

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно – металлургический институт имени А.О.Байконурова

Кафедра «Горное дело»

Хайруллаев Алихан Муктарулы

Влияние заоткоски уступов на напряженное состояние обнажений открытой горной
выработки на месторождении "Пустынное"

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07203 – «Горная инженерия»

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно – металлургический институт имени А.О.Байконурова

УДК 665.622.43.046.6-20 (043)
рукописи

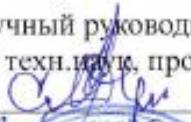
На правах

Хайруллаев Алихан Муктарулы

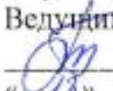
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра


Название диссертации	Влияние заоткоски уступов на напряженное состояние обнажений открытой горной выработки на месторождении "Пустынное"
Направление подготовки	7M07203 – «Горная инженерия»

Научный руководитель
д-р техн.наук, профессор
 Молдабаев С.К.
«13» 06 2024 г.

Рецензент
д-р Phd, ассоц. профессор
 Жанаикова Р.К.
«13» 06 2024 г.

Нормоконтроль
Ведущий инженер
 Мендекинова Д.С.
«13» 06 2024 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ГД
д-р техн.наук, профессор
 Молдабаев С.К.
«13» 06 2024 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Горно – металлургический институт имени А.О.Байконурова

Кафедра «Горное дело»

7M07203 – «Горная инженерия»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ГД
д-р техн. наук, профессор
Молдабаев С.К.
«13», 06 2024 г

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Хайруллаеву Алихану Муктарулы

Тема: Влияние заоткоски уступов на напряженное состояние обнажений открытой горной
выработки на месторождении "Пустынное"

Утверждена приказом ректора университета №408 от «13» ноября 2024 г.

Срок сдачи законченной диссертации «13» июня 2024 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

а) Отчет по исследованию напряженного деформированного состояния месторождения
«Пустынное» методом гидроразрыва скважин;

б) Исследование физико – механических свойств горных пород и руд месторождения
«Пустынное» по стандартам ISRM;

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Оценка геотехнического состояния массива горных пород в условиях открытой
разработки месторождения;

б) Выявление геотехнических рисков при ведении добычных работ на карьере «Пустынное»

в) Анализ напряженно деформированного состояния массива горных пород на
месторождении «Пустынное»;

г) Расчет коэффициента запаса устойчивости с учетом напряженно деформированного
состояния массива горных пород;

д) Выдача рекомендации по безопасной отработке карьера в участках, подверженных
деформациям под влиянием напряженно деформированного состояния;

Перечень графического материала:

а) План рельефа местности;

б) Ситуационный каркас карьера;

в) Натурные измерения напряженно деформированного состояния

Рекомендуемая основная литература:

а) E. Hoek, E. T. Brown, The Hoek-Brown failure criterion and GSI.

б) Standard Test Method for Determination of In-Situ Stress in Rock using the Hydraulic
Fracturing Method

в) Read and P. F. Stacey. Guidelines for Open Pit Slope Design.




ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации


Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Срок представления научному руководителю	Примечание
Общие сведения об объекте исследования. Краткая характеристика района месторождения	25.02.2023г.	
Геотехнические условия разработки месторождения	03.05.2023г.	
Определение напряженно деформированного состояния массива горных пород методом гидроразрыва	07.10.2023г.	
Исследование физико – механических свойств массива горных пород месторождения	14.01.2024г.	
Построение геолого – структурной модели месторождения в ПО Leapfrog Geo	09.02.2024г.	
Моделирование коэффициента запаса устойчивости методом конечных элементов в ПО Rocscience RS2	10.04.2024г.	

Подписи

консультантов и нормоконтроля на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Общие сведения о месторождении	д-р техн.наук, проф. Молдабаев С.К.	25.02.23	
Геотехнические условия разработки месторождения	д-р техн.наук, проф. Молдабаев С.К.	03.05.23	
Определение НДС массива горных пород методом гидроразрыва	д-р техн.наук, проф. Молдабаев С.К.	07.10.23	
Исследование ФМС массива горных пород месторождения	д-р техн.наук, проф. Молдабаев С.К.	14.01.24	
Построение геолого – структурной модели месторождения в ПО Leapfrog Geo	д-р техн.наук, проф. Молдабаев С.К.	09.02.24	
Моделирование коэффициента запаса устойчивости методом конечных элементов в ПО Rocscience RS2	д-р техн.наук, проф. Молдабаев С.К.	10.04.24	
Нормоконтролер	Ведущий инженер Медекинова Д.С	13.06.24г.	

Научный руководитель

 Молдабаев С.К.

Задание принял к исполнению обучающийся

 Хайруллаев А.М.

Дата

« 10 » апреля 2024г

АНДАТПА

Магистрлік диссертацияның мақсаты Пустынное кен орнында ашық тау-кен қазбасының жарықтары мен кернеулі күйіне артқы еңістің әсерін зерттеу болып табылады. Бұл зерттеу кен орындарын ашық тәсілмен игеру барысында тау жыныстары массивінде жүретін геомеханикалық процестерді түсінуді жақсартуға бағытталған.

Диссертацияның бірінші бөлімінде Пустынное карьерінің ағымдағы жағдайы, оның ішінде кен орнының геологиялық құрылымы мен гидрогеологиялық ерекшеліктері сипатталған. Зерттеу объектісінің геомеханикалық сипаттамасы оның құрылымдық ерекшеліктері мен гидрогеологиялық жағдайларын ескере отырып орындалды.

Екінші бөлімде карьер тау жыныстары массивінің кернеулі-деформацияланған күйі зерттелген. Негізгі назар табиғи кернеу өрісін бағалау үшін қолданылатын гидрожару әдісіне аударылған. Қолданылатын аспаптар мен жабдықтар, сондай-ақ далалық эксперименттерді жүргізу тәртібі мен нәтижелері сипатталған.

Үшінші тарауда массивтің физико-механикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері берілген. Алынған деректерді талдау негізгі литологиялық айырмашылықтардың есептік беріктік сипаттамаларын анықтауға және еңістердің тұрақтылық қор коэффициентін есептеу үшін пайдаланылды, сондай-ақ артқы еңістің массивтің кернеулі-деформацияланған күйіне әсер ету дәрежесін анықтады.

Төртінші тарауда артқы еңістің еңістердің тұрақтылығына және геотехникалық қауіптердің пайда болу қаупіне әсерін талдау қамтылған. Жүргізілген зерттеулер негізінде ашық тау-кен қазбасының тұрақтылығын арттыру үшін артқы еңіс бұрыштарын оңтайландыру бойынша ұсыныстар берілді.

Жұмыстың негізгі қорытындылары тау жыныстары массивінің кернеулі-деформацияланған күйін бағалауға кешенді көзқарастың қажеттілігін, әрбір нақты кен орнының ерекшеліктерін ескере отырып жасау керектігін көрсетеді. Диссертациялық зерттеудің нәтижелері әртүрлі геотехникалық жағдайларда ашық тау-кен қазбаларын жобалау және пайдалану бойынша ұсыныстар әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

АННОТАЦИЯ

Целью магистерской диссертации является исследование влияния заоткоски на напряженное состояние обнажений открытой горной выработки на месторождении Пустынное. Данное исследование направлено на улучшение понимания геомеханических процессов, протекающих в массиве горных пород при разработке месторождений открытым способом.

В первом разделе диссертации приводится описание существующего состояния карьера Пустынное, включая геологическое строение и гидрогеологические особенности месторождения. Геомеханическая характеристика объекта исследования выполнена с учетом его структурных особенностей и гидрогеологических условий.

Второй раздел посвящен исследованию напряженно-деформированного состояния массива горных пород карьера. Основное внимание уделяется методу гидроразрыва, который используется для оценки природного поля напряжений. Описаны используемые приборы и оборудование, а также порядок проведения и результаты натурных экспериментов.

Третья глава содержит результаты исследований физико-механических свойств массива. Анализ полученных данных позволил выявить расчетные прочностные характеристики основных литологических разностей, для расчета коэффициента запаса

устойчивости обнажений, и определить степень воздействия заоткоски на напряженно – деформированное состояние массива.

Четвертая глава включает анализ влияния заоткоски на устойчивость откосов и риск возникновения геотехнических рисков. На основе проведенных исследований предложены рекомендации по оптимизации углов наклона заоткоски для повышения устойчивости открытой горной выработки.

Основные выводы работы заключаются в необходимости комплексного подхода к оценке напряженно-деформированного состояния массива горных пород, с учетом специфики каждого конкретного месторождения. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для разработки рекомендаций по проектированию и эксплуатации открытых горных выработок в различных геотехнических условиях.

ANNOTATION

The aim of this master's thesis is to investigate the impact of backfill on the stress state of open pit mine exposures at the Pustynnoe deposit. This research is directed towards improving the understanding of geomechanical processes occurring within the rock mass during open-pit mining operations.

The first section of the thesis describes the current state of the Pustynnoe open pit, including the geological structure and hydrogeological features of the deposit. The geomechanical characterization of the study object is conducted considering its structural features and hydrogeological conditions.

The second section is devoted to the study of the stress-strain state of the rock mass in the pit. Special attention is given to the hydraulic fracturing method, which is used to assess the natural stress field. The equipment and instruments used, as well as the procedures and results of in-situ experiments, are described.

The third chapter contains the results of studies on the physic-mechanical properties of the rock mass. The analysis of the obtained data allowed for the identification of the calculated strength characteristics of the main lithological varieties and the calculation of the safety factor for the stability of the exposures, as well as the determination of the degree of impact of backfill on the stress-strain state of the rock mass.

The fourth chapter includes an analysis of the impact of backfill on slope stability and the risk of geotechnical hazards. Based on the conducted research, recommendations are proposed for optimizing the slope angles of the backfill to enhance the stability of the open pit mine.

The main conclusions of the work emphasize the necessity of a comprehensive approach to evaluating the stress-strain state of the rock mass, considering the specifics of each deposit. The results of the thesis research can be used to develop recommendations for the design and operation of open-pit mines under various geotechnical conditions.

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	8
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	9
ВВЕДЕНИЕ	10
1 Существующее состояние карьера Пустынное и геомеханическая характеристика объекта исследования	13
1.1 Общие сведения о месторождении	13
1.2 Геологическое строение месторождения	15
1.3 Структурное строение месторождения	17
1.4 Гидрогеологические особенности месторождения	21
1.5 Геомеханическое состояние месторождения Пустынное	22
Вывод к первому разделу	25
2 Исследования природного поля напряжения месторождения Пустынное методом гидроразрыва	26
2.1 Сущность определения напряженно деформированного состояния массива методом гидроразрыва	26
2.2 Описание оборудования	28
2.3 Порядок выполнения замеров напряжении	30
2.4 Анализ результатов измерении напряженно деформированного состояния массива путем гидроразрыва	32
2.5 Результаты измерений скважины DDPH_19_1	32
2.6 Результаты измерении скважины DDPH_19_2	35
Вывод ко второму разделу	39
3 Исследование физико-механических свойств горных пород и руд на месторождении «Пустынное» по стандартам ISRM и ASTM	41
3.1 Подготовка образцов к испытаниям	41
3.2 Определение естественной плотности	42
3.3 Определение предела прочности и деформационных свойств при одноосном сжатии	43
3.4 Определение предела прочности при одноосном растяжении (бразильский метод)	46
3.5 Определение предела прочности при объемном сжатии	46
Выводы к третьему разделу	48
4 Выполнение численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива бортов и откосов карьера Пустынное и выявление потенциально опасных участков	49
4.1 Метод снижения прочности на сдвиг (SSR)	49
4.2 Характеристика горного массива и расчетные параметры	50
4.3 Определение влияния уровня напряженного состояния пород массива отдельных участков карьера Пустынное на их заоткоску с использованием численных методов в 2-мерной постановке	51
Выводы к четвертому разделу	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей магистерской диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан послевузовское образование. Магистратура. Основные положения ГОСО РК 5.04.033–2008.

ГОСТ 8.417–81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

ГОСТ 7.9–95 (ИСО 214–74) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования.

Правила обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геологоразведочные работы. Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30 декабря 2014 года № 352. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 13 февраля 2015 года № 10247.

ISRM «Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials».

ISRM «Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression».

ISRM (Suggested Methods for Determining Shear Strength. Part 2. Suggested Method for Laboratory Determination of Direct Shear Strength).

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- НДС – напряженно – деформированное состояние
ФМС – физико-механические свойства
UCS – прочность при одноосном сжатии, МПа
УР – модули деформации, МПа
UTS – прочность пород при одноосном растяжении, МПа
ТХТ – прочность пород при трехосном сжатии, МПа
SOJ – предел прочности при прямом сдвиге по естественной трещине, МПа
ASTM – Американская международная организация по испытаниям материалов
ISRМ – Международное общество по механике горных пород
 σ_{100} - предел прочности при одноосном сжатии, МПа
 ε_1 – продольная относительная деформация, МПа
 ε_2 - поперечная относительная деформация, МПа
N – нагрузка, Н
A – площадь, мм
 ΔD – изменение диаметра, мм
H – высота образца, мм
D – диаметр образца, мм
P – разрушающая сила, кН
F – вертикальная нагрузка, кН
S₀ – площадь поперечного сечения образца, мм
S_п – площадь поперечного сечения поршня, мм
 τ – касательное напряжение, МПа
 σ – нормальное напряжение, МПа
с – сцепление, МПа
 φ – угол внутреннего трения, °
dP – перепад давления, МПа
g – ускорение свободного падения тела, м/с²
k – гидравлическая проводимость трещин, пересекающих исследуемый интервал,
см/с
K – проницаемость
L – длина участка испытания, м
MD – измеренная глубина, м
P – измеренное давление впрыска, МПа
P_a – асимптотическое давление, МПа
P_c – давление гидроразрыва (инициирование разрушения), МПа
P_o – гидростатическое давление в начале испытания, МПа
P_p – поровое давление, МПа
P_r – давление рефракции (повторное открытие трещины), МПа
P_{si} – давление захлопывания трещин, МПа
Q – скорость потока инъекционной жидкости, л/мин
R – радиус скважины, м
S_h – минимальное горизонтальное главное напряжение, МПа
S_H – максимальное горизонтальное главное напряжение, МПа
S_v – вертикальное главное напряжение, МПа
T – гидравлическая прочность массива на растяжение, МПа
t – время, с
TVD – фактическая вертикальная глубина с учетом местного рельефа, м
V – подаваемый объем инъекционной жидкости, л/м³
z – глубина, м

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, в связи с резким повсеместным усложнением горнотехнических условий добычи полезных ископаемых необходимость в достоверной оценке поля напряжений постоянно увеличивается [1].

Как показывает практика, обрушения бортов карьеров могут произойти без каких-либо визуальных признаков, вызвав гибель людей, повреждение оборудования и срыв графика горных работ. Понимание причин обрушения поможет избежать их проявления, определить стратегию проектирования и планирования горных работ [2].

Внезапные аномальные деформационные процессы в массиве горных пород приводят к нарушениям эксплуатации объектов недропользования и подвергают опасности жизнь и здоровье людей. Исследования показывают, что на внезапность деформационных явлений могут оказывать влияние физико-географические условия, физико-механические свойства пород, особенности структурно-тектонического строения горного массива. Одним из важных параметров, определяющих развитие катастрофических деформационных процессов, является геодинамическая активность массива, формирующая его напряженно-деформированное состояние [3].

Обоснование актуальности, теоретической и практической значимости темы исследования. Расчетами и экспериментальными исследованиями проведенных в натуральных условиях на золоторудном месторождении Пустынное установлено, что значение первоначальных напряжений пород массива горных пород значительно отличается от прогнозируемых. Направление главных нормальных напряжений ориентировано вкост простиранию, по простиранию и по падению рудного тела. Наибольшее значение имеют горизонтальные напряжения, превышающие вертикальные в 1,5–1,6 раза, что объясняется наличием в горном массиве не только гравитационных напряжений, но и первоначальных напряжений тектонического происхождения.

В этих условиях при ведении горных работ на больших глубинах существует возможность динамического проявления горного давления в окрестностях горных выработок. В связи с этим для предотвращения негативных проявлений геомеханических процессов необходимо решить задачу по определению напряженно-деформированного состояния горного массива и оптимизация углов наклона отдельных опасных участков карьера Пустынное, где деформационные процессы вызваны действием тектонических напряжений с целью повышения безопасности горных работ.

Решение данной задачи осуществлялось методом конечных элементов, с использованием численного моделирования.

В преобладающем большинстве случаев при проектировании геометрии бортов основываются на базу актуальной информации геологоразведочных работ, физико – механических свойств пород, грунтовых и подземных вод близ контура будущего карьера, пренебрегая геомеханические условия

месторождения при углублении и влияние напряженно – деформированного состояния массива. Такое положение обусловлено ограниченностью расходов на геологоразведочные, геомеханические изыскания, сжатые сроки по проекту, нехватка бюджета на исследования массива.

При разработке карьеров необходимо предоставить геомеханическое обоснование по геометрическим характеристикам конечного контура при проектировании карьера для обеспечения безопасной отработки [4]. Одним из современных методов, который позволяет учитывать воздействие основных геологических и геомеханических факторов на распределение напряжений в породном массиве, является численное моделирование напряженно-деформированного состояния бортов.

По данным исследования, проблема обеспечения устойчивости участков бортов глубоких карьеров остается нерешенной. Это связано с тем, что в большинстве исследований не учитываются тектонические напряжения, действующие в прибортовом массиве после обнажения путем буровзрывных работ без заоткоски, а также изменение их значений с глубиной.

