толщи, эксплуатация карьера сопровождается постоянными нарушениями в виде оползней, промоин, суффозионных процессов с выносом песка и образованием воронок.

- большой мощностью рыхлых слабых пород. Восточный борт карьера сложен рыхлыми отложениями, представленными породами (глины, глауконит, песчаники) мощностью до 100-120 м. Происходит оплывание и обрушение откосов, сложенных меловыми песками, неогеновыми глинами и четвертичными суглинками.

- наличием поверхностей ослабления (слоистость в рыхлых породах, трещиноватость, сланцеватость в скальных породах).

- склонностью пород к выветриванию. Коры выветривания палеозойских пород распространены на месторождении не повсеместно, их мощности меняются от одного до десятков метров, резко возрастают (до 150 м) в зонах разрывных нарушений. Кора выветривания обычно имеет глинистый состав.

Выводы по разделу 1

В целом инженерно-геологические условия отработки Сарбайского карьера сложные, что обусловлено прочностными свойствами пород, структурой массива (большая мощность рыхлых пород до 140 м, наличие поверхностей ослабления: слоистость в рыхлых породах, трещиноватость, сланцеватость в скальных породах), склонностью пород к выветриванию, гидрологическими факторами - обводненностью скальных и рыхлых пород [53, 59].

На устойчивость бортов и уступов Сарбайского карьера оказывают влияние следующие факторы - наличие поверхностей ослабления (трещиноватость, слоистость в рыхлых породах, сланцеватость в скальных породах), обводненность, низкие прочностные свойства горных пород. Основным фактором является интенсивная трещиноватость отдельных участков [53].

Для современного развития Сарбайского месторождения характерно значительное увеличение глубины карьера (до абсолютной отметки дна минус 500 м) и переход к разработке глубоко залегающих руд. При этом встает вопрос об обеспечении устойчивости борта карьера и выборе рациональных с точки зрения геомеханики параметров вновь проектируемых уступов на глубоких горизонтах.

Основным условием, необходимым для пересмотра первоначального проекта отработки месторождений является информация о геомеханическом состоянии массива горных пород, в которой наряду с параметрами напряженно-деформированного состояния и геолого-структурных особенностей месторождения, являются и знания о физико-механических свойствах вмещающих руд и пород [60 – 62, 8].

Проведенный анализ состояния геомеханических проблем при отработке глубоких карьеров показывает, что проблема устойчивости бортов и уступов карьеров является актуальной. В то же время существующие методики требуют внесения изменений. При обосновании устойчивых параметров глубоких карьеров необходимо учитывать влияние физико-механических свойств пород, гидрогеологические условия, структурные особенности месторождения, влияние напряженно-деформированного состояния.

Цель исследования: Обеспечение устойчивости бортов карьера при его углубке на основе геомеханической модели месторождения, включающей исходные горно-геологические данные, данные, полученные при проведении лабораторных и натурных исследований, результаты математического моделирования и районирования.

Постановка задач диссертационной работы. Применительно к условиям Сарбайского месторождения выполнение работ по обеспечению устойчивого состояния бортов и уступов карьера требует решения следующих задач:

- определить факторы, влияющие на устойчивость бортов карьера при увеличении глубины его отработки;
- провести лабораторные и натурные исследования массива горных пород, обработку и интерпретацию полученных данных;
- выполнить математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в пределах карьерной выемки;
- определить коэффициенты запаса устойчивости бортов карьера;
- разработать рекомендации по обеспечению геомеханической устойчивости бортов карьера в зависимости от горно-геологических, гидрогеологических, структурных особенностей месторождения;
- представить результаты лабораторных и натурных исследований, математического моделирования и расчетов в виде единой электронной базы данных (геомеханической модели).

2 ПРОВЕДЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

2.1 Методики определения физико-механических свойств горных пород

Для определения основных факторов, влияющих на устойчивость бортов Сарбайского карьера при увеличении глубины отработки было пробурено 5 глубоких вертикальных скважин общим метражом 2195 п. м. (Рисунок 2.1) [8]. Целевым назначением изысканий являлось изучение:

- геолого-структурного строения пород, слагающих борта карьера;
- данных по инженерно-геологической и гидрогеологической обстановке массива;
- данных по трещиноватости в нижней части карьера и законтурного массива в абсолютных отметках от минус 200 до минус 500 м;
- изучения физико-механических свойств пород на глубоких горизонтах;
- изменения прочностных свойств пород законтурного массива с глубиной.

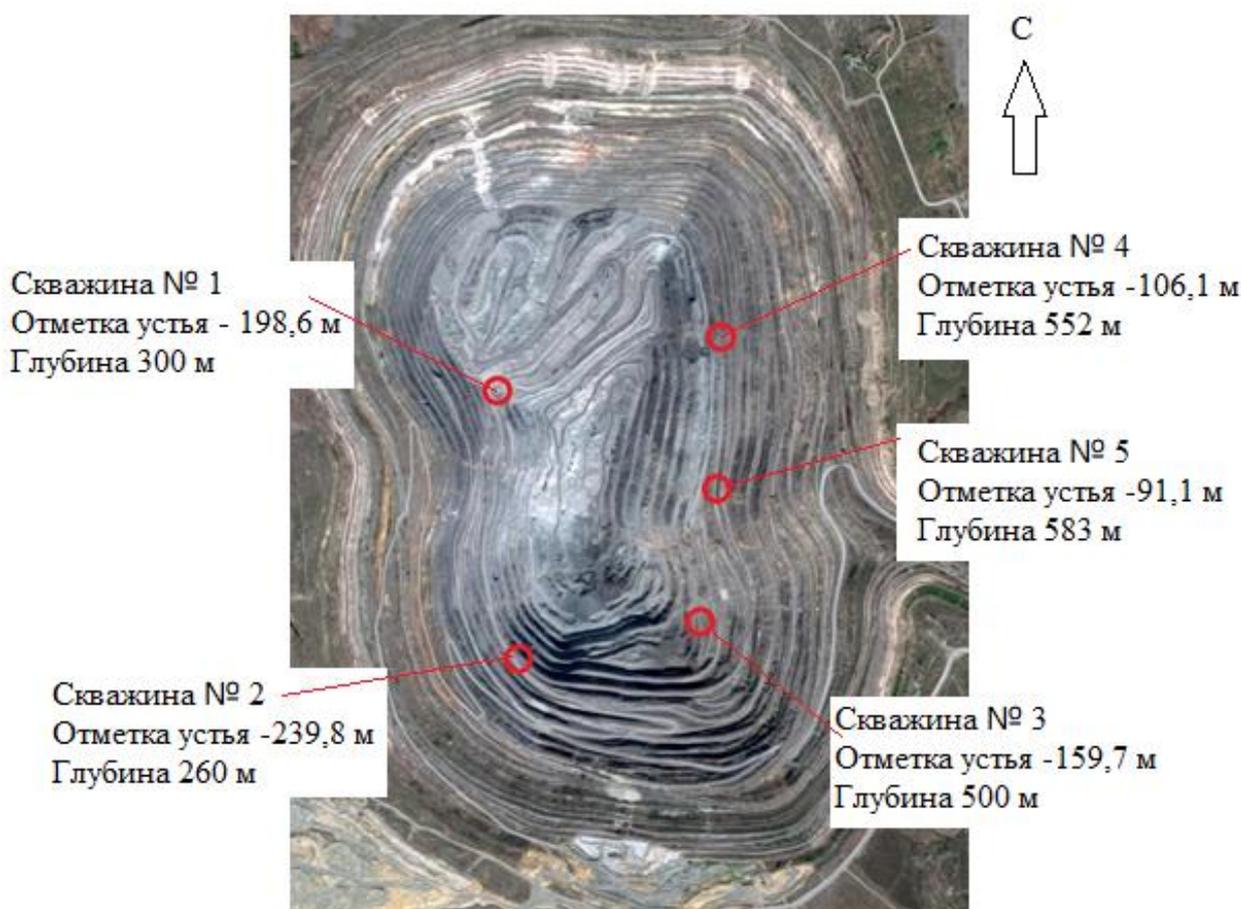


Рисунок 2.1 - Схема расположения геологических скважин

Буровые скважины вскрывающих комплекс палеозойских пород расположены на пяти профилях, ориентированных вкост простирания бортов карьера. Район работ пространственно приурочен к Западному крылу Сарбайской антиклинали, являющейся одной из составных частей Валерьяновской синклинали. В геологическом строении района принимают участие палеозойские образования складчатого фундамента и с разрывом горизонтально залегающие на них мезокайнозойские отложения, преимущественно рыхлые.

Геофизические исследования выполнялись для выделения в разрезе скважин зон неустойчивых, нарушенных пород, уточнения глубин их залегания и мощности; литологического расчленения пород в скважинах; выделения интервалов водопоглощения и водопритоков; определения пространственного положения стволов скважин и для радиоактивной характеристики пород. С целью решения вышеперечисленных задач применялся следующий комплекс геофизических исследований: гамма-гамма каротаж в плотностном варианте (ГГК-П), каротаж сопротивления (КС), гамма-каротаж (ГК), каротаж магнитной восприимчивости, кавернометрия, инклинометрия и расходомерия.

По результатам работ были выделены интервалы трещиноватых, неустойчивых пород. Критериями выделения являлись пониженное электрическое сопротивление, аномальные значения плотностного каротажа (повышенные значения в условных единицах) и кавернозность ствола скважин.

В среднем неустойчивые породы составляют 7,4 процентов от суммарной длины скважин: максимальная по скважине № 2 – 10,7%, минимальная по скважине № 4 – 5,5%, причём наиболее ослабленные породы находятся в верхней части разреза.

До глубины 300 м доля неустойчивых пород, в целом, составляет 9,8 %, максимальная по скважине №3 – 11,5%. Следует отметить, что приведённые цифры по неустойчивости пород максимально возможные, так как выделенные интервалы по КС и ГГК-П не все соответствуют инженерно-геологическим критериям неустойчивости.

В скважинах по данным расходомерии выявлены зоны поглощения и водопритоков. В скважине № 1 на глубине 21,8-22,4 м - полное поглощение, по скважине № 2 в интервалах 35 - 95 м, 170 - 210 м - поглощение, 95 - 100 м - водоприток, 225 - 226 - полное поглощение. В скважине № 3 на глубине 25 - 32м, в скважине № 4 на глубине 290 - 292м и в скважине № 5 в интервале 4 -5 м - полное поглощение.

По результатам гамма-каротажа радиоактивность пород оставляет в среднем 8 - 12 мкр/час. Повышенными значениями отмечаются метасоматически измененные туфы (кислый состав) и мраморизованные известняки 15 - 20 мкр/час, наибольшее значение по скважине № 1 - 37мкр/час. Пониженную радиоактивность имеют туфы основного состава,

магнетитсодержащие туффиты 5 - 6 мкр/час. Радиоактивных аномалий в отчётных скважинах не выявлено.

По результатам проведенных инженерно-геологических изысканий были отобраны образцы из всех литологических разностей каждой из скважин (рисунок 2.2, а). При натурных измерениях были определены такие параметры как плотность (γ), прочность при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$), прочность на растяжение (σ_p), модуль упругости (E), коэффициент Пуассона (μ), сцепление в образце (C), угол внутреннего трения (ϕ), скорость продольных и поперечных волн (V) [54].

В лабораторных условиях образцы керна подготовлены по условиям и требованиям методик исследования пород на прочность при одноосном сжатии [63 – 67]. На рисунке 2.2, б приведено фото с образцами для испытаний после резки.



а) полученный керн

б) образцы пород

Рисунок 2.2 - Подготовка образцов для испытаний

Плотность горных пород (γ) (объемный вес) правильной формы определяется взвешиванием образцов и измерением их линейных размеров [64, 65]

$$\gamma = \frac{P}{SH} \quad (2.1)$$

где P - вес образца в кгс;

S - площадь поперечного сечения образца, м²;

H - высота образца, м.

Прочностные (механические) свойства горных пород изучаются посредством испытаний образцов: на временное сопротивление одноосному сжатию и растяжению, на предел прочности на срез.

Для исследования пород на прочность при растяжении образцы были изготовлены из материалов керна с геометрическими размерами 1,0 x 1,0 см и 1,5 x 1,5 см, а для слабых и, возможно, интенсивно трещиноватых пород, образцы для испытаний подготовлены с размерами 4,5 x 4,5 см. Торцевые поверхности образцов подвергались шлифовке для обеспечения параллельности контактных поверхностей при нагрузочных испытаниях (рисунок 2.2, б) [59, 63 - 67].

Основными деформационными характеристиками исследуемых пород являются модуль упругости E , измеряемый в МПа, динамический коэффициент Пуассона μ . К динамическим можно отнести силы сцепления в образце C (МПа), угол внутреннего трения (φ), измеряемый в градусах и скорости продольных и поперечных волн (V , м/сек).

Определение скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в образцах проводилось с использованием соответствующей ультразвуковой аппаратуры и методики измерений [66, 67].

Измеренные скорости распространения продольных и поперечных упругих волн позволяют с определенной точностью получить такие динамические показатели, как модуль упругости E по формуле (2) и коэффициент Пуассона μ по формуле (3).

$$E_n = V_p \cdot \rho \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (2.2)$$

где V_p - скорость распространения продольных волн, м/сек;
 ρ - плотность породы, кг/м³;

$$\mu = \frac{0,5 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \quad (2.3)$$

где V_s/V_p –соотношение скорости распространения поперечной волны V_s к скорости продольной волны V_p .

Основным параметром измерения при определении упругих свойств горных пород является время акустической задержки Δt фронта первого полупериода импульса принимаемого сигнала, что при постоянной величине образца породы $L = 100$ мм позволяет определить скорость распространения продольной волны (формула 4). Для определения скорости распространения поперечной волны датчик приема сигнала (пьезоэлектрический преобразователь- излучающий или приемный) располагался на образце под углом 90° к продольной оси (формула 4).

$$V_p = L/\Delta t \quad (2.4)$$

$$V_s = L(90^\circ)/\Delta t \quad (2.5)$$

где $L(90^\circ)$ – длина образца (меньшая чем L , с учетом смещения датчиков на поверхности образца).

Определение коэффициента сцепления и угла внутреннего трения производилось по паспорту прочности, который строился на основе результатов испытаний на растяжение и одноосное сжатие (рисунок 2.3) [58].

При обработке результатов расчетов полученную зависимость между значениями сцепления C и прочности на сжатие для прочных и среднепрочных пород можно описать следующим выражением:

$$\sigma_{сж} = 22,2 \ln C - 73,4 \quad (2.6)$$

где $\sigma_{сж}$ – прочность породы при одноосном сжатии, МПа;
 C – сцепление в образце, МПа.

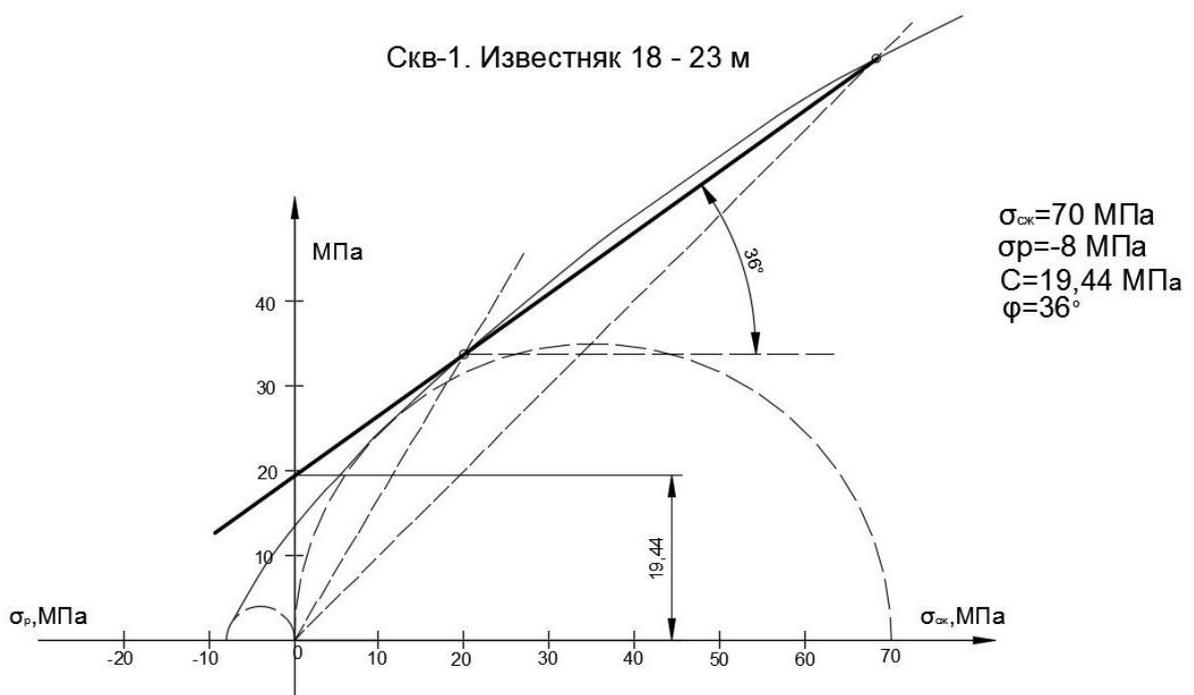


Рисунок 2.3 –Паспорт прочности

2.2 Определение физико-механических свойств горных пород на глубоких горизонтах и анализ результатов лабораторных исследований

При анализе результатов исследования прочностных свойств горных пород и руды Сарбайского карьера было замечена изменчивость физико-механических свойств даже в пределах одного литотипа (Рисунок 2.4), что объясняется существенным влиянием на них таких факторов как интенсивность трещиноватости, расланцевание, брекчирование пород,

метаморфизм [8].

Неоднородный минералогический состав горных пород и вторичные изменения в условиях естественного залегания также оказывают влияние на свойства пород, понижая или повышая предел прочности на сжатие, например, кальцит ($\sigma_{сж} = 16$ МПа) или пирит ($\sigma_{сж} = 128$ МПа). В зонах интенсивной трещиноватости значения сил сцепления пород массива резко снижаются.



а) прочность пород на сжатие



б) прочность пород на растяжение

Рисунок 2.4 - Минимальные и максимальные значения прочности пород по результатам инженерно-геологических изысканий

Одноименные литологические типы пород Сарбайского месторождения имеют различные значения физико-механических свойств при значительном разбросе таких параметров, как сцепление, предел прочности на одноосное сжатие и растяжение, что свидетельствует о значительной пространственной изменчивости свойств в массиве, как по площади распространения, так и по глубине залегания пород.

При обработке результатов расчетов получилась практически прямо пропорциональная зависимость между значениями сцепления C и прочности на сжатие (Рисунок 2.5). Прочностные свойства пород на глубоких горизонтах возрастают. Ранее подобная зависимость для угла внутреннего трения и сцепления была получена в работах зарубежных авторов [68, 69].

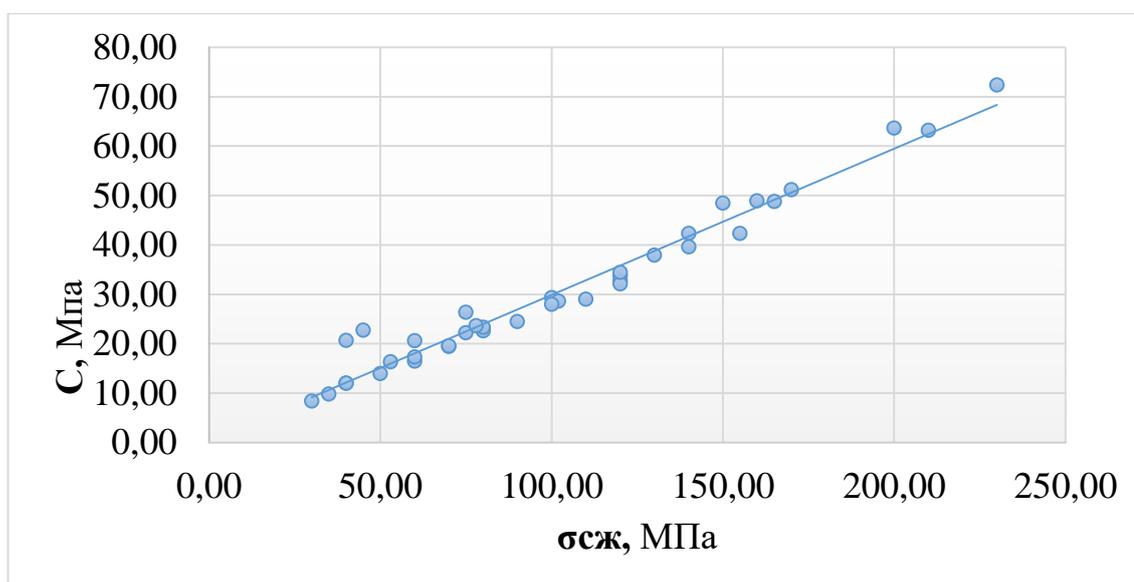


Рисунок 2.5 - Изменение основных физико-механических характеристик пород Сарбайского карьера (C , $\sigma_{сж}$) по данным испытаний

Отобранные для измерений образцы были выбраны во всех интервалах скважин с полным представлением всех описанных по скважине пород.

В целом ненарушенные скальные вмещающие породы Сарбайского месторождения крепкие, устойчивые. Лишь в зонах тектонических нарушений устойчивость пород и руд снижается за счет метасоматических изменений и трещиноватости, появляются ослабленные участки дробления, брекчирования пород. Мощность слабо устойчивых зон меняется от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. После статистической обработки значений пород получены обобщенные ФМС горных пород Сарбайского карьера до глубины минус 660 м (таблица 2).

На основании анализа литологических признаков и физико-механических свойств горных пород месторождения выделено 6 инженерно-геологических элементов [8]:

1. Известняк - порода прочная, величины предела прочности на

одноосное сжатие изменяются от 60 до 70 МПа при среднем 65 МПа.

2. Туфы- по прочности от средних до очень прочных, величины предела прочности на одноосное сжатие изменяются от 30 до 230 МПа при среднем 113 МПа.

3. Туффиты - порода прочная, величины предела прочности на одноосное сжатие изменяются от 40 до 80 МПа при среднем 64,78 МПа.

4. Метасоматиты - от средних до прочных, величины предела прочности на одноосное сжатие изменяются от 50 до 60 МПа при среднем 56,67 МПа.

5. Диориты - прочные и очень прочные, величины предела прочности на одноосное сжатие изменяются от 110 до 210 МПа при среднем 153,7 МПа.

6. Руда – прочная, рудная зона по данным бурения встретилаь один раз (4 скважина) на отметках 523.73-525.10 м. По данным лабораторных исследований значения плотности – 3,61 т/м³. Величины предела прочности на одноосное сжатие 160 МПа.

Изменчивость прочностных свойств пород учтена при расчетах устойчивости откосов уступов и моделировании напряженно-деформированного состояния Сарбайского карьера при увеличении глубины отработки.

Таблица 2.1– Обобщенные физико-механические свойства скальных пород и руд Сарбайского карьера

№ №	Порода	Физические свойства			Прочностные свойства		Упругие свойства					
		Объемный вес, γ , т/м ³	Пористость P , %	Влажность W , %	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{рас}$ МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Модуль сдвига G , МПа	Коэфф. бокового давл-я ξ	Коэфф. Пуассона μ	Удельное сцепление, C_0 , МПа	Угол внутреннего трения, φ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	известняк	2,82	0,55	0,13	65,00	8,00	5,94	2,47	0,28	0,22	18	35
2	туфы	2,75	2,08	0,49	113,0	8,15	6,06	2,51	0,27	0,21	30,0	37
3	метасоматиты	2,90	4,73	0,94	56,67	5,83	5,51	2,29	0,27	0,21	15,6	35
4	туффиты	2,84	1,89	0,55	64,78	7,17	5,39	2,24	0,28	0,22	18,5	36
5	диорит	2,84	0,88	0,32	153,7	11,5	7,79	3,24	0,26	0,21	43,5	35
6	руда	3,61	5,00	1,22	160,0	13,5	5,90	2,44	0,27	0,21	20,6	38

2.3 Изучение структурного строения массива горных пород

Трещиноватость массива скальных и полускальных пород является одним из основных факторов, которые необходимо учитывать при определении устойчивых параметров бортов и уступов карьера. Наличие в прибортовом массиве поверхностей ослабления в виде трещин резко снижает прочностные свойства скальных пород [45].

2.3.1 Изучение структурного строения массива горных пород по результатам геологических изысканий

Трещиноватость скальных пород существенно влияет на прочностные и деформационные свойства массива Сарбайского месторождения. В период с 30.03.2009 г. по 27.04.2016 г. на карьере произошло 4 обрушения: три обрушения на северо-западе, при постановке борта в конечное положение, одно в пределах горизонтов минус 110 ÷ минус 140 м на восточном борту [53].

Во этих случаях причиной деформационных процессов послужило наличие туффитов с выраженной слоистой текстурой и мощностью слойков в пределах от миллиметров до десятков сантиметров (Рисунок 2.6). В пределах скарново-рудной зоны месторождения туффиты интенсивно изменены, вплоть до перехода в метасоматиты и скарны [53].



Рисунок 2.6 - Слоистая текстура туффитов Южного борта карьера, горизонт 0 м

Для внесения в геомеханические расчеты влияния структурных нарушений и неоднородностей с учетом основных закономерностей

распределения и взаимоотношений трещиноватости разных систем был проведен анализ результатов, полученных по результатам бурения скважин (таблица 2.2, рисунок 2.7), фотосъемке уступов карьера и многопараметрической документации элементов трещиноватости и структурных неоднородностей [53].

Таблица 2.2 - Общая удельная трещиноватость для всех скважин

Горизонты, м	Средняя трещиноватость по горизонту	0-30°	30°-60°	60°-90°	Закрытая трещиноватость	Длина столбика*, м
0 до -100	21,33	20,0	21,0	23,0	2,00	0.1
-100 до -200	2,00	0,68	1,13	4,20	9,95	0,37
-200 до -300	2,58	1,49	2,13	4,12	6,78	0,50
-300 до -400	2,46	1,80	1,73	3,86	4,05	0,70
-400 до -500	1,25	1,14	0,74	1,86	3,12	0,70
-500 до -600	1,35	0,91	0,84	2,29	4,20	0,71
-600 до -660	0,70	0,32	0,40	1,38	4,38	0,77
Среднее значение	4,48	3,76	3,85	5,82	4,93	0,55

* -среднее значение длины столбика керна породы в данном интервале

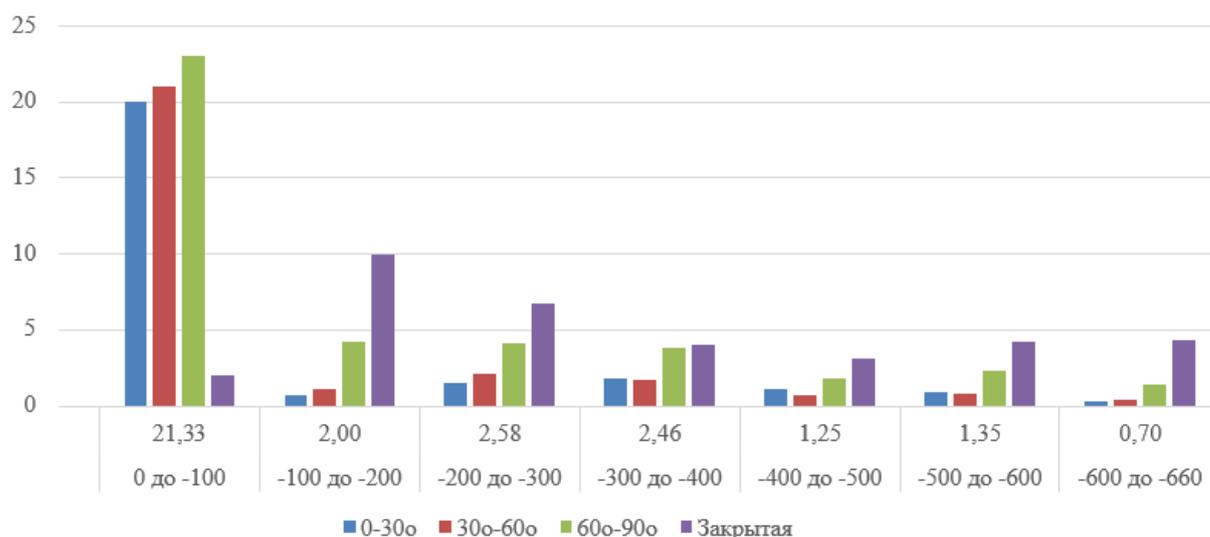


Рисунок 2.7 - Результаты определения трещиноватости массива горных пород по результатам геологических изысканий

Средняя трещиноватость скального массива по инженерно-геологическим данным равна 4.48 тр./м, наблюдается тенденция увеличения блочности массива с глубиной (Рисунок 2.8). На глубоких горизонтах (с отметки минус 400 м) выявлены зоны пород с малой трещиноватостью, приближающиеся к монолитным породам.

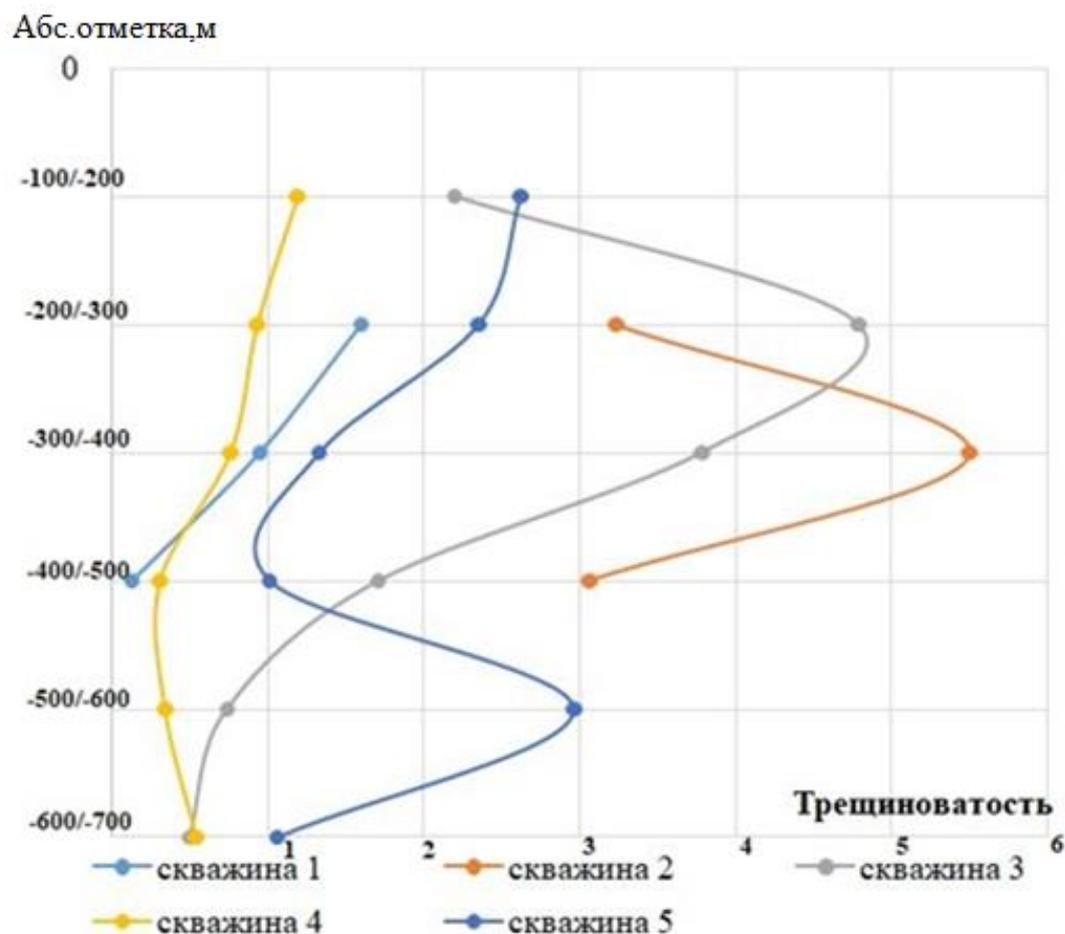


Рисунок 2.8 – Изменение трещиноватости массива горных пород с глубиной

Трещиноватость в массиве горных пород развита достаточно неравномерно от слаботрешиноватых (1 - 3 трещин/метр - в пределах зоны неизменных пород) до интенсивно трещиноватых (до 20 трещин/метр – в пределах зон тектонических нарушений). Как правило, породы в таких интервалах представлены зонами дробления, трещиноватости, брекчирования.