Методы исследования. Включали системный анализ научной и нормативно-методической литературы; анализ результатов ранее проведенных исследований по объекту; натурные исследования НДС в прибортовом массиве методом гидроразрыва; испытание керновых образцов на предел прочности при одноосном сжатии (UCS), предел прочности при одноосном растяжении (UTS – бразильский метод), предел прочности при трехосном сжатии (ТХТ) с построением паспорта прочности и расчетом сцепления и угла внутреннего трения, предел прочности при прямом сдвиге по естественной трещине (SOJ – трехстадийный сдвиг); определение деформационных характеристик пород на модуль Юнга и коэффициент Пуассона (UCS+YP); оценка уровня напряженного состояния пород массива и карьерной выемки на карьере Пустынное до проектной глубины с использованием численных методов в 2-мерной постановке; и определение геотехнически оптимального профиля отдельных секторов карьера Пустынное, рекомендации по контролю напряженно – деформированного состояния.

Цель работы. Определение и оптимизация углов наклона отдельных опасных участков карьера Пустынное, где деформационные процессы вызваны действием тектонических напряжений с целью повышения безопасности горных работ.

Объектом исследования является прибортовой массив карьера Пустынное.

Задачи исследования:

- существующее состояние карьера Пустынное и геомеханическая характеристика объекта исследования;
- исследования природного поля напряжения месторождения Пустынное методом гидроразрыва скважин;
- исследование физико-механических свойств горных пород и руд месторождения Пустынное по стандартам ISRM и ASTM

- выявление влияния действия напряжённо-деформированное состояния массива на устойчивость отдельных участков бортов карьера Пустынное путем моделирования;
- рекомендации и обоснование контура проблемного участка;

1 Существующее состояние карьера Пустынное и геомеханическая характеристика объекта исследования

1.1 Общие сведения о месторождении

Месторождение золота «Пустынное» расположено в Актогайском районе Карагандинской области в 120 км к востоку от г. Балхаш, в 22 км к северу от железнодорожной станции Акжайдак (ж.д. линия Балхаш Актогай). Месторождение расположено в пределах планшета L-43–45-A и имеет географические координаты центра $46^{\circ}57'40''$ с.ш. И $76^{\circ}03'09''$ в.д. Автотранспортная связь Между месторождением И городом Балхаш осуществляется наполовину по грейдеру, а остальная часть (50 км) по дороге с асфальтным покрытием; до ж.д. станции Акжайдак по грейдеру (рисунок 1.1.1). Климат района резко континентальный с холодной зимой и жарким сухим летом, низкой нормой выпадающих осадков и дефицитом влажности.

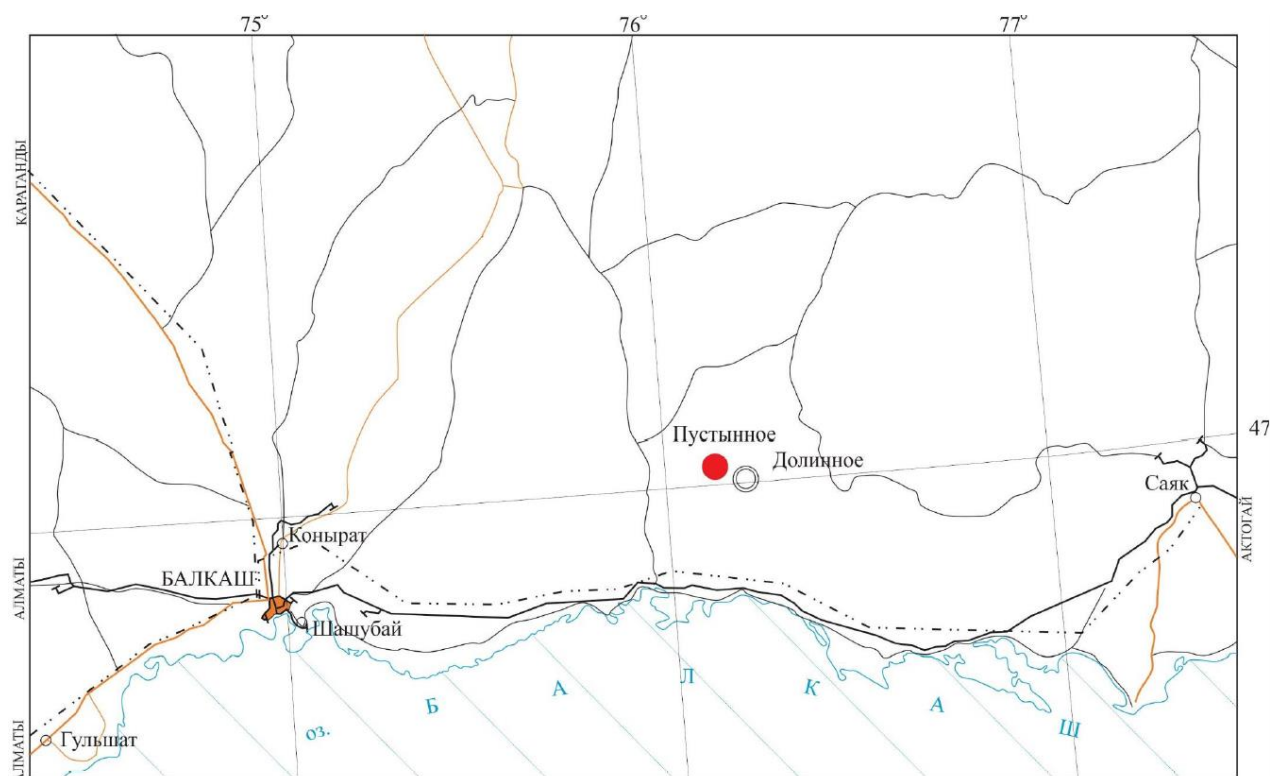


Рисунок 1.1.1 – Обзорная карта района месторождения

Самый холодный месяц - январь с абсолютным минимумом в отдельные годы - $40-45^{\circ}\text{C}$, самый теплый месяц - июль с абсолютным максимумом $+45^{\circ}$. Среднегодовая температура $+8-10^{\circ}\text{C}$. Засушливый климат участка проявляется в большом дефиците влаги в теплый период года (до 18 мбар), испарением с водной поверхности 1200–1300 мм. Высота снежного покрова 15–30 см, запасы воды в снеге 40–50 мм. Глубина промерзания грунтов 0,9–1,1 м.

В многолетнем разрезе количество атмосферных осадков изменяется от 57 до 219 мм при среднем значении 121 мм, количество "эффективных осадков" изменяется от 59 до 65 при среднемноголетнем значении 62 мм. Наибольшее значение в формировании поверхностного и подземного стоков имеют осадки зимне-весеннего периода («эффективные»).

Для района работ характерна интенсивная ветровая деятельность. Господствующими ветрами являются северо-восточные. Средняя скорость составляет - 5.2 метра в секунду.

Золоторудное месторождение Пустынное является сырьевой базой ГМК "Пустынное", находящегося в непосредственной близости от месторождения и входящего в состав АО «АК Алтыналмас».

В 3 км восточнее находится разведываемое месторождение Карьерное, с рудами аналогичными месторождению Пустынное. Оно является резервом для восполнения сырьевой базы горно-металлургического предприятия «Пустынное».

В 12 км к востоку расположено кварцево-жильное золоторудное месторождение Долинное.

Свободные трудовые ресурсы имеются в городах Балхаш и Караганда, ведущей отраслью которых является горнорудная промышленность.

ГМП «Пустынное» включает в себя рудник открытых горных работ (карьер), золото-извлекательную фабрику (ЗИФ), а также всю необходимую социальную и производственную инфраструктуру – вахтовый поселок, боксы для горнодобывающей техники, системы водо- и энергоснабжения, ремонтно-механические мастерские и пр.

Месторождение Пустынное выявлено при производстве съемочных работ в 1961–1962 годах и было отмечено как рудопроявление Иткудук. В 1979–92 годах выполнялись поисковые и разведочные работы. Впервые запасы месторождения были поставлены на Госбаланс в 1990 году, в последующие годы (1993, 1996г.г.) запасы переутверждались в связи с приростом и пересчетами.

В 1997–1999 годах на месторождении были выполнены работы по доразведке глубоких горизонтов и выявлению перспектив северо-западного фланга.

При подсчете запасов поверхностью служило дно карьера (по состоянию на 1.01.07 г.), которое располагалось для отдельных рудных тел на глубинах от 20 до 33–42 м от дневной поверхности. Дно карьера было опробовано вкрест простирания рудных тел бороздами длиной до 135 метров, расстояние между бороздами составляло 10–25 м. Опробование проводилось бороздой сечением 10x8 см секциями длиной 2–4 метра.

На глубину запасы разведаны колонковыми скважинами, пробуренными по 13 разведочным линиям, ориентированным в крест простирания рудных тел и расположенным на расстоянии около 40 метров друг от друга. Густота пересечения рудных тел по падению составила 20–60 м. Выход керна 86–89%. КERN скважин диаметром 76 мм раскалывался на две равные половинки и

опробовался интервалами от 0.2 до 2 м. При бурении диаметром 59 мм в пробу отбирался весь керн, длина проб при этом составляла 1–3.5 м, в среднем 2 метра. Всего при разведке месторождения было пробурено 122 скважины, из которых 89 участвуют в подсчете запасов.

Обработка проб производилась по стандартной схеме с учетом коэффициента неравномерности $k=0.8$. Пробы истирались до крупности 0.074 мм и направлялись в аналитическую лабораторию. До 1997 года пробы подвергались пробирному анализу, с 1997 года по всем пробам проводился спектрозолотометрический полуколичественный анализ, по результатам которого осуществлялась разбраковка проб. Пробы с содержанием 1.0 г/т и более направлялись на пробирный анализ, с содержанием 0.25–1.0 г/т - на атомно-абсорбционный анализ с пробирным окончанием.

Пробы для изучения физико-механических свойств руд и пород отбирались из 3-х специально пробуренных и 5 разведочных скважин, всего было отобрано 114 проб.

Изучение вещественного состава руд проведено на 20 групповых пробах, характеризующих руды месторождения на разных глубинах и по простиранию. По всем пробам был проведен полуколичественный спектральный анализ на 48 элементов.

Технологические свойства руд месторождения изучались в лабораторных и полупромышленных условиях в 1988, 1989, 1995 годах (окисленные руды) и в 1998 году (первичные руды).

Работы по изучению гидрогеологических и гидрохимических условий района месторождения с учетом фактических и ожидаемых водопритоков в горные выработки, разработки дренажных и водопонизительных мероприятий, оценки имеющихся и возможных источников водоснабжения и решения экологических вопросов при разработке месторождения проводились в соответствии с утвержденным проектом.

Месторождение Пустынное, согласно Инструкции ГКЗ, относится к 3 группе по сложности геологического строения как представленное минерализованными зонами среднего размера, сложного строения и с весьма неравномерным распределением золота. Достигнутая густота разведочной сети 40x20-60 м, качество выполненного комплекса геологоразведочных работ и проведенных исследований соответствуют требованиям Инструкции И позволяют квалифицировать большую часть (97%) разведанных запасов по категории С1.

1.2 Геологическое строение месторождения

В геологическом строении месторождения принимают участие отложения девонской и каменноугольной систем, приуроченные к локальному тектоническому блоку размером 400x600 м в ядре антиклинальной складки, ограниченной с юга Итмурундинским региональным разломом.

Девонские отложения представлены Морскими образованиями фаменского яруса, В состав которых входят чередующиеся пачки разнозернистых песчаников, алевролитов, алевропесчаников, известняков с редкими прослоями туфопесчаников.

Мощности отдельных пачек варьируют от первых сантиметров до нескольких десятков метров. Общая мощность отложений около 300 метров. Простираение пород субмеридиональное с мелкими флексурными перегибами, падение субширотное, крутое от 65° до 90°.

Отложения девона занимают большую часть площади месторождения, к ним пространственно приурочена вся золоторудная минерализация.

Песчаники мелко- и среднезернистые, преимущественно кварц-полевошпатового состава с глинисто-кремнистым, реже карбонатно-кремнистым цементом. Текстура песчаников от тонко- до грубослоистой, выраженная чередованием прослоев различной зернистости, мощностью от 1 мм до 3–10 см., обломки слабоокатанные. Песчаники являются наиболее благоприятной средой для концентрации золото-колчеданного оруденения.

Мощность слоев и пачек песчаников колеблется от 2 до 140 м.

Алевролиты кремнисто-глинистого состава, чаще всего тонкополосчатой текстуры, обусловленной частым чередованием прослоев серых аргиллитов и более светлых алевропесчаников мощностью от долей до 2–3 мм. Контакты между песчаниками и алевролитами нечеткие, постепенные. Мощность прослоев и пачек алевролитов от 2 до 62 м.

На месторождении широко развиты алевролиты с содержанием углеродистого вещества, образовавшегося за счет гидротермальной переработки слоев с повышенным содержанием органики и практически не несущие золотого оруденения. Цвет этих пород темно-серый, до черного, текстура грубосланцеватая, мощность прослоев от 13 до 72 м. Алевропесчаники являются переходной разностью между песчаниками и алевролитами или составляют пачки чередования маломощных слоев песчаников и алевролитов. К этим отложениям также приурочены повышенные содержания и концентрации золота.

Туфопесчаники по составу отличаются от песчаников только наличием туфогенного материала. Распространение их очень ограниченное, встречаются в западной части месторождения в лежащем боку рудных тел и имеют мощность от 2 до 20 м.

Известняки состоят из изометричных зерен кальцита неправильной формы размером от 0,05 до 0,5 мм, в виде отдельных обломков присутствует кварц. Встречаются довольно редко в виде отдельных линз и горизонтов в западной части месторождения. Мощность их колеблется от 1,5 до 20 м.

Отложения каменноугольной системы с угловым несогласием налегают на отложения девона. Распространены, в основном, в восточной части и представлены зеленовато-серыми разнозернистыми песчаниками, алевролитами, алевропесчаниками, гравелитами и туфами смешанного

состава. Наиболее развиты песчаники и алевролиты. Общая мощность этих отложений 250–470 м.

Четвертичные отложения на площади месторождения развиты слабо и представлены суглинками с угловатыми обломками коренных пород, мощность отложений - 0.2–3.5 м.

Интрузивные образования, представленные габбро-перидотитовым комплексом, расположены в юго-западной части площади. Породы состоят из оливина и ромбического пироксена, иногда интенсивно серпентинизированы. Контакты с осадочными породами тектонические. Породы комплекса значительно перемяты и раздроблены.

Дайковые образования представлены небольшими, до нескольких десятков метров в длину, дайками керсантитов. Простираение даек северо-западное, северное, падение крутое (70-80°) на восток. Мощность колеблется от 2 до 20 метров. Контакты с вмещающими породами четкие, резкие, сопровождающиеся зонами закалки.

1.3 Структурное строение месторождения

Рудовмещающие породы разорваны дорудными нарушениями сбрососдвигового характера северо-западного и северо-восточного направлений. Наиболее крупными из них являются нарушения северо-западного простирания. Амплитуда смещения по ним достигает 30 метров (при колебаниях от первых метров до 30 метров), падение крутое - 65-80°. Очень часто разломы северо-восточного простирания сопровождаются жильным окварцеванием и карбонатизацией. Разломы дорудные, так как по ним не отмечается существенных смещений рудных тел (рисунки 1.2.1).

Гидротермальные образования в пределах месторождения имеют довольно широкое распространение. Лиственитизированные породы развиты преимущественно вдоль разрывных нарушений, в виде линейных линзообразных зон протяженностью 10–15 м при мощности от 1 до 10 м.

Гидротермальные изменения в пределах рудных тел и по их периферии представлены интенсивным окварцеванием осадочных пород. Окварцевание проявляется в виде метасоматической проработки осадочных пород и разноориентированных кварцевых прожилков и жил. Прожилковое окварцевание в песчаниках наиболее интенсивное и имеет штокверковый характер. Мощность прожилков от волосовидных до 2–3 мм. В алевролитах и алевропесчаниках прожилки ориентированы вдоль слоистости и имеют мощность от первых миллиметров до 10–15 мм. Изредка отмечаются секущие крутопадающие жилы молочно-белого кварца мощностью 0,5–3 м, не несущие золотого оруденения.

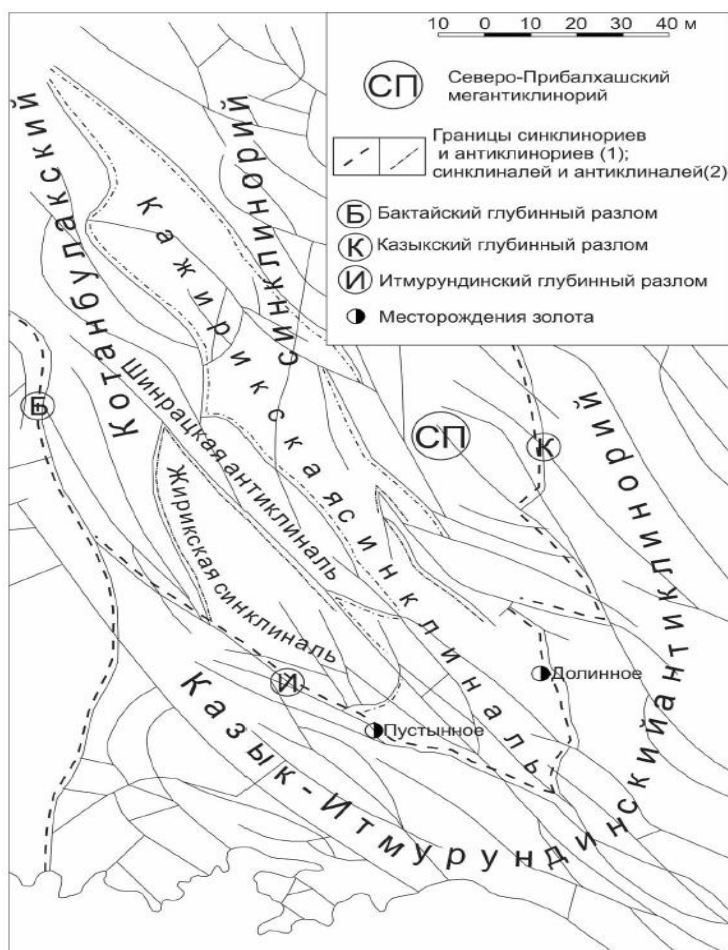


Рисунок 1.3.1 – Тектоническая схема района месторождения Пустынное

Гидротермальные изменения пород развиты вдоль многочисленных сколовых трещин, игравших роль рудоподводящих и рудораспределяющих каналов.

Кварцево-жильные зоны характеризуются сложным строением, с частыми пережимами и раздувами и имеют как согласное со слоистостью, так и секущее залегание. Простираение их изменчивое — от северного до северо-восточного, протяженность - от первых метров до сотен метров, углы падения крутые - $65-90^\circ$, мощности - от первых десятков сантиметров до 6 метров.

Состав прожилков кварцевый, кварц - полевошпатовый, кварц-карбонатный.

Большую роль в формировании рудных зон играет литологический контроль. Концентрация золота и степень гидротермальной переработки в толщах песчаников и алевропесчаников выше, чем в алевролитах. Это объясняется разной степенью проницаемости пород и наличием углеродистого и глинистого вещества. Алевролиты с повышенным содержанием углеродистого вещества, превращенные в углисто-кремнистые алевролиты (сланцы), выступают в качестве экрана и практически не несут золотого оруденения.

Различное сочетание структурных, тектонических и литологических факторов обусловило довольно сложное размещение оруденения и форму

рудных тел. Золотая минерализация распределяется весьма неравномерно. На фоне сравнительно убогого оруденения выделяются зоны (тела) кондиционных руд, разделенных некондиционными прослоями.

Золотое оруденение месторождения пространственно связано с линейно-вытянутыми в субмеридиональном направлении штокверковыми зонами, в пределах которых терригенно-осадочные породы девона подверглись метасоматическим изменениям (окварцевание, пиритизация, серицитизация, карбонатизация, хлоритизация). Зоны крутопадающие $75-90^\circ$, по простиранию прослежены на 550 М при мощности 130–170 м. Основными рудоконтролирующими факторами являются зоны интенсивного окварцевания и пиритизации. Окварцевание носит как метасоматический, так и жильный характер (кварцевые прожилки, жилы мощностью до 2-х м, прожилки и гнезда кварц-карбонатного состава).

Зона окисления распространяется до глубины 13–50 м и в настоящее время на 90% отработана карьером.

В пределах рудных зон выделены промышленные рудные тела, оконтуренные по бортовому содержанию 0,5 г/т. Границы рудных тел нечеткие, устанавливаются только по результатам опробования. Рудные тела представляют собой пластообразные и линзообразные залежи мощностью от первых метров до 112 м. Рудные тела крутопадающие ($60-90^\circ$), с пережимами и раздувами, простирание субмеридиональное $315-20^\circ$

Всего выделено 7 рудных тел: 1, 1а, 1б, 2, 2а, 3, 3а.

Основные морфологические параметры рудных тел месторождения «Пустынное» приведены в таблице 1.3.1.

Рудное тело 1 основное рудное тело, в котором сосредоточено 67.1% подсчитанных запасов золота месторождения. Характеризуется наиболее сложным внутренним строением из-за наличия значительного количества прослоев пустых пород и некондиционных руд, извилистых контуров с раздувами и пережимами. Рудное тело прослежено по простиранию на 440 м (р.л. 2-12) и по падению до глубины 300 м. Азимут простирания изменяется от 340 до 0° , углы падения - от 45 до 90° , мощность от 3 до 112 м (средняя 41 м). Содержание золота по отдельным пересечениям колеблется от 0.5 до 6.57 г/т при среднем 1.49 г/т.

Рудное тело 1а является восточным продолжением рудного тела 1, прослежено между разведочными линиями 8 и 12 на протяжении 208 м, на глубину изучено на 285 м, мощность от 2.5 до 37 м, средняя 7.2 м. Азимут простирания $315-335^\circ$, угол падения $66-90^\circ$ на восток. Содержание золота по пересечениям изменяется от 0.53 до 2.14 г/т (среднее 1.38 г/т).

Рудное тело 1б представляет собой западное ответвление рудного тела 1 (р.л. 8–12). Мощность колеблется от 2.5 до 27 м (средняя 6.9 м), азимут простирания $330-20^\circ$, угол падения $78-90^\circ$. Содержание золота по пересечениям 0.52–2.03г/т (среднее 1.46 г/т).

Таблица 1.3.1 – Основные морфологические параметры рудных тел месторождения Пустынное

Прослежено по падению, м	Прослежено по простиранию, м	Мощность, м от-до / средняя	Угол падения от-до, градус	Азимут простирания, градус	Содержание золота, г/т от-до среднее	Запасы золота, в % от общих
Рудное тело 1						
300	440	3–112 41	45-90	340-0	0,5–6,57 1,49	67,1
Рудное тело 1а						
285	208	2,5–37 7,2	66-90	315-335	0,53–2,14 1,38	4,1
Рудное тело 1б						
259	188,5	2,5–27 6,9	78-90	330-20	0,52–2,03 1,46	2,2
Рудное тело 2						
110	218,5	2–20 6,4	60-83	300-315	0,55–4,8 1,09	1,5
Рудное тело 1а						
214	173,5	1,5–72 15,2	73-90	330-315	0,63–2,9 1,23	5,7
Рудное тело 3						
210	120	10–100 54,4	68-90	-	0,5–3,04 1,23	18,4
Рудное тело 3а						
200	50	8–18 7,3	-	-	4,46	1,0

Рудное тело 2 имеет выдержанные параметры и непрерывно прослеживается на 218 м (р.л. 3–8). На глубину изучено до 110 м, средняя мощность составляет 6,4 м (от 2 до 20 м.), среднее содержание 1,09 г/т (от 0,55 до 4,8 г/т), азимут простирания 300-315°, углы падения 60-83°.

Рудное тело 2а является северо-западным продолжением рудного тела 2, прослежено на 173 м (р.л. 10–13), на глубину до 214 м. Мощность изменяется от 1,5 до 72 м (15,2 м) содержание золота - от 0,63 до 2,9 г/т (1,23 г/т). Азимут простирания 315-330°, углы падения - 73-90°.

Рудное тело 3 второе по количеству запасов на месторождении, содержит 18,4% запасов золота. С поверхности прослежено в профилях 9–10 и 11, ниже отметки + 450 м в профилях 9 и 10. Рудное тело имеет форму рудного столба размером 120x100 м., углы падения - 68-90°, являясь наиболее богатым по содержанию золота (2,08 г/т).

Рудное тело 3а является ответвлением рудного тела 3 и подсечено только в районе р.л. 10. Параметры его определены методом интерполяции (50 м по простиранию и на глубине подсчитано между горизонтами 130 и 200 м.). Содержание золота и мощность приняты по скважине 12 и составляют 4,46 г/т и 7,3 м соответственно.

1.4 Гидрогеологические особенности месторождения

Месторождение Пустынное расположено в зоне сухих степей и полупустынь. Для него характерно небольшое количество атмосферных осадков, высокий дефицит влажности и высокая испаряемость. Так, в многолетнем разрезе количество атмосферных осадков изменяется от 57 до 219 мм при среднем значении 121 мм. Сумма «эффективных» осадков зимне-весеннего периода изменяется от 59 до 65 мм при среднем значении 62 мм. Эти осадки имеют наибольшее значение в формировании поверхностного и подземного стока.

Гидросеть района слабо развита и представлена только кратковременными водотоками в весенний период. Ближайшей рекой является р. Токрыау, которая протекает в 65 км к западу от месторождения.

На территории района подземные воды распространены повсеместно и характеризуются в зависимости от особенностей гидрогеологических условий неравномерным распределением ресурсов и запасов на отдельных участках, а также крайней пестротой их химического состава и минерализации.

Характерными чертами участка являются: сильная тектоническая дробленость палеозойских и допалеозойских пород на блоковые структуры, развитие трещинных и трещинно-жильных вод и повышение их минерализации в направлении с севера на юг, от водораздельных участков в сторону озера Балхаш, являющегося базисом стока подземных и поверхностных вод.

Участок месторождения характеризуется различными фильтрационными свойствами пород, неявно выраженными источниками формирования запасов подземных вод, отсутствием связи с поверхностными водами.

По характеру водовмещающей среды, условиям залегания и формирования в районе выделяются трещинные, трещинно-жильные и поровые воды.

Практическое значение имеют трещинные, трещинно-жильные воды, заключенные в коренных породах.

Основным источником питания трещинных и трещинно-жильных подземных вод являются атмосферные осадки. Наряду с абсолютным количеством осадков на формирование подземных вод большое влияние оказывает режим их распределения по временам года и соотношение осадков и испарения.

Решающую роль в пополнении естественных ресурсов принадлежит осадкам зимне-весеннего периода. Определенную роль играют ресурсы, привлекаемые с сопредельных структур по ослабленным зонам разломов регионального и местного значения. Инфильтрация атмосферных осадков от структурно-геоморфологического положения, мощности перекрывающих отложений, физического состояния водовмещающей среды и пр.

В полупустынных условиях северного Прибалхашья при значительной величине испарения питание подземных вод за счет атмосферных осадков происходит только на площадях распространения хорошо обнаженных трещиноватых пород, слагающих возвышенные формы рельефа, которые развиты к северу от месторождения и где значительную роль в питании принадлежит временным водотокам и поверхностному стоку.

Разгрузка подземных вод происходит родниками, подземным стоком в озеро Балхаш, транспирацией растениями и испарением.

Гидрогеологические условия месторождения Пустынное схематически представляются в виде пласта неограниченного в плане. Это связано с тем, что окружающие продуктивную толщу отложения В процессе освоения месторождения будут оказывать влияние на водоприток в карьер за счет притяжения подземных вод по зонам тектонических нарушений. Фильтрационные свойства фамен-турнейских отложений неоднородны в плане и разрезе. Основные водопритоки выявлены на глубинах от 8–9 до 49,6 м, а наиболее обводненные интервалы отмечаются до глубины 25 м. По аналогии с подобными горными выработками региона глубина водопритоков принята равной 80 м. Ниже глубины 80–100 м трещиноватость пород практически затухает.

Водоприток в карьер состоит из относительно постоянных водопритоков за счет дренирования подземных вод, притоков за счет атмосферных (твердых) осадков, выпадающих на площади карьера и притока за счет ливневых осадков. Ожидаемый водоприток в проектный карьер составит:

- водоприток за счет дренирования подземных вод – 12,1 м³/час;
- приток за счет атмосферных осадков – 28,6 м³/час;
- эпизодический приток за счет ливневых осадков 464 м³/час.

1.5 Геомеханическое состояние месторождения Пустынное

В диссертационной работе используются данные ранее проводимых визуальных и инструментальных наблюдений за бортами и уступами карьера, выполненных отделом геомеханики и гидрогеологии месторождения «Пустынное», чтобы выделить участки, подверженные деформациям, и определить причины этих деформаций.

По результатам геомеханических наблюдений, инферометрического радара IDS Arcsar, анализа геологического, структурного строения месторождения и гидрогеологических условий было выявлено, что:

1) Юго-западная часть карьера Пустынное сложен интрузивным отложением, представленным серпентинитами (рисунок 1.5.1), которая имеет слабые прочностные характеристики, чем окружающие литологические разности. В пределах обнаженных участков карьера серпентинит демонстрирует низкую прочность неразрушенной породы в диапазоне от 20 до 40 Мпа, при одноосном сжатии, а значения рейтинга массивов горных пород RMR приблизительно от 25 до 35. Оценка керна скважин, пробуренных на юго-

западе, показала более высокие рейтинги по серпентиниту, где взвешенные значения RMR находилось в районе 48 и выше. Это говорит о том, что обнаженный серпентинит на бортах карьера демонстрирует более низкую прочность массива горных пород, чем керн, в результате выветривания открытой поверхности что снижает их прочностные характеристики. В ходе анализа юго – западного борта было выявлено, что серпентиниты на данном участке переслаиваются с метасоматитами и углистыми алевролитами. Контакты с осадочными породами тектонические. Породы комплекса значительно перемяты и раздроблены. Заполнитель представлен слоистым минералом из класса силикатов - тальком, который имеет минимальную твердость по шкале Мооса.



Рисунок 1.5.1 – Обрушения серпентинитов на гор. + 340 м ЮЗ борта

2) На нижних горизонтах карьера Пустынное в юго – западной и северо-восточной частях обнажений по направлению азимута $N 67^{\circ} \pm 10^{\circ}$ прослеживаются действия тектонических напряжений на состояние массива в виде проявлений деформаций (рисунок 1.5.2).

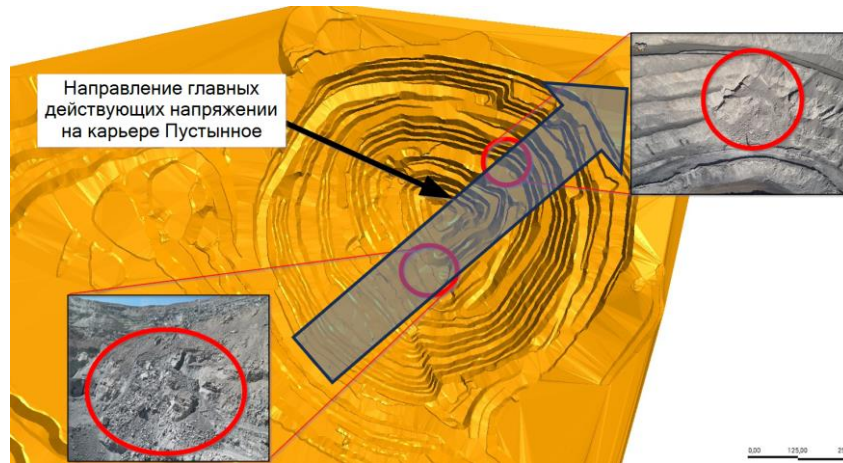


Рисунок 1.5.2 - Проявления участков деформаций и интерпретация направления главных действующих напряжений на карьере Пустынное в ГИС Leapfrog GEO

3) Домен углистых алевролитов представлен сильнотрещиноватыми породами темно – серого цвета (рисунок 1.5.3). Согласно имеющимся данным отдела геомеханики по картированию уступов массив горных пород в основном содержит от 2 до 4 систем трещин, шероховатость трещин гладкая, заполнитель чаще всего отсутствует, реже представлен кварцитом, а среднее расстояние между естественными трещинами всех систем составляет 0,1–0,5 м, что относит эту породу на месторождении ко второй категории трещиноватости. Показатель рейтинга пород RQD варьируется от 10% до свыше 90%. Внутри карьера есть несколько бортов уступа, образованные почти параллельно кливажу, имеющие особенные геотехнические условия. При формировании бортов перпендикулярно или наклонно к кливажу, борта часто расслаиваются и имеют плохие условия, что приводит к риску деформации по направлению трещин.

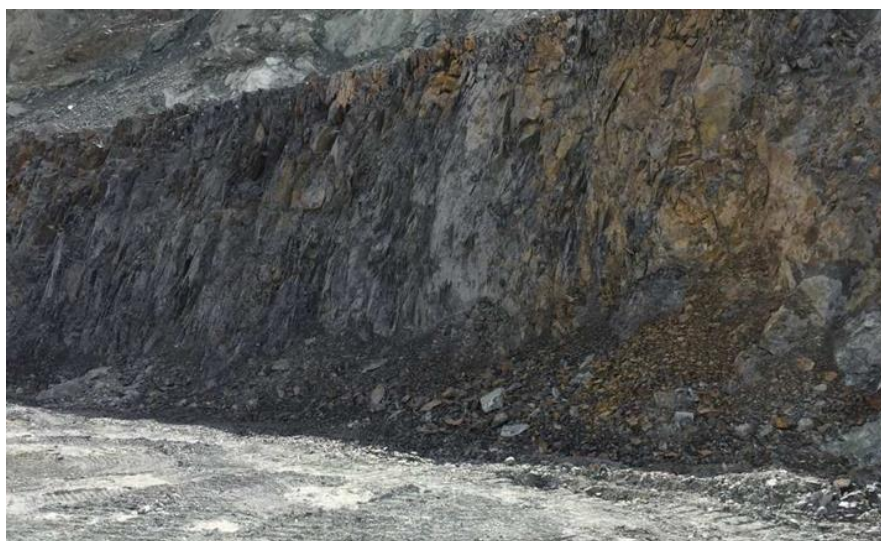


Рисунок 1.5.3 - Участок контакта углистого алевролита с песчаниками на гор. +410 м карьера Пустынное

4) Массив в восточной части карьера Пустынное представлен синклиналию, сложенной переслаиванием углистых алевролитов, песчаников и алевропесчаников (рисунок 1.5.4). На данном участке имеются риски локальных обрушений в виде обратного опрокидывания в ядре синклинали и изогнутого опрокидывания по крыльям синклинали. По результатам кинематического анализа структурных данных восточной части борта карьера имеется вероятность обрушения в виде обратного опрокидывания на 90,91%, что предшествует деформации борта карьера.



Рисунок 1.5.4 - Границы синклиналиальной зоны

Выводы к первому разделу

1. Для карьера Пустынное наиболее тектонически напряженными участками определены нижние горизонты в юго – западной и северо-восточной частях обнажений по направлению азимута $N 67^{\circ} \pm 10^{\circ}$, где наблюдаются проявления горного давления в виде проявлений деформаций (рисунок 1.5.2).
2. На сегодняшний день проблема стабилизации этих участков не решена.
3. Наиболее достоверный прогноз характера и формы проявления горного давления при отсутствии данных о действующих в массивах пород естественных напряжений невозможен. В связи с этим для решения этой проблемы требуется проведение натурных и экспериментальных исследований НДС массива карьера Пустынное.