Основное количество открытых трещин (более 60%) ориентировано в субвертикальном направлении с углами падения 60° до 90° (Таблица 2.2), без заполнителя, раскрытые вследствие выветривания. Доминирующая часть трещин закрытого типа -крутопадающие субширотного простирания. Отмечается возрастание углов падения трещиноватости пород с глубиной. Полости закрытых трещин обычно заполнены неустойчивым кальцито-хлоритным материалом, реже гематитом, магнетитом, пиритом.

В целом ненарушенные скальные вмещающие породы Сарбайского месторождения крепкие и устойчивые, в зонах тектонических нарушений устойчивость пород и руд снижается за счет метасоматических изменений и трещиноватости, появляются ослабленные участки дробления, брекчирования пород. Мощность слабо устойчивых зон может меняться от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров.

2.3.2 Изучение структурного строения массива горных пород по результатам натуральных измерений

От положения поверхностей ослабления относительно откоса зависят вид и вероятность возникновения деформаций. Поэтому управление устойчивостью откосов в трещиноватых скальных массивах требует индивидуального решения для каждого конкретного случая [42].

Существующие методики изучения трещиноватости и тектонической нарушенности горного массива и оценки их влияния на устойчивость откосов и бортов карьеров описаны в работах Попова В.Н. [42, 70], Чернышева С.Н. [71], Машанова А.Ж. [72], Раца М.В. [73], Куваева Н.Н. [74], Зотеева В.Г. [75], Низаметдинова Ф.К. [76] и т.д.

Существующие методы изучения трещиноватости массива, по мнению перечисленных авторов делятся на пять групп: непосредственные измерения на участках обнажений горных пород; изучение кернов геотехнических и геологоразведочных скважин; наблюдения за протеканием воды в горном массиве или сжатого воздуха по трещинам при проведении специальных исследований; геофизические методы; методы, использующие ультразвук.

Наиболее полную характеристику трещиноватости можно получить при изучении естественных и искусственных обнажений горных пород, так как детальное изучение неблагоприятных для устойчивости карьеров структурно-геологических элементов производится в период эксплуатации месторождения [77].

Классификация систем трещин производится по пространственному положению и размеру, происхождению, форме и строения трещины [78]. В таблице 2.3 представлены параметры, по которым в диссертационной работе были классифицированы системы трещин Сарбайского карьера.

Таблица 2.3 – Общая классификация трещин

Геометрическая классификация		
Угол падения	Вертикальные	75-90
	Крутые	45-75
	Пологие	15-45
	Слабо наклонные	0-15
Простираие	Меридиальные	
	Широтные	
	Диагональные	
Протяженность, см	Короткие	$10-10^2$
	Средние	10^2-10^3
	Длинные	10^3-10^4
По ширине, см	Узкие	$10^{-1}-10^{-2}$
	Средние	$10^{-1}-1$
	Широкие	1-10
По технологическому фактору	Продольные	
	Диагональные	
	Поперечные	

Генетическая классификация	
	Эндогенные
	Экзогенные/тектонические
	Выветривания и давления
По форме	Прямолинейные
	Изогнутые
	Волнистые
По характеру поверхности	Шероховатые
	Гладкие
	Текстурные
По степени заполнения	Полностью заполненные
	Частично заполненные
По способу образования	Отрыва
	Скальвания

Результаты массовых замеров трещиноватости обрабатываются с использованием круговых, прямоугольных диаграмм и стереографических сеток.

Исследования трещиноватости пород Сарбайского месторождения проводилось в 1961-1963 гг. Институтом ВНИМИ, в 1972-1974 гг., в 1976-1977 гг. и в 1982-1983 гг. Институтом ИГД МЧМ СССР для оценки устойчивости бортов карьера (Таблица 2.4). В результате этих работ были выявлены основные системы трещин, которые использовались при расчете проектных углов бортов и уступов Сарбайского карьера.

Таблица 2.4 - Результаты изучения трещиноватости скальных пород Сарбайского месторождения по данным ИГД МЧМ СССР

Система трещиноватости	Элементы залегания		Протяженность, м	Расстояние м/у трещ., м	Раскрытие трещин, мм
	Азимут прост., град.	Угол падения, гр.			
1	167±18	48±13	10-100	0,21±0,19	1
2	270±13	88±11	10-15	0,24±0,19	6
3	2±11	46±9	0,2-2	19±0,23	1

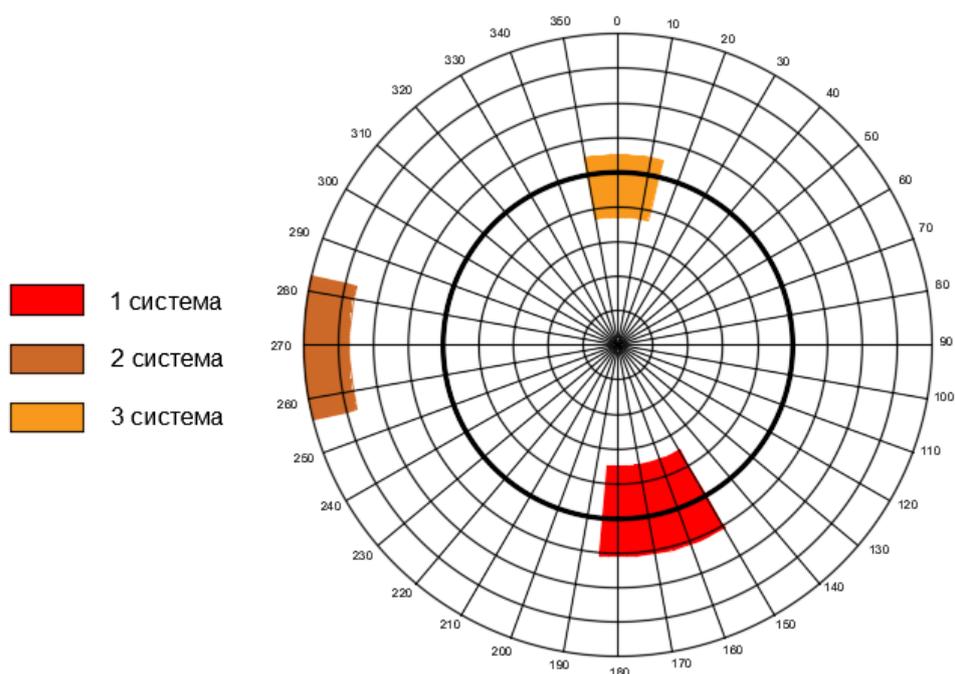


Рисунок 2.9 – Диаграмма трещиноватости по данным ИГД МЧМ СССР

Результаты предыдущих исследований трещиноватости пород Сарбайского месторождения показали, что по всему восточному борту карьера четко прослеживается пологопадающая система трещин сланцеватости, подсекаемой откосами уступов, и крутопадающая субширотного простирания. В целом в массиве горных пород выделяются 5 систем трещин, в основном имеющих субмеридиональное и субширотное простирание (Рисунок 2.10).

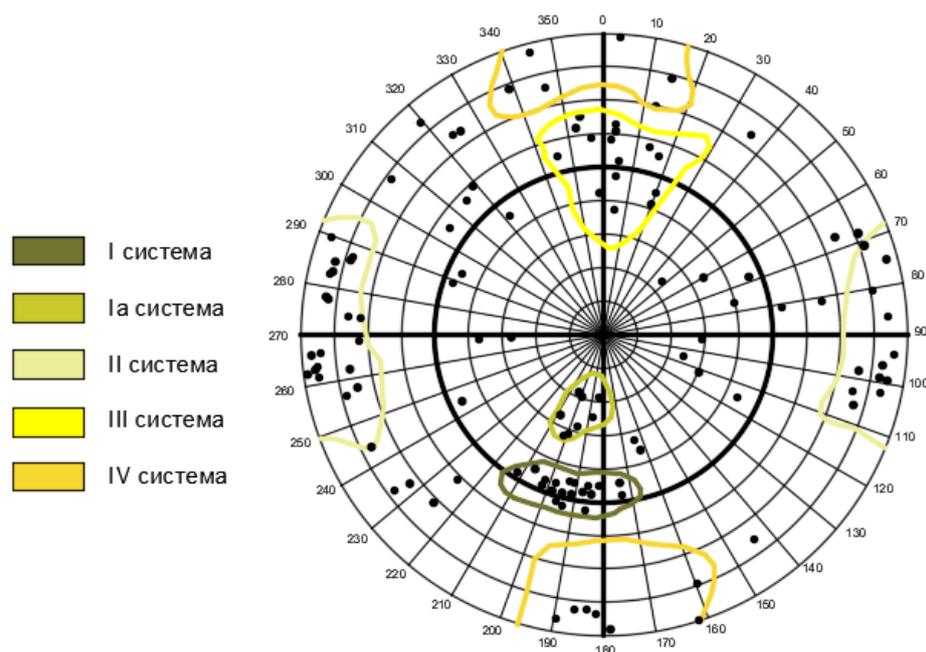


Рисунок 2.10 – Диаграмма трещиноватости по данным ВНИМИ и ИГД МЧМ СССР

Система I, согласная с направлением слоистости и расланцевания, прослеживается во всех породах месторождения (Таблица 2.5). Наиболее четко проявляется вблизи от рудных тел, где по этим трещинам происходит заоткоска уступов на всю высоту под углами $40\div 45^\circ$. Протяженность и интенсивность трещин уменьшается с удалением от рудных тел. На предельном контуре в диорит-порфиритах они, как правило, прерывисты, кулисообразные. Вблизи от рудных тел или тектонических нарушений кулисообразные трещины в результате тектонических подвижек сливаются и образуют крупные плоскости, протяженностью до $20\div 50$ м, которые фиксируются зеркалами скольжения.

Система Ia является пологопадающей и наиболее четко выражена в диорит-порфиритах. Простираие трещин системы Ia близко к простираию системы I. Рассогласование их простираия, как правило, не превышает $10\div 20^\circ$. Для системы Ia характерны углы падения от 0 до 40° .

Система II субширотных трещин являются самой четко выраженной на месторождении. Она прослеживается во всех породах. Протяженность трещин обычно превышает $10\div 15$ м. Это система трещин оказывает наибольшее влияние на устойчивость и формирование откосов уступов северного и южного борта карьера.

Система III. Трещины этой системы прерывисты, секутся трещинами систем I, II и IV. В уступах, сформированных технологическими взрывами, плоскости трещин, по которым происходит заоткоска, не превышает 2 - 3 м по простираию и 1 - 3 м по падению.

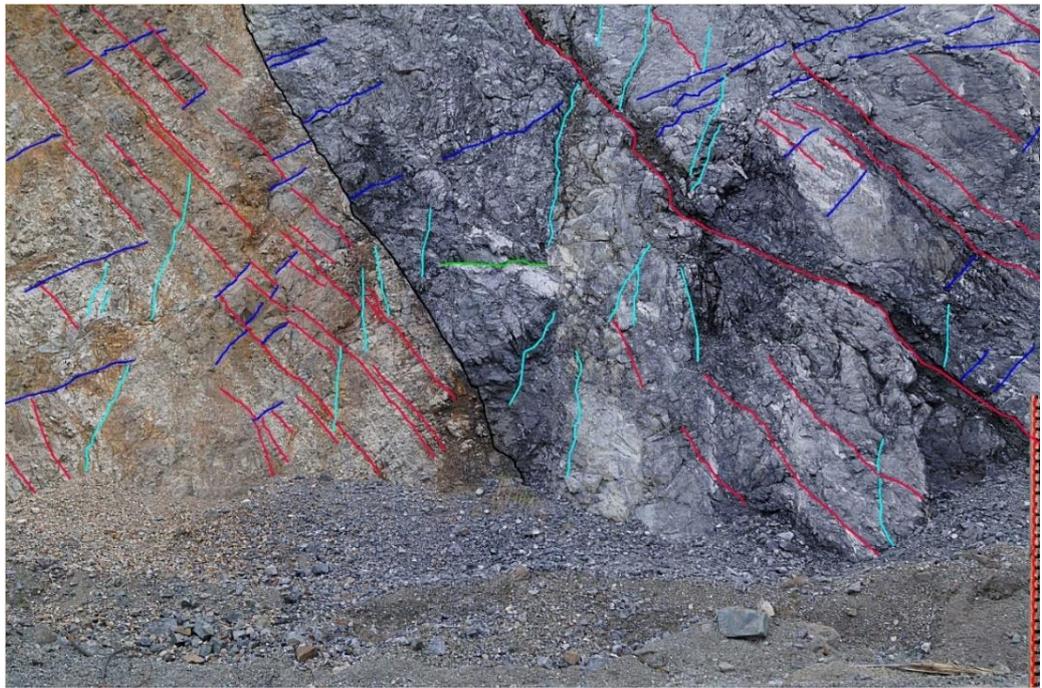
Система IV. Наиболее протяженные трещины отмечаются в породах вулканогенно-осадочной толщи, а также в скарных и скарнированных породах. В диорит-порфиритах длина сплошных трещин данной системы по простиранию и падению не превышают 1 - 5 м.

Таблица 2.5 - Характеристики трещиноватости скальных пород по ранее проведенным исследованиям

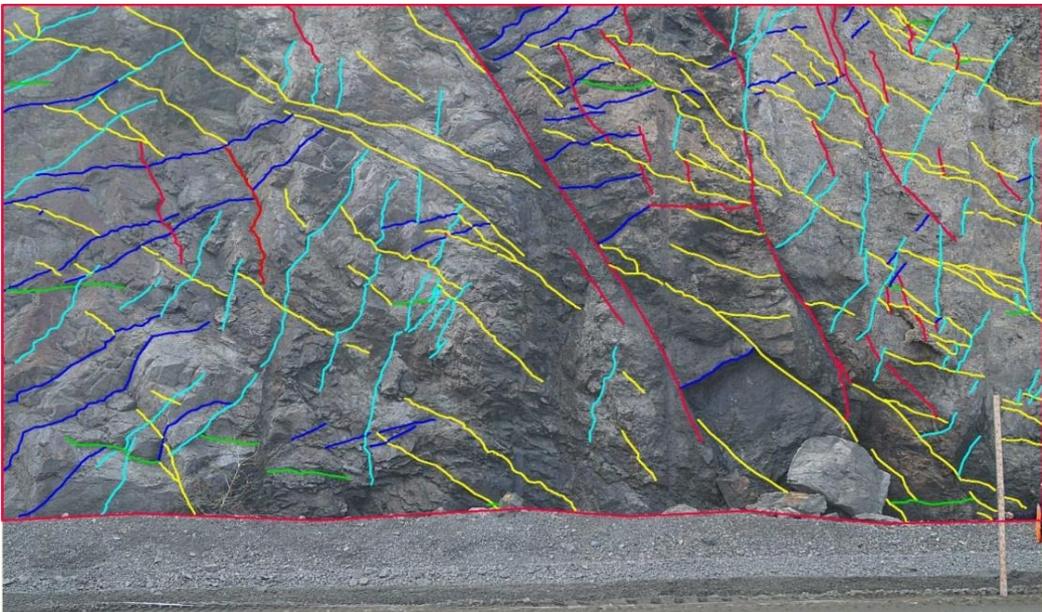
Система трещин	Заполнение трещин	Азимут простирания, град.	Угол падения, градусы	Раскрытие трещин, мм	Расстояние между трещинами, м
1	2	3	4	5	6
Система трещин I, совпадающая со слоистостью вулканогенно-осадочной толщи	Заполнитель отсутствует	190±20	40-55 (западное падение)	2,0	Восточный борт – 0,2-0,45 Западный борт – 0,35-0,6
Система пластовых трещин Ia пологопадающих	Заполнитель отсутствует	190±20	0-40	1,0	0,1-0,4
Система VI субмеридиальных крутопадающих трещин	Заполнитель отсутствует	175±15	Падение западное, восточное, 60-90		0,2-0,8
Система II субширотных крутопадающих трещин		270±15	70-80	2,0	0,3-0,6
Система III нормально-секущая к системе I	Заполнитель отсутствует	5±12	30-67	1,0-3,0	Восточный борт – 0,3-0,5 Западный борт – 0,4-0,6

В связи с увеличением глубины отработки и обнажением скальных пород на больших площадях в 2016 году ИГД им. Д. А. Кунаева совместно с предприятием ТОО «ТГП Шымкентгеокарт» провели изучение трещиноватости путем обработки материалов фотодокументации откосов уступов Сарбайского карьера (далее в тексте будет упоминаться как первая серия замеров). Для определения трещиноватости скальных пород по результатам фотодокументации были выбраны 4 наиболее информативных снимка, что позволило охарактеризовать структурное строение горных пород в пределах восточного и южного бортов Сарбайского карьера (Рисунок 2.11).

a)



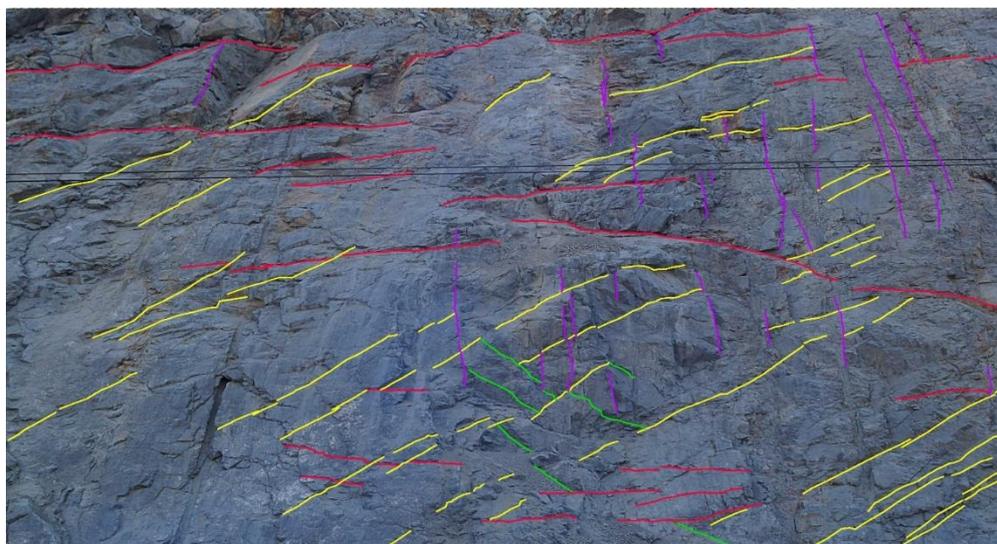
b)



B)



г)



— система 1, — система 2, — система 3,
— система 4, — система 5, — система 6,

а) горизонт минус 40; б) горизонт 0; в) горизонт минус 110; г) горизонт минус 140

Рисунок 2.11 – Снимки фотодокументации скальных пород

Участок I на горизонте минус 40 южного борта (Рисунок 2.11, а) площадью 115,25 м² представляет контакт туффита и известняка. Туффит светлый зеленовато - розовый за счет пироксенизации и альбитизации, тонко - мелкозернистый, слоистый. Известняк светло – серый до черного за счет примеси углистого материала, мелкозернистый, слабо мраморизованный с нечетко выраженной грубой слоистостью. На этом участке развиты пять систем разно ориентированных тектонических трещин скола. Количество трещин 292 при средней длине 0,93 м. Коэффициент трещинной пустотности $K_t = 0,60\%$, блочность 0,495 м. По среднему размеру структурного блока породы относятся к сильно трещиноватым.

Участок II находится на нулевом горизонте южного борта Сарбайского карьера (Рисунок 2.11, б), площадью 135,62 м², представлен туфом плагиоклазового порфирита. На участке выделены четыре системы тектонических сколовых трещин общее количество которых 113. Средняя ширина 2,25 мм, длина 1,75 м, среднее расстояние между ними 1,38 м. Коэффициент трещинной пустотности 0,41%, блочность 0,652 м. По блочности туф относится к среднетрещиноватым.

Участок III расположена на горизонте минус 110 м восточного борта карьера в (Рисунок 2.11, в). Откос уступа представлен псаммитовыми туфы плагиоклазового порфирита, интенсивно пироксенизированные, альбитизированные, хлоритизированные и гематитизированные. Развита система двух взаимно перпендикулярных сколовых трещин, расположенных

практически горизонтально и вертикально. В основании откоса уступа сформирована осыпь в составе которой преобладает обломочный материал размером более 0,5 м.

Площадь участка 44,79 м². В состав двух систем входит 206 трещин средней шириной 2,25 мм, средней длиной 0,52 м и средним расстоянием между ними 0,60 м. Коэффициент трещинной пустотности 0,21%.

Участок IV находится на горизонте минус 140 м восточного борта Сарбайского карьера (Рисунок 2.11, г). В откосе уступа обнажаются туффиты интенсивно пироксенизированные, альбитизированные и геметитизированные. Хорошо видны четыре различно ориентированные системы сколовых тектонических трещин шириной 2 - 3 мм, длиной 0,5 – 1,0 м и средним расстоянием между собой 0,5 – 0,6 м. Коэффициент трещинной пустотности 0,29%, блочность 0,553 м. По блочности туффиты относятся к среднетрещиноватым.

Диаграмма трещиноватости представлена на рисунке 2.12, простираение систем трещин относительно друг друга изображено на рисунке 2.13. Основные параметры систем трещин по результатам замера приведены в таблице 2.6. Необходимо отметить, что все эти трещины, за исключением трещин слоистости имеют сравнительно небольшую длину и заполнены кальцитом, хлоритом и другими минералами.

Как в своей работе писал Борщ-Компаниец: «В зависимости от протяженности трещин и их мощности различают три порядка трещин. К трещинам I порядка относятся крупные тектонические нарушения протяженностью 500 и более метров, мощностью свыше 0,5 м и заполненные раздробленным материалом. Такие трещины, как правило, пересекают горный массив по всему месторождению. Трещины II порядка также являются трещинами тектонического происхождения, но размеры их существенно меньше – протяженность 0,5 до 500 м, мощность от десятых миллиметра до десятков сантиметров. Протяженность трещин III порядка не превышает 0,5 м, а мощность – 0,2 мм. Основными при формировании первичных блоков являются трещины III порядка» [79]. Именно к трещинам III порядка относятся выявленные системы трещин Сарбайского карьера.

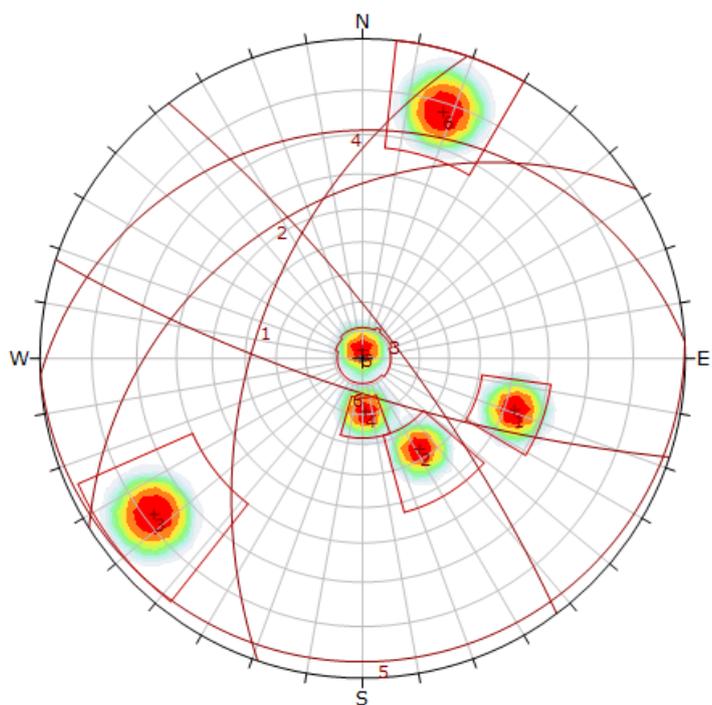


Рисунок 2.12 - Диаграмма трещиноватости по результатам картирования первой серии

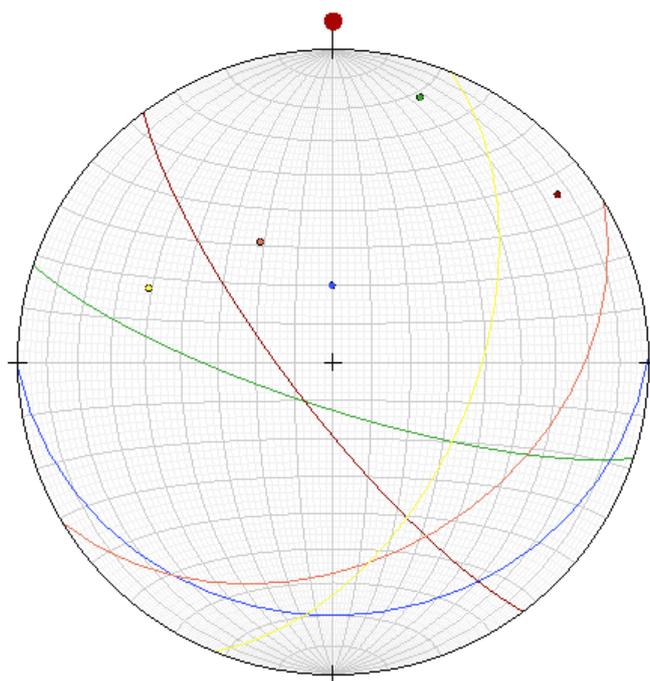


Рисунок 2.13 – Простираение систем трещин

Таблица 2.6 - Характеристика основных параметров систем трещин южного и восточного бортов Сарбайского карьера (первая серия)

№ системы трещин	Генезис	Число трещин	Элементы залегания						Размеры				Расстояние между трещинами, м		Морфология		Заполнитель		
			Азимут падения, °		Азимут простираия, °		Угол падения, °		Длина, м		Ширина, мм		пределы	среднее	форма	поверхность стенок	Состав	Мощность, мм	
			пределы	средний	пределы	средний	пределы	средний	пределы	средняя	пределы	средняя							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1 (V)	Тектонические трещины скола	225	<u>277.28</u> 301.53	289.41	<u>7.28</u> 31.53	19.41	<u>41.04</u> 60.68	52.68	<u>0.14</u> 15.45	1.07	<u>0.50</u> 5.00	2.50	<u>0.09</u> 1.40	0.61	Плоская	Шероховатая	Са,хл,пр	<u>0.50</u> 2.00	1.50
2 (VI)		280	<u>321.41</u> 334.73	328.02	<u>51.41</u> 64.73	58.06	<u>28.83</u> 64.05	36.80	<u>0.14</u> 3.90	0.83	<u>1.00</u> 10.00	3.00	<u>0.16</u> 1.25	0.56	Ступенчатая	Шероховатая	Са,хл,гм	<u>1.00</u> 3.00	2.00
3 (VII)		91	<u>38.73</u> 65.43	52.99	<u>128.73</u> 155.43	142.99	<u>60.35</u> 88.23	77.95	<u>0.20</u> 4.25	1.18	<u>1.00</u> 7.00	2.00	<u>0.25</u> 1.96	0.78	Волнистая	Шероховатая	Са,хл,гм	<u>0.50</u> 2.00	1.00
4 (VIII)		85	<u>358.83</u> 359.47	357.24	<u>88.80</u> 89.47	89.20	<u>18.00</u> 54.30	19.42	<u>0.11</u> 4.12	0.88	<u>2.00</u> 12.00	2.50	<u>0.23</u> 1.60	0.70	Ступенчатая	Шероховатая	Хл,гм,Са	<u>0.50</u> 2.50	1.00
5 (IX)		26	<u>175.36</u> 180.15	177.24	<u>85.36</u> 90.15	87.24	<u>1.00</u> 5.00	2.53	<u>0.15</u> 1.68	0.64	<u>0.50</u> 10.00	2.00	<u>2.50</u> 5.21	3.43	Волнистая	Шероховатая	Хл,гм,пр	<u>1.00</u> 3.00	1.50
6 (X)		42	<u>186.15</u> 210.02	198.09	<u>96.15</u> 120.02	108.09	<u>52.42</u> 90.00	78.33	<u>0.10</u> 3.14	0.53	<u>1.00</u> 25.00	2.00	<u>0.11</u> 1.46	0.58	Ступенчатая	Шероховатая	Са,хл,цр	<u>1.00</u> 2.00	1.00

Сокращения:

Са-кальцит

Хл-хлорит

Гм- гематит

Пр-пирит

Для оценки систем трещин в 2018 г. ИГД им. Д. А. Кунаева совместно с ГИ УрО РАН (г. Пермь) проводилось изучение тектонической трещиноватости в полевых условиях на 9 замерных станциях (вторая серия). План размещения замерных станций показан на рисунке 2.14. Выбор замерных станций производился исходя из двух основных критериев: доступности для инструментальных измерений и представительности по количеству систем трещин [80].

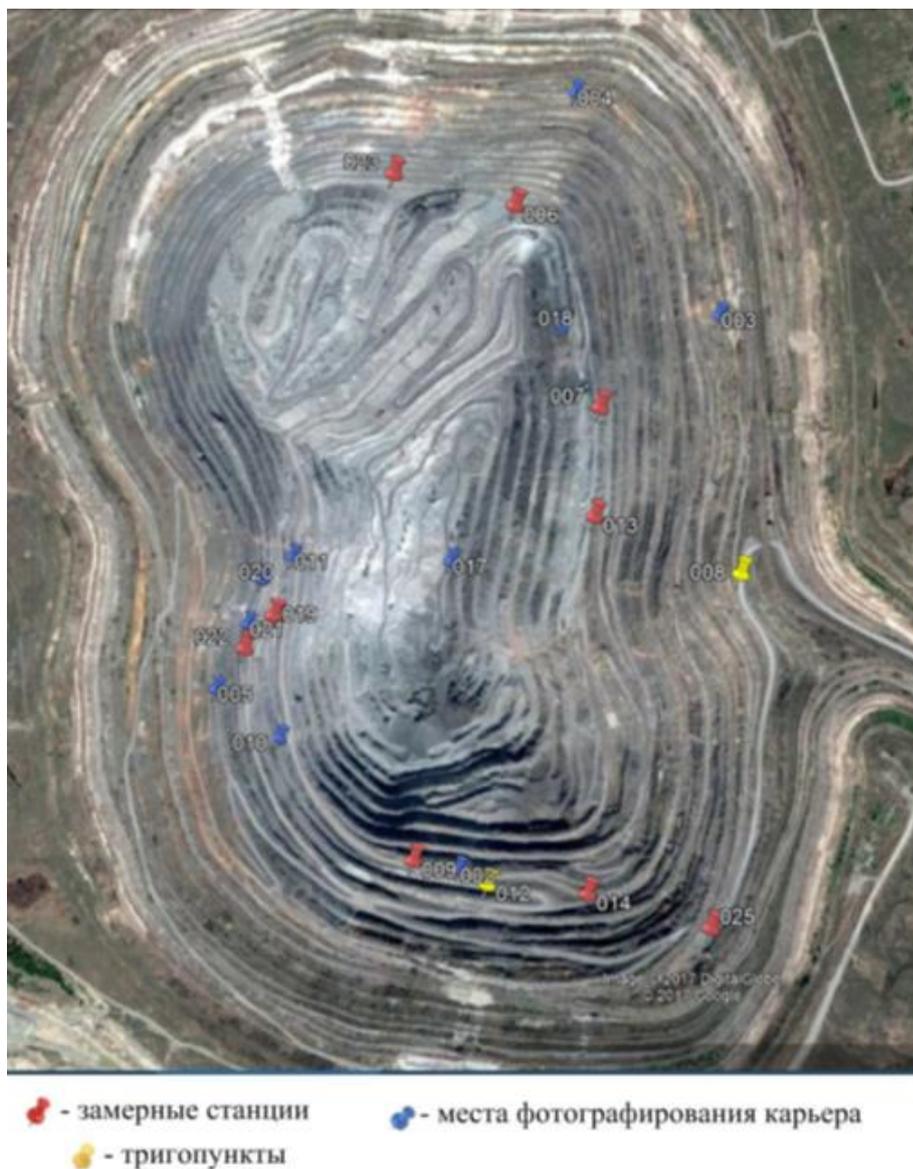


Рисунок 2.14 - Местоположение замерных станций второй серии

Первая система трещин совпадает с полосчатостью руд, метасоматитов и слоистостью и элементами стратификации осадочных и вулканогенных пород. Данная система трещин зафиксирована на семи замерных станциях.

Вторая система трещин ориентирована в субширотном направлении и фактически имеет вертикальное падение. При этом у части трещин этой

системы ось падения ориентирована в южном направлении, а у другой – в северном. Данная система трещин зафиксирована на четырех замерных станциях, расположенных на восточном и западном бортах карьера.

Третья система трещин имеет субширотную ориентацию и падение в южном направлении под углом $50^{\circ}\div 80^{\circ}$ (в среднем - 65°). Данная система трещин зафиксирована на четырех замерных станциях в восточном и западном бортах карьера.

Четвертая система трещин имеет субширотную ориентацию и падение в северном направлении под углом $30^{\circ}\div 70^{\circ}$ (в среднем - 52°). Данная система трещин зафиксирована на 4 замерных станциях в восточном и западном бортах карьера.

Пятая система трещин имеет субмеридианальную ориентацию и падение в восточном направлении под углом $30^{\circ}\div 50^{\circ}$ (в среднем - 42°). Данная система трещин зафиксирована на замерных станциях № 6 и № 7. Непосредственно к пятой системе трещин примыкает система 5' с близкими параметрами залегания. По существу, при дальнейшем анализе трещиноватости их можно объединить в одну систему № 5.

Параметры залегания основных тектонических систем трещин массива горных Сарбайского карьера представлены в таблице 2.7 и на рисунке 2.15 [80].

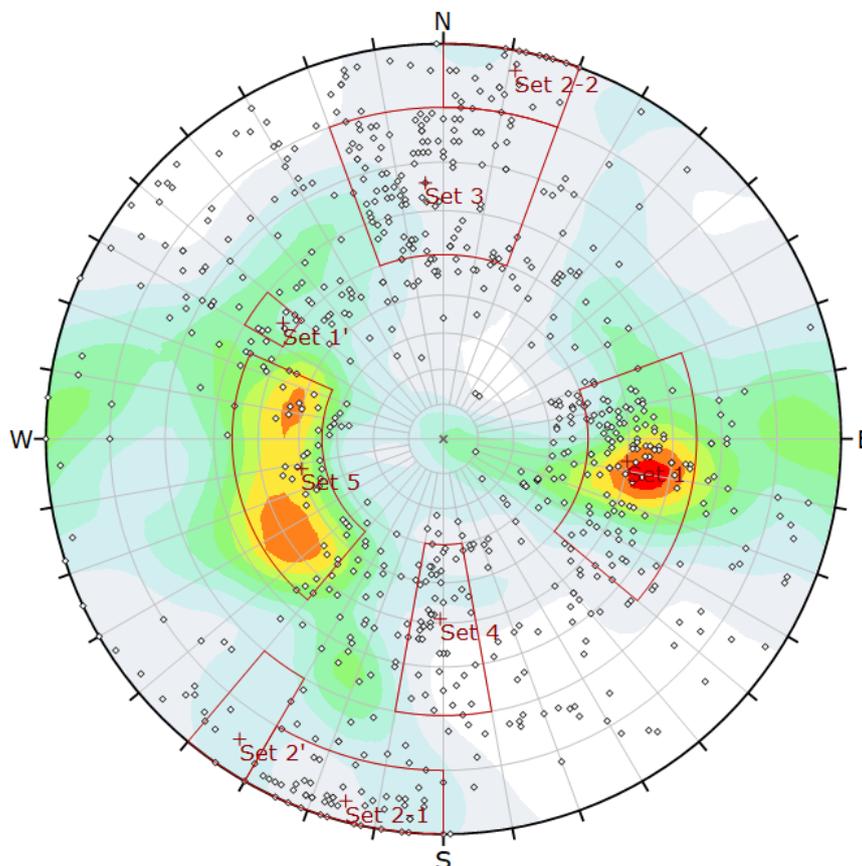


Рисунок 2.15 - Диаграмма трещиноватости по результатам картирования (вторая серия)

Таблица 2.7 - Характеристика основных параметров систем трещин южного и восточного бортов Сарбайского карьера (вторая серия)

№ системы трещин	Число трещин	Элементы залегания						Размеры				Расстояние между трещинами, см		Морфология	
		Азимут падения, °		Азимут простирания, °		Угол падения, °		Длина, м		Ширина раскрытия, мм		пределы	среднее	форма	поверхность стенок
		пределы	средний	пределы	средний	пределы	средний	пределы	средняя	пределы	средняя				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I	104	$\frac{250}{310}$	282	$\frac{340}{40}$	10	$\frac{40}{65}$	52	$\frac{0,5}{\text{нес.д.}}$	-	$\frac{0,5}{5}$	2,50	$\frac{15}{50}$	25	Плоская	Шероховатая
II	49	$\frac{0}{30}$	15	$\frac{90}{120}$	105	-	85	$\frac{0,14}{3,90}$	0,83	$\frac{1,00}{10,00}$	3,0	-	40	Плоская	Гладкая
		$\frac{180}{200}$	190	$\frac{270}{290}$	280										
III	26	$\frac{160}{200}$	175	$\frac{250}{290}$	265	$\frac{50}{80}$	65	$\frac{0,5}{\text{нес.д.}}$	-	$\frac{0,5}{10,0}$	3,0	$\frac{0,1}{\text{метры}}$	40-50	Плоская	Гладкая
IV	111	$\frac{350}{10}$	0	$\frac{80}{100}$	90	$\frac{30}{70}$	52	$\frac{0,5}{\text{нес.д.}}$	-	$\frac{0,5}{10,0}$	2,5	$\frac{0,1}{\text{метры}}$	50-60	Плоская	Гладкая
V	48	$\frac{70}{110}$	90	$\frac{160}{220}$	180	$\frac{30}{50}$	42	$\frac{0,5}{\text{нес.д.}}$	-	$\frac{0,5}{10,0}$	5,0	$\frac{0,1}{\text{метры}}$	20-30	Плоская	Гладкая

При сравнении параметров выявленных систем трещин, полученных на основе полевых исследований и по результатам обработки материалов фотодокументации откосов уступов карьера, проведенных в 2016 и 2018 годах, было выявлено что полностью по параметрам залегания совпадают только системы трещин I и I', связанные с естественной слоистостью массива.

Объясняется это тем, что площадки для замеров трещиноватости были выбраны на различных участках карьера и наличием в массиве скальных пород Сарбайского карьера большого количества трещин, образующих блочную структуру.

2.4 Влияние трещиноватости на устойчивость уступов

Для определения наиболее опасных, с точки зрения устойчивости откосов, выявленные системы трещин сопоставляются с направлением простирания плоскости откоса. Трещины разделяются на продольные, диагональные и поперечные как согласнопадающие, так и несогласнопадающие.

Геометрическая классификация трещиноватых пород в работе Белоусова В.В. [81] основана на линии скрещивания плоскостей трещины и напластования. Попов В.Н., видоизменив классификацию Белоусова В.В., разделяет все трещины по направлению простирания на продольные, диагональные и поперечные относительно направлению простирания откосов уступов и бортов карьеров [45] (Рисунок 2.16).

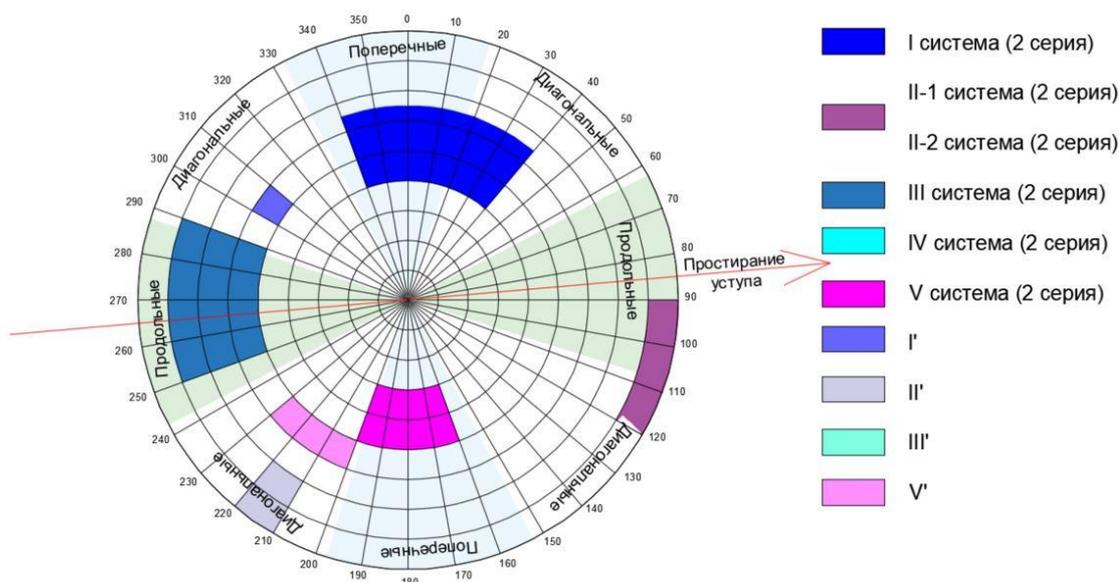


Рисунок 2.16 – Сопоставление систем трещин с направлением простирания плоскости откоса

Сориентировав все системы выявленных на участке трещин с простиранием уступа можно выявить какие системы являются наиболее опасными с точки зрения устойчивости. К таким трещинам относят

продольные согласнопadaющие, поперечные согласнопadaющие системы могут не оказывать влияния на устойчивое состояние откоса [45].

Таблица 2.8 – Классификация систем трещин по отношению к уступу

Участок	Борт карьера	Система трещин	Положение системы по отношению к откосу
1	2	3	4
1	Северный	I	Поперечная, согласная, наклонная
		I'	Диагональная, несогласная, наклонная
		II-1	Продольная, согласная, крутая
		III	Продольная, несогласная, крутая
		V	Поперечная, согласная, наклонная
		V'	Диагональная, несогласная, наклонная
2	Северный	I	Поперечная, согласная, наклонная
		III	Продольная, несогласная, крутая
3	Северо-восточный	1	Диагональная, несогласная, наклонная
		2	Диагональная, несогласная, наклонная
4-1	Восточный	I'	Диагональная, несогласная, наклонная
		I	Продольная, несогласная, наклонная
		II-1	Поперечная, согласная, крутая
		IV	Поперечная, согласная, наклонная
		V	Продольная, согласная, наклонная
4-2	Восточный	2	Диагональная, несогласная, наклонная
		5	Поперечная, несогласная, пологая
		6	Поперечная, согласная, крутая
5	Восточный	I'	Диагональная, несогласная, наклонная
		I	Продольная, несогласная, наклонная
		II-1	Поперечная, согласная, крутая
		IV	Поперечная, несогласная, наклонная
		V	Продольная, согласная, наклонная
6	Юго-восточный	I	Поперечная, несогласная, наклонная
		IV	Продольная, несогласная, наклонная
		V	Поперечная, согласная, наклонная
7	Южный	1	Поперечная, несогласная, наклонная
		3	Диагональная, несогласная, крутая
		4	Продольная, несогласная, пологая
8-1	Южный	I	Поперечная, несогласная, наклонная
		III	Продольная, согласная, крутая
		IV	Продольная, несогласная, наклонная
		V	Поперечная, несогласная, наклонная
8-2	Южный	2	Диагональная, несогласная, наклонная
		3	Диагональная, несогласная, крутая
		4	Продольная, несогласная, пологая
		5	Продольная, несогласная, пологая
9	Юго-западный/западный	I'	Диагональная, согласная, наклонная
		I	Продольная, согласная, наклонная
		II-2	Поперечная, согласная, крутая
		III	Поперечная, согласная, крутая
		V	Продольная, несогласная, наклонная

Продолжение таблицы 2.8

1	2	3	4
10	Юго-западный/западный	I	Продольная, согласная, наклонная
		II-1	Поперечная, несогласная, крутая
		II-2	Поперечная, несогласная, крутая
		II'	Продольная, несогласная, крутая
		III	Поперечная, несогласная, крутая

Наибольшую потенциальную опасность представляют трещины, ориентированные параллельно (согласно падающие) простиранию откоса и падающие в сторону выработанного пространства под углами более 50°.

Также потенциальную поверхность скольжения для уступов могут определять сопряженные системы трещин - продольные, согласно падающие крутого залегания по отношению к откосам. Данные трещины будут способствовать расслоению пород в уступах, приводя к деформациям уступа, не вызывая потери общей устойчивости уступа.

Анализ результатов обработки трещиноватости показывает, что потенциальными поверхностями ослабления для Сарбайского карьера могут быть следующие системы трещин:

- для Северного и Северо-восточного бортов карьера – система трещин II-1;
- для Восточного и Юго-восточного бортов – система V;
- для Южного борта – III система трещин;
- для Юго-западного и Западного бортов – I система трещин, также по I', II-2 и III системам вероятно образование призм возможного обрушения.

2.5 Определение риска возникновения деформаций в виде скольжение блоков по плоскостям ослабления в масштабе одного уступа

Учитывая высокую прочность скальных пород Сарбайского карьера, потеря устойчивости откосов возможна главным образом по существующим плоскостям ослабления. Как было определено выше, массив месторождения имеет блочную структуру. Многочисленные системы трещин образуют вероятность смещения скальных блоков, что может привести к разрушению уступа.

Определение вида разрушения является важным этапом при оценке его устойчивости [82]. В работах авторов постсоветского пространства характерно разделение деформаций бортов и уступов карьеров по 5 – 6 видам обрушений (рассмотрено в Главе 1).

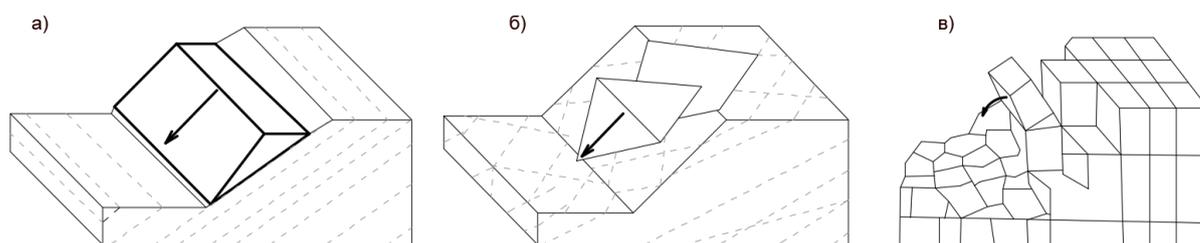
В зарубежной литературе установлены три основные вида потери устойчивости: в виде сдвига части массива по подсекающей плоскости (Planar Sliding), сдвига клиновидного блока (Wedge) и опрокидывания скальных блоков в сторону выработанного пространства (в дальнейшем в тексте будет упоминаться как классификация второго типа) [82 - 84].

По пересечениям трещин образуется один из видов деформаций уступа карьера. Сдвиг может произойти у скального блока при наличии подсекающей

плоскости, падающей в сторону поверхности склона и других нарушениях, которые отделяют блок от массива и образуют его боковые поверхности (Рисунок 2.17, а) [82, 83].

Сдвиг клиновидного блока происходит при пересечении двух плоскостей таким образом, что образуется тетраэдр. Условием сдвига при этом является выход линии пересечения плоскостей нарушения сплошности на поверхность откоса (Рисунок 2.17, б) [82].

Потеря устойчивости откоса путем опрокидывания скальных блоков в сторону склона при крутопадающем в глубь откоса напластования пород (Рисунок 2.17, в). Процесс разрушения может развиваться двумя путями: прямое опрокидывание (Direct Toppling) и опрокидывание с изгибом (Flexural Toppling). Прямое опрокидывание блоков развивается в слоистых породах, имеющих сопряженную субвертикальную по отношению к направлению пластов систему трещин, разбивающую пласты на блоки. Опрокидывание с изгибом, когда напластование пород скального массива выходит на поверхность склона, при этом главные нормальные сжимающие напряжения параллельны поверхности уступа [82, 83].



а) сдвиг призматического блока; б) сдвиг клиновидного блока; в) разрушение уступа с опрокидыванием блоков

Рисунок 2.17 – Три основных вида потери устойчивости скальных пород

Данные изучения структурного строения, представленные в главе 2.2, стали основой для анализа устойчивости уступов Сарбайского карьера. За две произведенные серии выявлено десять систем трещин, отнесенных к тектоническим. Местоположение каждого изученного участка представлено в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Анализируемые участки карьера

№ участка	Параметры уступа			Местоположение		Системы трещин
	Азимут падения уступа	Угол падения уступа	Высота уступа	Борт карьера	Высотная отметка	
1	2	3	4	5	6	7
1	185	63	40	С	0/- 40	I, I', II-1, II', III, V
2	185	58	20	С	-100/-120	I, III
3	270	51 55	25 40	В	-80/-105; -106/-146	I, II', II-1, II-2, III, IV

Продолжение таблицы 2.9

1	2	3	4	5	6	7
4	276	53	25	В	-80/-105	Г', I, II-1, IV, V
5	354	55	20	ЮВ	10/-10	I, IV, V
6	14	59	30	Ю	-20/-50	I, III, IV, V
7	93	63	40	ЮЗ/З	0/-40	Г', I, II-2, III, V
8	106	52	30	ЮЗ/З	-40/-70	I, II-1, II-2, II', III,

Участок №1 расположен на северном борту Сарбайского карьера на горизонте минус 40. На участке в результате 116 проведенных измерений выявлено 5 основных систем трещин – I, II, III, IV, V (Рисунок 2.18). Для этого участка выявлено:

- наличие плоскостей скольжения для возникновения всех видов деформаций по классификации второго вида;

- вероятность локальных обрушений уступа в виде Planar Sliding (1) составляет более 80 %, плоскости скольжения образуют трещины III системы (Рисунок 2.19);

- вероятность локальных обрушений уступа в виде Wedge (2) составляет 28,55 %, наиболее вероятные поверхности скольжения образуются пересечением трещин III, V, Г', II' систем (Рисунок 2.20);

- высокая вероятность локальных обрушений уступа в виде Flexural Toppling (3) по IV системе трещин (Рисунок 2.21);

- вероятность локальных обрушений уступа в виде Direct Toppling (4) более 80 %, деформации будут происходить по линиям пересечений трещин III системы (Рисунок 2.22).

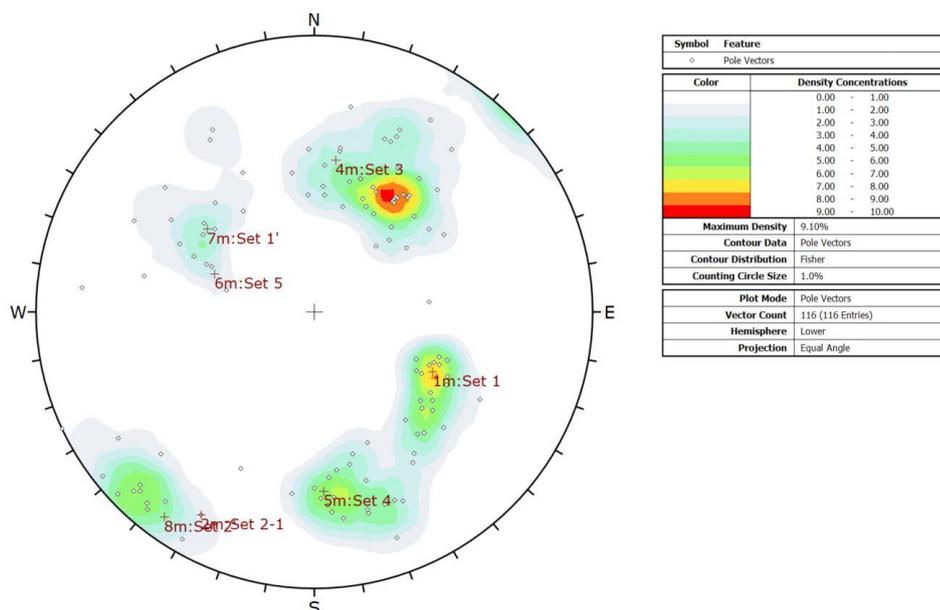


Рисунок 2.18 – Диаграмма трещиноватости 1 участка

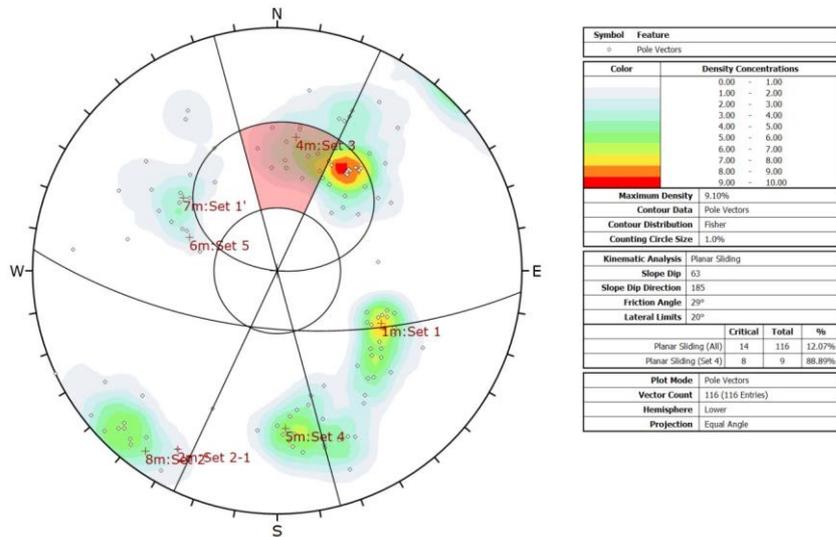


Рисунок 2.19 – Диаграмма трещиноватости 1 участка (сдвиг призматического блока)

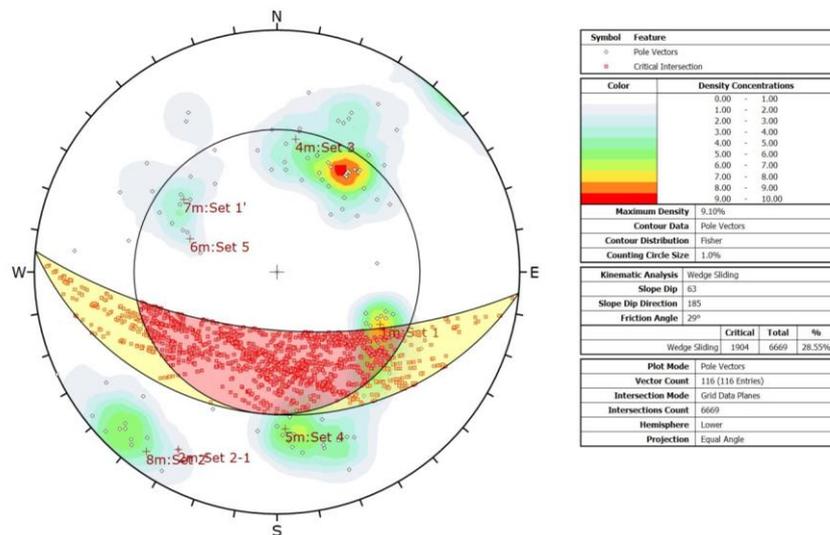


Рисунок 2.20 – Диаграмма трещиноватости 1 участка (сдвиг клиновидного блока)

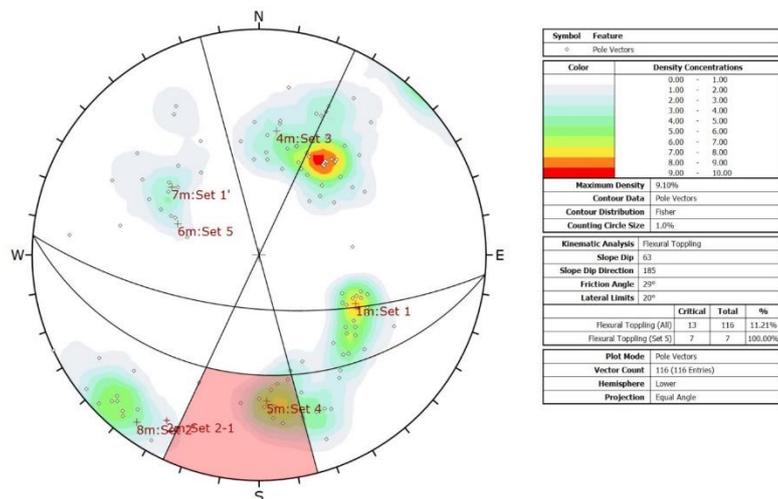


Рисунок 2.21 - Диаграмма трещиноватости 1 участка (опрокидывание блоков - Flexural Toppling)

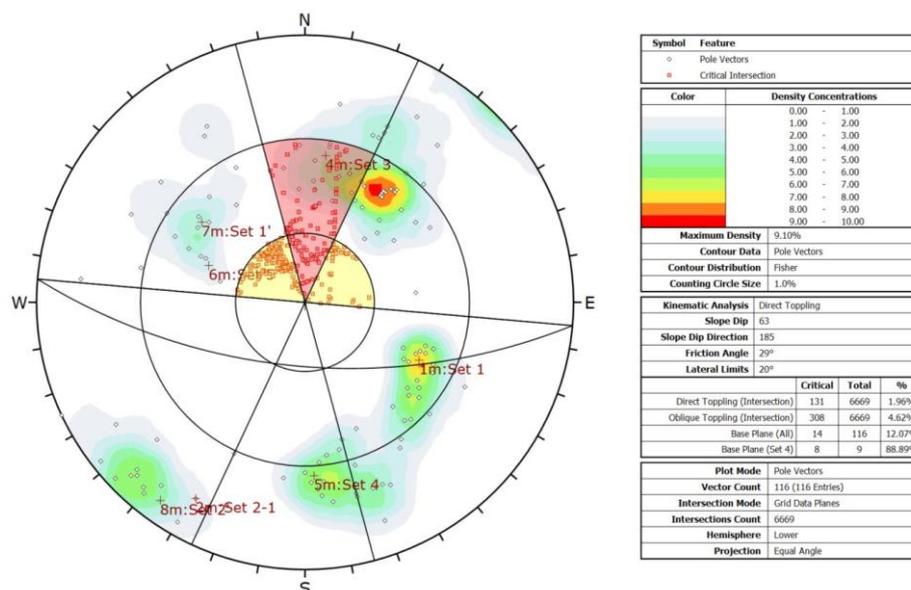


Рисунок 2.22 - Диаграмма трещиноватости 1 участка (опрокидывание блоков Direct Toppling)

В таблице 2.10 представлен результат анализа по всем выбранным участкам Сарбайского карьера. Вероятность возникновения деформаций по каждому из видов представлена в процентах, плоскости скольжения – системами трещин. Районирование карьера по видам деформаций представлена на рисунке 2.23.

Таблица 2.10 – Результаты анализа устойчивости уступов карьера

№ участка	Вероятность/влияющие системы	Вид деформации			
		Planar Sliding	Wedge	Flexural Toppling	Direct Toppling
1	Вероятность, %	88,89	28,55	100	88,89
	Системы	III	III, V, I', II'	IV	III
2	Вероятность, %	75,0	43,0	0	75,0
	Системы	III	I+III	-	III
4	Вероятность, %	52,94	25,81	0	58,82
	Системы	I	I, II-2, III	-	I
5	Вероятность, %	68,75	21,06	0	68,75
	Системы	I	I, II-1, IV	-	I
6	Вероятность, %	100	15,67	2,33	100
	Системы	IV	I, IV		IV
8	Вероятность, %	100	31,34	6,25	100
	Системы	IV	I+IV IV+V	III	IV
9	Вероятность, %	78,28	44,46	66,67	78,26
	Системы	V	II-2, II, V, I'	I	V
10	Вероятность, %	0	11,99	0	11,88
	Системы	-	II-1, II-2, III	-	-

Следует отметить, что даже при высоких значениях вероятности возникновения деформаций обрушение может не произойти, т.к. помимо пространственной ориентации систем трещин оказывают влияние сцепление материала трещин, высота уступа, обводненность и, в некоторой степени, прочность пород, слагаемых рассматриваемый участок. Например, для первого участка вероятность возникновения деформаций по сдвигу призматического блока составляет более 80%, однако расчетный коэффициент запаса устойчивости для этого призматического блока больше 1.