2 Исследования природного поля напряжения месторождения пустынное методом гидроразрыва

2.1 Сущность определения напряженно деформированного состояния массива методом гидроразрыва

В механике горных пород термин "гидроразрыв массива" используется для операций закачки воды в герметичные интервалы ствола скважины для создания и распространения гидроразрывов в массиве горных пород. Данные о давлении при гидроразрыве пласта могут быть использованы для определения напряженного состояния в массиве горных пород. Хотя этот метод был хорошо известен как метод стимуляции нефтяных и газовых скважин с конца 1940-х годов, первые измерения напряжений гидроразрыва пласта были выполнены на подземном испытательном полигоне в северной Миннесоте в 1968 году. С тех пор гидравлический разрыв массива используется во всем мире в многочисленных неглубоких и глубоких скважинах для измерения внутренних напряжений массива.

Классический анализ гидроразрыва пласта основан на решении Кирша для распределения напряжений вокруг круглого отверстия в однородном, изотропном, упругом материале, подвергаемого воздействию высоких сжимающих напряжений [5]. В случае вертикальной скважины решения Кирша используются Формула Хабберта и Уиллиса (1957г.) [6] для критического давления P_c в момент начала разрушения (2.1.1):

$$P_c = 3 \cdot S_h - S_H + T - P_p, \quad (2.1.1)$$

где S_h и S_H - горизонтальные главные напряжения,

T - гидравлическая прочность на растяжение породы в массиве,

P_p - поровое давление в массиве породы.

Предполагается, что напряжение раскрытия трещин является главным напряжением, порода однородна, изотропна и изначально непроницаема, а индуцированная трещина ориентирована перпендикулярно минимальному горизонтальному главному напряжению S_h . Последнее предположение дает:

$$S_h = R_{si}, \quad (2.1.2)$$

где R_{si} — это запорное давление, которое просто удерживает трещину открытой после закрытия системы наддува.

Основываясь на линейно-упругой модели поведения массива определяем главные напряжения соотношениями:

$$S_h = R_{si} \quad (2.1.3)$$

$$S_H = 3P_{si} - P_r - P_p \quad (2.1.4)$$

$$S_v = \rho \cdot g \cdot 2 \cdot P_r = P_c - T \quad (2.1.5)$$

Таким образом, для анализа напряжений требуется знание плотности горной массы ρ , определение характерных значений давления, давления захлопывания трещин P_{si} и давления повторного раскрытия трещины P_r на глубине z , где возникает трещина, и информация о поровом давлении P_p . Азимуты наведенных вертикальных трещин соответствуют ориентации S_H .

Учитывая допущения, используемые в подходе Хабберта и Уиллиса [6], определение напряжений по этим уравнениям иногда может быть поставлено под сомнение. Это, в частности, относится к предположениям об изотропии горного массива и поровом давлении.

Кроме того, порода на глубине всегда характеризуется наличием существующих (микро-) трещин или слабых плоскостей с различной ориентацией относительно ориентации главных напряжений. При закачке воды в герметичный скважинный интервал, содержащий такую трещину, она раскроется, как только давление воды превысит нормальное напряжение S_n , действующее поперек (произвольно ориентированной) плоскости трещины. В этом случае завершение - в P_{si} давления, чтобы держать трещину открытой после того, как система давления закрыта - в равенстве нормального напряжения S_n . Однако из-за неоднородностей горного массива угол наклона и распространения усилия могут значительно расходиться. Предполагая, что горизонтальные компоненты напряжений линейно изменяются с глубиной z , а вертикальное напряжение S_v является главным напряжением, нормальное напряжение S_n , действующее поперек плоскости разрушения данной ориентации, тогда связано с напряжениями дальнего поля (например, Baumgärtner and Rummel, 1989):

$$S_n(z_i) = \rho g z \cos^2 \alpha_i + \frac{1}{2} \sin^2 \alpha_i \{ S_{H0} + S_{h0} + (\delta_H + \delta_h) z_i^* - (S_{H0} - S_{h0}) \cos 2(\Theta'_i - \Theta'') - (\delta_H - \delta_h) z_i^* \cos 2[\Theta'_i - (\Theta'' + \eta)] \} = P_{si}(z_j) \quad (2.1.6)$$

S_{H0} и S_{h0} -основные горизонтальные напряжения на верхнем пределе исследуемого участка скважины,

δ_H и δ_h - градиенты горизонтальных напряжений, а Θ'' - ориентация S_{H0} относительно Севера.

Угол η вводится для учета возможного поворота поля напряжений с глубиной, если рассматриваются профили большой глубины. При $\eta = 0^\circ$ уравнение содержит 5 неизвестных и поэтому для его решения требуется не менее 5 измерений S_n на различных глубинах, на трещинах с различной ориентацией. Затем напряжения могут быть оценены методом инверсии. В

принципе эта процедура минимизирует разницу между теоретически рассчитанными P_{si} -значениями и измеренными P_{si} - значения.

Расчеты сопровождаются построением графика среднего отклонения (AVE) между теоретическими и измеренными P_{si} - значениями в зависимости от ориентации SH, вычисленной для соответствующей модели поля напряжений:

$$AVE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_{si,theor} - P_{si,measured})^2}{n - 1}} \quad (2.1.7)$$

где n-количество измерений.

2.2 Описание оборудования

Измерения напряжений на карьере "Пустынное" проводились с использованием метода гидроразрыва / гидравлического нагнетания жидкости. Пакеры подвешиваются на специальном кабеле с семью жилами. Управление кабелем производится с помощью электроприводной лебедки. Этот метод позволяет быстро "регистрировать напряжение" без применения буровой установки на рабочем месте. Кроме того, испытания с помощью кабеля позволяют контролировать давление и рост трещин благодаря высокой жесткости гидравлической системы и возможности регистрации давления в скважине в режиме реального времени. Схематическое изображение установки системы приведено на рисунке 2.2.1.

Для проведения экспериментов по гидравлическому впрыску/гидроразрыву пласта в открытых скважинах диаметром 96 мм использовался Пакер «MeSy® straddle packer assembly PERFRAC-II», оснащенный усиленными кевларом/стальной сеткой элементами Пакера (IP1, OD: 91 мм). Длина уплотнения каждого элемента Пакера составляла около 1,0 м, длина испытательного интервала между двумя пакерами-около 0,7 м. Элементы Пакера герметизировались с помощью змеевика из нержавеющей стали высокого давления (OD 8 мм / ID 6 мм, максимальное рабочее давление 60 МПа), который был закреплен на каротажном кабеле с интервалом 50 м. Двухтактный клапан, установленный на верхней части узла Пакера, позволяет переключаться с давления Пакера на впрыск в испытательный интервал и обратно контролируя натяжение каротажного кабеля. Для нагнетания жидкости как на элементы пакера, так и в испытуемый интервал используется трехплунжерный насос с электроприводом (СПЕСК, тип НР 400/ 2–10) с максимальным рабочим давлением 40 МПа и максимальной скоростью впрыска 10 л / мин. Закачиваемая жидкость – вода.

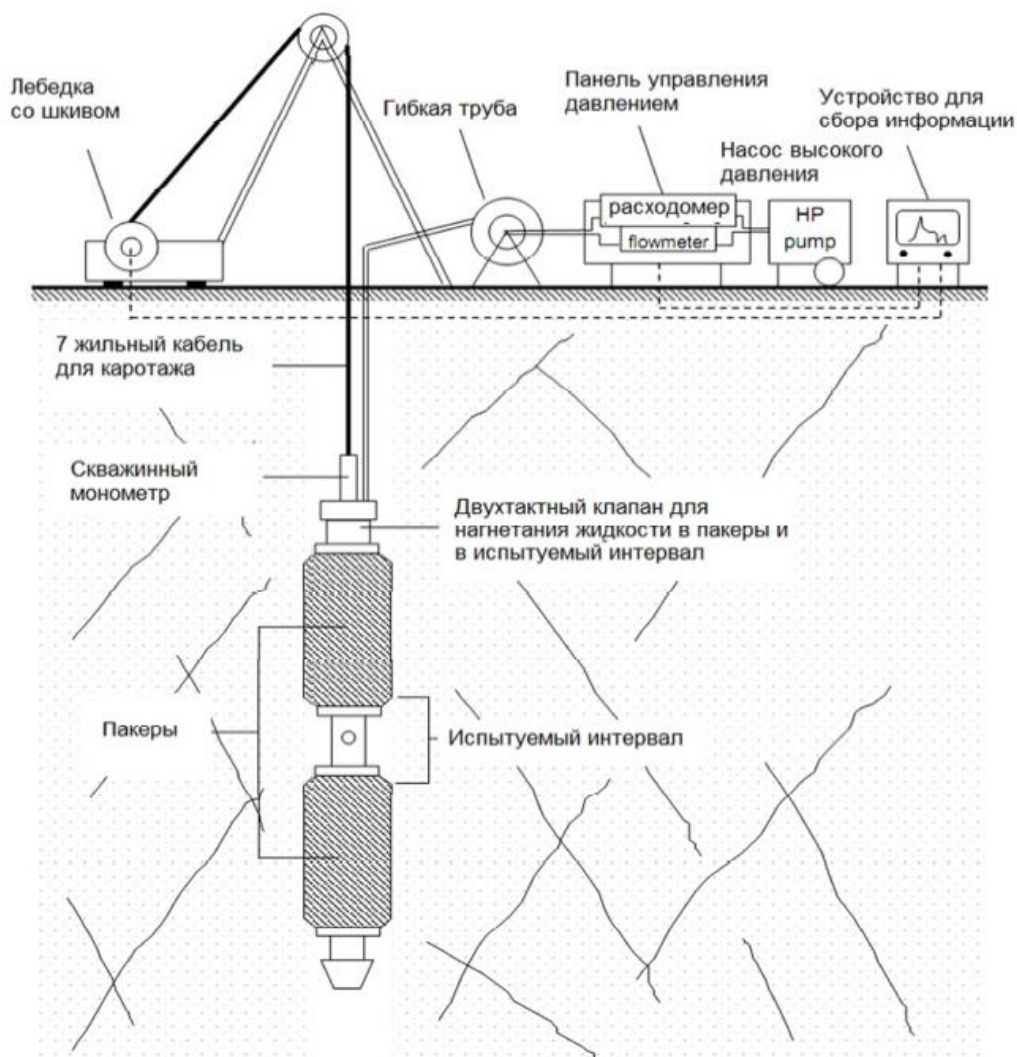


Рисунок 2.2.1 - Схематический вид системы испытательного кабельного пакера

Пакерное и интервальное давление измеряли в скважине и в устье скважины с помощью высокоточных электрических датчиков давления (KELLER, тип PAA-33X, 0–40 МПа). Значения давления регистрировались с помощью цифровой системы сбора данных (Solexperts SCIA, 16 каналов, разрешение 16 бит, частота дискретизации: 5 Гц). В рамках обеспечения качества датчики давления и расходомер были откалиброваны до проведения испытаний на месте. Как правило, датчики давления испытывались на эталонном тензодатчике. Расходомер исследовали путем определения массы в единицу времени с точным балансом. Калибровки непрерывно проверялись во время проведения полевых испытаний.

Инструмент для ориентации созданных или раскрытых трещин состоит из одного элемента Пакера (S&K, OD: 91 мм) с мягкой резиновой втулкой в сочетании с магнитным многошаговым устройством для ориентирования. Пакер сохраняет отпечаток со стенок скважины и от следов трещины, при этом давление в пакере должно превышать давление повторного раскрытия трещины. Пакер распирается в течение 5–10 минут.

2.3 Порядок выполнения замеров напряжении

Испытания гидроразрывом проводились в полном соответствии со стандартом ISRM (Haimson and Cornet, 2003) [7]. Типичная запись испытания, иллюстрирующая процедуру испытания, показана на рисунке 2.3.1 для испытания на глубине 83,75 м в скважине DDHP_19_1. Каждое испытание состояло из следующих циклов впрыска после нагнетания давления (дифференциального) в элементах Пакера до 5–10 МПа:

- быстрая подача давления в испытательный интервал до перепада давления около 1–3 МПа и последующий контроль снижения давления около 5 минут (Импульсный тест на рисунке 2.3.1);
- сброс давления и восстановление объема жидкости;
- повышение давления в интервале испытаний со скоростью впрыска около 1–2 л/мин до тех пор, пока не произойдет падение давления в интервале или не будет достигнуто постоянное давление впрыска (испытание гидроразрыва на рисунке 2.3.1); прекращение впрыска и закрытие кранов на 2–3 минуты;
- сброс давления и восстановление объема жидкости;
- повторное повышение давления в испытательном интервале со скоростью впрыска от 1 до 4 л/мин (в порядке возрастания) до достижения постоянного давления впрыска (испытание повторного разрыва на рисунке 2.3.2; прекращение впрыска и остановка на 2–3 минуты;
- сброс интервала давления и восстановление объема жидкости
- несколько повторений циклов повторного разрыва, пока значения давления захлопывания трещин не будут восстановлены
- ступенчатое увеличение скорости потока впрыска и наблюдение соответствующего давления впрыска (тест изменения скорости подачи на рисунке 2.3.1);
- сброс интервала давления и восстановление объема жидкости;
- выкачивание воды из пакера и движение к следующему испытательному участку

Испытания оттискного пакера состояли из нагнетания жидкости в пакера примерно на 30% выше давления повторного раскрытия трещины в течение 5 минут. После возвращения пакера на поверхность, отпечаток и положение контрольной отметки были задокументированы на пластиковой пленке, обернутом вокруг пакера. Данные Multy-Shot хранились, документируя ориентацию контрольной отметки относительно магнитного севера, помимо данных об ориентации скважины (рисунок 2.3.2, для испытания на 83,75 м в скважине DDHP_19_1).

Таким образом, в 2 скважинах выполнено 19 испытаний на гидроразрыв и 19 оттискных испытаний в течение 8 рабочих дней.

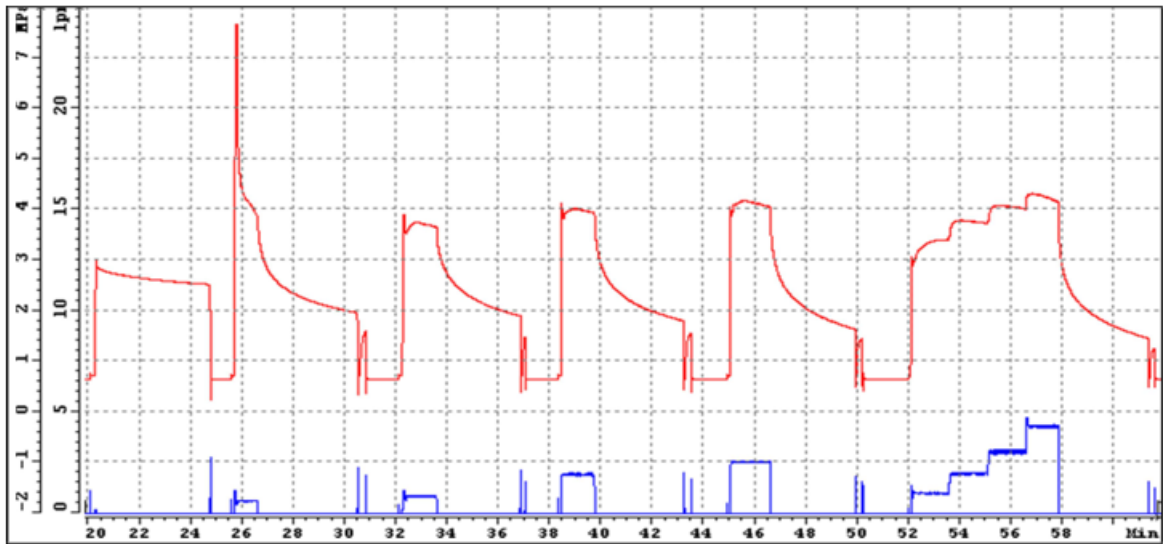


Рисунок 2.3.1 - Скважинная запись испытания гидроразрыва массива на глубине 62,35м в скважине DDHP_19_1

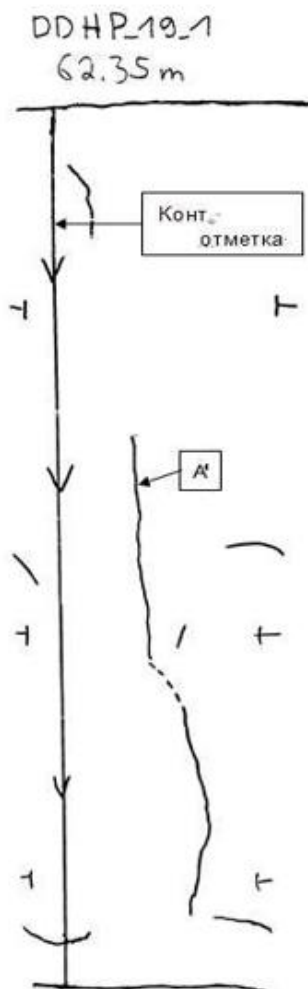


Рисунок 2.3.2 - Отпечатки разрушения при испытании оттискового пакера на глубине 62,35м в скважине DDHP_19_1. Окружность пакера составляет около 285 мм, длина приблизительно 900мм

2.4 Анализ результатов измерения напряженно деформированного состояния массива путем гидроразрыва

Для определения напряжений методом гидроразрыва массива, обычно требуются следующие данные испытаний:

- давление первичного разрыва трещин P_c (создание трещин);
- давление повторного разрушения P_r (повторное раскрытие трещины);
- давление захлопывания трещин P_{si} ;
- определение пространственной ориентации созданных или раскрытых трещин

Значения давления раскрытия трещин P_c , повторного раскрытия P_r , и давления захлопывания трещин P_{si} определяются следующим образом:

Давление создания трещин P_c определяется как максимальное давление, наблюдаемое во время цикла гидроразрыва (первое повышение давления). P_c определяется из детального графика зависимости давления P от времени t .

Давление повторного раскрытия трещин P_r определяется на основе анализа жесткости (dP/dV) во время повышения давления в испытательном интервале. Открытие трещины коррелирует со значительным отклонением жесткости от линейности.

Давление захлопывания трещин P_{si} определяется следующей трехэтапной процедурой:

- График зависимости давления P от расхода впрыска Q позволяет определить точное значение давления, при котором гидравлический поток прекращается ($Q = 0$). Таким образом, в зависимости графика P от Q дает оценку верхнего предела захлопывания трещин.

- Разность между давлением P и асимптотическим давлением P_a от времени t дает нижний предел давления захлопывания трещин, предполагая, что линейная часть графика характеризует радиальное течение, например, существующие трещины захлопнуты.

- В этих двух пределах давление захлопывания трещин, соответствующее действующему напряжению поперек плоскости разрушения, знаменует переход от быстрого линейного падения давления (наблюдаемого сразу после захлопывания трещин) к началу медленного снижения давления с преобладанием диффузии. Переход можно определить по касательной к линейному снижению давления на детальном графике P в зависимости от t .

Давление P в качестве дополнительной оценки главного минимального напряжения получено из тестов скорости шага с использованием квазистационарных 16 пар данных P - Q , определенных из анализа графика давления P и расхода Q в зависимости от времени t . В большинстве случаев давление захлопывания трещин близко к давлению в системе.

2.5 Результаты измерения скважины DDPH_19_1

В общей сложности в скважине DDPH_19_1 глубиной от 24,55 м до 94,45 м было проведено 9 гидравлических испытаний на разрыв/гидравлическое закачивание, включая 9 испытаний по съемке слепков с пакера. Полученные данные о характерных давлениях (давление разрушения P_c при инициировании разрушения, давление повторного раскрытия трещины P_r , результирующая прочность на разрыв $t = P_c - P_r$ и давление захлопывания трещин P_{si}), а также результаты испытаний отпечаточного пакера (направление развития трещины θ , направление падения β , падение α) обобщены в таблице 2.5.1 и графически показаны на рисунках 2.5.1 и 2.5.2. Данные ориентации трещины приведены относительно магнитного азимута.

Восемь из 9 испытаний гидроразрыва в скважине DDPH_19_1 характеризуются инициированием трещин со значениями давления разрыва в диапазоне от 3,9 МПа до 10,1 МПа. В ходе испытания на глубине 31,55 м стимулировалась ранее существовавшая трещина без пика давления и с захлопыванием, полученным в результате испытания на ступенчатое нагнетание, равным 0,9 МПа. Значения давления преломления изменяются в диапазоне от 1,4 МПа до 5,8 МПа, а соответствующая гидравлическая прочность на разрыв T на месте составляет от 1,05 МПа до 4,3 МПа. Большинство испытаний характеризуются различными значениями давления захлопывания трещин, варьирующимися в интервале от 1,2 МПа до 4,4–4,7 МПа.

Несмотря на то, что большинство испытаний по съемке слепка с пакера показали инициирование или стимулирование осевых и крутонаклонных трещин, детальный анализ не выявил ни равномерной ориентации трещины, ни какой-либо корреляции между наблюдаемым разбросом значений давления захлопывания трещин и наблюдаемыми ориентациями трещины (например, на глубине 24,55 м и 37,65 м наблюдались осевые трещины с аналогичной ориентацией СЗ-ЮВ, однако с явно различными давлениями захлопывания трещин).

Тем не менее, напряжения были рассчитаны на основе концепции Хабберта и Уиллиса (1957) [6] с использованием характерных значений давления P_r и P_{si} . Вертикальное напряжение S_v рассчитывали для средней плотности вскрышной массы породы 2,7 г/см³. Максимальное горизонтальное напряжение S_H было рассчитано без учета окружающего порового давления. Рассчитанные минимальные и максимальные значения горизонтальных напряжений S_h и S_H приведены в таблице 2.5.1 и графически показаны на рисунке 2.5.3 в сравнении с вертикальными напряжениями S_v . Полученные результаты свидетельствуют о достаточно неоднородном распределении напряжений с 3 зонами различных натуральных главных напряжений и направлений напряжений.

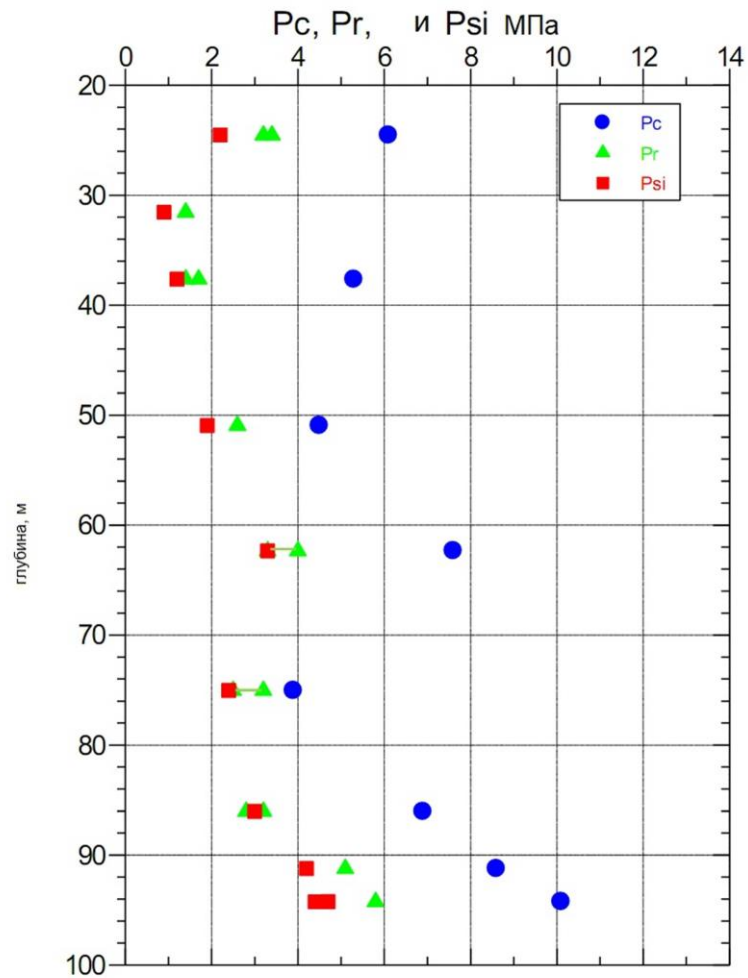


Рисунок 2.5.1 – Давление создания трещины P_c , давление преломления P_r и давление закрытия P_{si} против глубины в скважине DDHP_19_1

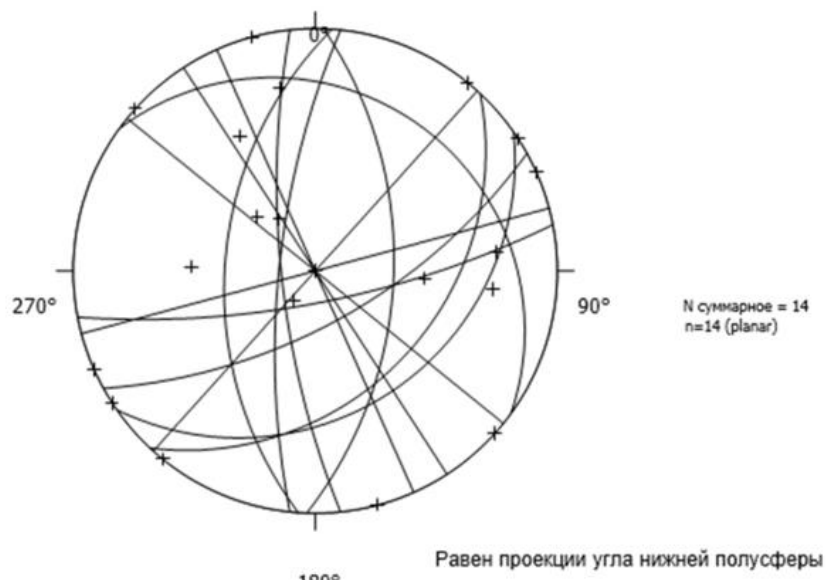


Рисунок 2.5.2 – Ориентация созданных и раскрытых трещин в скважине DDHP_19_1

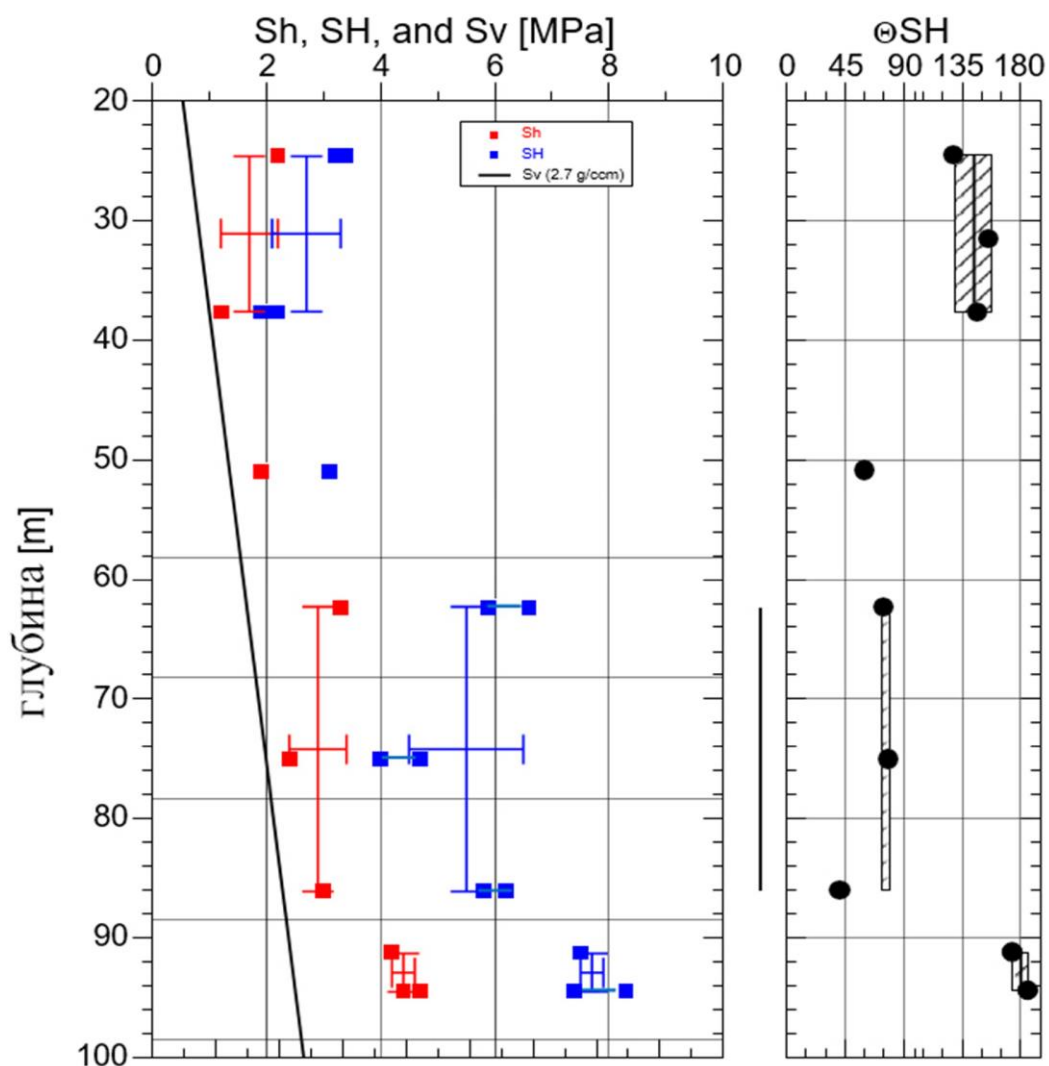


Рисунок 2.5.3 – Главные напряжения, определенные по скважине DDHP_19_1

Таблица 2.5.1 - Зависимость напряжений от значения глубины скважины

Значение Глубина [м]	S_v $\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$ [МПа]	S_h [МПа]	S_H [МПа]	γS_H [градус]
$31,1 \pm 6,5$	$0,8 \pm 0,2$	$1,7 \pm 0,5$	$2,7 \pm 0,6$	$N 144 \pm 14$
$74,2 \pm 11,9$	$2,0 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,5$	$5,5 \pm 1,0$	$N 77 \pm 2$
$92,9 \pm 1,6$	$2,5 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,2$	$7,7 \pm 0,2$	$N 180 \pm 6$

2.6 Результаты измерения скважины DDHP_19_2

В скважине DDHP_19_2 было проведено в общей сложности 10 гидравлических испытаний на разрыв массива, в том числе 10 испытаний по

съему слепков с отпечаточного пакера на глубинах от 32,45 м до 92,5 м. Полученные данные о характерных давлениях гидроразрыва (давление разрушения P_c при инициировании создания трещины, давление повторного раскрытия P_r , давление захлопывания трещин P_{si} и результирующая прочность на разрыв $t = P_c - P_r$), а также результаты испытаний по слепкам отпечаточного пакера (направление роста трещины θ , направление трещины β , угол падения трещины α) обобщены в таблице 2.6.1 и показаны графически на рисунках 2.6.2 - 2.6.3. Данные по давлению перечислены как значения скважины, и данные по ориентации трещины даны по отношению к магнитному азимуту.

Как и ожидалось из описания керна, все испытания в скважине DEPTH_19_2 характеризуются инициированием трещин со значениями давления пробоя в диапазоне от всего 3,9 МПа до 12,0 МПа. Значения давления преломления варьируются от 2,6–2,9 МПа до 8,0 МПа, соответствующая гидравлическая прочность на разрыв T на месте составляет от 1,0–1,3 МПа до 5,9–6,3 МПа. Испытания характеризуются различными значениями давления при закрытии в диапазоне от 2,6 МПа до 4,8 МПа.

Испытания отпечаточного Пакера показали инициирование осевых и крутонаклонных (угол падения $\alpha > 70^\circ$) трещин только для участков: 32,45 м, 35,2 м, 77,45 м, 89,8 м и 92,5 м. Однако направления развития этих трещин варьируются между северным-южным и восток, северо-восточным – западным, юго-западным направлениями и поэтому не дают никаких указаний на направление максимального горизонтального напряжения S_H . В остальных испытательных участках были инициированы или стимулированы наклонные трещины, имеющие восточное, северо-восточное- западное, юго-западное направление. Поэтому оценка напряжений проводилась в два этапа: во-первых, элементы природного поля напряжений были рассчитаны на основе концепции Хабберта и Уиллиса (1957) с использованием характерных значений давления P_r и P_{si} испытаний, в которых наблюдалось возникновение осевых трещин. Максимальное горизонтальное напряжение S_H было рассчитано без учета окружающего порового давления. Расчетные минимальные и максимальные значения горизонтальных напряжений S_h и S_H приведены в таблице 2.6.1. Полученные результаты дают первую оценку горизонтальных напряжений $S_h \approx 2,5\text{--}4$ МПа и $S_H \approx 5\text{--}6,5$ МПа.

Для включения результатов всех проведенных испытаний были проведены инверсионные расчеты по методу НТРФ – или P_{si} - с учетом результатов расчета напряжений по методу Хабберта и Уиллиса (1957). Расчеты проводились для диапазона глубин от 32 м до 93 м. В этом коротком интервале глубин ориентация горизонтальных главных напряжений принималась постоянной. Для расчета напряжений перекрывающей толщи пород использовали среднюю плотность горной массы $2,7$ г/см³. Результат инверсии (рисунок 2.6.3) дает следующие соотношения глубины напряжений между 32 м и 93 м:

$$S_h \text{ [МПа]} = (3,4 \pm 0,1) + (0,001 \pm 0,001) \cdot (z \text{ [М]} - 32)$$

$$S_H \text{ [МПа]} = (5,6 \pm 0,4) + (0,008 \pm 0,006) \cdot (z \text{ [М]} - 32)$$

$$S_v \text{ [МПа]} = 0,0265 \cdot z \text{ [М]}$$

где S_h и S_H -минимальные и максимальные горизонтальные главные напряжения, МПа

S_v - вертикальное главное напряжение, МПа

z -глубина (в м от поверхности). Полученные профили напряжений вместе с вычисленной степенью неопределенности показаны на рисунке 2.6.3.

Расчет инверсии дает направление действующего максимального горизонтального главного напряжения S_H N $67^\circ \pm 10^\circ$ (Восток, северо-восток – запад, юго-запад).