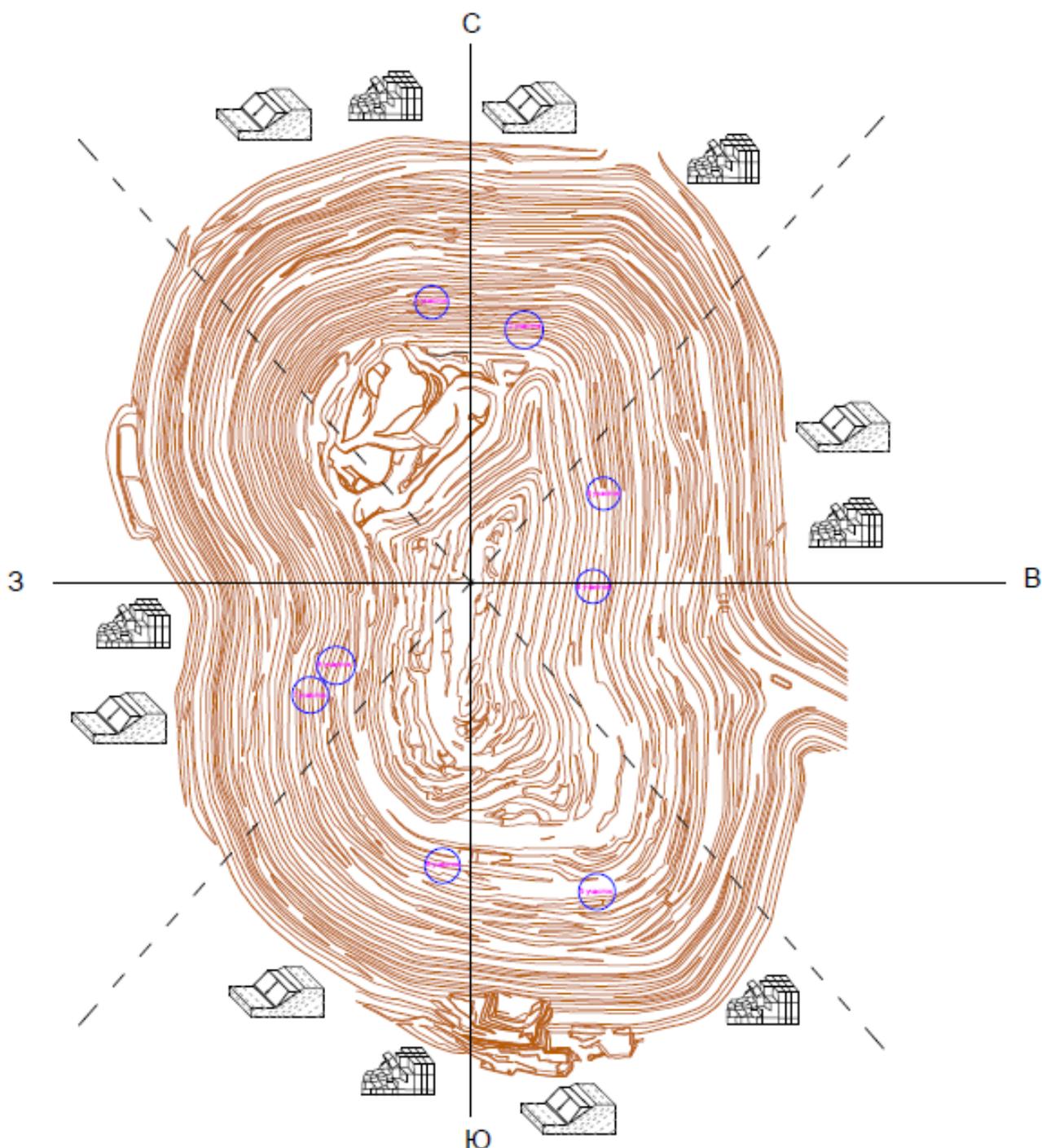


Рисунок 2.23 – Районирование бортов карьера по видам обрушений

2.6 Определение расчетных прочностных характеристик пород Сарбайского карьера с учетом их трещиноватости

При оценке устойчивости бортов по ряду разрезов (9, 11, 15, 18, 19), проходящих рядом с местами бурения глубоких геологоразведочных скважин, использовались расчетные прочностные характеристики пород по данным испытаний кернового материала скважин № 1 - 5 (Таблица 2.12). Для остальных профилей использовались ранее полученные прочностные характеристики (Таблица 2.11). Для верхней части карьера в расчете по оценке устойчивости бортов карьера использовались ранее полученные показатели ФМС рыхлых отложений (Таблица 2.11).

Таблица 2.11 – Расчетные прочностные характеристики пород Сарбайского карьера

№№	Наименование пород	Расчетные характеристики (n=1)			Расчетные характеристики (n=1,3)	
		Плотность, γ , т/м ³	Угол внутреннего трения, φ	Сцепление т/м ² , С	Угол внутреннего трения, φ	Сцепление т/м ² , С
1	2	3	4	5	7	8
Рыхлые породы						
1	Глины	2,03	11,3	9	11,3	2,6
2	Глауконит	1,73	26	8,7	26	8,7
3	Песчаники	1,94	31,5	3,4	25	3
Скальные породы (Восточный борт)						
1	Известняки	2,7	32,6	80	26,2	61,54
2	Туфы	2,69	32,6	79,6	26,2	61,23
3	Туффиты	2,86	32,6	96	26,2	73,85
4	Диориты	2,66	29	80	23	61,4
5	Руда	3,68	35,2	91	28,5	70
Скальные породы (Западный борт)						
1	Известняки	2,7	32,6	80	26,2	61,54
2	Туфы	2,84	35,2	80	28,5	61,54
3	Базальты	2,84	32,6	80	26,2	61,5
4	Туффиты	2,86	32,6	96	26,2	73,85
5	Диориты	2,7	37	89,6	30	68,9
6	Руда	3,68	35,2	91	28,5	70
Для продольных разрезов (1-1, 2-2, 3-3)						
1	Известняки	2,7	32,6	80	26,2	61,4
2	Туфы	2,69	32,6	79,6	26,2	61,23
3	Туффиты	2,86	32,6	96	26,2	73,85
4	Базальты	2,84	32,6	80	26,2	61,5
5	Диорит	2,66	29	80	23	61,4
6	Руда	3,68	35,2	91	28,5	70

Таблица 2.12 – Расчетные прочностные характеристики пород по данным испытаний кернового материала скважин № 1 - 5

№ скв, борт	№ разреза	Основной комплекс пород	Глубина залегания пород Н, м	Размер блока l, м	Значение коэффициента a	Коэффициент структурного ослабления, λ	Показатели в образце		Расчетные показатели в массиве			Плотность, γ , т/м ³
							Удельное сцепление C_0 , МПа	Угол внутреннего трения φ	Сцепление C_m Мпа	Сцепление C_m т/м ²	Угол внутрен. трения φ	
4-В	9	Туфы	500	0,65	7	0,0210	37,1	36,2	0,78	79,6	36,2	2,70
		Диориты	852	0,90	7	0,0204	52,7	32,5	1,08	109,8	32,5	2,84
		Руда	825	0,66	7	0,0228	20,57	38	0,47	47,9	38	3,61
5-В	15	Туфы	860	0,45	7	0,0186	39,0	38	0,72	73,8	38	2,76
		Туффиты	490	0,12	5	0,0235	22,6	40	0,53	54,1	40	2,84
3- В	18	Мегасоматиты	380	0,25	4	0,0330	17,3	33	0,57	58,2	33	2,86
		Туфы	580	0,43	5	0,0226	24,1	36,4	0,54	55,6	36,4	2,70
		Диориты	860	0,74	7	0,0198	34,3	37,5	0,68	69,4	37,5	2,84
1- 3	11	Туффиты	440	0,24	3	0,0425	13,4	31,3	0,57	58,1	31,3	2,84
		Известняки	500	0,63	4	0,0361	18	35	0,65	66,3	35	2,81
		Туфы	700	1,13	6	0,0253	24,5	36	0,62	63,1	36	2,86
2-3	19	Туфы	580	0,37	4	0,0222	25,7	38,7	0,57	58,1	38,7	2,81
		Мегасоматиты	620	0,31	3	0,0420	13,9	37	0,58	59,7	37	2,86
		Туффиты	700	0,41	5	0,0262	19,6	37	0,51	52,3	37	2,84

В расчётах по оценке устойчивости бортов карьеров использованы следующие физико-механические характеристики пород в массиве: плотность, угол внутреннего трения и удельное сцепление. Значения плотности пород принимаются равными значениям, которые получены по результатам испытаний образцов.

Величина удельного сцепления в массиве определяется по формуле [46]:

$$C_m = (C_0 - C_T) \cdot \lambda + C_T \quad (2.7)$$

где C_m , C_0 , C_T - удельное сцепление, соответственно в массиве, образце и по поверхностям ослабления (Таблица 2.13);

Конструкция бортов уступов и борта карьера должна определяться исходя из величины сцепления пород по ослаблениям.

Таблица 2.13 – Прочностные характеристики по ослабленным контактам

Наименование пород	Сцепление пород в массиве, т/м ²	Угол внутреннего трения, град	Расчетное сцепление	Расчетный угол внутреннего трения, град
Глины коры выветривания	1	24	0,8	18,9
Разлом	3	14	2	10,8

Учет влияния характера трещиноватости на свойства горного массива производится с помощью коэффициента структурного ослабления λ , который позволяет переходить от сцепления горных пород в образце к сцеплению пород в массиве. В практике инженерных расчетов широкое распространение получила формула для определения коэффициента структурного ослабления профессора Фисенко Г.Л., которая проста в использовании и дает приемлемые результаты [46]:

$$\lambda = \frac{1}{1 + a \ln(H/l)} \quad (2.8)$$

где, a - коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и характера трещиноватости (табличные данные);

H и l - высота борта и средний размер элементарного структурного блока.

С учетом данных натуральных замеров параметров трещиноватости скального массива на Сарбайском карьере коэффициент структурного ослабления $\lambda = 0,02 \div 0,04$.

По результатам натуральных замеров параметров трещиноватости получена логарифмическая зависимость коэффициента структурного ослабления от величины сцепления в образце (Рисунок 2.24).

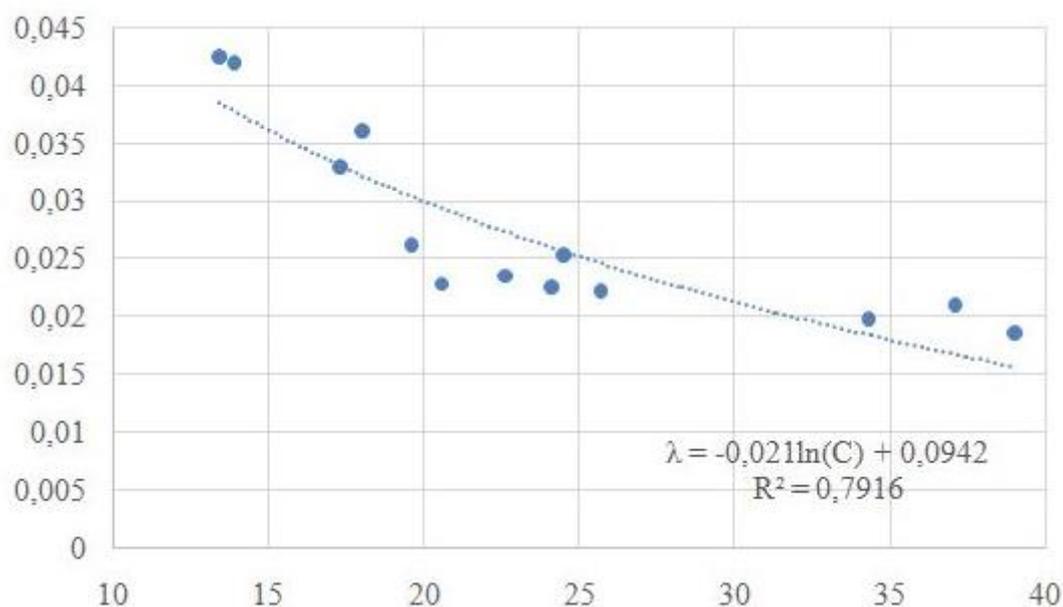


Рисунок 2.24 - Зависимость коэффициента структурного ослабления (λ) от величины сцепления в образце (C)

Значения коэффициента структурного ослабления, пересчитанные с учетом разбивки скальных пород по глубине с учетом разной степени трещиноватости приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Расчетные прочностные характеристики пород по данным испытаний kernового материала

Основной комплекс пород	Размер блока l, м	Коэффициент структурного ослабления, λ	Расчетные показатели в массиве			Плотность, γ , т/м ³
			Сцепление См Мпа	Сцепление См т/м ²	Угол вн. трения	
Туфы	0,61	0,0219	0,65	66,04	37,06	2,77
Диориты	0,82	0,02	0,88	89,60	35,00	2,84
Туффиты	0,26	0,03	0,54	54,83	36,10	2,84
Руда	0,66	0,02	0,47	47,90	38,00	3,61
Известняки	0,63	0,0361	0,65	66,30	35,00	2,81
Метасоматиты	0,28	0,04	0,58	58,95	35,00	2,86

Выводы по главе 2

1. При углубке карьера до абсолютной отметки минус 500 м, наиболее неблагоприятные инженерно-геологические условия будут наблюдаться на восточном борту. Связано это с тем, что борт ориентирован по простиранию Восточного рудного тела и вмещающих его интенсивно трещиноватых

туффигов. Породы, залегающие в восточном борту карьера и проявленная в них 1 система трещин падают в сторону дна карьера под углами 50- 70°. При постановке борта карьера в конечное положение и заоткоске откосов уступов их углы наклонов будут близки к углам падения 1 системы трещин и при расположении в толще туффигов могут приводить к процессам обрушения.

2. В результате проведенных инженерно-геологических работ для районирования прибортового массива горных пород Сарбайского карьера с учетом углубки до абсолютной отметки минус 500 м выделено 6 систем тектонических трещин скола в первой серии замеров и 5 систем во второй серии. Выявлено, что полностью по параметрам залегания совпадают только 1 и I системы трещин, связанные с естественной слоистостью массива.

3. По анализу результатов обработки трещиноватости выявлено, что потенциальными поверхностями ослабления для Сарбайского карьера могут быть следующие системы трещин:

- для Северного и Северо-восточного бортов карьера – система трещин II-1;
- для Восточного и Юго-восточного бортов – система V;
- для Южного борта – III система трещин;
- для Юго-западного и Западного бортов – I система трещин, также по I', II-2 и III системам вероятно образование призм возможного обрушения.

4. По результатам натурных замеров параметров трещиноватости получена логарифмическая зависимость коэффициента структурного ослабления от величины сцепления в образце.

5. По результатам натурных и лабораторных исследований установлена закономерность структурного строения, физико-механических свойств с увеличением глубины горных работ для Сарбайского карьера

Результаты, полученные в главе 2 необходимы для дальнейшего выполнения математического моделирования устойчивости бортов карьера и моделирования распределения основных действующих напряжений в прибортовом массиве горных пород.

3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА

3.1 Методы расчета, применяемые в работе

В массивах пород, прилегающих к откосам и содержащих природные поверхности ослабления (дизъюнктивные нарушения, тектонические трещины большого протяжения, слабые контакты слоев и др.), которые частично или полностью могут представлять собой поверхность скольжения, форму и местоположение поверхности скольжения призмы обрушения откоса, находящегося в предельном равновесии, определяют на основе расчетов устойчивости [15].

Оценка устойчивого состояния бортов и уступов карьера в связи со сложностью горно-геологических и горнотехнических условий открытых разработок получила широкое распространение. В настоящее время по данным института ВИОГЕМ насчитывается более 120 методов расчета устойчивости откосов [49, 85].

Расчет устойчивости осуществляется путём численного решения уравнений математической физики, описывающей геомеханические процессы геологической среды. К методам численного геомеханического моделирования относятся [86]:

- численный эксперимент;
- метод конечных элементов;
- метод предельного равновесия;
- метод локальных вариаций;
- метод конечных разностей;
- метод дискретных элементов.

В настоящее время методика оценки устойчивости бортов карьеров имеет два основных направления: развитие методов предельного равновесия; развитие численных методов [87].

Численные методы в основном представлены методом конечных элементов и конечных разностей. Эти методы используются для решения задач механики твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электромагнитных полей. Кроме того, необходимо отметить, что при решении задач устойчивости откосов бортов ни одна схема не учитывает деформационные характеристики массива, а численные методы позволяют сделать это [87].

В диссертационной работе численное моделирование проведено двумя методами – методом предельного равновесия и методом конечных элементов.

Широкое применение при расчетах устойчивости бортов карьеров получили способы расчета, основанные на теории предельного равновесия. Ранее этот метод расчета рассматривался в работах Л.Н. Бернацкого [88, 89], В. Феллениуса [90], М.Н. Гольдштейна [91], Н.И. Маслова [92], Г.Л. Фисенко [33], Н.А. Цытовича [93, 94], Э.Л. Галустьяна [95] и других исследователей.

Расчет устойчивости бортов карьера методами предельного равновесия, предназначенная для анализа склонов, сложенных всеми типами грунтов и горных пород.

Одним из видов расчета устойчивости бортов карьера является расчет по кругло-цилиндрическим поверхностям скольжения. В диссертационной работе первый из методов определение коэффициентов запаса устойчивости является этот вид расчета по способу бокового давления.

Методика расчета сводится к поиску расчетного отсека с минимальным значением соотношения горизонтальных проекций удерживающих и сдвигающих сил (или соответствующих моментов сил). Отношение этих значений принимается за расчетный коэффициент запаса устойчивости (КЗУ). Под расчетным отсеком подразумевается часть откоса, ограниченная снизу заданной круговой дугой скольжения, а сверху – поверхностью откоса.

Расчетный отсек разбивается вертикальными линиями на «столбики» шириной менее одного метра. Силы, действующие на элементарный столбик отсека, определяются из силового треугольника, приведенного на рисунке 3.1 (формулы 1 - 3) [96, 97].

$$N = P \cdot \cos \alpha, \quad (3.1)$$

$$E = P \cdot \sin \alpha, \quad (3.2)$$

$$M_{\text{сдв}} = E \cdot R, \quad (3.3)$$

где: N – сила, нормальная к плоскости сдвига, кг;
 P – вес грунта в элементарном столбике, кг;
 E – сдвигающая сила, кг;
 α – угол наклона подошвы столбика к горизонту, градусы;
 $M_{\text{сдв}}$ – момент сдвигающих сил, кг;
 R – радиус кривой скольжения, м.

Коэффициент запаса устойчивости по каждой расчетной плоскости рассчитывается по формуле 4:

$$K_{\text{зу}} = \sum ((P_i \cdot \cos^2 \alpha_i + \xi \cdot P_i \cdot |\sin \alpha_i|) \cdot \text{tg } \varphi + b \cdot C \cdot K_{\text{тр}}) / \sum (P_i \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i), \quad (12)$$

где: $K_{\text{зу}}$ – коэффициент запаса устойчивости;
 P_i – вес породы в элементарном столбике (с учетом разнородности в слоях);
 ξ – коэффициент бокового давления породы в состоянии покоя;
 φ – угол естественного откоса для пород в основании столбика;
 α_i – угол наклона подошвы столбика к горизонту;
 b – ширина столбика;
 C – сцепление пород в основании столбика;
 $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трещиноватости пород в основании столбика.

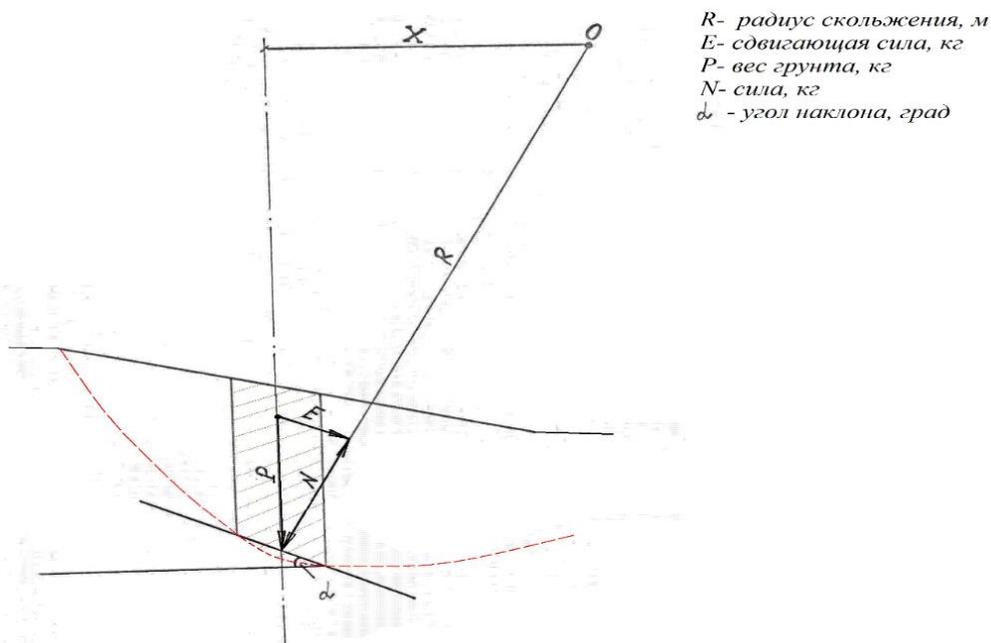


Рисунок 3.1 - Силы, действующие на элементарный столбик расчетного отсека

Напряжения, действующие на поверхности скольжения, обусловлены весом элементарного породного отсека, выделенного в пределах призмы возможного обрушения. Сдвигающие и нормальные силы, действующие на призму возможного обрушения, определяют путем интегрирования элементарных сил по поверхности скольжения. Удерживающие силы определяются с учетом прочностных характеристик пород горного массива в соответствии с теорией предельного равновесия.

В расчетах учитывались неоднородность породы, разделенной на слои с разными физико-механическими характеристиками, а также водонасыщенность – по положению линии депрессии.

Расчет производился также в программном продукте Slide по 9 способам: Ordinary/Fellenius, Bishop simplified, Janbu simplified, Janbu corrected, Spencer, Corps of Engineers 1, Corps of Engineers 2, Lowe-Karafiath, GLE/ Morgenstern-Price.

В программе реализовано несколько критериев разрушения: Кулона-Мора, Хоека-Брауна, обобщенный критерий Хоека-Брауна и т.д. [87, 98].

Наиболее распространенным вариационным методом анализа напряженно деформированного состояния склона является метод конечных элементов (МКЭ) [99].

Расчет по МКЭ условно можно разделить на следующие этапы:

- задание расчетной области с выделением характерных областей и механических свойств для выделенных областей;

- задание граничных условий на границах расчетной области и выделенных областей;
- разбиение расчетной области на конечные элементы (выбор типа и размера конечных элементов в выделенных областях);
- выбор характера деформирования материала (упругий, пластический и пр.) и критерия разрушения (Кулона-Мора, Друкера-Прагера, Хука-Брауна и др.);
- расчет напряжений (деформаций, перемещений), графическое представление и интерпретация результатов расчета

Расчет устойчивости методом конечных элементов производился в программном обеспечении Midas GTS NX методом анализа напряжений (SAM).

Данный метод сначала использует метод конечных элементов для расчетов напряженного состояния откоса, затем с использованием полученного решения коэффициент надежности для каждой виртуальной поверхности скольжения определяется на основе предположения о ее конфигурации с использованием теории предельного равновесия. Вычисленный таким образом минимальный коэффициент устойчивости для различных поверхностей скольжения становится расчетным коэффициентом.

3.2 Расчет устойчивости бортов Сарбайского карьера и выявление потенциально опасных участков

По изложенным выше методикам выполнены расчеты устойчивости бортов карьера по поперечным, продольным и диагональным инженерно-геологическим разрезам (Рисунок 3.2), которые являются характерными для прибортовой зоны Сарбайского карьера в конечном положении с учетом углубки до минус 500 м с выполнением числового математического моделирования и выявлением потенциально опасных участков.

На разрезы был нанесен проектный контур борта карьера и геологическое строение прибортового массива по данным разведочных скважин. Расчетные физико-механические свойства вмещающих пород Сарбайского карьера приведены в главе 2.6.

По каждому разрезу (профилю карьера) выполнены расчеты по нескольким поверхностям скольжения. При прогнозировании устойчивости откоса задача сводилась к отысканию в массиве наиболее слабой поверхности скольжения и определению по ней коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) [100, 101].

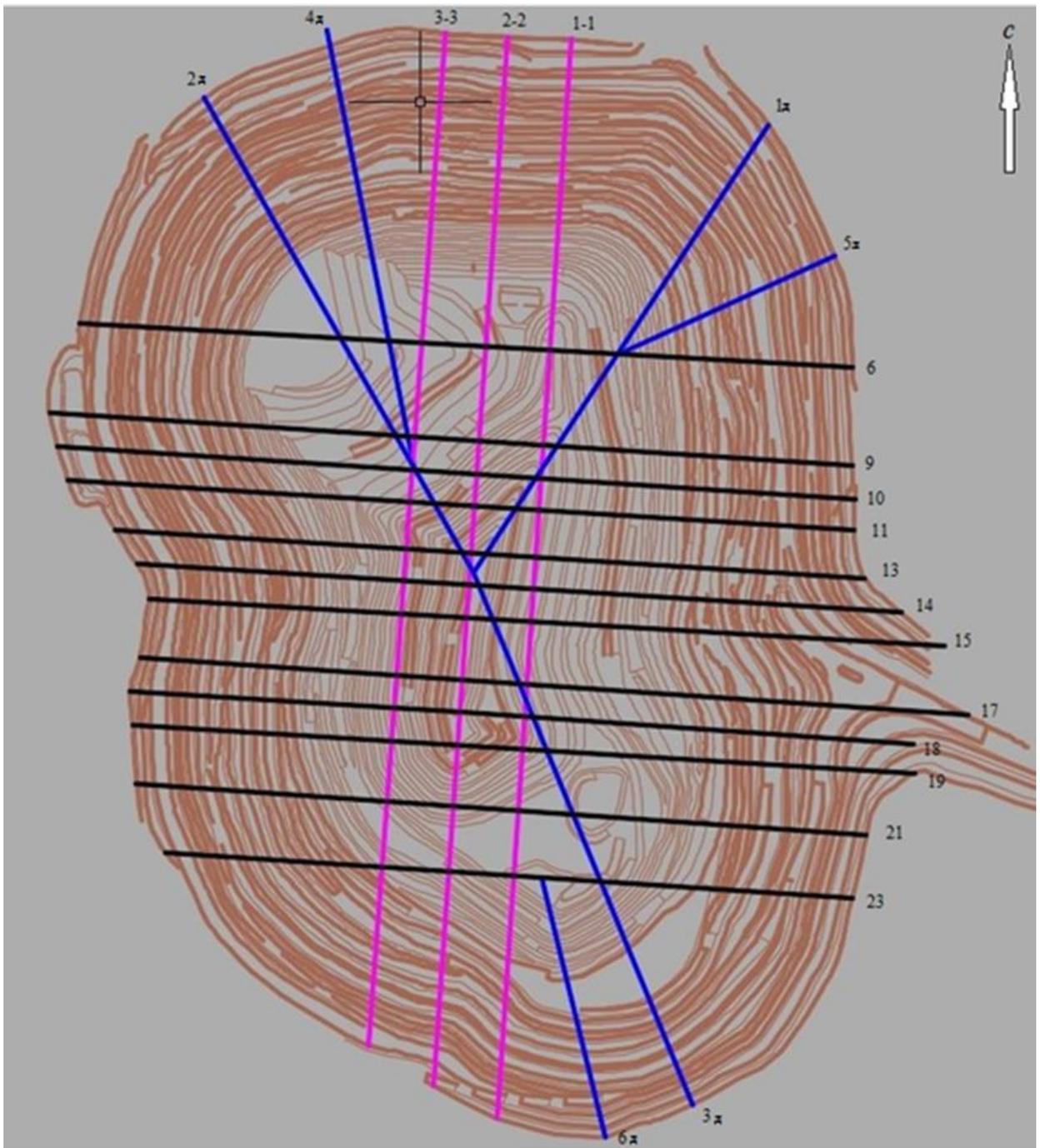


Рисунок 3.2- Расположение расчетных профилей

Результаты расчета по 11 профилю методом бокового давления представлены на рисунках 3.3 и 3.4, расчет в ПО Slide– 3.5 и 3.6, расчет в ПО Midas GTS NX – 3.7 и 3.8. По остальным расчетным профилям результаты расчетов сведены в таблицу 3.1.