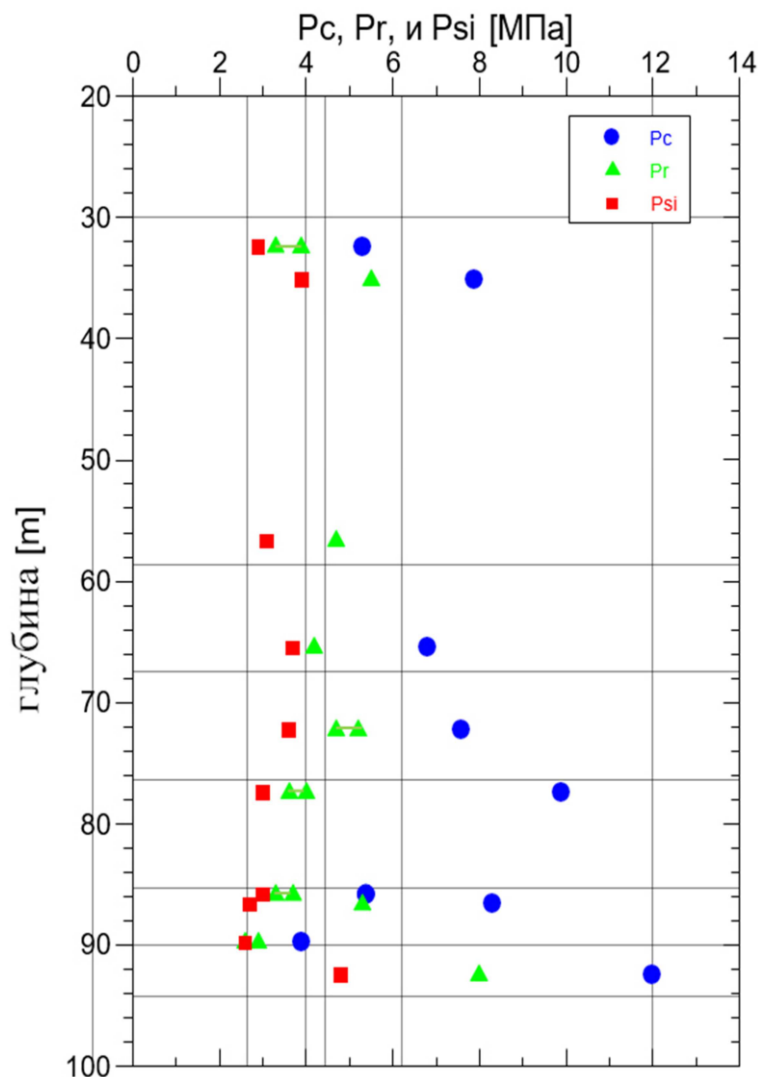


Рисунок 2.6.1 – Давление создания трещины P_c , давление преломления P_r и давление закрытия P_{si} против глубины в скважине DDPH_19_2

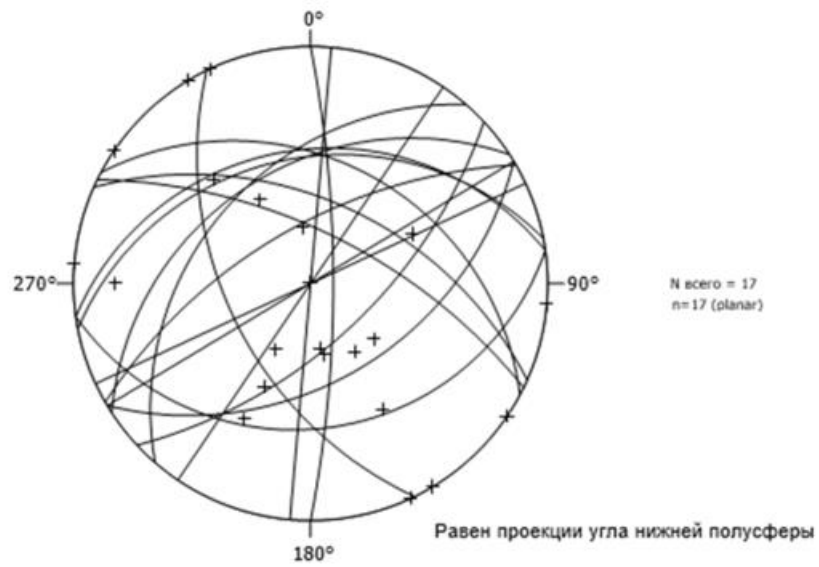


Рисунок 2.6.2 – Ориентация созданных и раскрытых трещин в скважине DDPH_19_2

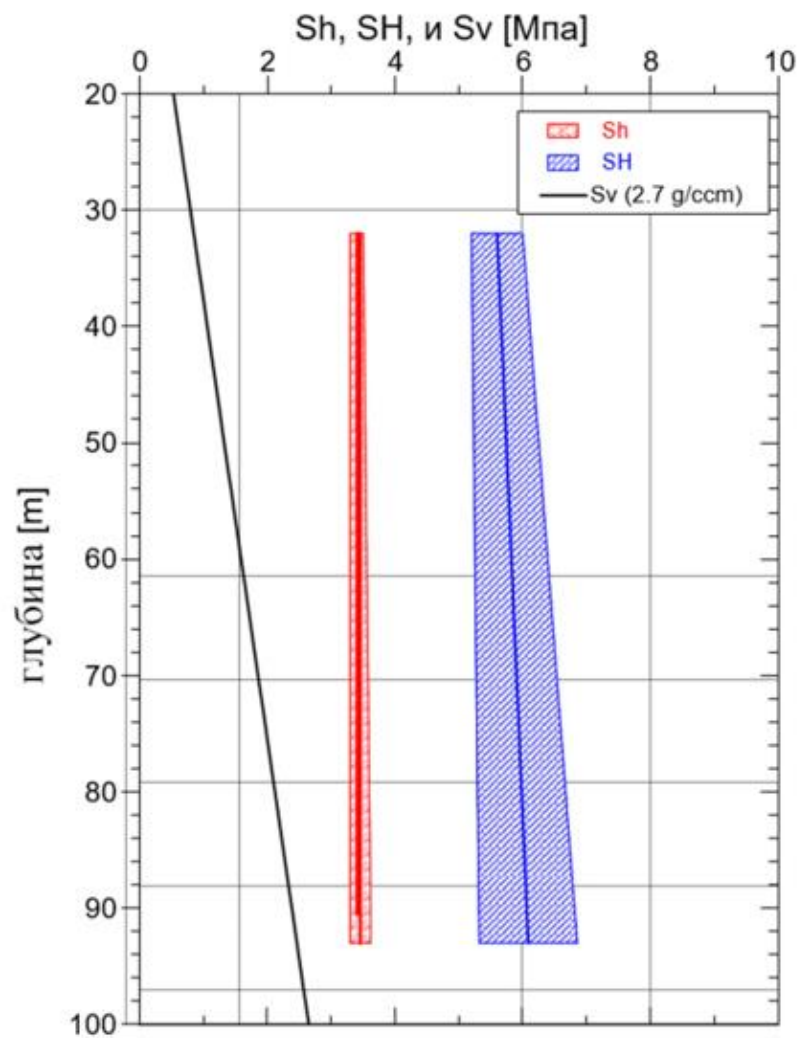


Рисунок 2.6.3 – Главные напряжения поскважине DDPH_19_2

Таблица 2.6.1 – Результаты оценки напряжений согласно подходу Хабберта и Уиллиса (1957) по скважине DDHP_19_2

Глубина, м	S_v , МПа	S_h , МПа	S_H , МПа	Θ_{SH}
32,45	0,9	2,9	4,8–5,4 <5,1>	N 5
35,2	0,9	3,9	6,2	N 35
77,45	2,05	3,0	5,0–5,4 <5,1>	N 65
89,8	2,4	2,6	4,9–5,2 <5,1>	N 59
92,5	2,45	4,8	6,4	N 0

Вывод ко второму разделу

В результате выполненных научно-исследовательских работ можно сделать следующие выводы:

- Всего на карьере «Пустынное» было выполнено 19 замеров поля напряжений;

- По данным, полученным со скважины DDHP_19_1 можно выделить три зоны распределения напряжений:

а) до глубины $31,1 \pm 6,5$ направление максимального горизонтального нормального напряжения северо-запад, юго-восточное (N 144 ± 14). Величина максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 = 2,7 \pm 0,6$ МПа (S_H), величина вертикального нормального напряжения $\sigma_3 = 0,8 \pm 0,2$ МПа (S_v), величина минимального горизонтального нормального напряжения $\sigma_2 = 1,7 \pm 0,5$ МПа (S_h);

б) в интервале $74,2 \pm 11,9$ м величина максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 = 5,5 \pm 1,0$ МПа (S_H), величина вертикального нормального напряжения $\sigma_3 = 2,0 \pm 0,3$ МПа (S_v), величина минимального горизонтального нормального напряжения $\sigma_2 = 2,9 \pm 0,5$ МПа (S_h). Максимальные главные горизонтальные нормальные напряжения имеют северо-восточное-юго-западное направление (N 77 ± 2);

в) В интервале $92,9 \pm 1,6$ м величина максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 = 7,7 \pm 0,2$ МПа (S_H), величина вертикального нормального напряжения $\sigma_3 = 2,5 \pm 0,1$ МПа (S_v), величина минимального горизонтального нормального напряжения $\sigma_2 = 4,4 \pm 0,2$ МПа (S_h). Максимальные главные горизонтальные нормальные напряжения имеют северное (южное) направление (N 180 ± 6).

Подобное неравномерное распределение напряжений обусловлено влиянием карьера на напряженно-деформированное состояние массива.

По данным со скважины DDHP_19_2 в интервале глубин 32 м и 93 м зафиксированы значение вертикального нормального напряжения $\sigma_3 = 2,46$ МПа (S_v), минимального горизонтального напряжения $\sigma_2 = 3,4 \pm 0,1$ МПа (S_h), величина максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 = 5,6 \pm 0,4$ МПа, направление максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 - N 67^\circ \pm 10^\circ$ градусов ($\ominus SH$) северо-восточное, юго-западное.

Согласно полученным данным поле напряжений можно охарактеризовать соотношением главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ с преобладанием горизонтальных напряжений. Направление действия максимального главного напряжения как Северо-Западное-Юго-Восточное.

Преобладание максимальных горизонтальных напряжений обусловлено малой глубиной.

Результаты исследований рекомендуется использовать для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива вблизи отдельных участков контура карьера, так и при создании геомеханической модели месторождения.

Учет неравномерности распределения горизонтальных и вертикальных напряжений позволит повысить безопасность проведения горных работ и эффективность применения средств и способов поддержания горных выработок.

3 Исследование физико-механических свойств горных пород и руд на месторождении «пустынное» по стандартам isrm и astm

3.1 Подготовка образцов к испытаниям

Подготовка образцов горных пород осуществлялась в соответствии с ASTM D4543-08e1 «Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances» [8].

Подготовка образцов горных пород к лабораторным испытаниям включала операции разгерметизации проб (извлечения из оболочки), очистку их поверхностей, изготовление цилиндрических образцов требуемых размеров путем обработки на специальном камнерезном и шлифовальном оборудовании и укладку изготовленных образцов в эксикаторы на хранение.

Для подготовки образцов к испытаниям использовали следующее оборудование:

- 1) камнерезный станок DIMAS TS 350 E;
- 2) шлифовальный станок STRASSENTEST Baustoff-Prufsysteme;



Рисунок 3.1.1 – Камнерезный станок DIMAS TS 350 E



Рисунок 3.1.2 – Шлифовальный станок STRASSENTEST Baustoff-Prufsysteme

Камнерезный станок DIMAS TS 350 E применяли для поперечной резки кернов горных пород на цилиндрические образцы с плоскими торцами. Разрезку производили отрезным алмазным кругом с диаметром 350 мм.

Шлифовальный станок STRASSENTEST Baustoff-Prufsysteme применяли для шлифовки поверхностей образцов пород после резки кернов на камнерезном станке DIMAS TS 350 E. Станок производит шлифовку обеих торцов образца одновременно (без переустановки образца), что обеспечивает высокую параллельность обрабатываемых поверхностей.

Подготовку поверхностей образцов производили с удовлетворением требований стандарта.

Диаметр образца измеряли электронным штангенциркулем в трех местах по высоте (в середине и у торцов) в двух взаимно перпендикулярных направлениях, с точностью не более 0,1 мм. За средний диаметр принимали среднее арифметическое результатов всех измерений.

Высоту образца измеряли с точностью не более 0,1 мм.

3.2 Определение естественной плотности

Естественную плотность определяли на образцах правильной формы в соответствии с ASTM D7263-09 «Standart Test Methods for Laboratory

Determination of Density(Unit Weight) of Soil Specimens» [9], ГОСТ 5180-2015 «Методы лабораторного определения физических характеристик» [10].

Плотность определяли методом непосредственных измерений, по следующей формуле:

$$\rho = \frac{m \cdot 4000}{\pi \cdot d^2 \cdot h} \quad (3.2.1)$$

где m- масса образца, г;

d - средний диаметр образца, мм;

h - средняя высота образца, мм.

3.3 Определение предела прочности и деформационных свойств при одноосном сжатии

Прочностные и деформационные характеристики определялись в соответствии с ISRM «Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials» [11] и ГОСТ 28985-91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии» [12].

Сущность метода заключается в измерении сжимающей силы, приложенной к торцам цилиндрического образца, продольных и поперечных деформаций его, вызванных этой силой.

Испытания проводились на сервогидравлической испытательной машине MTS 816 (рисунок 3.3.1)



Рисунок 3.3.1 - Сервогидравлическая испытательная система MTS 816 в варианте с плитами на одноосное сжатие

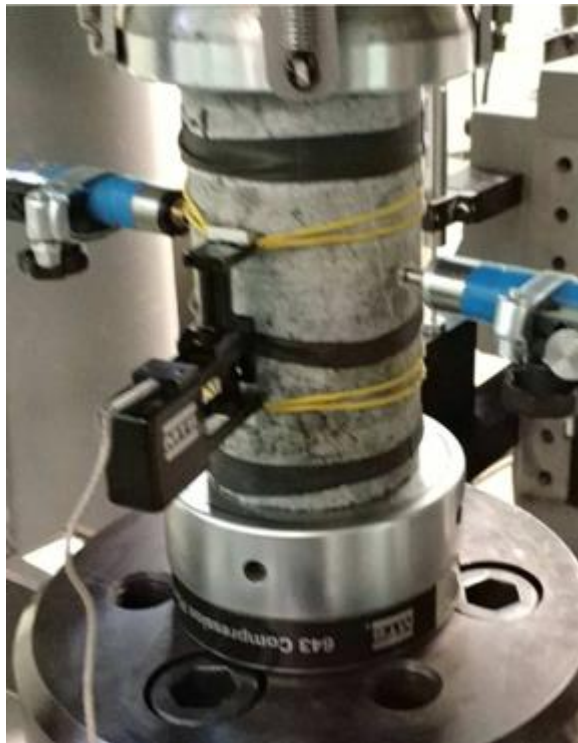


Рисунок 3.3.2 – Расположение датчиков продольной и поперечной деформации на образце

По результатам испытаний строили графики зависимости продольных и поперечных относительных деформаций образца от осевых напряжений.

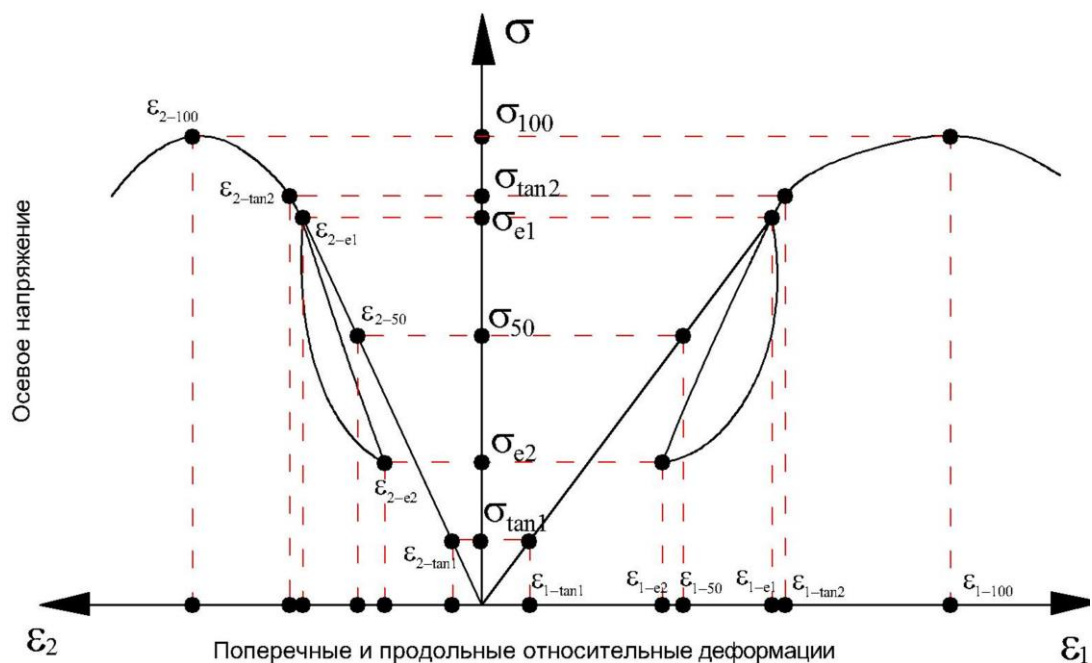


Рисунок 3.3.3 - Характерные графики зависимости продольных и поперечных относительных деформаций образца от напряжений для расчета деформационных показателей

По результатам испытания определялись следующие прочностные и деформационные характеристики (рисунок 3.3.3):

1) Предел прочности на одноосное сжатие:

$$\sigma_{100} = \frac{N}{A} \quad (3.3.1)$$

где N – нагрузка, Н;
 A – площадь, мм².

2) Продольная относительная деформация:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.3.2)$$

где ΔL – приращение деформации, мм;
 L – база измерения деформации, мм.

3) Поперечная относительная деформация:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta D}{D} \quad (3.3.3)$$

где ΔD – изменение диаметра, мм;
 D – диаметр образца, мм.