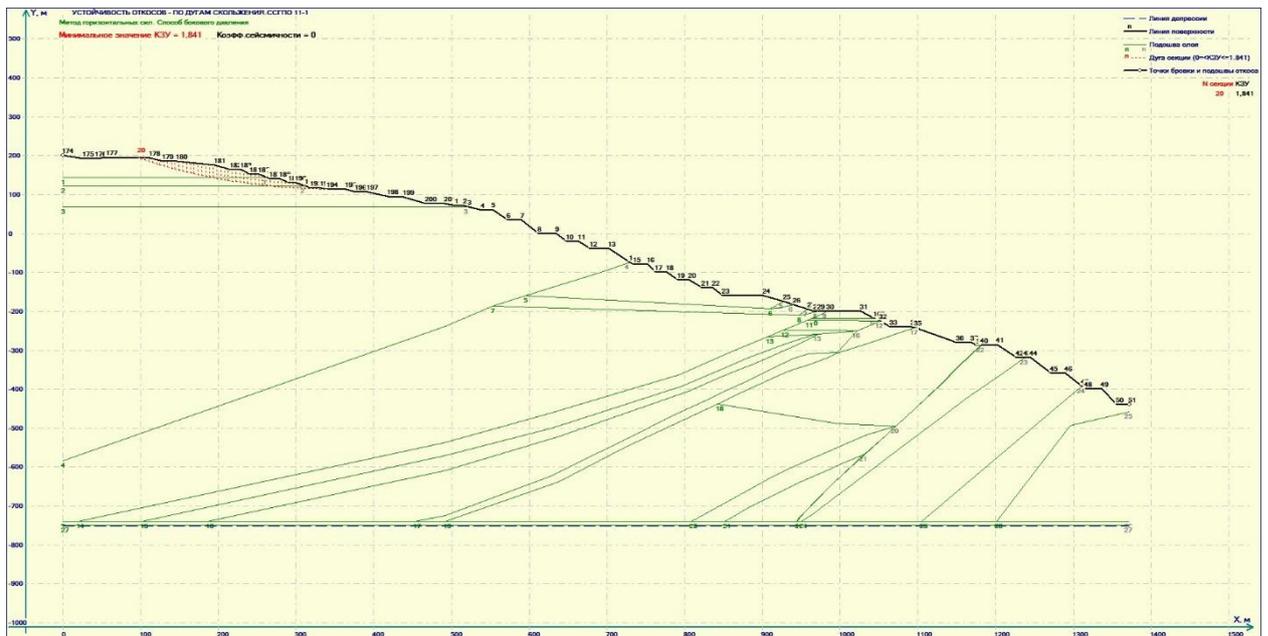


Рисунок 3.3 - Разрез 11 минимальное КЗУ=1.841 по наиболее слабой поверхности скольжения, Западный борт



Рисунок 3.4 - Разрез 11, минимальное КЗУ=1.549 по наиболее слабой поверхности скольжения, Восточный борт

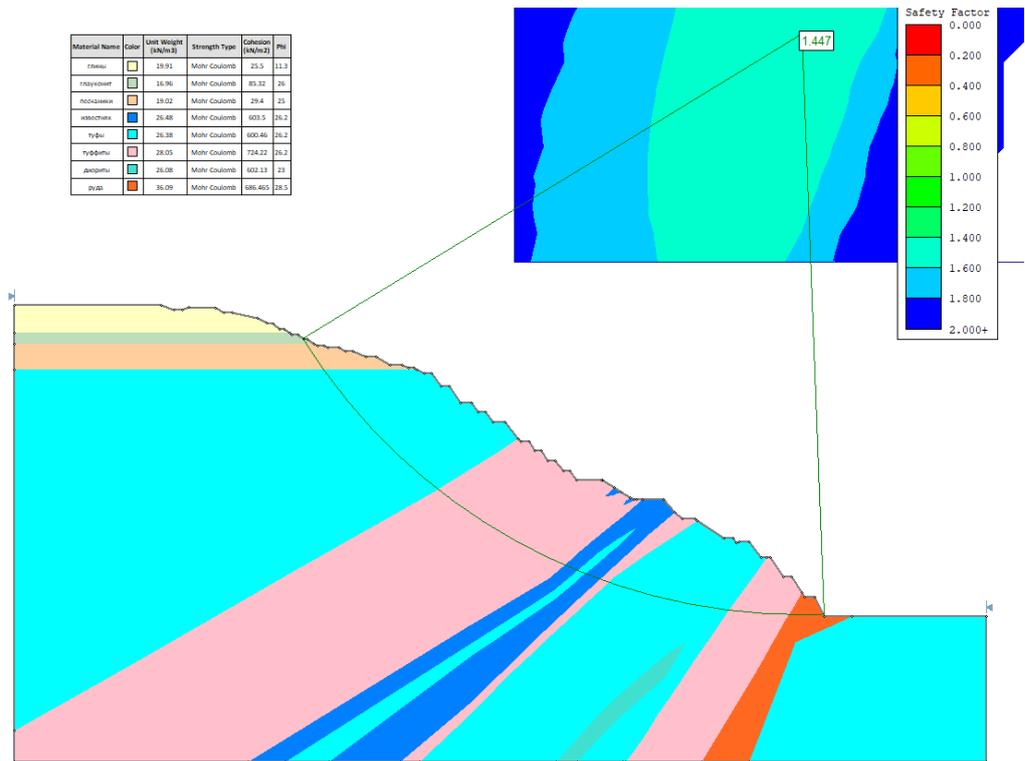


Рисунок 3.5 – Западный борт

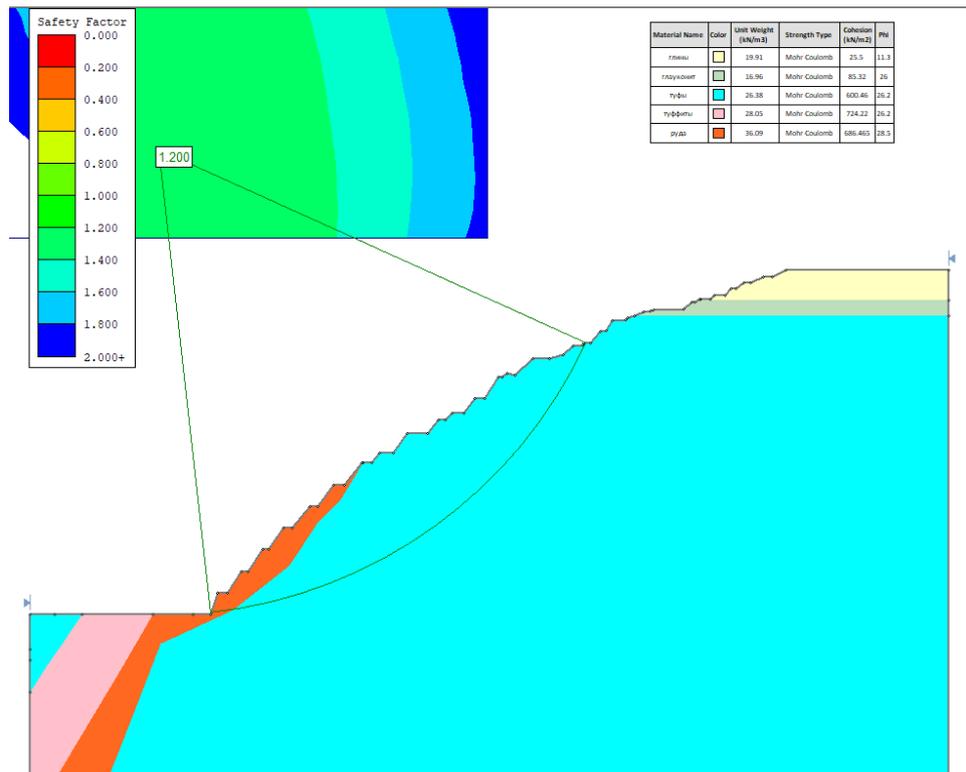


Рисунок 3.6 – Восточный борт

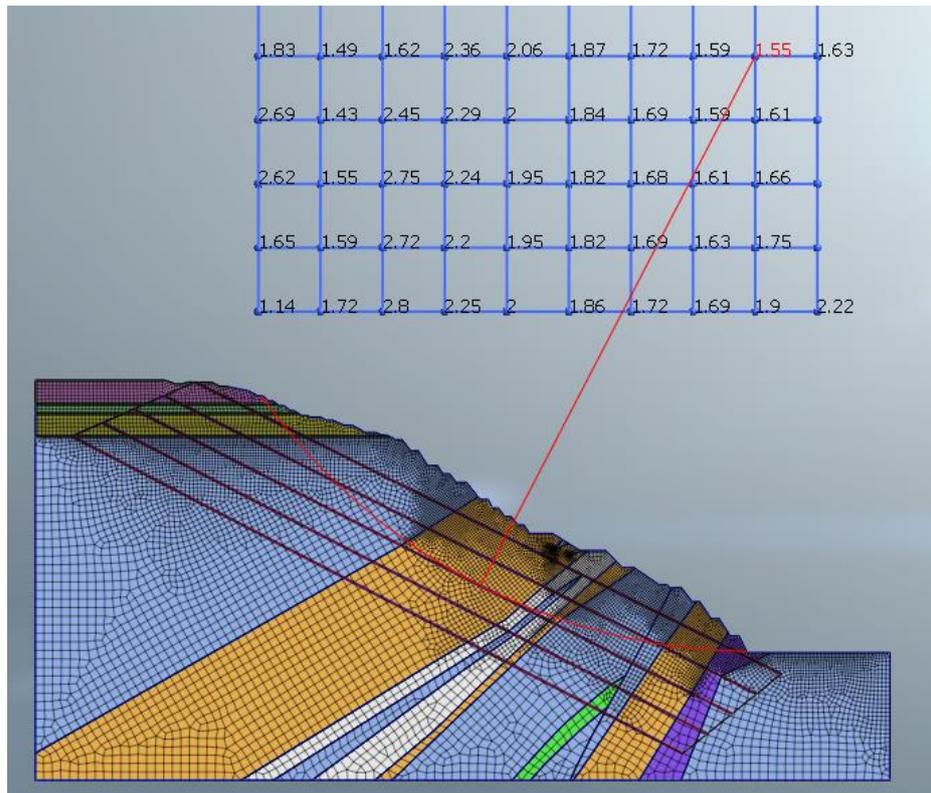


Рисунок 3.7 – Западный борт

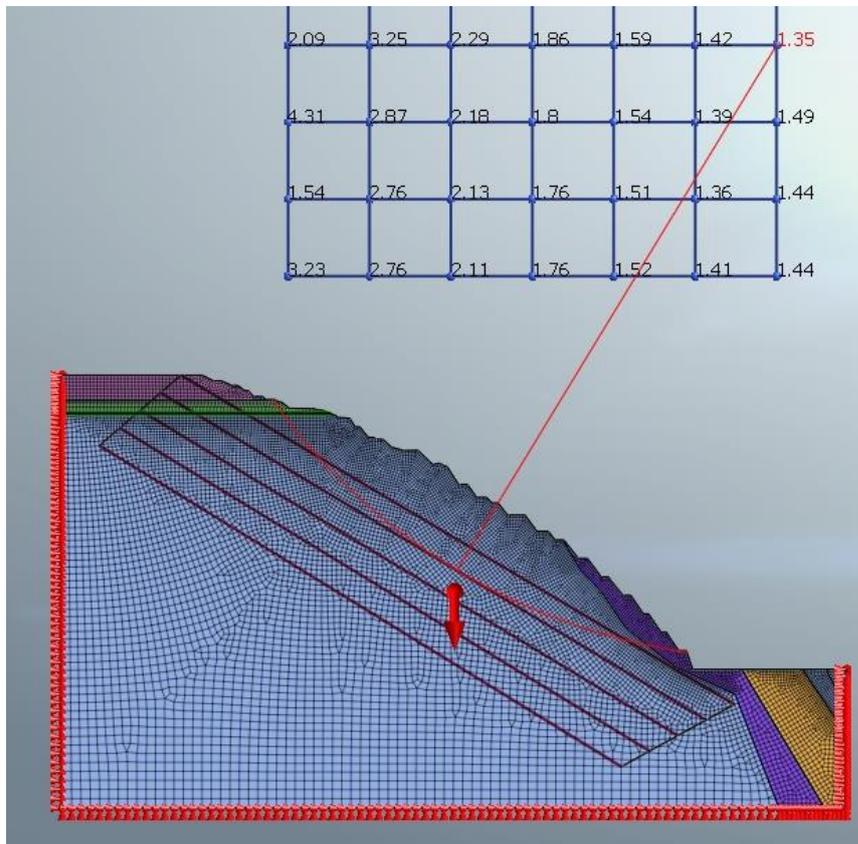


Рисунок 3.8 – Восточный борт

Таблица 3.1 – Результаты математического расчета устойчивости бортов Сарбайского карьера

№	Профиль	Борт	USTO DU	SLIDE	Midas GTS NX
1	6	Восточный	2,63	2,66	2,13
2		Западный	2,07	1,69/1,72	1,7
3	9	Восточный	2,5	0,995/1,6	1,27
4		Западный	1,95	1,4	1,35
5	10	Восточный	1,87	1,3/1,8	1,4
6		Западный	1,73	1,37	1,46
7	11	Восточный	1,84	1,45	1,14
8		Западный	1,55	1,2	1,35
9	13	Восточный	1,45	1,04	1,14
10		Западный	1,44	1,06	1,17
11	14	Восточный	1,45	1,09	1,16
12		Западный	1,32	1,0	1,05
13	15	Восточный	1,34	1,0	1,11
14		Западный	1,56	1,14	1,22
15	17	Восточный	1,42	1,0	1,07
16		Западный	1,54	1,18	1,36
17	18	Восточный	1,42	1,01	1,07
18		Западный	1,85	1,36	1,4
19	19	Восточный	1,44	1,22	1,14
20		Западный	1,76	1,39	1,44
21	21	Восточный	1,73	1,4	1,5
22		Западный	1,76	1,33	1,5
23	23	Восточный	1,45	1,77	2,0
24		Западный	1,7	1,5	1,6
25	I-I (продольный)	Южный	1,89	1,3/1,4	1,36
26		Северный	1,83	1,2/1,48	1,31
27	II-II (продольный)	Южный	1,46	1,14	1,19
28		Северный	1,90	1,23	1,3
29	III-III (продольный)	Южный	1,93	1,3	1,25
30		Северный	2,11	1,54	1,63
31	1 диагональный	Восточный	1,82	1,4	1,5
32	2 диагональный	Западный	1,68	1,8	1,9
33	3 диагональный	Восточный	2,07	1,6	1,54
34	4 диагональный	Западный	1,14	1,6	1,5
35	5 диагональный	Восточный	1,84	1,9	1,8
36	6 диагональный	Восточный	1,46	1,46	1,4

3.3 Результаты математического моделирования устойчивости бортов карьера

Расчет устойчивости бортов Сарбайского карьера с учетом увеличения глубины отработки до абсолютной отметки минус 500 м тремя различными методами показал, что борта карьера в целом являются устойчивыми, при этом коэффициенты устойчивости варьируются в пределах – от 1,0 до 2,66. В таблице 3.2 представлены участки с наименьшей устойчивостью по результатам многовариантного расчета устойчивости [59].

Таблица 3.2 – Наименее устойчивые участки бортов карьера, по результатам расчета

Программа расчета	Борт, участок	Расчетный профиль	Отметка борта неустойчивой зоны, м
USTO DU	Северо-западный	4 диагональный	+200 м до +150 м
SLIDE	Северо-восточный	9 поперечный	+200 до +150 м
	Западный борт	13, 14	+50 до -500 м
	Восточный борт	13, 15, 17, 18	-50/-100 до -500 м
Midas GTS NX	Верхние горизонты карьера	Северо-западный борт	+200 м до +100 м
	Западный борт	14	+50 до -500 м
	Восточный борт	17, 18	-50/-100 до -500 м

По таблице 3.2 видно, что неустойчивые участки находятся на верхних горизонтах карьера. Для скальной части коэффициенты запаса устойчивости по всех расчетным методам показали результаты больше 1, что говорит об устойчивом состоянии массива. Однако имеются участки со значением КЗУ близким к предельно допустимому. На рисунке 3.9 приведена объемная модель карты устойчивости Сарбайского карьера с учетом глубины отработки до абсолютной отметки минус 500 м. Наименее устойчивые участки по результатам математического расчета устойчивости [59]:

1. Верхние горизонты северного борта карьера на отметках от дневной поверхности до + 150 м (участок I).
2. Западный борт карьера в пределах 15 – 19 профильных линий в скальной части массива до дна карьера (участок II).
3. Восточный борт карьера в пределах 13 – 17 профильных линий на отметках -50/-100 до дна карьера (участок III).

Участок I (отметки +200 м до +150 м, северо-западная часть карьера) - зона слабой устойчивости по границе рыхлых отложений и коры выветривания в результате увлажнения откосов бортов.

Учитывая, что расчет критериального параметра (критерий Кулона-Мора) показал, что в обоих бортах карьера на всех рассматриваемых разрезах верхний слой рыхлых пород мощностью 100 - 120 м находится за пределом прочности при увеличении глубины отработки до минус 500 м для исключения деформационных процессов уступов рыхлых отложений и верхней трещиноватой зоны скальных пород необходимо обеспечить планово-профилактические меры безопасности:

- разгрузить прибортовой массив от застойных напорных вод с помощью системы горизонтальных скважин;
- разработать и обеспечить противооползневые мероприятия в песчано-глинистых отложениях в случаях их оплывания или обрушения.

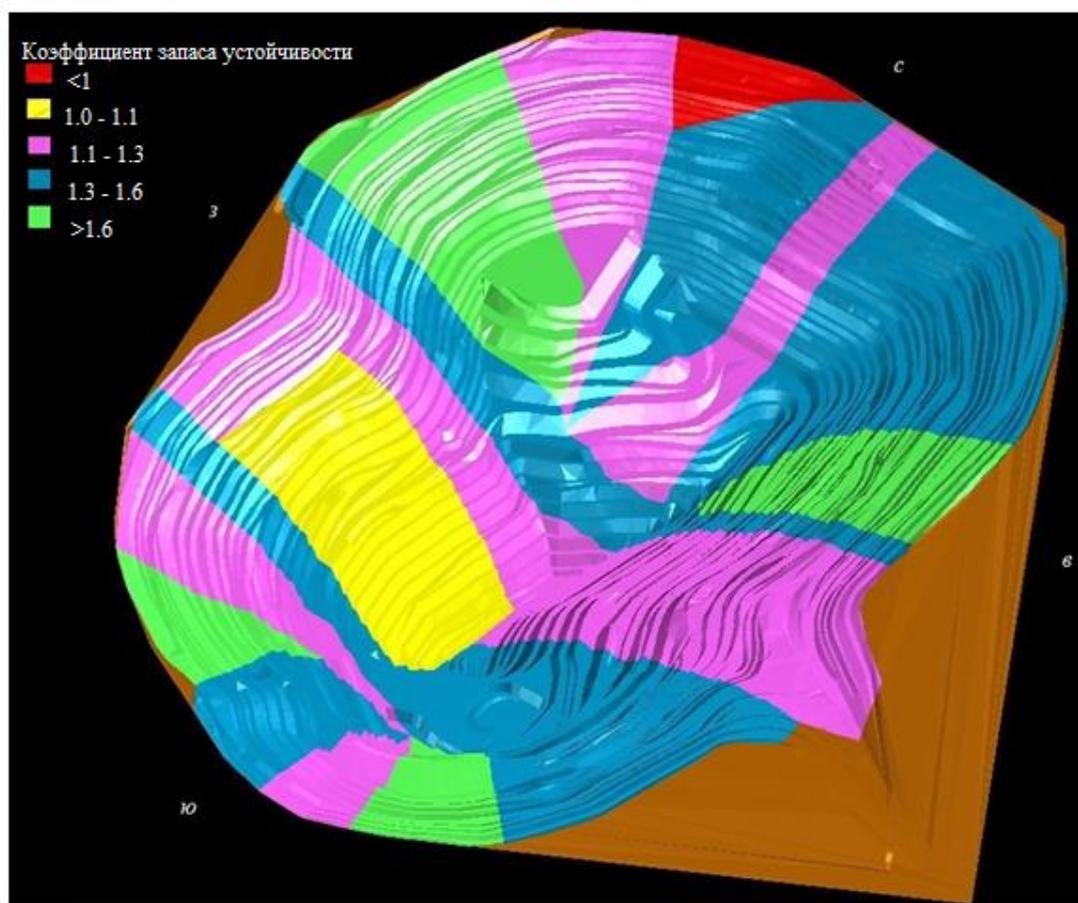


Рисунок 3.9 - Объемная модель карты устойчивости Сарбайского карьера

Участок II расположен на западном борту карьера (профили 15, 17, 18, 19) на отметках 100 м до минус 500 м. Массив скальных пород на данном участках неоднороден в плане и в разрезе, ослаблен системами трещин (несколько повышенной трещиноватостью обладают туфы и туффиты), наличие пересечений зон разрывных нарушений.

Многочисленными скважинами от разведочной линии 19 прослежено меридиональное нарушение, которое представлено зоной тектонически

раздробленных пород (нормальная мощность составляет 30 - 50 м) и внутри зоны хлоритизированные раздробленные породы с зеркалами скольжения чередуются со слабо нарушенными породами (Рисунок 3.10). Простираение его субмеридиональное (от 340 до 250), падение западное под углом 50° – 60°, на глубине угол падения возрастает до 70°. Нарушение представляет собой правый взбросо-сдвиг, оно делит участок месторождения на Западный и Восточный блоки.

По данным инженерно-геологической документации скважины 2 (19 профиль), порода на отметках от минус 240 м до минус 450 м с зонами тектонического дробления, местами наблюдаются пересечения с разрывным нарушением.



Рисунок 3.10 - Меридиональное нарушение, Западный борт

По разрезам 15,17,18,19 Западного борта на отметках от 100 м до минус 480 м формируется выпуклый профиль борта в предельном положении в основании которого залегают пропластки слабых пород (туфы, туффиты).

Слагающие откос слои пород в нижней части борта (туфы, туффиты) значительно отличаются по прочностным характеристикам от средневзвешенных в сторону уменьшения. Так, по данным исследования ФМС скважины 2 (19 профиль) для туфов на отметках минус 297 ÷ минус 335 м $\sigma_{сж} = 25,5 \div 47$ МПа и $\sigma_{раст} = 1 \div 3,75$ МПа, порода слабая, интенсивно трещиноватая, мощность слоя 38 м. На отметках минус 411 до минус 418 м порода интенсивно трещиноватая, которая проявляется в виде зон дробления. Порода более устойчивая с отметки минус 450 м.

Ниже приведены фотографии керна 2 скважины по глубине бурения 19,1 м ÷ 100,3 м (отметки - 260 м ÷ 340 м) (Рисунок 3.11).





Рисунок 3.11 - Фотографии керна скважины №2(западный борт),
отметки минус 260 м ÷ минус 340 м

Керн горизонтальных данных скважин 1 - 6 (западный борт, отметка минус 240 м, место бурения скважины 2) состоит из весьма рыхлых пород (туфов) с большим количеством поверхностей ослабления (Рисунок 3.12). Средние размеры кусков керна горизонтальных скважин 7 – 9, также пробуренных в западном борту карьера в массиве туффитов (Рисунок 3.13), равны $0,15 \div 0,25$ м.



Рисунок 3.12 - Фотографии керна, горизонтальные скважины №№ 1-4, западный борт



Рисунок 3.13 - Фотография керн, горизонтальная скважина № 9, западный борт

Таким образом, по разрезам 15,17,18,19 Западного борта на отметках от 100 м до минус 500 м формируется выпуклый профиль борта в предельном положении в основании которого залегают пропластки слабых пород (туфы, туффиты), что создает дополнительные благоприятные условия для раскрытия трещин и обрушений по потенциальным поверхностям. Учитывая, что с точки зрения обеспечения устойчивости откосов отдельных уступов данный участок - потенциально опасен, необходимо усилить меры безопасности по данному участку.

Рекомендации по мерам безопасности по Западному борту для профилей 15, 17, 18, 19:

- для выявления зон и участков возможного проявления разрушающих деформаций откосов необходимо проведение инструментальных наблюдений за деформациями бортов уступов в пределах профилей 15, 17, 18, 19;
- оперативная корректировка проекта отработки локальных участков при выявлении зон проявления слабых пород;
- применение инженерных мероприятий, направленных на предотвращение осыпобразования и локальных обрушений уступов или улавливания осыпей, не изменяя конструкции борта (анкерная сетка, торкретбетон в сочетании со штанговой крепью) [102].

Участок III (восточный борт) лежащий бок Сарбайского карьера подвержен деформациям сдвига в связи с наличием готовых поверхностей скольжения (поверхности ослабления, ориентированные параллельно откосам уступов). По данным натурных замеров (Таблица 3.2) определено, что для Восточного борта доминирующими являются трещины с углами падения $60^\circ - 90^\circ$ (более 60 %). Параметры борта (угол откоса) ограничиваются поверхностями ослабления- наличием 1 и 2 систем трещин, интенсивно проявляющихся в околорудных туфах, имеющих падение в сторону карьера.

Меры безопасности:

- применение противодеформационной (сейсмооберегающей) технологии заоткоски уступов на предельном контуре в скальных породах. Заоткоску производить по согласным трещинам с помощью отрезных щелей, взрыванием наклонных скважин под углом падения трещин (60°);

- при наличии протяженных согласно с откосом трещин и их возможного развития при действии массовых взрывов в карьере, а также процессов выветривания такие участки откосов с бермами необходимо укреплять для исключения их оползания или обрушения (железобетонные сваи, анкера, цементация, сетка, защитные и подпорные стенки, искусственные бермы, контрфорсы).

Таблица 3.3 – Данные по трещиноватости Восточного борта

№ скважины	Открытая трещиноватость						Общее количество открытых трещин	Закрытая трещиноватость
	0-30°		30° -60°		60° -90°			
	Кол-во трещин	%	Кол-во трещин	%	Кол-во трещин	%		
3	193	14,5	279	21	858	64,5	1330	797
4	125	18,7	110	16,4	432	64,7	667	1095
5	355	14	629	25	1535	61	2519	1926

Выводы по главе 3

При отработке запасов на всех бортах карьера необходимо учитывать наличие обводненной толщи рыхлых пород и глин. Происходит оплывание и обрушение откосов, сложенных меловыми песками, неогеновыми глинами и четвертичными суглинками.

Борта карьера в скальном массиве горных пород по результатам математического моделирования устойчивы, однако на трех участках значения, полученных КЗУ находятся в предельно допустимых значениях:

4. Верхние горизонты северного борта карьера на отметках от дневной поверхности до + 150 м (участок I).

5. Западный борт карьера в пределах 15 – 19 профильных линий в скальной части массива до дна карьера (участок II).

6. Восточный борт карьера в пределах 13 – 17 профильных линий на отметках -50/-100 до дна карьера (участок III).

Для этих участков при увеличении глубины отработки рекомендуется:

1. Проведение инструментального мониторинга [103, 104].

2. При проявлении деформационных процессов по результатам мониторинга проведение дополнительных работ по укреплению уступов на этих участках.

Полученные результаты математического моделирования устойчивости бортов карьера при увеличении его глубины до 700 метров, позволяют определить участки возможных деформаций, которые необходимо внести в единую базу данных, представленную геомеханической моделью.

4 ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

4.1 Общие сведения о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород рудных месторождений

Характер изменения напряженно-деформированного состояния массива в результате горных работ определяет устойчивость карьерных откосов – способность сохранять приданную им форму в течении определенного периода времени (срока службы бортов карьеров, уступов, отвалов) без развития критических (разрушающих) деформаций [49].

При открытой разработке месторождений в результате выемки сотен миллионов тонн горных пород происходит разгрузка днища и бортов карьера: породы, ранее находившиеся в условиях всестороннего сжатия, получают возможность деформироваться в сторону выработанного пространства.

Таким образом, для массива горных пород, непосредственно прилегающего к карьере, характерно наличие гравитационных, фильтрационных, тектонических, сейсмических сил, под суммарным воздействием которых происходит формирование напряженного состояния.

Форма и интенсивность проявления силового воздействия определяются такими факторами, как параметры открытой разработки, геологическое строение и структура массива, трещиноватость горных пород и тектоника района, гидрогеологические, климатические условия, литологический состав пород, технология ведения горных работ, способ вскрытия и система разработки. Основным условием перехода откоса в предельное состояние (на котором базируется большинство методов оценки устойчивости) является равенство «сдвигающих» и «удерживающих» сил, т.е. достижение действующими напряжениями предела прочности (пластичности). В этом случае применение теории линейно-деформируемого тела (упругости) для изучения напряженно-деформированного состояния дает значительные погрешности. Однако в условиях действия ряда силовых факторов для изучения закономерностей проявления каждого в отдельности правомерно применение теории линейно-деформируемого тела при допущении, что ни один из них не вызывает предельного состояния. Такая постановка тем справедливее, чем больше силовых факторов участвуют в формировании суммарного напряженно-деформированного состояния. Это открывает широкие возможности для аналитического и экспериментального изучения влияния отдельных факторов с целью прогнозирования состояния и управления устойчивостью откосов на карьерах [49].

В связи с тем, что приведенные силовые факторы не зависят друг от друга, для рассмотрения их совместного воздействия применим принцип суперпозиции, согласно которому сумма решений также является решением.

В настоящее время существуют следующие гипотезы напряженного состояния массива горных пород:

- гидростатическая

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = m\gamma H_{\text{ст}} \quad (4.1)$$

- бокового распора

$$\sigma_1 = \gamma H_{\text{ст}}; \sigma_2 = \sigma_3 = m\gamma H_{\text{ст}} \quad (4.2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа;

$H_{\text{ст}}$ – высота столба пород от рассматриваемого элемента по поверхности, м

γ – плотность горных пород, т/м³;

m – коэффициент бокового распора:

для упругих материалов

$$m = \mu / (1 - \mu) \quad (4.3)$$

для сыпучих материалов

$$m = tg^2(45 - \frac{\varphi}{2}) \quad (4.4)$$

где μ – коэффициент Пуассона;

φ – угол внутреннего трения, градусы.

В условиях искусственной выемки (карьера), вне зависимости от естественного напряженного состояния массива, породы деформируются в сторону выработанного пространства. При этом наиболее существенную разгрузку испытывает днище выемки. Деформации разгрузки дна направлены вертикально вверх, а подоткосной части — «вперед-вверх» [49].

Более сложная картина наблюдается в бортах выемки, где наряду с деформациями разгрузки, направленными «вперед-вверх», при определенных параметрах откоса возникают деформации, направление которых можно интерпретировать как «вперед-вниз». Поэтому в зависимости от крутизны откоса и глубины выемки H можно наблюдать как поднятие поверхности, так и ее опускание. В общем случае верхняя часть откоса выемки испытывает смещение «вперед-вниз», а нижняя — «вперед-вверх». Зона влияния выемки в плане составляет (1,5—2) H от верхней бровки откоса и по глубине значительно превышает H [49].

В последние годы в результате натуральных измерений, проведенных как в СНГ, так и за рубежом, обнаружены значительные по величине сжимающие горизонтальные напряжения, превышающие вертикальную составляющую массы пород налегающей толщи.

Наличие тектонических сил обнаружено практически во всех железорудных бассейнах: Курской магнитной аномалии (Д.М. Казикаев), Кольский полуостров (Г.А. Марков), Урал и Казахстан (Н.П. Влох), Кривой Рог (П.А. Богданов), Горная Шория (П.В. Егоров). Однако существующая

методика исследований не позволяет выделить тектоническую составляющую в чистом виде. Кроме того, единичные измерения напряжений в массиве горных пород проводятся из горных выработок, где неизбежно влияние как самих горных выработок, так и ряда естественных факторов (трещины, включения и т. п.) [49].

Напряжённо-деформированное состояние породных массивов определяется, прежде всего, весом слагающих массив горных пород. Помимо этого, в породном массиве могут действовать зачастую весьма значительные тектонические напряжения. В связи с этим принято выделять два наиболее характерных типа НДС породных массивов.

Гравитационный тип НДС, при котором в нетронутом массиве максимальная компонента главных напряжений вертикальна и определяется собственным весом пород, промежуточная и минимальная компоненты - горизонтальны и определяются боковым отпором от собственного веса пород в соответствии с той или иной моделью среды. Гравитационный тип НДС характерен для массивов сыпучих, слабосвязных пород, моренных отложений, залегающих на небольшой глубине [49].

Гравитационно-тектонический тип НДС, при котором в нетронутом массиве максимальная и промежуточная компоненты главных напряжений горизонтальны и определяются тектоническими силами, действующими в рассматриваемом регионе, а минимальная компонента ориентирована в вертикальной плоскости. При этом абсолютное значение минимальной компоненты главных напряжений определяется, как собственным весом вышележащих пород, так и боковым отпором максимальной и промежуточной компонент главных напряжений. Гравитационно-тектонический тип НДС характерен для массивов скальных пород в особенности залегающих в районах с гористым рельефом, в зонах активно идущих горообразовательных процессов. Существуют данные о том, что ориентировочно для 60% массивов пород рудных месторождений характерен гравитационно-тектонический тип НДС [105 - 108, 2].

На основе обобщения сведений о тектонических напряжениях А.И. Ильиным сформулированы основные закономерности их проявления:

- тектонические напряжения действуют в горизонтальной плоскости или близкой к ней;
- направление действия тектонических напряжений примерно постоянно для данного региона;
- тектонические напряжения наблюдаются в скальном массиве горных пород;
- величина тектонических напряжений для расчетов ориентировочно может быть принята постоянной с увеличением глубины, и она не влияет на величину вертикальной составляющей от массы пород, которая для нетронутого массива принимается равной $\gamma H_{ст}$.

4.2 Натурные измерения напряженно-деформированного состояния массива горных пород Сарбайского карьера

Для проведения исследования напряжений в краевых частях рабочих бортов Сарбайского карьера в процессе полевых инженерно-геологических изысканий на 3-х выбранных площадках пробурено по 9 горизонтальных скважин (длиной 8 метров каждая). Общий объем работ составил 27 скважин и 216 п. м бурения.

Контроль напряжений в прибортовом массиве осуществлялся на основе использования эффекта Кайзера горных пород при нагружении стенок скважины гидродомкратом Гудмана [109-113].

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 [111].