4) Модуль Юнга и коэффициент поперечных деформаций в диапазоне напряжений 0-50 %, определенный в соответствии с ISRM:

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50} - \sigma_{ul}}{\varepsilon_{1-50} - \varepsilon_{1-ul}} \quad (3.3.4)$$

$$\mu_{50} = \frac{\varepsilon_{2-50} - \varepsilon_{2ul}}{\varepsilon_{1-50} - \varepsilon_{1-ul}} \quad (3.3.5)$$

где σ_{ul} , ε_{1-ul} , ε_{2ul} - напряжение, относительная продольная и поперечная деформация на уровне преднагрузки.

5) Модуль упругости и коэффициент Пуассона, определенный в соответствии с ГОСТ 28985-91:

$$E_{50} = \frac{\sigma_{e1} - \sigma_{e2}}{\varepsilon_{1-e1} - \varepsilon_{1-e2}} \quad (3.3.6)$$

$$\mu_{50} = \frac{\varepsilon_{2-e1} - \varepsilon_{2-e2}}{\varepsilon_{1-e1} - \varepsilon_{1-e2}} \quad (3.3.7)$$

3.4 Определение предела прочности при одноосном растяжении (бразильский метод)

Определение предела прочности при одноосном растяжении образцов выполнено в соответствии с ISRM «Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials» [13].

Сущность метода заключается в измерении разрушающей силы, приложенной к образцу через стальные встречно направленные плиты.

Предел прочности при одноосном растяжении:

$$\sigma = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3.4.1)$$

где P – разрушающая сила, Н;

L – высота образца, мм;

D – диаметр образца, мм.

3.5. Определение предела прочности при объемном сжатии

Определение прочностных характеристик при объемном сжатии проводили в состоянии естественной влажности в соответствии с ISRM «Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression» [14].

Сущность метода заключается в измерении разрушающей силы, приложенной к торцам образца через стальные плоские плиты при боковом сжатии его гидростатическим давлением. Испытания проводили на сервогидравлической системе MTS 815, общий вид которой представлен на рисунке 3.5.1.



Рисунок 3.5.1 – Сервогидравлическая система MTS 815

При подготовке к испытаниям образец для предохранения от проникновения в его поры рабочей жидкости (технического масла) помещали в резиновую трубчатую оболочку. Торцы образца изолировали от жидкости плоскими стальными подкладками.



Рисунок 3.5.2 – Образец подготовленный к испытаниям

Объемные испытания были проведены при разных значениях бокового гидростатического давления.

$$\sigma_1 = \frac{F}{S} + \sigma_3 \cdot \left(1 - \frac{S_{\text{п}}}{S_0}\right) \quad (3.5.1)$$

где F – вертикальная нагрузка, кН;

S_0 – площадь поперечного сечения образца, см²;

σ_3 – всестороннее давление в камере, МПа;

$S_{\text{п}}$ – площадь поперечного сечения поршня, см².

По результатам испытаний при одноосном и объемном сжатии определялись характеристики сцепления и угла внутреннего трения как параметры линейной зависимости (критерий Кулона-Мора):

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg}\varphi + c$$

где τ – касательное напряжение, кПа;

σ – нормальное напряжение;

φ – угол внутреннего трения;

c – сцепление, кПа.

Выводы к третьему разделу

Лабораторные исследования образцов пород были проведены в лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства.

Были изготовлены образцы стандартных формы и размеров и выполнены заданные виды лабораторных определений свойств образцов:

- предел прочности при одноосном сжатии (UCS);
- модуль Юнга и коэффициент Пуассона (UCS+YP);
- предел прочности пород при одноосном растяжении (UTS-бразильский метод);
- предел прочности при трехосном сжатии (ТХТ) с построением паспорта прочности и расчетом сцепления и угла внутреннего трения;
- предел прочности при прямом сдвиге по естественной трещине (SOJ – трехстадийный сдвиг) с построением паспорта прочности и расчетом сцепления и угла внутреннего трения.

При проведении лабораторных испытаний руководствовались следующими методиками: материалам Международного общества по механике горных пород ISRM (Internatoonal Society for Rock Mechanics); стандартами ASTM [15].

Расчитаны физико-механические свойства горных пород в массиве на основе лабораторных исследований на образцах.

Результаты вычислений показали, что прочность пород на одноосное сжатие в зависимости от GSI может уменьшится: GSI равном 40, прочность пород на сжатие снижается до 3,5% от прочности образца, при GSI = 50 прочность пород на сжатие снижается до 6%, при GSI = 60 до 11%, при GSI = 70 до 19%.

Коэффициент сцепления вдоль естественной трещины составляет: алевролиты – 0,12, алевропесчаники – 0,11, мет.песчаники – 0,07, метосомотиты – 0,11, песчаники – 0,1, серпентиниты – 0,06, угл.алевролиты – 0,1.

Полученные результаты позволят снизить риски принятия неверных технологических решений:

- при обосновании устойчивых параметров откосов и бортов карьера;
- при районировании карьера по устойчивости.

Разработанные геомеханические модели на основе уточненных данных о физико-механических свойствах горных пород, слагающих массив позволят:

- повысить достоверность моделируемых геомеханических процессов;
- своевременно выявлять зоны с высокими рисками обрушения;
- определить эффективность тех или иных технологических решений по локализации сложных геомеханических участков массива горных пород.

4 Выполнение численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива бортов и откосов карьера пустынное и выявление потенциально опасных участков

4.1 Метод снижения прочности на сдвиг (SSR)

Численное моделирование было выполнено с использованием программного обеспечения RS2 RocScience [16], где стабильность откоса количественно оценивается с использованием метода снижения прочности на сдвиг (SSR). Функция снижения прочности на сдвиг (*Shear Strength Reduction*) в RS2 позволяет автоматически вычислять критический коэффициент снижения прочности *SRF* (*Strength Reduction Factor*). Если $SRF > 1,3$, то откос находится в устойчивом состоянии, при $SRF < 1,3$ возникает сдвижение пород откоса.

Основная концепция метода снижения прочности на сдвиг (SSR) сводится к следующему:

Прочностные параметры откоса (C и φ) одновременно уменьшаются на определенный коэффициент (SRF), и рассчитывается анализ напряжений методом конечных элементов:

$$C^* = \frac{C'}{SRF}$$
$$\varphi^* = \arctan \left[\frac{\tan \varphi'}{SRF} \right]$$

где C' и φ' – исходные параметры прочности

C^* и φ^* - вновь полученные прочностные свойства

SRF - коэффициент снижения прочности, соответствующий коэффициенту устойчивости в момент разрушения.

SRF присваивается значение равное 1, в ходе расчета SRF увеличивается. Новые прочностные характеристики вводятся в модель откоса и расчет повторяется. По мере увеличения SRF прочностные свойства снижаются. По мере уменьшения прочности максимальное смещение увеличивается. Процесс вычислений SRF повторяется до момента потери откосом устойчивого состояния (напряжения в откосе достигают предела прочности на сдвиг и возникает сдвижение пород) и графически выражается в виде наиболее вероятной линии скольжения, по которой происходит сдвижение массива.

Точка несовпадения конечно-элементного анализа определяет критический коэффициент снижения прочности (критический SRF) или коэффициент безопасности откоса. Коэффициент снижения критической прочности (Critical SRF) — это максимальное значение SRF, при котором модель остается стабильной.

Метод снижения прочности на сдвиг имеет преимущество за счет автоматического определения критической поверхности скольжения. Критический SRF идентичен коэффициенту запаса устойчивости откоса при анализе устойчивости предельного равновесия.

Для уклона с запасом прочности менее 1 процедура такая же, за исключением того, что дробные значения SRF будут систематически уменьшаться до тех пор, пока уклон не станет стабильным.

4.2 Характеристика горного массива и расчетные параметры

Исходными данными для расчета сдвижений и деформаций в окрестности выемки являются, прежде всего, геологические и структурно-тектонические особенности, физико-механические свойства вмещающих пород, а также параметры борта карьера. Расчетные физико-механические свойства выделенных литотипов геологического разреза, определяющие исходное поле напряжений и упругопластическое деформирование пород включают: удельный вес пород, деформационные характеристики (модуль деформации и коэффициент Пуассона) и прочностные характеристики.

На месторождении Пустынное идентифицированы шесть типов пород: серпентинит, алевролит, алевропесчаник, песчаник, метасоматит, углистый алевролит. Для характеристики массива горных пород были отобраны пробы из 16 скважин в количестве 150 штук.

Исследования определялись по следующим показателям физико – механических свойств пород:

- предел прочности при одноосном сжатии (UCS);
- модуль Юнга и коэффициент Пуассона (UCS+YP);
- предел прочности пород при одноосном растяжении (UTS-бразильский метод);
- предел прочности при трехосном сжатии (ТХТ) с построением паспорта прочности и расчетом сцепления и угла внутреннего трения;
- предел прочности при прямом сдвиге по естественной трещине (SOJ – трехстадийный сдвиг) с построением паспорта прочности и расчетом сцепления и угла внутреннего трения.

При проведении лабораторных испытаний руководствовались следующими методиками: Американской международной организации по испытаниям и материалам ASTM (American Society for Testing and Materials); Международного общества по механике горных пород ISRM (Internatoonal Society for Rock Mechanics) [15].

Результаты лабораторных испытаний были статистически проанализированы для определения репрезентативных геотехнических параметров, которые могут быть использованы для проектирования откосов.

4.3 Определение влияния уровня напряженного состояния пород массива отдельных участков карьера Пустынное на их заоткоску с использованием численных методов в 2-мерной постановке

Для отдельных критических участков карьера Пустынное (юго – западного борта в отметках +300 м ÷ 380 м представленных контактами серпентинита, алевролита, песчаника, углистого алевролита, северо – восточного борта в отметках +345 м ÷ 445 м представленных в основном алевропесчаниками) где имеются динамические проявления горного давления в виде обрушений уступов была поставлена задача по определению напряженно-деформированного состояния горного массива и определения их безопасных углов наклона.

На первом этапе была создана 3-мерная геологическая модель месторождения. При построении геолого-структурной модели месторождения в трехмерном пространстве использовались как данные геотехнических скважин, так и все имеющиеся данные разведочных скважин, исторические геологические поперечные и продольные разрезы и планы, топографические поверхности нарушений [17]. На рисунке 4.3.1 приведен общий вид трехмерной модели карьера Пустынное в конечном контуре.

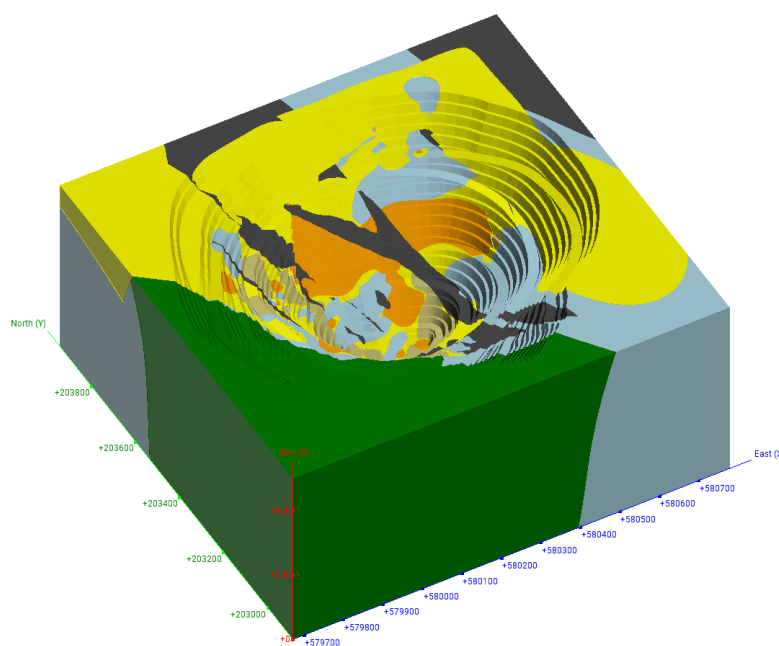


Рисунок 4.3.1- общий вид трехмерной модели карьера Пустынное на конечном контуре

Начальное исходное напряженное состояние массива промоделировано с помощью величин коэффициента бокового давления грунта по двум взаимно перпендикулярным направлениям главных напряжений по итогам изучения естественного напряженного состояния согласно отчету «Исследование

природного поля напряжения месторождения Пустынное путем гидроразрыва скважин»: $\lambda_1=1,48$ и $\lambda_2=1,64$.

Для моделирования характера деформирования пород прибортового массива карьера Пустынное была использована модель упругопластической среды Хука-Брауна.

Задание расчетных параметров. Исходными данными для расчета смещений и деформаций в окрестности выемки являются, прежде всего, геологические и структурно-тектонические особенности, физико-механические свойства вмещающих пород, а также параметры борта карьера. Расчетные физико-механические свойства выделенных литотипов геологического разреза, определяющие исходное поле напряжений и упругопластическое деформирование пород включают: удельный вес пород, деформационные характеристики (модуль деформации и коэффициент Пуассона) и прочностные характеристики приведены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – Расчетные параметры по разности литотипов для критерия Хука – Брауна

Литология	Уд.вес, г/см ³	Коэф. Пуассона	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, МПа	GSI	mb	s	a
Серпентинит	2,62	0,264	16,15	4708,3	48	0,624	0,0030956	0,5066
Алевролит	2,72	0,25	87,34	6355,5	50	0,449	0,0007128	0,5057
Алевропесчаник	2,73	0,243	81,2	8581,2	52	0,501	0,0009524	0,5050
Песчаник	2,72	0,235	99,2	3957,6	45	0,438	0,0003453	0,5081
Метасоматит	2,71	0,225	88,6	7476,3	50	0,385	0,0007128	0,5057
Углистый алевролит	2,71	0,269	60,87	7059,3	40	0,704	0,0012726	0,5114

Критерии проектирования откоса представляют собой требования, которым должен соответствовать проект откосов, чтобы считаться проектом, имеющим приемлемый уровень надежности в отношении устойчивости. Критерии основаны на коэффициенте устойчивости (FOS) и вероятности обрушения (POF), определенных в рамках анализа [4].

Служба геомеханики карьера Пустынное рекомендует использовать для данного исследования следующие критерии приемлемости при проектировании откосов (таблица 4.3.2).

Таблица 4.3.2 - Критерии приемлемости для проекта откосов

Откос	Критерии приемлемости
	FOS - статическая
Откос уступа	1,3
Откос между съездами	1,3 – 1,5
Общий откос борта карьера	1,3

На рисунке 4.3.2–4.3.4 приведены общий вид расчетных разрезов на каркасе конечного контура карьера Пустынное и их геологические разрезы.

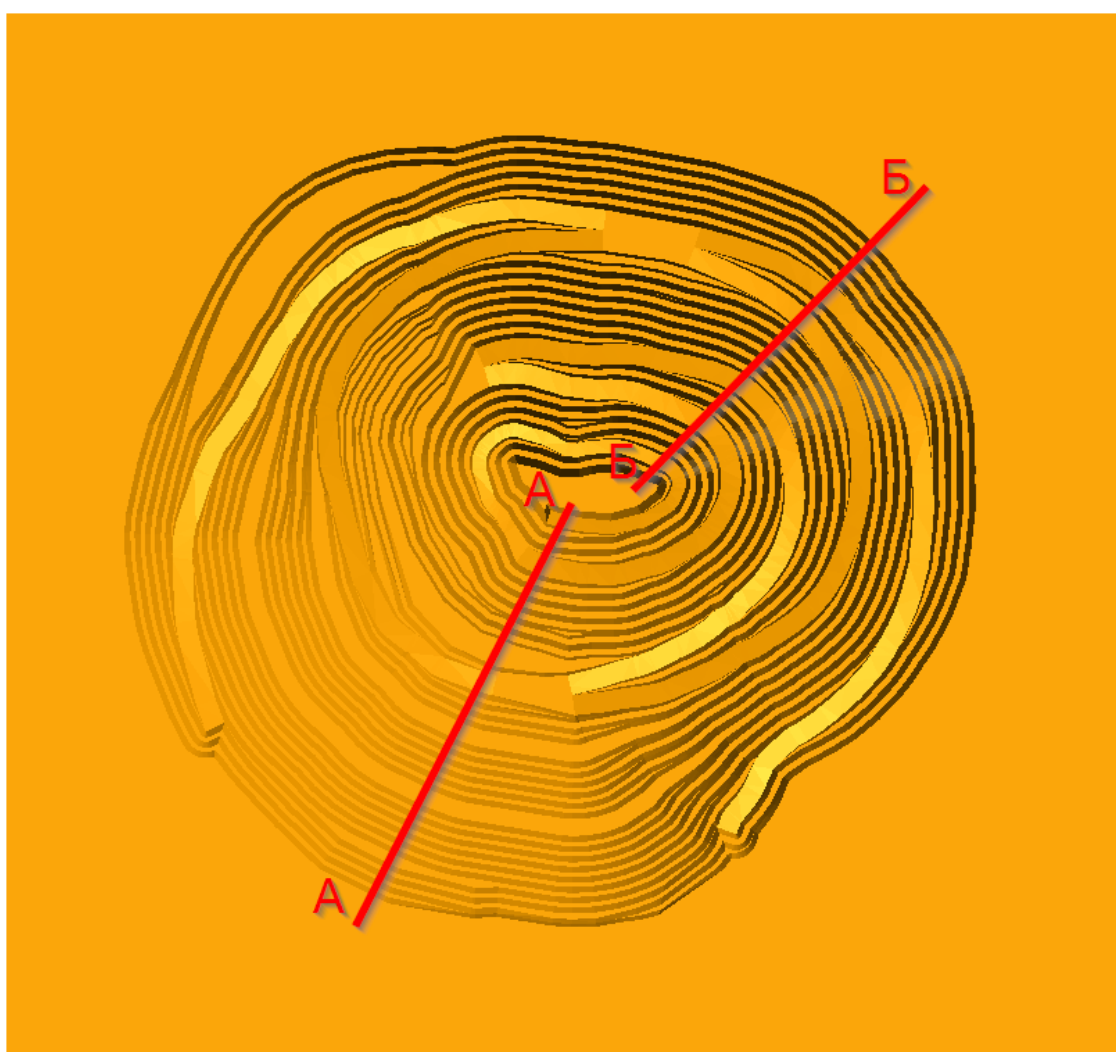


Рисунок 4.3.2 - Расчетные разрезы А-А и Б-Б на каркасе конечного контура карьера Пустынное