По результатам экспериментов строятся графики зависимости давления в гидросистеме от времени и относительного изменения диаметра скважины (Рисунок 4.1). На диаграммах деформирования можно выделить несколько характерных стадий (рис. 2.5, б). На первой стадии (участок 1-2) в процессе нагружения происходит раздавливание домкратом неровностей стенок скважины и остатков бурового штыба, уплотнение околоскважинного массива пород. Участок 2-3 соответствует полному контакту нажимных пластин со стенками скважины. На стадии 3-4 осуществляется плавное снижение нагрузки действующей на стенки скважины путем сброса давления в гидросистеме домкрата специальным клапаном на ручном насосе. Далее производится второй цикл нагружения, на начальной стадии которого можно опять выделить участок уплотнения горных пород (4-5). Затем следует линейно-упругое деформирование околоскважинного массива (5-6), плавно переходящее в стадию упругопластического (6-7) [114, 115].

Измерения напряжений проводились на трех экспериментальных участках (Рисунок 4.2). Первый экспериментальный участок располагается в западной части карьера (гор. -240 м), второй и третий участки располагаются в северо-восточной части карьера (гор. -240 м и гор. -320 м). Каждый экспериментальный участок включает три замерные станции по три скважины. Всего на 9 замерных станциях исследовано 27 скважин длиной 6-8 м (Рисунок 4.3). Скважины диаметром 76 мм бурились в стенках уступов в горизонтальной плоскости. Измерялись горизонтальные напряжения, действующие вдоль борта карьера [114].

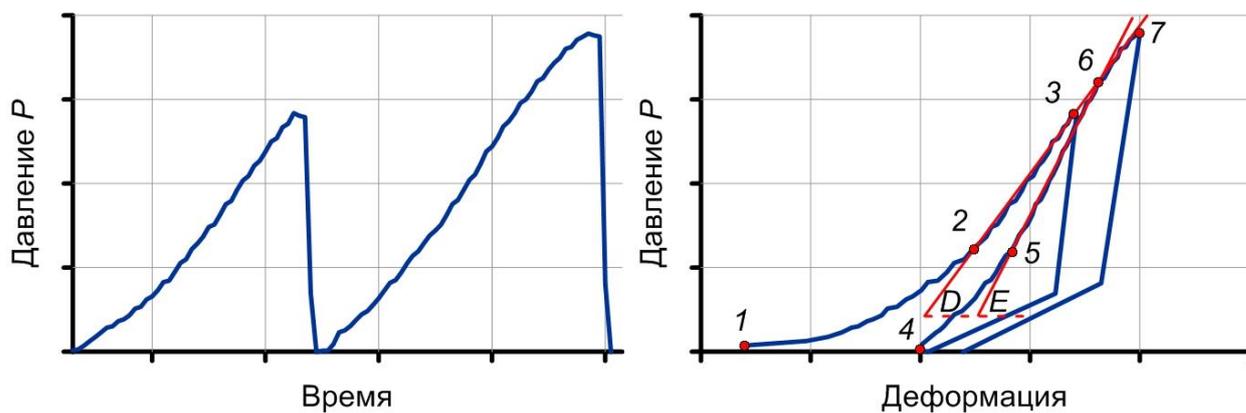


Рисунок 4.1 - Характерные зависимости давления (а) и относительной деформации (б) от времени при испытании стенок скважины гидродомкратом

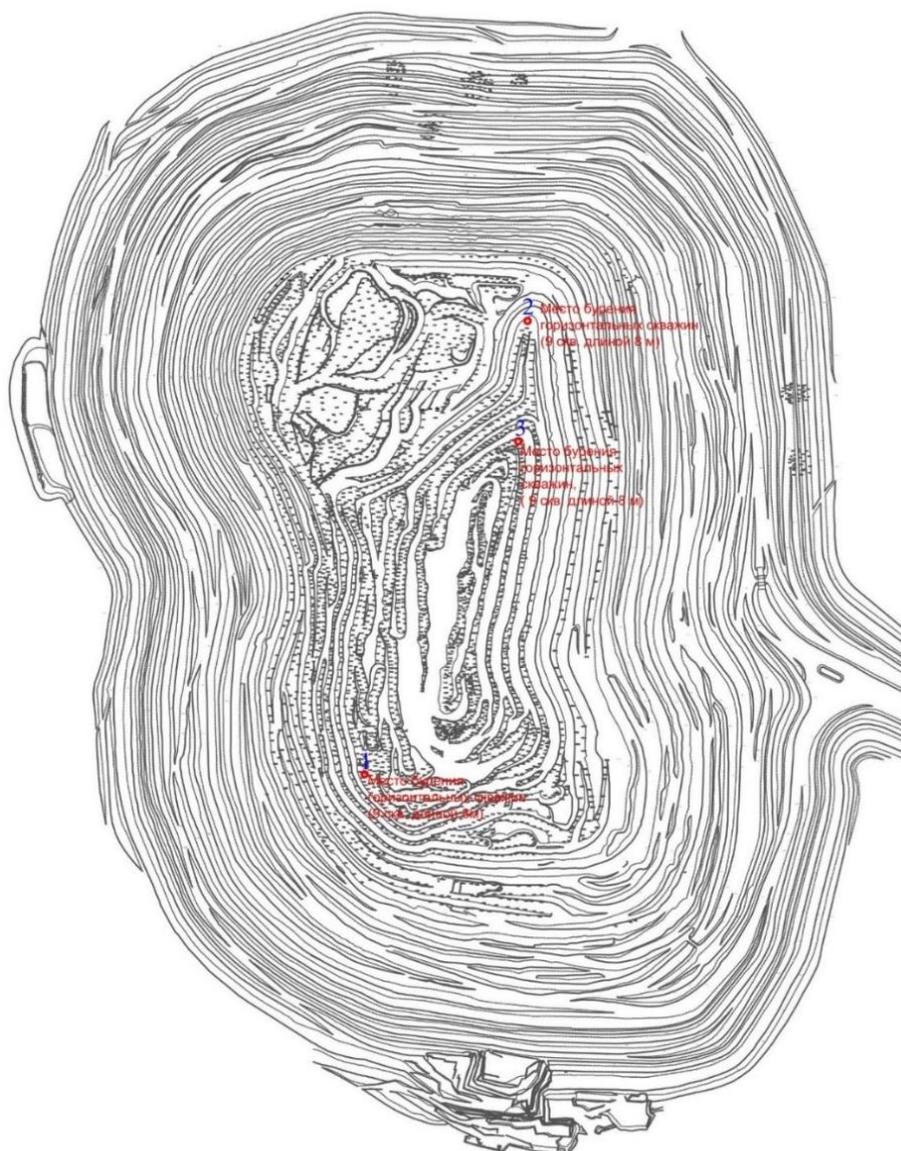


Рисунок 4.2 - Местоположение экспериментальных участков

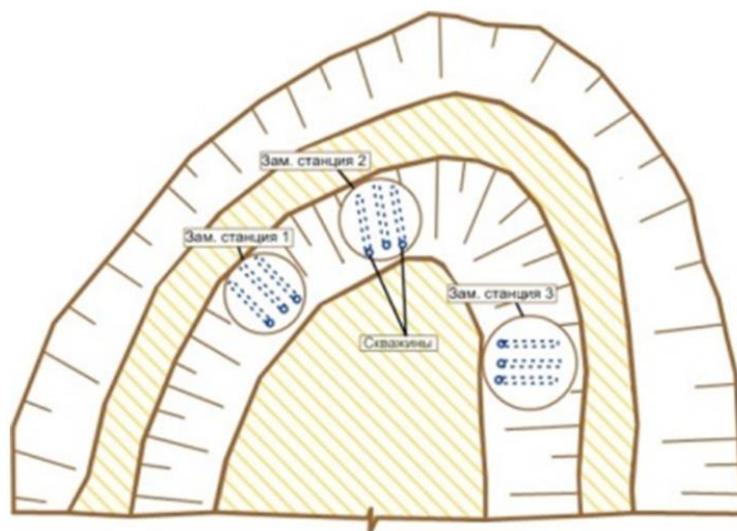


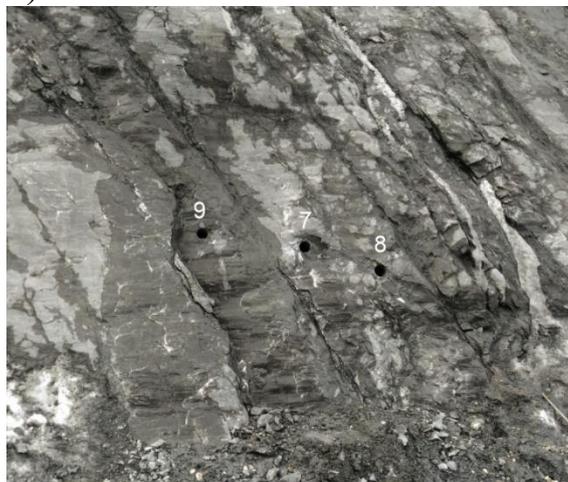
Рисунок 4.3 - Схема расположения замерных станций на участке

Экспериментальный участок 1. На первой замерной станции (скважины 1 - 3) породы представлены в основном метаморфизированными туфами темно-зеленого цвета с вкраплениями магнетита, хлорита, пирита и др. пород (Рисунок 4.4, а). Скважины 4 - 9 представлены мраморизированным известняком темно-серого цвета (Рисунок 4.4, б).

а)



б)



а) замерная станция 1, б) замерная станция 3
Рисунок 4.4 – Экспериментальный участок №1

Распределение напряжений по длине скважин неравномерное: наблюдается чередование участков с повышенными и пониженными уровнями напряжений, что обусловлено блочным строением массива. Горизонтальные напряжения изменяются в широком диапазоне от 2-3 до 10-12 МПа. Средняя величина горизонтальных напряжений на первом экспериментальном участке за зоной опорного давления составляет 4 МПа [113, 114].

Экспериментальный участок 2. На втором экспериментальном участке породы представлены в основном туфами темно-серого цвета с прослоями туффитов андезитового состава (Рисунок 4.5). Структура пород мелкозернистая пористая текстура – массивная. По всему интервалу скважин отмечен магнетит в виде вкраплений [113, 114].



Рисунок 4.5 – Замерная станция 4, экспериментальный участок № 2

Горизонтальные напряжения изменяются в диапазоне от 2 - 4 до 12 МПа. Средняя величина горизонтальных напряжений на втором экспериментальном участке за зоной влияния опорного давления составляет около 6 Мпа [113, 114].

Экспериментальный участок 3. На третьем экспериментальном участке породы представлены в основном сплошной магнетитовой рудой, а также метаморфически измененными туфами темно-зеленого цвета (Рисунок 4.6). В интервале глубин 5 - 8 м отмечается 5 - 7 трещин на погонный метр скважины. Средняя величина горизонтальных напряжений на третьем экспериментальном участке за зоной влияния опорного давления составляет около 8 Мпа [113, 114].

Таблица 4.1 – Горизонтальные напряжения, действующие на Сарбайском карьере

Абсолютная отметка экспериментального участка, м	Расстояние от устья скважины вглубь массива, м						
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
-240	7,4	5,03	4,92	5,16	4,95	4,5	4,34
-280	7,21	6,52	6,83	4,94	6,37	6,14	5,33
-340	10,28	6,58	7,73	8,14	8,16	8,42	8,83



Рисунок 4.6 – Замерная станция 7, экспериментальный участок № 3
 Результаты натурного определения горизонтальных напряжений
 Сарбайского карьера представлены в таблице 4.1 и на рисунке 4.7.

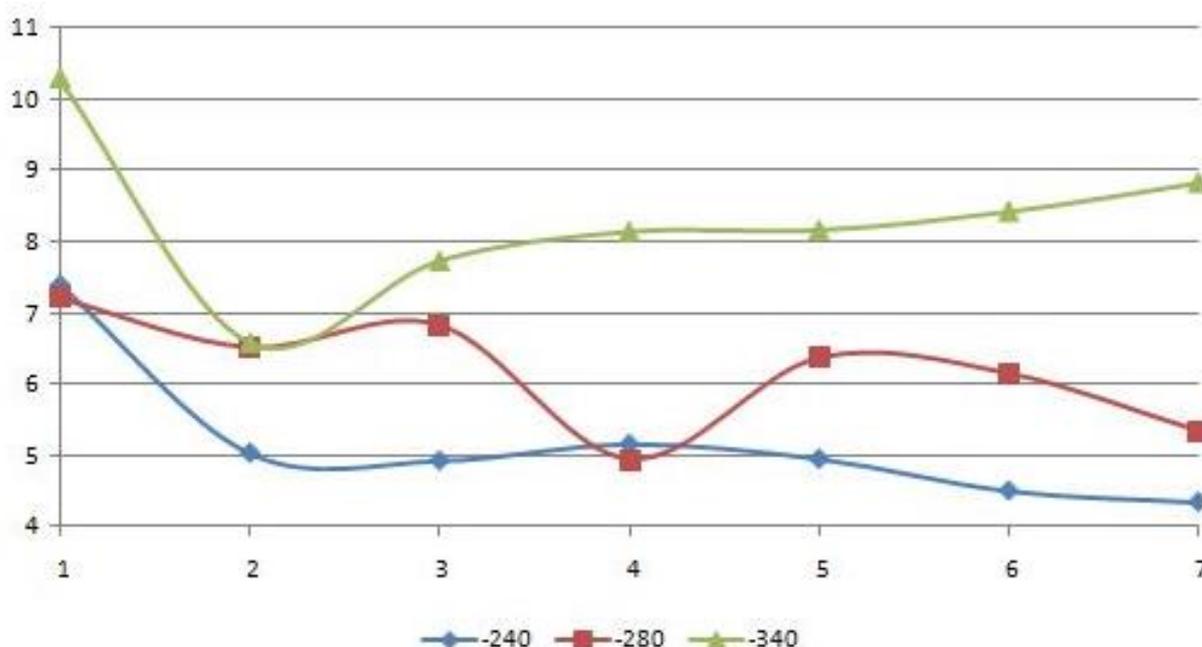


Рисунок 4.7 – Горизонтальные напряжения массива горных пород

4.3 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния пород прибортового массива

В расчетной схеме учитывались основные особенности строения подработанного массива, действие массовых сил, граничные условия: статические и кинематические.

Кинематические граничные условия формулируются следующим образом: верхняя граница (дневная поверхность) принимается свободной, выбранные размеры исследуемой области обеспечивают равенство нулю на

нижней границе вертикальных, а на боковых границах – горизонтальных перемещений.

Действие гравитационных сил обуславливаются массовыми силами интенсивностью γ_i (γ_i – удельный вес пород i – го элемента геологического разреза).

Задание нулевых горизонтальных смещений на боковых границах для нетронутого горными работами массива ($\varepsilon_x = \varepsilon_z = 0$) определяет литостатическое исходное поле напряжений. В этом случае значения коэффициентов бокового распора, характеризующие отношение горизонтальных напряжений σ_x и σ_z к вертикальному $\sigma_y = \gamma H$, определяются соотношением

$$\lambda_x^L = \lambda_z^L = \frac{\mu}{1 - \mu}, \quad (4.5)$$

где λ_x^L, λ_z^L – значения коэффициентов бокового распора (литостатическое напряженное состояние), μ – значение коэффициента Пуассона.

Вертикальное напряжение нетронутого горными работами массива, обусловленное гравитационными силами, реализованное в рассматриваемой точке массива (y^e, y^0 – соответственно значения вертикальной координаты точки и земной поверхности; $\gamma(y)$ зависимость удельного веса пород от координаты y).

Математическая модель содержит следующие исходные данные: физико-геологическую модель; параметры карьера; комплекс физико-механических свойств всех литологических разностей месторождения.

Расчет напряженно-деформированного состояния производился методом конечных элементов. На рисунках 4.8 – 4.10 представлены результаты расчета моделирования НДС в трехмерной постановке.

На рисунке 4.8 представлен результат расчета горизонтальных напряжений, действующих вкрест простирания рудных тел. Значения максимальных напряжений приконтурного массива достигают 8,5 – 10,5 МПа. Зона концентрации максимальных горизонтальных напряжений расположена в юго-западной части карьера на глубине 700 метров.

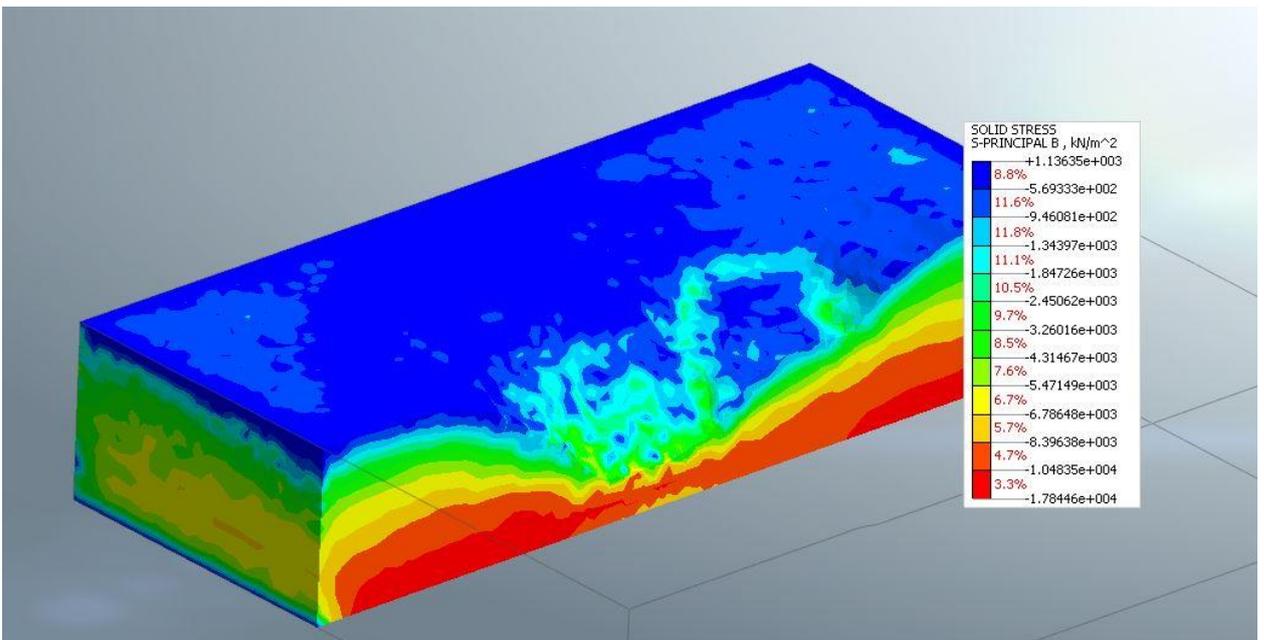
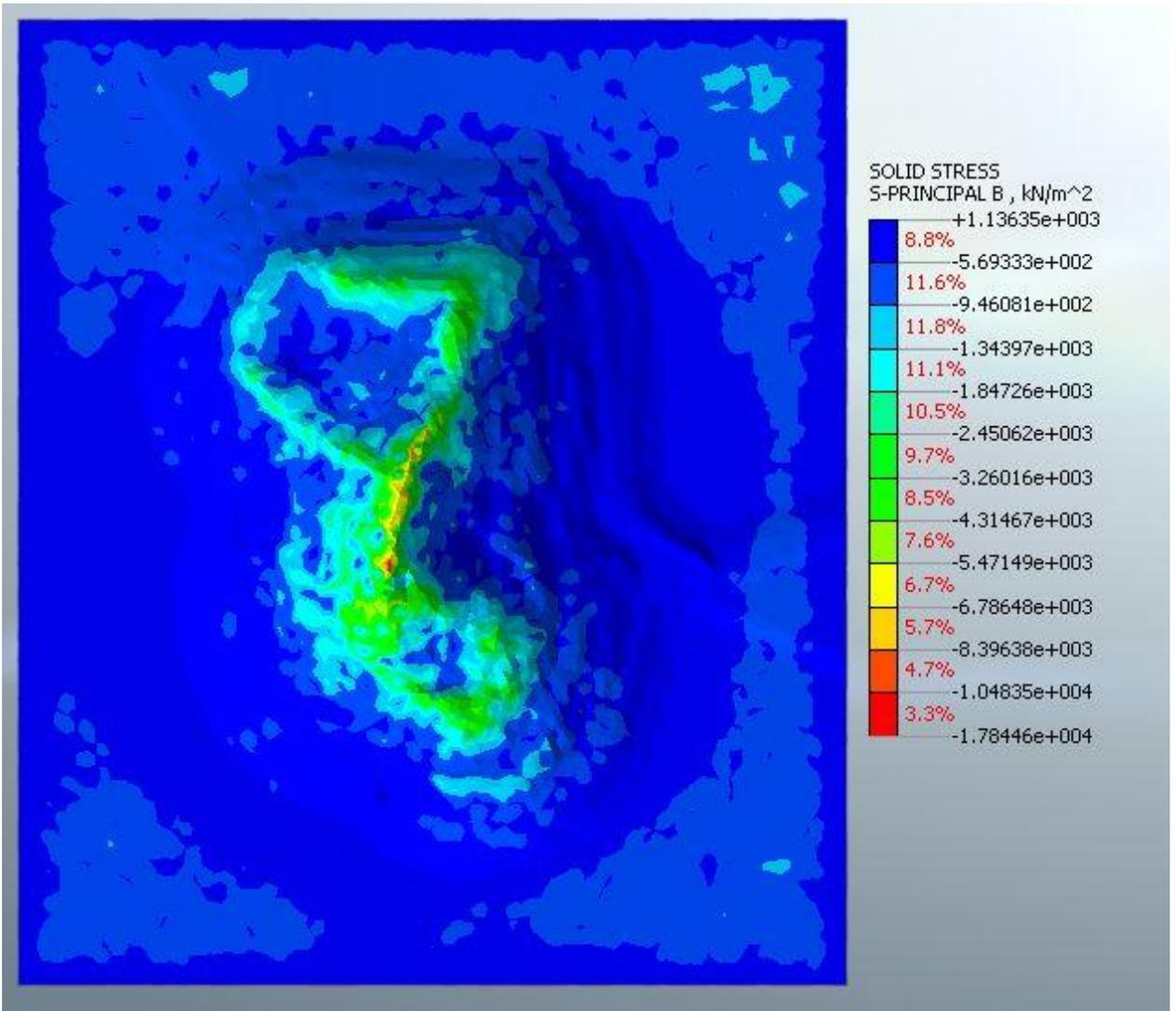


Рисунок 4.8 – Трехмерное моделирование НДС Сарбайского карьера (горизонтальные напряжения, действующие вкострости рудных тел)

На рисунке 4.9 представлены результаты моделирования горизонтальных напряжений, действующих по простиранию рудных тел. Значения максимальных напряжений достигают 6,8 – 8,4 МПа.

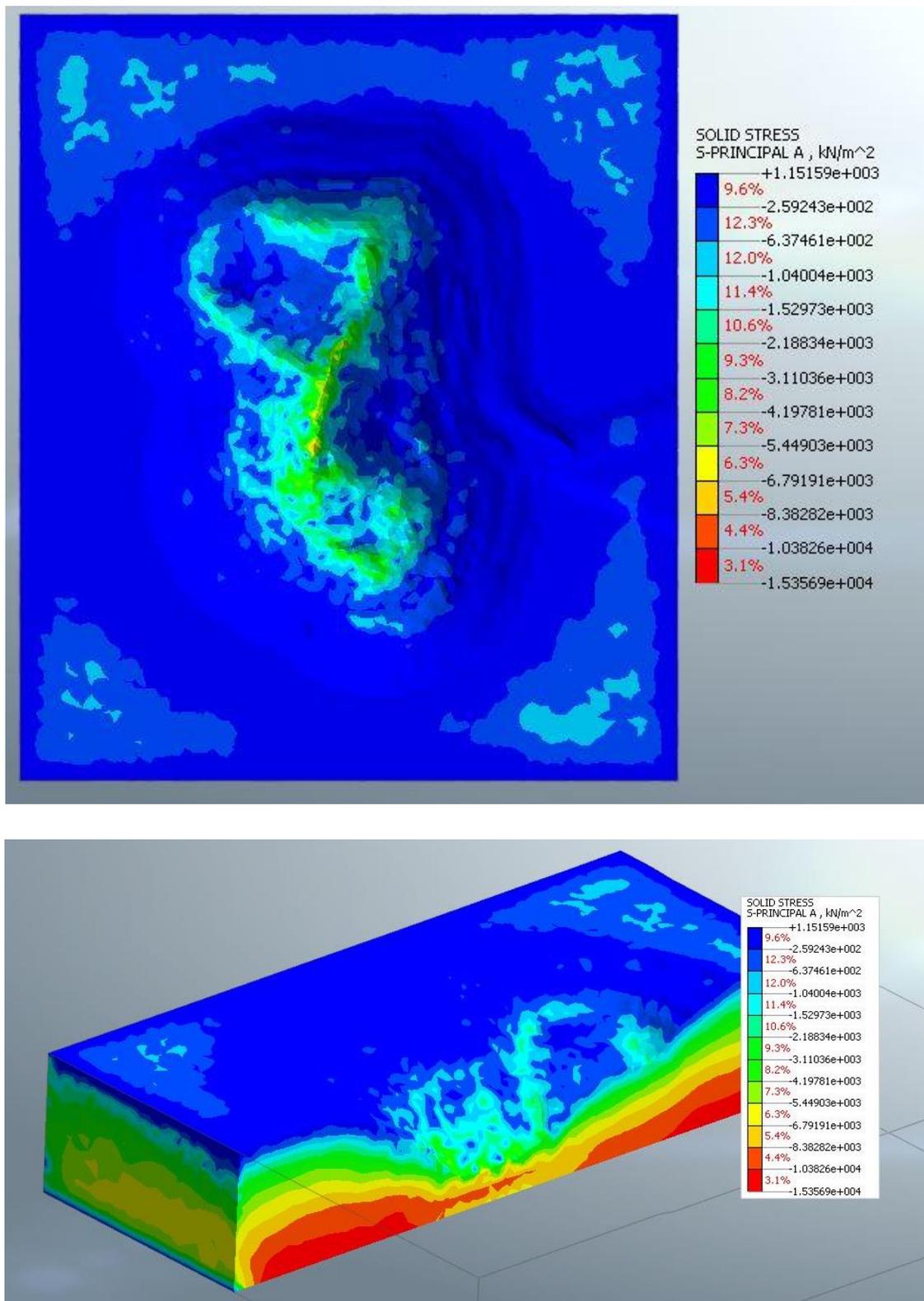


Рисунок 4.9 – Трехмерное моделирование НДС Сарбайского карьера (горизонтальные напряжения, действующие по простиранию рудных тел)

На рисунке 4.10 представлены результаты моделирования вертикальных напряжений. Значения максимальных напряжений достигают 11,5 – 14,1 МПа.

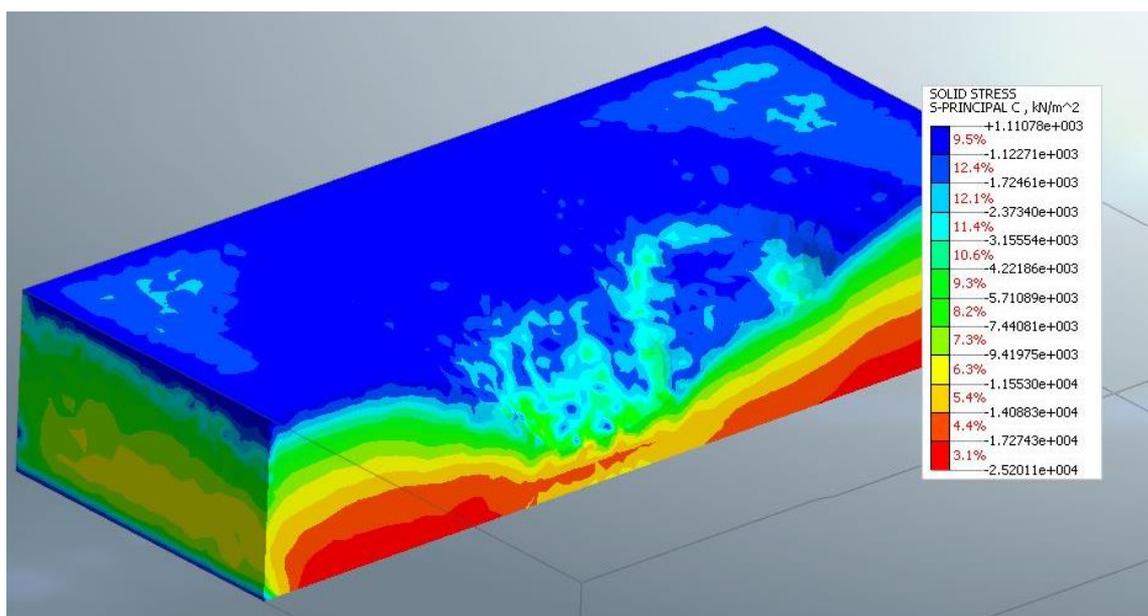
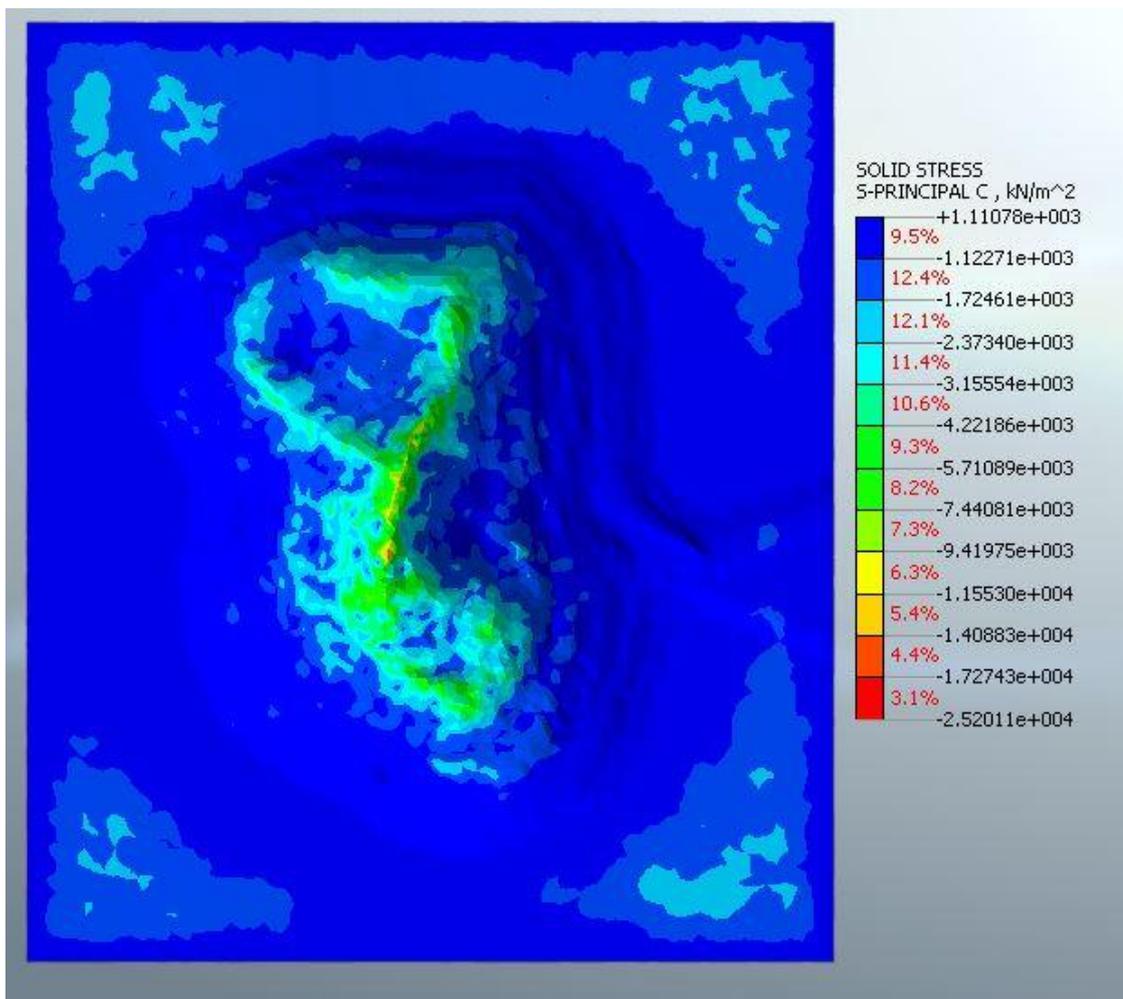


Рисунок 4.10 – Трехмерное моделирование НДС Сарбайского карьера (вертикальные напряжения)

По результатам математического моделирования напряженно-деформированного состояния Сарбайского карьера выявлено в днище карьера образуются максимальные концентрации напряжений, при этом значения вертикальных напряжений больше, чем горизонтальные в 1,3 и 1,7 раз соответственно для напряжений, действующих вкрест и по простиранию рудных тел.

По результатам моделирования максимальные величины касательных напряжений фиксируются в нижней приконтурной части бортов карьера на расстоянии 100–150 м от дна карьера. При этом максимум касательных напряжений, равный 2,8 МПа зафиксирован в западном борту карьера по разрезу 15 (Рисунок 4.11). Места локализации максимумов касательных напряжений в бортах карьера являются потенциально наиболее опасными с точки зрения обеспечения устойчивости откосов отдельных уступов.

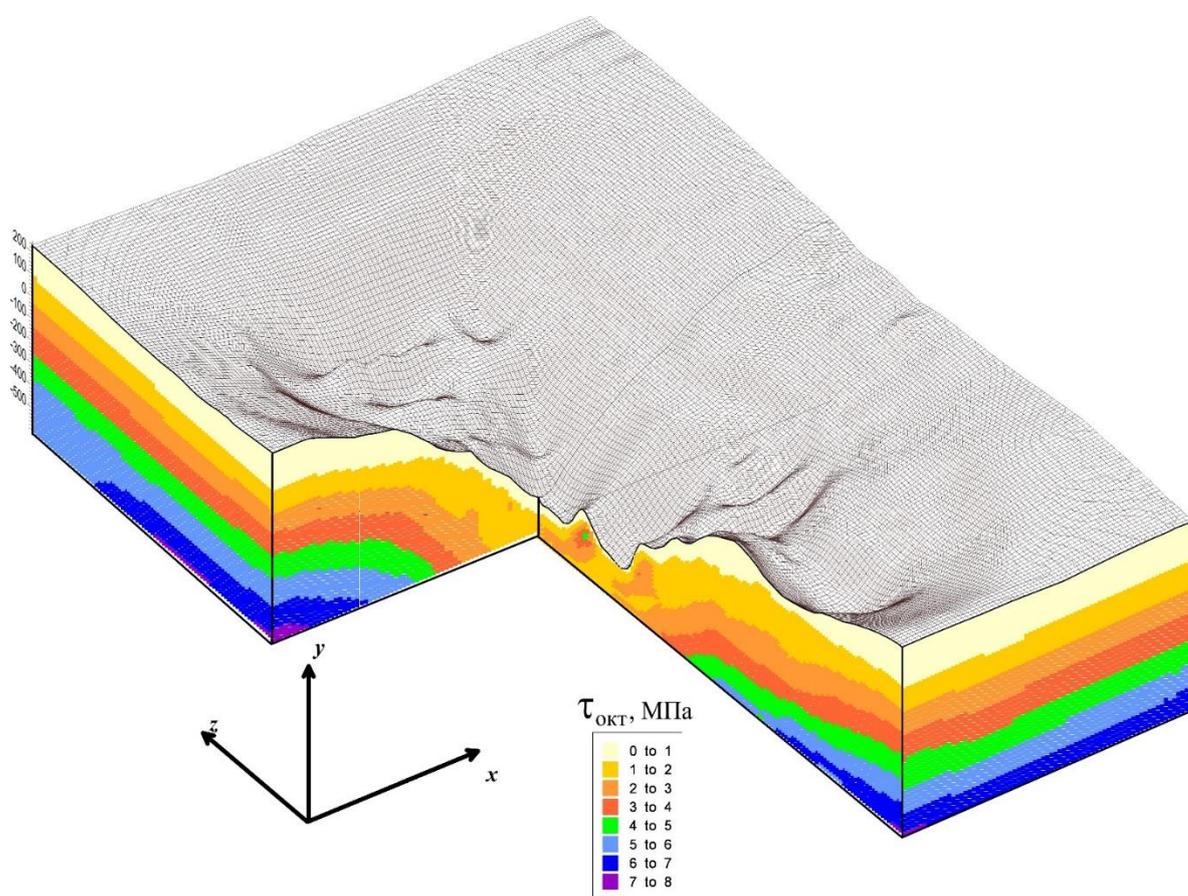


Рисунок 4.11 – Объемное распределение касательных октаэдрических напряжений Сарбайского карьера

По результатам объемного моделирования НДС Сарбайского карьера при увеличении глубины его отработки до абсолютной отметки дна карьера минус 500 западный борт в районе разрезов 15 – 18 является наиболее неустойчивым. На этом участке существует вероятность возникновения деформационных процессов (Рисунок 4.12).

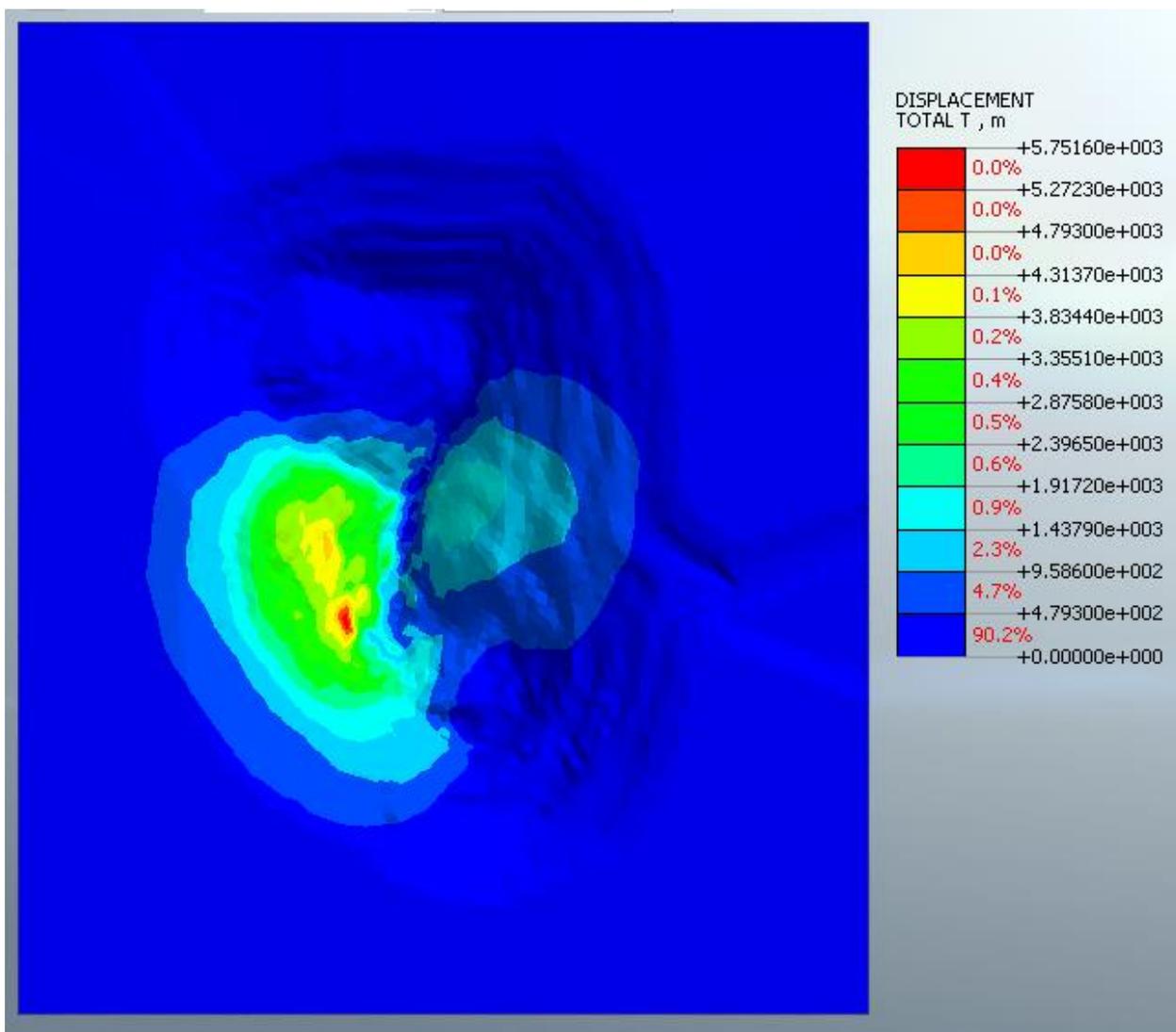


Рисунок 4.12 – Область возможных деформаций по результатам трехмерного моделирования

4.4 Геомеханическая модель месторождения

Первым этапом создания цифровой геомеханической модели является сбор и подготовка необходимой базы данных. В диссертационной работе в предыдущих главах показаны результаты сбора исходной информации для заполнения геомеханической модели.

Второй этап заключается в последовательном переносе наборов данных или их комбинаций в объемную модель трехмерного формата, используя распространенные системы моделирования (Surpac, Datamine, Vulcan и т.д.) [87]. В таблице 4.2 представлена обобщающая характеристика входных данных для модели.

Таблица 4.2 – Краткая характеристика базы данных геомеханической модели

№		Наименование	Обозначение в модели
1	Литология	буквенный код	Lithology
2	Структурное описание месторождения	буквенный код для нарушений удельная трещиноватость для пород системы трещин	Fault Jointing Joint
3	Гидрогеология	код водоносного горизонта коэффициент фильтрации	Water WF
4	Свойства пород	плотность сцепление угол внутреннего трения сжатие растяжение коэффициент Пуассона	Density Friction Compression Stretching Poisson
5	Классификация массива горных пород	рейтинг RQD рейтинг MRMR	RQD MRMR
6	Напряженно-деформированное состояние	Вертикальные напряжения Горизонтальные напряжения	σ_1 σ_2 σ_3
7	Устойчивость	Коэффициент запаса устойчивости	SF

Геомеханическая модель месторождения состоит из четырех основных компонентов [87, 116 - 119]:

1. Геологической модели.
2. Структурной модели.
3. Модели породного массива (свойства пород).
4. Гидрогеологической модели.

В зависимости от особенностей месторождения геомеханическая модель может включать в себя значения напряженно-деформированного состояния.

Геологическая модель представлена трехмерным распределением горных пород, формирующих борта карьера. Основу каркасной модели по Сарбайскому месторождению составляют туффиты. Согласно таблице инженерно-геологической классификации горных пород по классификации Ф.П. Саваренского с изменениями и дополнениями В.Д. Ломтадзе на рассматриваемом месторождении представлены породы 3 групп: I – твердо – скальные, II – относительно твердые полускальные и III – рыхлые несвязные.

Для Сарбайского карьера выделено 6 типов скальных и полускальных пород (туффиты, известняки, туфы, метасоматиты, диориты) и руда. Рыхлые породы представлены глинами, глауконитами и песчаником. В таблице 4.3 представлены условные обозначения для геологической модели Сарбайского карьера.

Таблица 4.3 – Условные обозначения пород геологической модели

№		Порода	Код	Цветовое обозначение
1	Мезокайнозой	Глины	CLY	
2		Глаукониты	GLA	
3		Песчаники	SST	
4	Палеозой	Туфы	TUF	
5		Диориты	DIO	
6		Руда	ORE	
7		Туффиты	TFF	
8		Известняк	LST	
9		Базальты	BAZ	

Геологическая каркасная модель (ГКМ) была построена на основе имеющихся геологических разрезов, планов горизонтов и результатам проведенных инженерно-геологическим исследованиям (глава 2.1). В общем виде ГКМ представляет собой трехмерную триангуляцию, созданную на основе стринг-файлов (полилиний), которые являются контурами геологических тел. Элементы ГКМ Сарбайского месторождения представлены в виде объемных объектов (Solid) на рисунке 4.13.

Геологическая каркасная модель может быть использована как основа для следующих видов работ: визуализации пространственного ориентирования вмещающих пород и руд, вычисление объемов, извлечение геологических разрезов в любом направлении и основой для создания геомеханической модели месторождения [116 - 118].

В структурную модель месторождения внесены все нарушения месторождения, рассмотренные в главе 1.1. Результаты построения структурной модели представлены на рисунке 4.14.

Гидрогеологическая модель Сарбайского карьера представлена кривой линии депрессии в рыхлой толще вмещающих пород. Как выявлено в главе 1.1 для рассматриваемого месторождение характерно наличие четырех водоносных комплекса. В рамках проводимых работ, рассмотренных в главе 2, устья скважин были расположены ниже водоносных горизонтов месторождения. Поэтому в гидрогеологическую модель внесены данные ранее проведенных исследований (2006, 2013, 2015 годы).

По результатам ранее проведенных работ (2013 г. - ГеобайтИнфо) по восточному борту уровень подземных водоносного комплекса скальных палеозойских пород снижен и изменяется в абсолютных отметках от 114,7 м до минус 57,57 м. По данным исследований 2015 года грунты палеозойского водоносного горизонта классифицируются как слабопроницаемые в интервалах от минус 35 м ÷ минус 135 м ($K_f=0.016$ м/сут) и почти водонепроницаемы в интервалах минус 135 м ÷ - 260 м ($K_f= 0.0005$ м/сут).

Величину коэффициента фильтрации по результатам ранее проведенных работ (19, 20) который составляет: $K_f=0,08$ м/сут до глубины 190,0 м и $K_f=0,03$ м/сут до глубины 525 м.

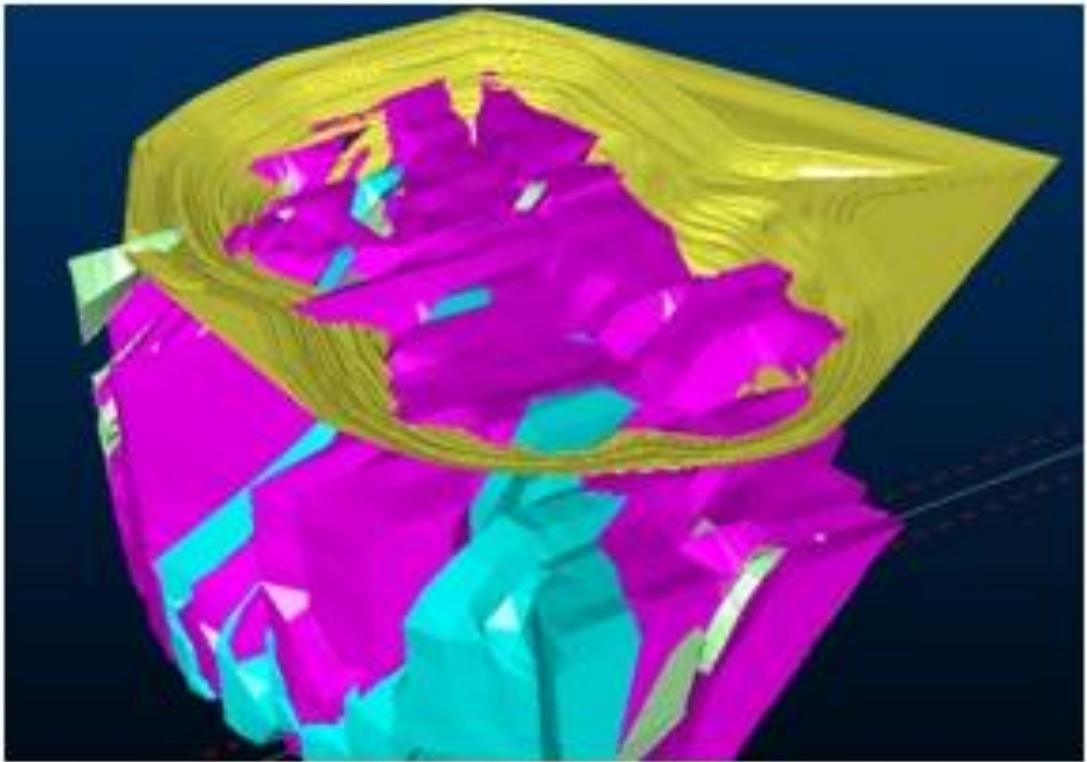


Рисунок 4.13 – Геологическая модель Сарбайского месторождения

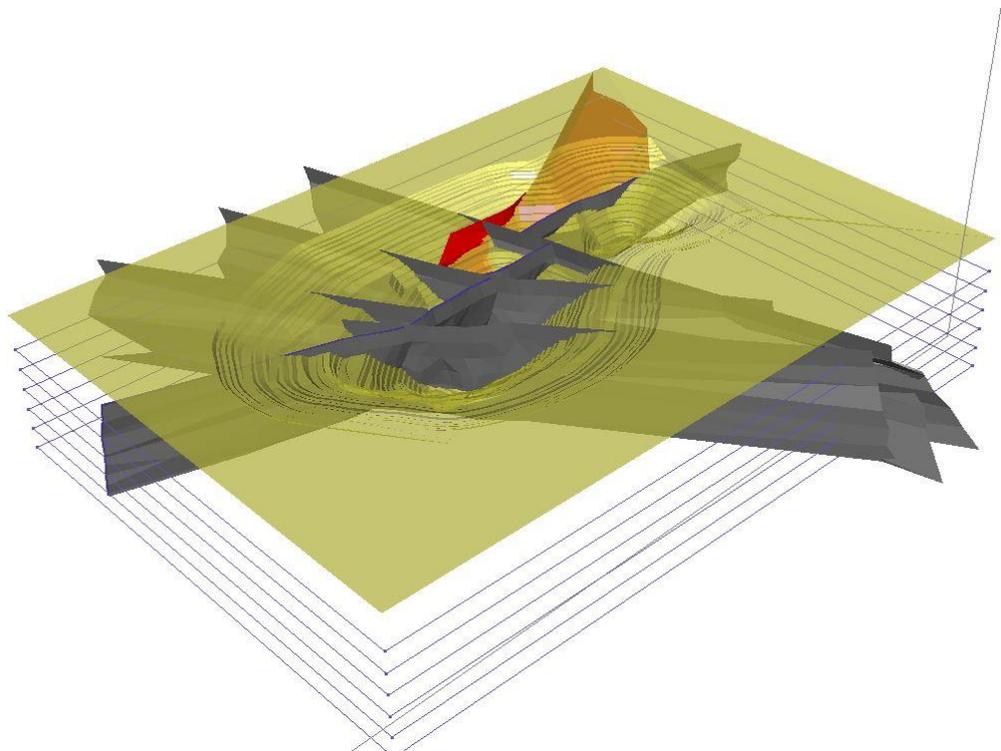


Рисунок 4.14 – Структурная модель Сарбайского месторождения

Модель породного массива представляет собой базу данных по параметрам прочности массива (ФМС пород), частоту трещин (среднее

количество трещин на метр), классификацию массива (по рейтингам RQD, MRMR) [119 - 123]. Физико-механические свойства пород и их трещиноватость представлены в главе 2.

Блочная модель месторождения представляет собой совокупность трехмерных блоков (кубических, разной величины (субблоки) в пространстве (Рисунок 4.15), с присущими атрибутами блоков и базируется на двумерной таблице данных, в которой по строкам расположены пронумерованные блоки, а по столбцам их атрибуты (характеристики) [117].

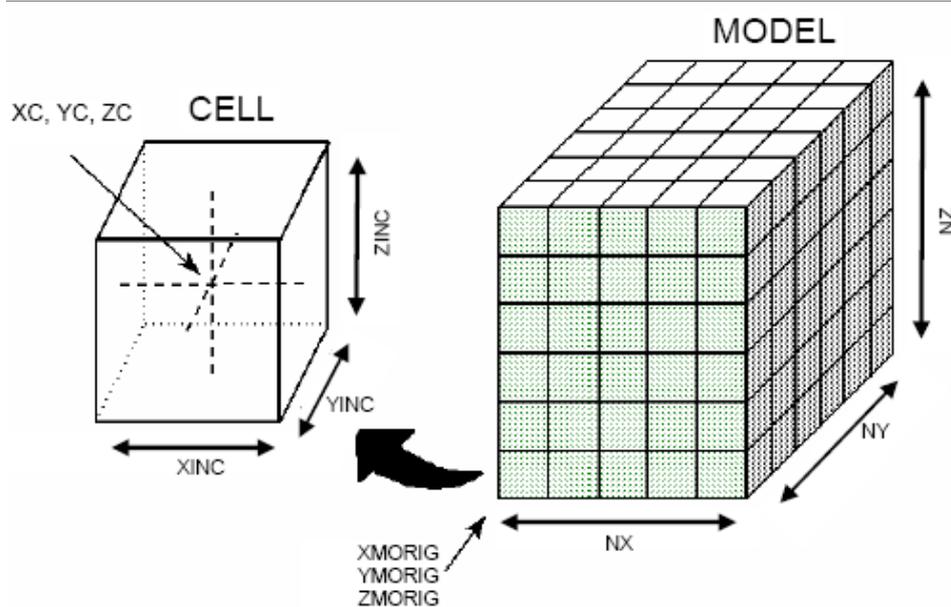


Рисунок 4.15 – Общее строение блочной модели

Часть атрибутов (такие как ID блока, его пространственные координаты, протяженность по пространственным координатам) являются системными. Остальные атрибуты (такие как тип пород в блоке, удельный вес, содержание полезного ископаемого в процентах или массовое, различные разведочные данные и т.д.) являются пользовательскими и несут основную рабочую функцию модели (Рисунок 4.16). Количество пользовательских атрибутов в модели количественно не ограничено [117].

Создание блочной модели осуществлялось двумя методами [116 - 118]:

а) каркасным моделированием:

✓ непосредственным заполнением замкнутых твердотельных трехмерных структур: «солидов» - каркасов каких-либо тел (например, замкнутых тел литологии);

✓ в случае моделирования не каркасов, а поверхностей (не замкнутых трехмерных структур), блоки заполнялись следующим образом: над и под поверхностью, а также между поверхностями (при моделировании двух поверхностей – создание слоев);

б) геостатистическим моделированием (интерполяцией) каких-либо данных.

RECORD	XC (M)	YC (M)	ZC (M)	XINC (M)	YINC (M)	ZINC (M)	LK (M)	ZONE (M)	DENSITY (M)	XINCOR (M)	YINCOR (M)	ZINCOR (M)	HX (M)	HY (M)	HZ (M)
1	-190	8010	890	20	20	20	0	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
2	-190	8010	870	20	20	20	1	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
3	-190	8010	850	20	20	20	2	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
4	-190	8010	830	20	20	20	3	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
5	-190	8010	810	20	20	20	4	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
6	-190	8010	790	20	20	20	5	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
7	-190	8010	770	20	20	20	6	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
8	-190	8010	750	20	20	20	7	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
9	-190	8010	730	20	20	20	8	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
10	-190	8010	710	20	20	20	9	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
11	-190	8010	690	20	20	20	10	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
12	-190	8010	670	20	20	20	11	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
13	-190	8010	650	20	20	20	12	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
14	-190	8010	630	20	20	20	13	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
15	-190	8010	610	20	20	20	14	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
16	-190	8010	590	20	20	20	15	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
17	-190	8010	570	20	20	20	16	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
18	-190	8010	550	20	20	20	17	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
19	-190	8010	530	20	20	20	18	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
20	-190	8010	510	20	20	20	19	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
21	-190	8010	490	20	20	20	20	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
22	-190	8010	470	20	20	20	21	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
23	-190	8010	450	20	20	20	22	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
24	-190	8010	430	20	20	20	23	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
25	-190	8010	410	20	20	20	24	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
26	-190	8010	390	20	20	20	25	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
27	-190	8010	370	20	20	20	26	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
28	-190	8010	350	20	20	20	27	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
29	-190	8010	330	20	20	20	28	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
30	-190	8010	310	20	20	20	29	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
31	-190	8010	290	20	20	20	30	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
32	-190	8010	270	20	20	20	31	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
33	-190	8010	250	20	20	20	32	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
34	-190	8010	230	20	20	20	33	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
35	-190	8010	210	20	20	20	34	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
36	-190	8010	190	20	20	20	35	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
37	-190	8010	170	20	20	20	36	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
38	-190	8010	150	20	20	20	37	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
39	-190	8010	130	20	20	20	38	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
40	-190	8010	110	20	20	20	39	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
41	-190	8010	90	20	20	20	40	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
42	-190	8010	70	20	20	20	41	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
43	-190	8010	50	20	20	20	42	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
44	-190	8010	30	20	20	20	43	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
45	-190	8010	10	20	20	20	44	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
46	-190	8010	10	20	20	20	45	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
47	-190	8010	30	20	20	20	46	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96
48	-190	8010	50	20	20	20	47	1	2.69	-4200	8000	-900	160	205	96

Рисунок 4.16- Табличный вид блочной модели Сарбайского месторождения

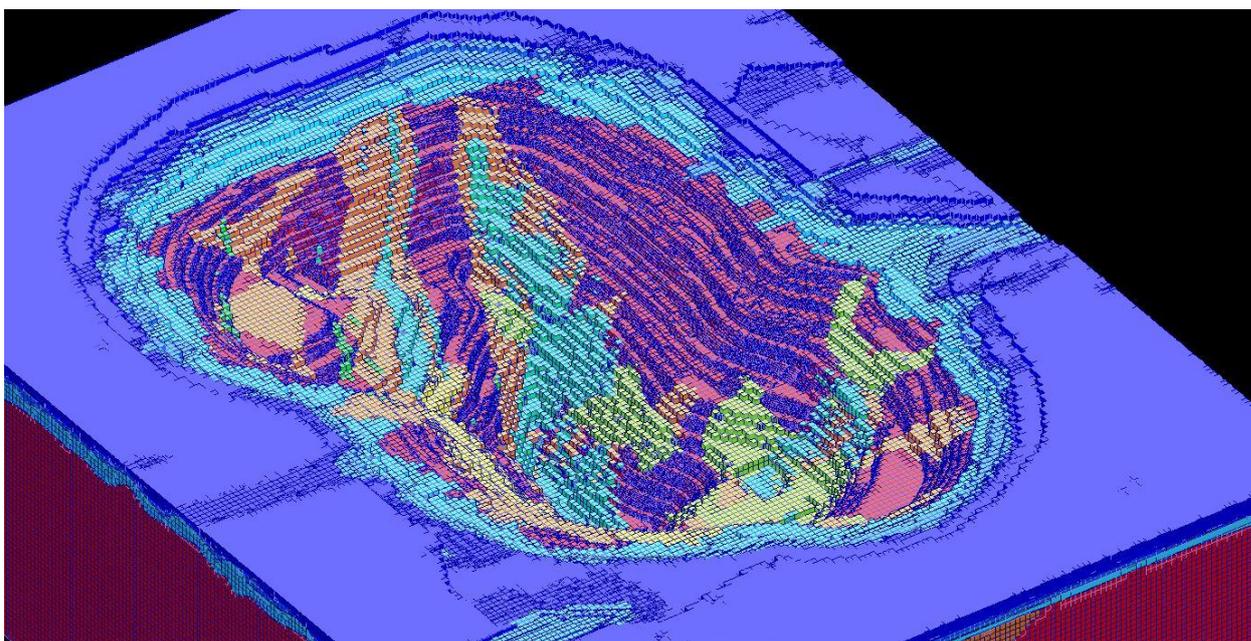


Рисунок 4.17 – Блочная геомеханическая модель Сарбайского карьера (по литологии)

В цифровую геомеханическую модель Сарбайского месторождения кроме рассмотренных выше данных также внесены результаты расчетов коэффициентов запаса устойчивости и значения напряженно деформированного состояния (Рисунок 4.18).

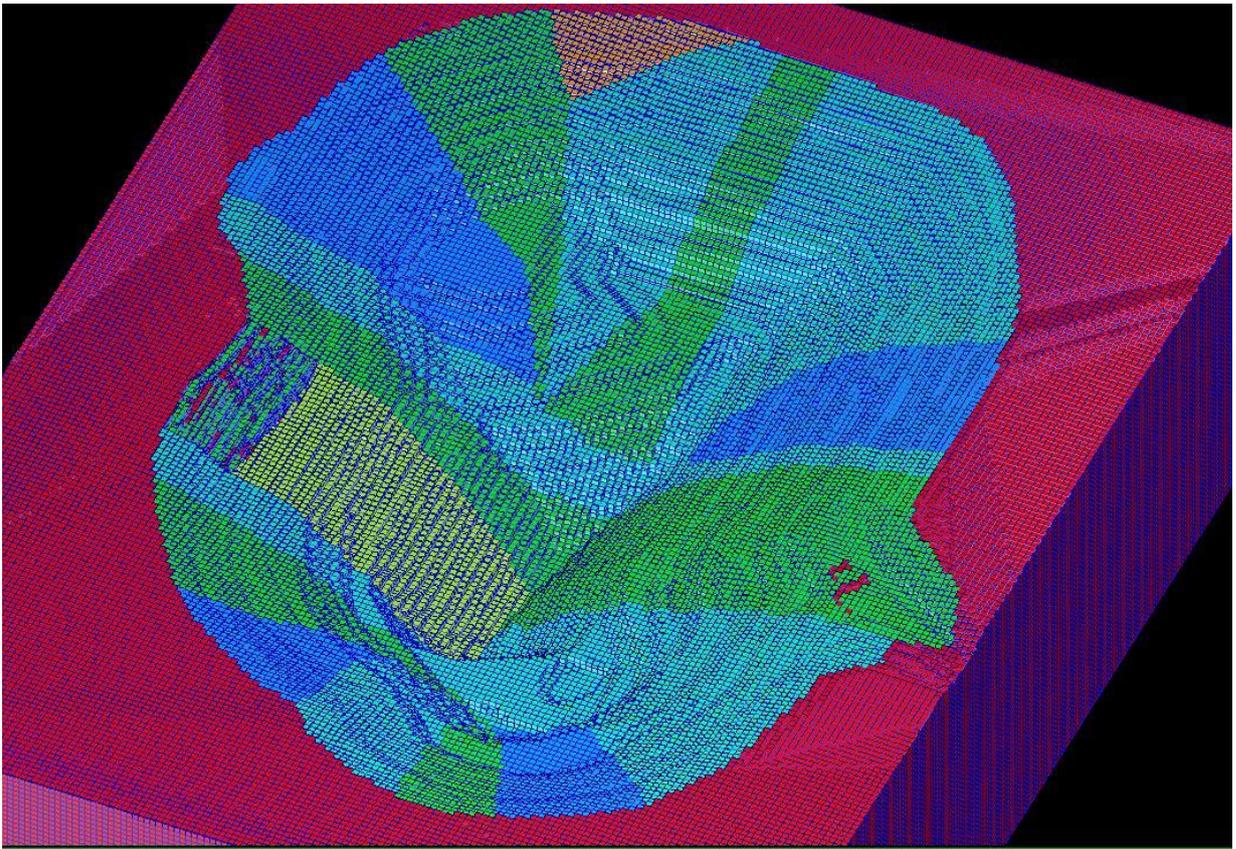


Рисунок 4.18 – Блочная геомеханическая модель Сарбайского карьера (по значениям коэффициента запаса устойчивости)

Выводы по главе 4

По результатам математического моделирования напряженно-деформированного состояния прибортового массива Сарбайского карьера методом конечных элементов установлено:

1. Зоны максимальных напряжений сосредоточены у дна карьера, при этом значения вертикальных напряжений больше, чем горизонтальные в 1,3 и 1,7 раз соответственно для напряжений, действующих вкрест и по простиранию рудных тел.

2. Максимальные величины касательных напряжений фиксируются в нижней приконтурной части бортов карьера на расстоянии 100 м – 150 м от дна карьера. При этом максимум касательных напряжений, равный 2,8 МПа зафиксирован в западном борту карьера по разрезу 15.

3. Профили 15, 17, 18, 19 карьера Западного борта карьера являются наиболее опасными с точки зрения обеспечения устойчивости откосов отдельных уступов. Предельные нагрузки на данном участке проявляются в виде тектонических трещин.

Полученные по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния массива данные подтверждают рассчитанные коэффициенты запаса устойчивости, приведенные в главе 3.

Приведенные в диссертационной работе исследования позволили определить параметры уступов скальной части Сарбайского карьера при увеличении глубины отработки до 700 м (Таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Параметры уступов скальной части Сарбайского карьера

Наименование борта	Высота уступа, м	Угол наклона откоса уступа	Ширина предохранительной бермы, м
Западный борт	40	До гор. +40м – 60°	11
		Ниже -65°	13
Восточный борт	40	До гор. +40м – 45°	не менее 11
		Ниже -55°	11
		Два нижних уступа -70°	16

Созданная геомеханическая модель Сарбайского карьера представляет собой объединенную цифровую базу данных, совмещающую:

- ✓ исходную инженерно-геологическую информацию в виде геологического строения месторождения;
- ✓ структурные особенности месторождения;
- ✓ гидрогеологические условия месторождения;
- ✓ свойства вмещающих пород, полученные по ранее проведенным исследованиям и приведенным в диссертационной работе результатам лабораторных исследований;
- ✓ классификацию горных пород по рейтингам RQD и MRMR;
- ✓ результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния прибортового массива и полученные значения коэффициентов запаса устойчивости.

Полученные результаты натурных измерений и математического моделирования напряженно-деформированного состояния прибортового массива карьера при увеличении глубины разработки позволяют прогнозировать участки, на которых возможно возникновение деформационных процессов.

Результаты, полученные при выполнении диссертационного исследования представлены в виде геомеханической модели, позволяющей объединить в одной базе данных все параметры, влияющие на безопасность отработки месторождений. На основании комплексного подхода и полноценной классификации горного массива возможно прогнозирование поведения пород при ведении горных работ, что обеспечивает безопасность отработки и полноту извлечения полезных ископаемых из недр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований.

В современных условиях наблюдается тенденция увеличения глубин отработки, что в свою очередь негативно сказывается на устойчивости бортов и уступов карьеров. Для эффективного и безопасного функционирования горнорудных предприятий необходима достоверная, оперативная и максимально полная информация о недрах. В диссертационной работе изложены научно обоснованные результаты геомеханического обеспечения устойчивости бортов глубокого карьера на примере действующего предприятия с применением современных программных обеспечений.

Получены следующие наиболее значимые результаты, отражающие научную новизну и практическую значимость:

1. Проведенный анализ современного состояния изучения геомеханических условий глубоких карьеров и горно-геологических условий действующего железорудного карьера показал, что на устойчивость бортов и уступов оказывают влияние следующие факторы - наличие поверхностей ослабления, обводненность, прочностные свойства горных пород.

2. Вмещающие породы Сарбайского карьера имеют различные значения физико-механических свойств при значительном разбросе таких параметров, как сцепление, предел прочности на одноосное сжатие и растяжение, что свидетельствует о значительной пространственной изменчивости свойств в массиве, как по площади распространения, так и по глубине залегания пород, связанные с трещиноватостью массива.

3. По результатам изучения структурного строения массива горных пород выявлены системы трещин, являющиеся плоскостями скольжения и оказывающие неблагоприятное влияние на устойчивость уступов карьера.

4. С учетом данных натурных замеров параметров трещиноватости скального массива на Сарбайском карьере определен коэффициент структурного ослабления ($\lambda=0,02\div 0,04$) и получена логарифмическая зависимость коэффициента структурного ослабления от величины сцепления в образце.

5. Борты карьера по результатам многовариантного численного моделирования устойчивы, однако на трех участках значения, полученных коэффициентов запаса устойчивости находятся в предельно допустимых значениях.

6. По результатам измерения напряженно-деформированного состояния определены горизонтальные напряжения, действующие в прибортовом массиве.

7. По результатам трехмерного моделирования напряженно-деформированного состояния выявлено, что концентрации напряжений находится под днищем карьера. Значения напряжений под днищем карьера достигают 9,5 – 10 МПа, при их величине на той же глубине в окружающем массиве 4 – 4,5 МПа.

8. Впервые для Сарбайского месторождения создана цифровая база данных, состоящей из геологической, структурной, гидрогеологической моделей и результатов математического моделирования устойчивости и напряженно-деформированного состояния. Полученная база данных представляет собой цифровую геомеханическую модель для обеспечения устойчивого состояния бортов и уступов карьера при увеличении глубины карьера до 700 м.

Результаты диссертационной работы приняты в производство Сарбайским РУ АО «ССГПО», что подтверждается соответствующим Актом внедрения в производственный процесс.

Оценка полноты решения поставленных задач

Таким образом, решены все задачи, поставленные в работе:

- проведены лабораторные исследования физико-механических свойств горных пород для глубоких горизонтов;
- проведены натурные исследования массива горных пород, обработка и интерпретация полученных данных;
- выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород и определение коэффициентов запаса устойчивости бортов карьера;
- создана единая база данных в виде геомеханической модели, которая включает результаты предыдущих и проведенных в диссертационной работе исследований массива горных пород;
- разработаны рекомендации по обеспечению геомеханической устойчивости бортов карьера в зависимости от горно-геологических, гидрогеологических, структурных особенностей месторождения.

Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов. Методы и последовательность выполнения исследований возможно применить при выполнении аналогичных работ для других месторождений твердых полезных ископаемых, обрабатываемых открытым способом.

Результаты, полученные в диссертационной работе, использовались при:

- выполнении научно-исследовательской работы между Институтом горного дела им. Д.А. Кунаева и АО «ССГПО» в рамках х/договора «Районирование прибортового массива горных пород Сарбайского карьера по геомеханическим условиям с учетом углубки карьера до абсолютной отметки – 500 м», которая использована при проектировании реконструкции Сарбайского карьера Сарбайского РУ АО «ССГПО».
- реализации научно-технической программы № BR05236712 «Технологическая модернизация горных производств на основе перехода к цифровой экономике» в рамках программно-целевого финансирования на 2018-2020 гг.

Оценка экономической эффективности технологии

При увеличении глубины разработки месторождений открытым способом обычно происходит разнос бортов карьера и увеличение объемов

вскрыши. Однако, возможен другой вариант вовлечения в отработку глубоких горизонтов карьера без значительного увеличения себестоимости добычи полезного ископаемого - пересмотр первоначального проекта и увеличения конечного угла наклона борта. При увеличении глубины действующего Сарбайского карьера до 700 м будут вовлечены в отработку глубокозалегающих руд Сарбайского карьера с отметки минус 390 до отметки минус 500 м.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области

Выполненный анализ литературных источников, результаты лабораторных, натурных исследований и математического моделирования, представленные в данной работе, позволяют сделать вывод о том, что диссертационная работа соответствует современному научно-техническому уровню.

Приведенные результаты достоверны и представляют научную ценность ввиду применения современных методов натурных исследований, моделирования и анализа, что подтверждено публикациями соответствующих научных трудов автора и обсуждением результатов на международных конференциях различного уровня.

АҚ «Соколов-Сарыбай
кен-байыту
ендірістік бірлестігі»

Қазақстан Республикасы, 111500
Рудный қ., Ленин д., 26
Т: +7 (71431) 3-16-52
Ф: +7 (71431) 3 16 00, 3 16 01
E: main.ssgpo@erg.kz
www.erg.kz



АО «Соколовско-сарбайское
горно-обогатительное
производственное объединение»

Республика Казахстан, 111500
г. Рудный, пр. Ленина, 26
Т: +7 (71431) 3-16-52
Ф: +7 (71431) 3 16 00, 3 16 01
E: main.ssgpo@erg.kz
www.erg.kz

ИСХ. № 49/10038
« 28 » 11 2018 г.

АКТ

**внедрения результатов исследований, выполненных
в диссертационной работе Съединой С. А.
«Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при его углубке»**

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Съединой С. А. «Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при его углубке» представляют практический интерес, использовались при выполнении научно-исследовательской работы между ИГД им. Д.А. Кунаева и АО «ССГПО» в рамках х/договора: «Районирование прибортового массива горных пород Сарбайского карьера по геомеханическим условиям с учетом углубки карьера до абсолютной отметки - 500 м», которая использована при проектировании реконструкции Сарбайского карьера Сарбайского РУ АО «ССГПО».

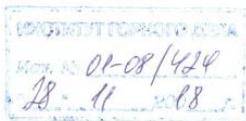
Вице-президент по производству



С. В. Кузьменко

Богаи М. И.
тел.: 31618

Handwritten signature and date: 27.11.18



УТВЕРЖДАЮ

Директор
заслуженный изобретатель РК,
академик НАН РК,
д-р техн. наук, проф.
Буктуков Н.С.



СПРАВКА

**об использовании результатов диссертационного исследования
Съединой Светланы Андреевны
«Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при его углубке»**

Настоящая справка подтверждает использование следующих результатов диссертационного исследования: математическая расчетная схема для решения задачи оценки устойчивости откосов уступов и бортов карьера с учетом увеличения глубины отработки до отметки минус 500 м., математическое моделирование карьера и выявление его потенциально опасных участков, оценка устойчивости бортов карьера, районирование карьера на 3D плане в его конечном положении, прогноз деформаций уступов карьеров, рекомендации по параметрам для уступов скальной части карьера.

Выше обозначенные результаты, изложенные в диссертации, были использованы при реализации научно-технической программы № BR05236712 «Технологическая модернизация горных производств на основе перехода к цифровой экономике» в рамках программно-целевого финансирования на 2018-2020 гг. Работа принята ГУ «Комитет науки МОН РК» согласно акту выполненных работ №2 от 22.10.2018 г.

Зам. директора по науке,
д-р техн. наук, член-корр. НАН РК

Шамганова Л.С.

Заведующий сектором НИОКР

Макашева У.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УРО РАН

СЕРТИФИКАТ

УЧАСТНИКА

VII УРАЛЬСКОГО ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО ФОРУМА

Конференция «Геомеханика в горном деле»
Номинация «Лучший доклад»

вручается

Сьединой Светлане Андреевне

(Институт горного дела им. Кунаева Д.А., г. Алматы, Республика Казахстан)

за доклад «Разработка 3D геомеханических моделей для подземных рудников и карьеров»
(соавтор Шамганова Л.С., Д.Т.)



17 – 19 октября 2017 г.

(Дата)

Секретарь оргкомитета,
зам. директор ИГД УРО РАН,
К.Т.Н. Глебов А.В.
Подпись

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. М.: Недра, 1978. – 544 с.
2. В.В. Рыбин. Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Апатиты, 2016 г.
3. Цирель С.В., Павлович А.А. Проблемы и пути развития методов геомеханического обоснования параметров бортов карьеров // Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 39-45.
4. А.С. Ковров. Устойчивость бортов карьеров в сложноструктурном массиве мягких пород. Монография. Днепропетровск НГУ, 2013 г.
5. Zhiqiang Yang, Qian Gao, Mao-hui Li, Guangcun Zhang. Stability Analysis and Design of Open Pit Mine Slope in China. EJGE, Vol. 19, 2014. Pp. 10247-10266.
6. О.В. Шпанский, Д.Н. Лигоцкий, Д.В. Борисов. Проектирование границ открытых горных работ. Санкт-Петербург, 2003 г.
7. В. И. Панин, В. В. Рыбин, К. Н. Константинов. Новая информация о физических свойствах руд и пород месторождений Кольского полуострова и ее использование в проектах развития горнодобывающих предприятий региона. Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 24-27 сентября 2013 г., 2013, 155-160.
8. Е.С. Калюжный, Асанов В.А., Съедина С.А., Н.Д. Рахимов. Определение физико-механических свойств горных пород Сарбайского карьера. Горный журнал Казахстана, № 9, 2018 г., Алматы, ISSN 2227-4766. С. 26-29.
9. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Решетняк С. П., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Сви́нин В. С., Рыжков А. Н. Концепция формирования нерабочих бортов глубоких карьеров Кольского Заполярья // Горный журнал. 2004. - № 9. - С. 45–50.
10. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Решетняк С. П., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Мелик-Гайказов И. В., Сви́нин В. С., Рыжков А. Н. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении // Труды 8-го международного симпозиума «Горное дело в Арктике». Апатиты. Мурманская область. Россия. 20–23 июня 2005 г. С. 2–14.
11. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. ВНИМИ, Ленинград, 1972 г
12. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб.: ВНИМИ. – 1998. – 208 с.

13. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости / Под ред. Г.Л. Фисенко. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 116 с.
14. А. А. Козырев, И. Э. Семенова, В. В. Рыбин, И. М. Аветисян. Особенности перераспределения полей напряжений при формировании глубокого карьера рудника “Железный” Ковдорского месторождения.
15. Зотеев О.В. О соответствии действующей нормативной документации задачам геомеханического обеспечения открытых горных работ.
16. КК.Н. Трубецкой, М.В. Рыльникова. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2015 г. Стр. 21 – 32.
17. Цирель С.В. Концепция новых правил расчетов устойчивости бортов карьеров и отвалов.
18. Ракишев Б.Р., Кузьменко С.В., Съедина С. А., Тулебаев К.К. анализ влияния горно-геологических факторов на устойчивость бортов на примере сарбайского карьера. Доклады НАН РК, №3, 2018 г., Алматы, ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print). С. 19-25
19. Гришин А.В., Шевчук С.В. К вопросу организации геомеханического мониторинга при освоении месторождений полезных ископаемых открытым способом на больших глубинах // Маркшейдерский вестник. 2017. № 1. С. 51-55.
20. Послание Президента Республики Казахстан Н. Назарбаева народу Казахстана. «Третья модернизация Казахстана: глобальная конкурентоспособность» от 31.01.2017 г.
21. Госпрограмма «Цифровой Казахстан» утверждена постановлением Правительства РК №827 от 12.12.2017
22. <https://primeminister.kz/ru/news/all/16058> Проект «Цифровой рудник» — прорыв в повышении производительности труда с помощью цифровых инноваций. 16 февраля 2018
23. <http://www.altynalmas.kz/digitalization.html>
24. <http://www.kazatomprom.kz/ru/news/kazatomprom-predstavil-glave-gosudarstva-realizuemye-proekty-po-cifrovizacii>
25. <https://erg.kz/>. «Умный карьер» запущен в ССГПО в рамках внедрения элементов Индустрии 4.0
26. <https://primeminister.kz/ru/news/industrializatsiya/industriya-40-i-tsifrovoy-kazahstan-b-sagintaev-oznakomilsya-s-tehnologicheskoi-modernizatsiei-v-kostanaiskoi-oblasti>
27. А.С. Калюжный. Определение параметров нарушенной зоны и объемов потенциальных вывалов для условий карьера «Олений ручей». 2016 г.
28. Н.Н. Мельников, А.А. Козырев, С.В. Лукичѳв. Большие глубины – новые технологии.

29. Andrés Parra, Nelson Morales, Javier Vallejos & Phu Minh Vuong Nguyen. Open pit mine planning considering geomechanical fundamentals.
30. Fimiston Open Pit “Super Pit” Gold Mine. <https://www.mining-technology.com/projects/superpitgoldmineaust/>
31. Fimiston Open Pit mine (Super Pit gold mine). <https://www.mindat.org/loc-192453.html>
32. J Jiang, K Karunaratna and T Jones. Mining Through Underground Workings in Fimiston Open Pit Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM).
33. <https://nashural.ru/article/promyshlennost-urala/sibajskij-karer/>
34. <http://www.alrosa.ru/>
35. Dowling J., Beale G., Bloom J. Designing a Large Scale Pit Slope Depressurization System at Bingham Canyon // International Mine Water Association Annual Conference. Reliable Mine Water Technology. 2013. Vol. I, pp. 119–125.
36. Tapia A., Contreras L.F., Jefferies M., Steffen O. Risk evaluation of slope failure at the Chuquicamata mine // Slope Stability 2007. Proceedings of 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering (ed. Y Potvin). 2007. pp. 477–495.
37. Brummer R.K., Li H., Moss A., Casten T. The Transition from Open Pit To Underground Mining: An Unusual Slope Failure Mechanism at Palabora /Proceedings of International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2006. pp. 411–420.
38. Wines D.R., Lilly P.A., Measurement and analysis of rock mass discontinuity spacing and frequency in part of the Fimiston Open Pit operation in Kalgoorlie, Western Australia: a case study // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, Vol. 39, no 5. 2002. pp. 589–602.
39. J. Wesseloo and J. Read, Acceptance Criteria, in Open Pit Slope Design, CSIRO, Leiden, 2013, pp. 221–236.
40. А.С. Ковров. Влияние сложной геологической структуры и обводненности массива пород на устойчивость откосов карьеров.
41. ВНИМИ. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л., 1972. – 163 с.
42. Попов В.Н., Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л. Управление устойчивостью карьерных откосов. Москва. Издательство «Горная книга», 2008 г.
43. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. Издание 2. Недра, Москва, 1965 г., 378 стр., УДК: 622.271.001.5.
44. Б.Р. Ракишев, А.Н. Шашенко, А.С. Ковров. Геомеханическая оценка устойчивости бортов карьеров и отвалов. Алматы: «ҒЫЛЫМ» НАН РК, 2017. – 234 с. ISBN 978-601-323-103-7.

45. А.В. Яковлев. Геомеханическое обеспечение формирования бортов карьеров и отвалов. Проблемы недропользования №4, 2016 г. УДК 622.271.333: 624.131.537 DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.075. С 75-80.
46. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 172 с.
47. Епифанова М.С., Федоров С.А., Козырев А.А., Рыбин В.В., Волков Ю.И. Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2007. №9. — С. 30–33.
48. Б.Р. Ракишев, А.С. Ковров, А. У. Кожантов, К. Сейтулы. Проблемы оползней на карьерах.
49. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ.
50. Нурпеисова М. Б., Касымканова Х. М. Устойчивость бортов рудных карьеров и отвалов. Алматы: КазНТУ, 2006, 131 с.
51. Ф. Я. Умаров. Воздействие факторов, влияющих на устойчивость бортов карьеров.
52. L.S. Shamganova, Sedina S.A., N.O. Berdinova. Development of geomechanical model of open pit for ensuring safe usage. The 25th World Mining Congress 2018. Proceedings. Open-pit Mining. P.177-185.
53. Ракишев Б.Р., Кузьменко С.В., Съедина С. А., Тулебаев К.К. анализ влияния горно-геологических факторов на устойчивость бортов на примере сарбайского карьера. Доклады НАН РК, №3, 2018 г., Алматы, ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print). С. 19-25.
54. Низаметдинов Ф.К., Бесимбаева О.Г., Бесимбаев Б.А. Исследование влияния техногенных факторов на устойчивость прибортового массива. Международная научно-техническая интернет-конференция
55. Ожигина С.Б., Урдубаев Р.А., Ожигин Д.С., Ожигин С.Г. Мониторинг состояния бортов глубоких карьеров АО «ССГПО». Интерэкспо Гео-Сибирь, 2015 г. С. 210 – 215.
56. Турсбеков С.В., Низаметдинов Ф.К. Маркшейдерский мониторинг прибортовых массивов глубоких карьеров. Вестник КРСУ, 2012. Том 12, № 7. С. 152 – 157.
57. Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г., Ожигина С.Б., Долгоносов В.Н., Радей К., Станькова Г. Мониторинг состояния откосов уступов и бортов карьеров. Здибы, 2015. – 350 с.
58. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. Недра, Москва, 1980 г., 360 стр., УДК: 622.02:539.2/.8:622.83
59. Мухаметкалиев Б.С., Калюжный Е.С., Съедина С.А., Абдибеков Н.К. Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при увеличении глубины отработки. Горный журнал, №4, 2018 г. АО «Издательский дом «Руда и Металлы». ISSN 00172278, IF 0,39. С. 27-32.
60. А.А. Козырев, И.Э. Семенова, В.В. Рыбин, И.М. Аветисян. Исследование напряжённо-деформированного состояния массива пород численными методами на основе данных натуральных измерений в окрестности

крупной карьерной выемки. Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011, 11, 78-89.

61. Козырев А.А., Решетняк С.П., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Кампель Ф.Б. Обоснование рациональной конструкции конечного борта карьера рудника «Железный» ОАО «Кавдорский ГОК». Горный информационно-аналитический бюллетень, № 3, 2004 г. –С. 243-250.

62. Жиров Д. В., Рыбин В. В., Шпаченко А. К. Эволюция хрупких деформаций массива пород Ньюрпахкского месторождения апатит-нефелиновых руд по результатам документации и анализа трещиноватости // Тез. докл. Всероссийской конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М. В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН», 13–17 октября 2008 г. Т. 2. М.: ИФЗ РАН 2008. С. 124–127.

63. ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии». М., 1988.

64. Кобранова В.Н. Определение физических свойств горных пород / В.Н. Кобранова, Н.Д. Лепарская. - М.: Госгортехиздат, 1957. - 160 с.

65. Ильницкая, Е.И. и др. Определение свойств горных пород. М.: Недра. - 1969.-392 с.

66. Карташов Ю.М. и др. Прочность и деформируемость горных пород – М.: Недра, 1979. – 269 с.

67. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. - М.: Недра, 1984. - 359 с.

68. Еремин Г.М. Совершенствование методов определения прочностных свойств пород и их деформируемости при применении в проектах новых технологических процессов на карьерах и поддержания устойчивости выработок. – М.: Горная книга, 2016. -36 с.

69. Еремин Г.М. Научное обоснование метода определения параметров отвалов и технологии отвалообразования в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях. Апатиты – Санкт-Петербург. Труды всероссийской науч. конференции 2012. – С. 300-306.

70. Окатов Р.П., Попов В.Н. Некоторые вопросы учета трещиноватости горных пород. Изв. вузов. Горный журнал. -1970. №3. С.21-23.

71. Чернышев С.Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. – М. Недра, 1984. – 111 с.

72. Машанов А.Ж. Механика массива горных пород. – Алма-Ата: АН Каз. ССР, 1961. – 166 с.

73. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1970. – 159 с.

74. Куваев Н.Н. Роль трещиноватости в устойчивости откосов и требования к методике ее изучения. Труды ВНИМИ. – Л. 1964. – Сб.51. – С. 174-184.

75. Зотеев В.Г., Можаяев Л.В., Комаров В.В. Изучение трещиноватости пород железнорудных месторождений Горный журнал. – 1970. - № 3. – С. 54 – 56.
76. Низаметдинов Ф.К. Устойчивость карьерных откосов в слоистой среде с пликативной нарушенностью: Автореф. канд. дис. – Караганда, 1983. – 27 с.
77. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. ВНИМИ, 1970г.
78. Букринский В.А. Геометрия недр. Москва: МГГУ, 2002. – С. 549.
79. В.И. Борщ-Компониец. Практическая механика горных пород. М.: Горная книга, 2013. С. 327.
80. Токсаров В.Н., Асанов В.А., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А. Напряженное состояние и трещиноватость массива горных пород Сарбайского карьера. Проблемы недропользования. Выпуск 3, 2018. С. 54 – 60.
81. Белоусов В.В. Основные вопросы тектоники. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 608 с.
82. Зерцалов М.Г. Механика грунтов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 364 с.
83. Hudson J., Harrison J. Engineering rock mechanics, Pergamon, 1997
84. John Read, Peter Stacey. Guidelines for open pit slope design. ISBN: 9780415874410. Print: Large Hard cover – CSIRO Publishing 2009.
85. Ильин А.И., Гальперин А.М., Стрельцов В.И. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах. М., 1985. 248 с.
86. Смолич С.В., Барабелло В.А. Основы геомеханики. Чита, 2017 г.
87. Мочалов А.М., Ишутин С.А., Павлович А.А., Сапачев Р.Ю. Оценка устойчивости бортов карьеров с использованием отечественного и зарубежного программного обеспечения.
88. Бернацкий Л.Н. Условия устойчивости земляных масс. Трансиздат, 1925.
89. Бернацкий Л.Н. Прикладная геотехника. М., Трансжелдориздат, 1935.
90. Fellenius, W. —Calculation of the Stability of Earth Dams. Proceedings of the Second Congress of Large Dams, 4, pp. 445-463, 1936
91. Гольдштейн, М. Н. Механика грунтов / М. Н. Гольдштейн // Справочник «Инженерные сооружения». М. : Машстройиздат, 1950. - Т. 1.
92. Маслов, Н. Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве / Н. Н. Маслов. М. : Госэнергоиздат, 1955.
93. Цытович Н.А. Механика грунтов.- М.: Госстройиздат, 1963.
94. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: Высшая школа, 1981.
95. Галустьян, Э. Л. Определение предельных параметров откосов без отыскания потенциальной поверхности сдвига / Э. Л. Галустьян II Тр. ВНИМИ.-Л., 1977.-Сб. 104.

96. Baltiyeva A. A., Altayeva A. A., Sedina S. A., Shamganova L. S., Tulebayev K. K. Sarbai mining open pit stable state edges geomechanical monitoring using software Usto4du // Proceedings of the 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016). – New York : Curran Associates, 2016. Vol. 2. No. 2. P. 525–530.
97. Шамганова Л.С., Тулебаев К.К., Байтов Ж.К., Съедина С.А., Алтаева А.А. Геомеханическое обоснование отработки золоторудных месторождений открытым способом. Горные науки в индустриально-инновационном развитии страны, Том 87 2015 г, Казахстан, Алматы, ISBN 978-601-7093-30-3. С. 120-123
98. Обучающие материалы с сайта <https://www.roscience.com>.
99. В.И. Слепцов. Устойчивость борта карьера при изменении прочностных свойств многолетнемерзлых горных пород. ГИАБ, 2011. С. 202-205.
100. Shashenko O. M., Rakishev B. R., Kovrov O. S. Slope Stability Analysis by Hoek–Brown Failure Criterion // Mine Planning and Equipment Selection : Proceedings of the 22nd MPES Conference. – Cham : Springer, 2014. P. 541–550.
101. Soren K., Budi G., Sen P. Stability analysis of open pit slope by finite difference method // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2014. Vol. 3. Iss. 5. P. 326–334.
102. Галустьян Э.Л. Технологические аспекты проблемы оптимизации углов наклона бортов карьера. ВНИМИ. 1999 г.
103. Съедина С.А., Балтиева А.А., Шамганова Л.С. Инновационные методы наблюдения за деформациями бортов карьера. Вестник КазГАСА, № 3(65), 2017 г., Алматы, ISSN 1680-080X. С. 224-230.
104. Балтиева А.А., Съедина С.А., Шамганова Л.С. Алгоритм выполнения GNSS-измерений на геодинамических полигонах месторождений. Вестник КазГАСА, № 3(65), 2017 г., Алматы, ISSN 1680-080X. С. 204-209.
105. Козырев А.А., Панин В.И., Савченко С.Н. и др. Сейсмичность при горных работах – Апатиты, 2002. – 325 с.
106. Леонтьев А.В. Обзор и анализ напряженного состояния массива горных пород в основных горнодобывающих регионах СНГ / Геомеханика в горном деле. – 2000:– Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2000. – С. 54-65.
107. Леонтьев А.В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории северной Евразии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2001. – №1. – С.31–40.
108. Zoback M.L., Zoback M.D., Adams J. et al. Global patterns of tectonic stress // Nature. – 1989. – V.341. – No. 6240. – P.291-298.
109. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах.- М.: Изд-во МГГУ, 2004.
110. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов памяти в соляных породах с

использованием скважинного гидродомкрата Гудмана / Горный информационно-аналитический бюллетень, Москва. МГГУ, 2010, № 10.

111. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В. Опыт использования гидродомкрата Гудмана при исследовании состояния массива квазипластичных пород / «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2011, т.1. – 524 с.

112. Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Лыков К. Г., Фарафонов В. М. Оценка напряженного состояния массива на основе эмиссионных эффектов памяти горных пород околоскважинного пространства / ФТПРПИ.- 1991.- № 2.

113. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Методика интерпретации акустико-эмиссионных измерений при использовании эффекта Кайзера для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород / Горный журнал, 2012, № 9.

114. Токсаров В.Н., Шамганова Л.С., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А., Съедина С.А. Экспериментальное определение напряжений в массиве горных пород Сарбайского карьера // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Том 4. 2017. № 2. С.286-290.

115. Барях А.А., Л.С. Шамганова, В.Н. Токсаров, Самоделкина Н.А., Бердинова Н.О. Напряженно-деформированное состояние горных пород в прибортовом массиве Сарбайского карьера. Международная научно-практическая конференция «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли». ИПКОН РАН, г. Москва. 13-16 ноября 2017 г.С. 34-40.

116. Шамганова Л.С., Съедина С.А., Балтиева А.А. К вопросу создания геомеханической модели месторождения. Инновационные технологии в геодезии, маркшейдерии и геотехнике, 2017 г., Караганда, ISBN 978-601-315-325-325-4. С. 33-35.

117. Съедина С.А., Балтиева А.А., Шамганова Л.С. Разработка 3D геомеханических моделей для подземных рудников и карьеров. Проблемы недропользования, №1, 2018 г. Россия Екатеринбург, ISSN 2313-1586. С. 60-65.

118. L.S. Shamganova, Sedina S.A., N.O. Berdinova. Creation the geomechanical model for deep open-pit. 18th International multidisciplinary scientific geoconference SGEM, Volume 18 Issue 1.3, 2018, Bulgaria, ISBN 978-619-7408-37-9. P 223-229.

119. Жаркимбаев Б.М., Съедина С.А. Выбор рейтинговой классификации для определения характеристик массива горных пород. Горные науки в индустриально-инновационном развитии страны, Том 87 2015 г, Казахстан, Алматы, ISBN 978-601-7093-30-3. С. 150-155.

120. Cartin Edelbro. Evaluation of rock mass strenght criteria. Lulea University of Technology, pp. 7 - 23.

121. Beniawski Z.T. Engineering classification of jointed rock mass. Trans Sft Civ Eng 15, pp. 335-344

122. Songul Cosar. Application of rock mass classification systems for future support design of the dim tunnel near Alanya. In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in mining engineering, September 2004.

123. Laubscher D.H., Jacubec J. The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses. Foundations for Design. Brisbane, p.475-481, 2000.