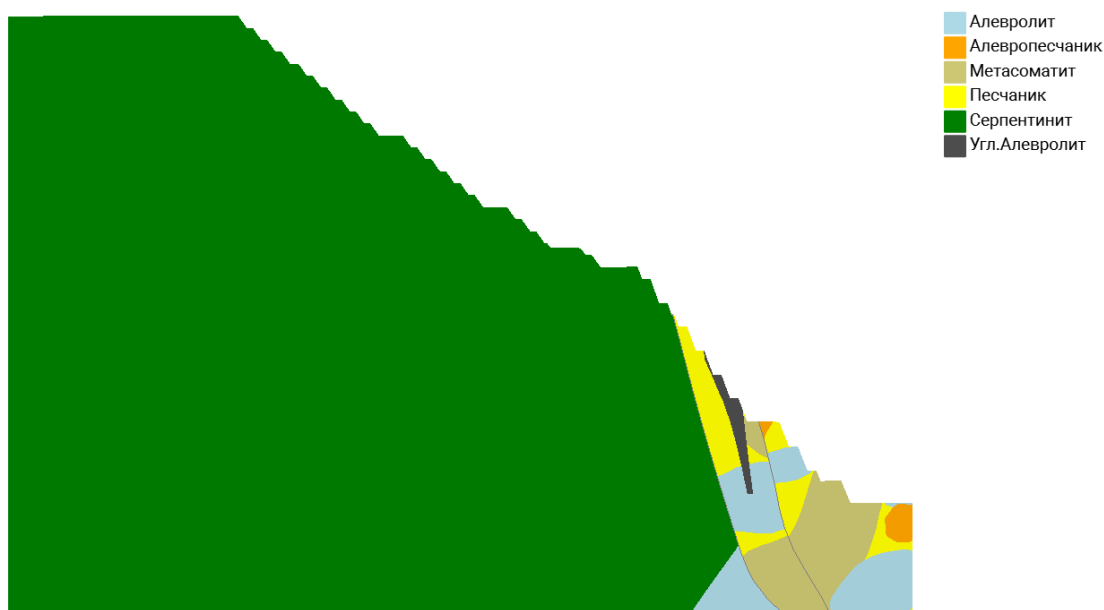


Рисунок 4.3.3 – Разрез А-А с литологическими разностями карьера Пустынное (вынесен из геомеханической модели в ГГИС Leapfrog Geo)



Рисунок 4.3.4 - Разрез Б-Б с литологическими разностями карьера Пустынное (вынесен из геомеханической модели в ГГИС Leapfrog Geo)

Численное моделирование было выполнено с использованием программного обеспечения RS2 RocScience [5], где стабильность откоса количественно оценивается с использованием метода снижения прочности на сдвиг (SSR).

Основными прогнозными показателями при оценке устойчивости массива при моделировании численными методами в программе RS2

RosScience являются коэффициент запаса SRF (Strength Factor) и показатель общего смещения (Total Displacement).

На рисунках 4.3.5–4.3.8 приведены результаты численного моделирования устойчивости бортов карьера Пустынное по расчетным профилям А-А и Б-Б.

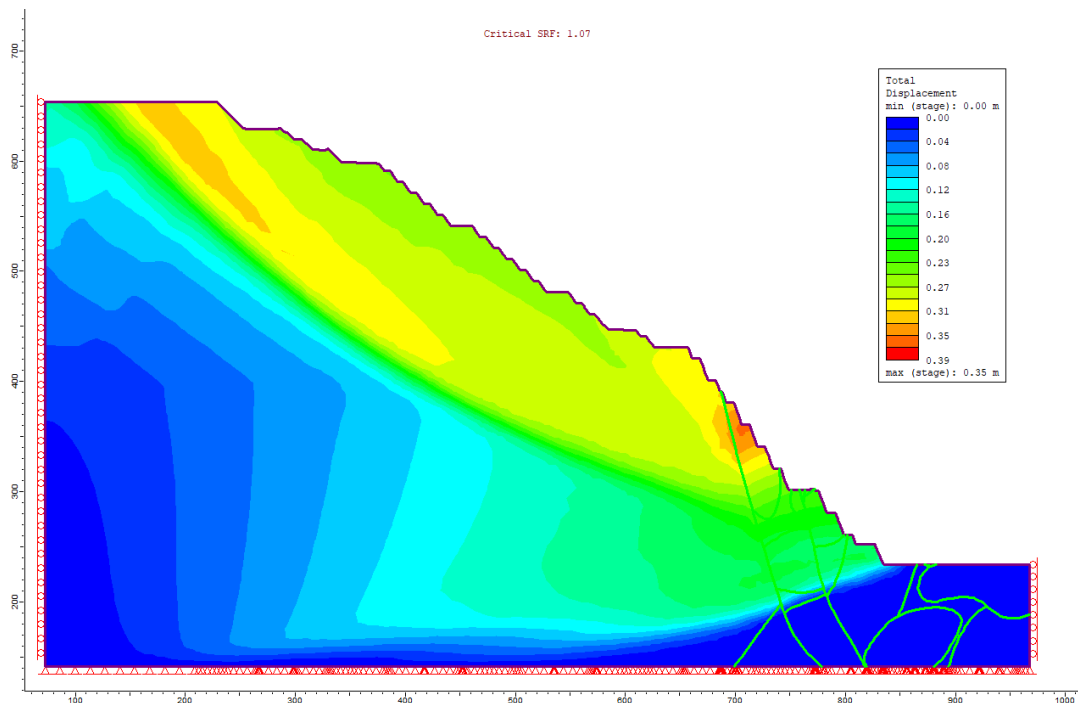


Рисунок 4.3.5 - Результат численного моделирования устойчивости бортов карьера Пустынное по расчетному профилю АА

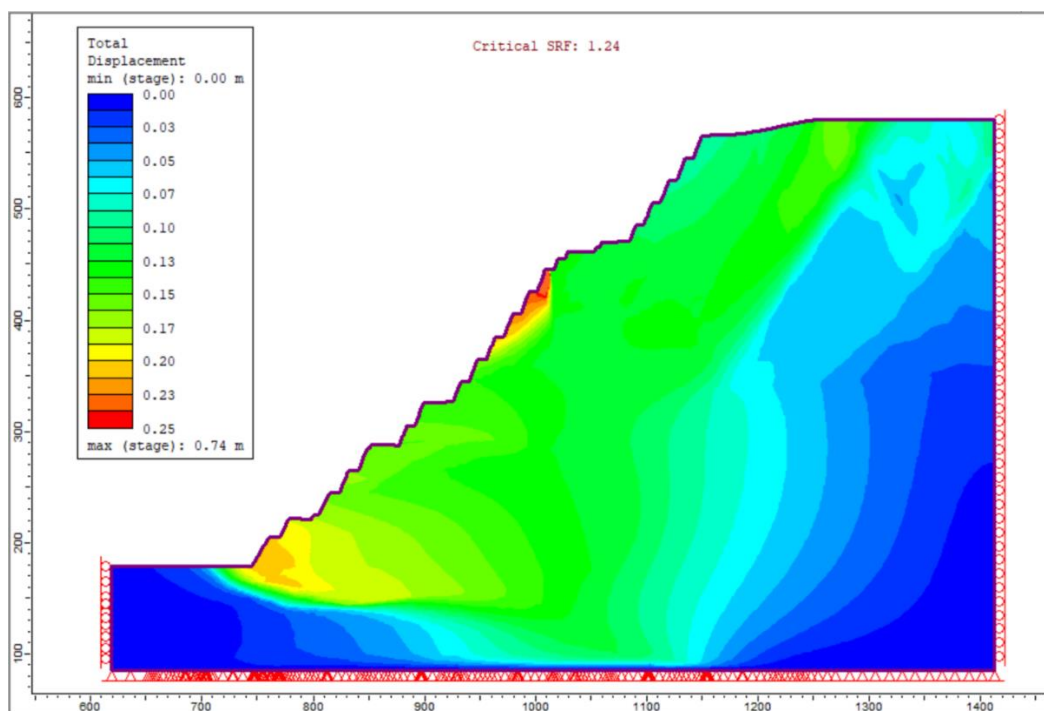


Рисунок 4.3.6- Результат численного моделирования устойчивости бортов карьера Пустынное по расчетному профилю ВВ

Результаты численного моделирования НДС показывают:

- в Юго-Западном борту карьера Пустынное в отметках (+300) м - (+380) м прогнозируется смещение порядка 0,31–0,39 м в сторону выработанного пространства, вызванное действием НДС, $SRF=1,07$ (рисунок 4.3.5), при нормативном 1,3.

- в скальной части Северо-Восточного борта карьера Пустынное в отметках (+345) м - (+445) м прогнозируется смещение порядка 0,25–0,74 м в сторону выработанного пространства, $SRF=1,24$ (рисунок 4.3.6), при нормативном 1,3.

После уменьшения угла заоткоски уступов в отметках (+300) м - (+380) м в Юго-Западном борту карьера Пустынное на 10 градусов (с 70° до 60°) повторные расчеты показывают устойчивость борта с $SRF=1,36$ (рисунок 4.3.7).

После уменьшения угла заоткоски уступов в отметках (+345) м - (+445) м Северо-Восточного борта на 5 градусов (с 70° до 65°) повторные расчеты показывают устойчивость борта с $SRF=1,31$ (рисунок 4.3.8).

В таблице 4.3.3 приведены КЗУ расчетных профилей карьера Пустынное, полученные методами численного моделирования (SFR).

Таблица 4.3.3 – КЗУ расчетных профилей карьера Пустынное и показатели общего смещения

Борт	Название профиля	Метод расчета		
		Численного моделирования ($SFR'=1/3$)	Показатель общего смещения, м (Total Displacement)	Границы минимальной призмы обрушения, м
ЮЗ	А-А	1,07	0,31–0,39	(+300) м - (+380)
СВ	Б-Б	1,24	0,25-0,74	(+345) м - (+445)

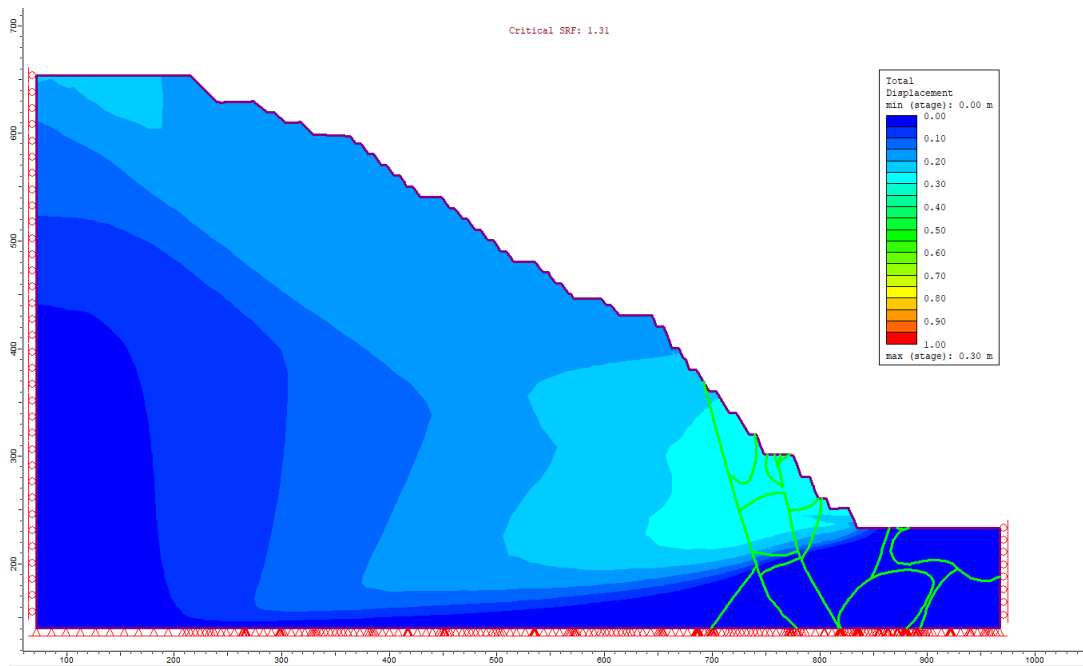


Рисунок 4.3.7- Результат численного моделирования устойчивости ЮЗ борта карьера Пустынное по расчетному профилю АА после уменьшения углов заоткоски в отметках (+300) м - (+380) м на 10 градусов

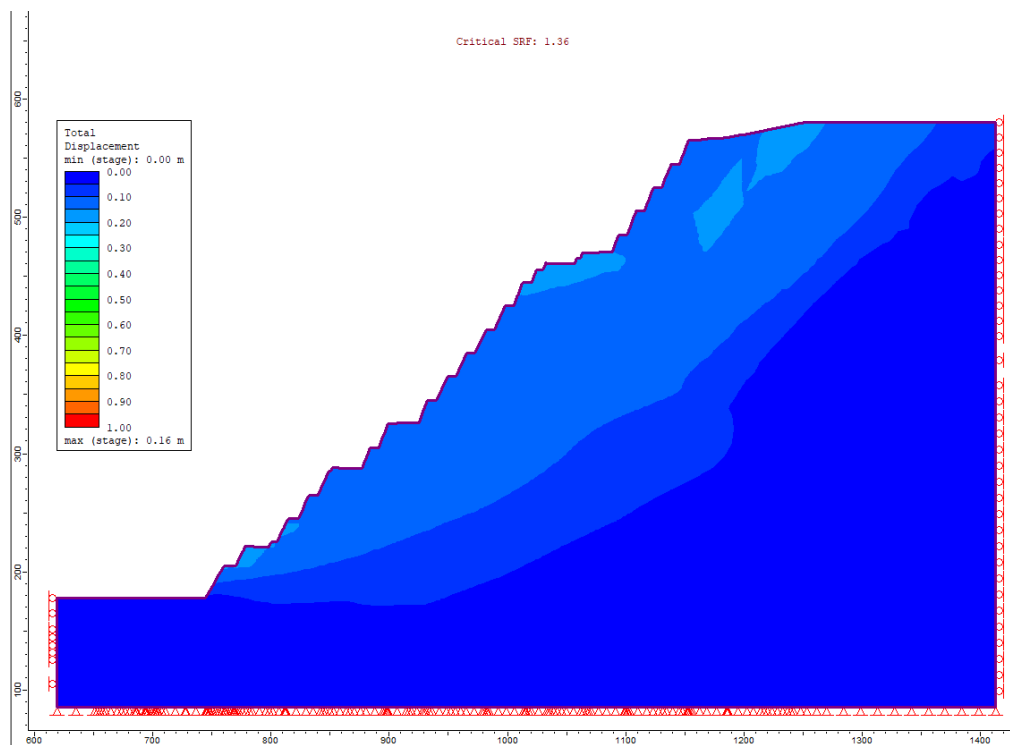


Рисунок 4.3.8- Результат численного моделирования устойчивости СВ борта карьера Пустынное по расчетному профилю ВВ после уменьшения углов заоткоски в отметках (+345) м - (+445) м на 5 градусов

По итогам моделирования отдельных проблемных участков карьера Пустынное были определены наиболее напряженные площадки (Ю-З борт в отметках (+300) м - (+380) м и С-В борта карьера Пустынное в отметках (+345) м - (+445) м), где наблюдается неблагоприятное воздействие напряжений на прибортовой массив. Уменьшение угла уступов на 5–10 градусов приводит к стабилизации этих участков.

Была решена задача по определению неблагоприятного воздействия напряжений на отдельные участки бортов карьера Пустынное и обоснованию их безопасных углов наклона.

Выводы к четвертому разделу

1. По итогам моделирования отдельных критических участков карьера Пустынное были определены наиболее напряженные площадки (Ю-З борт в отметках (+300) м - (+380) м и С-В борта карьера Пустынное в отметках (+345) м - (+445) м), где наблюдается неблагоприятное воздействие напряжений на прибортовой массив. Уменьшение угла уступов на 5–10 градусов приводит к стабилизации этих участков.

2. Была решена задача по определению неблагоприятного воздействия напряжений на отдельные участки бортов карьера Пустынное и обоснованию их безопасных углов наклона.

3. Необходимо разработать методы контурного взрывания и проверить их эффективность, прежде чем приступать к выемке бортов карьера согласно предлагаемым конечным проектным откосам. Эффективность каждого контурного взрыва должна отслеживаться и анализироваться для того, чтобы проект контурного взрыва мог быть скорректирован в соответствии с изменяющимися условиями откосов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для карьера Пустынное наиболее тектонически напряженными участками определены нижние горизонты в юго – западной и северо-восточной частях обнажений по направлению азимута $N 67^{\circ} \pm 10^{\circ}$, где наблюдаются проявления горного давления в виде проявлений деформаций (рисунок 1.5.2).

На сегодняшний день проблема стабилизации этих участков не была решена.

Наиболее достоверный прогноз характера и формы проявления горного давления при отсутствии данных о действующих в массивах пород естественных напряжений невозможен. В связи с этим для решения этой проблемы были проведены натурные и экспериментальные исследования НДС массива карьера Пустынное. Всего на карьере «Пустынное» было выполнено 19 замеров поля напряжений

На основе выполненных натурных исследований сделаны следующие выводы:

а) до глубины $31,1 \pm 6,5$ направление максимального горизонтального нормального напряжения северо-запад, юго-восточное ($N 144 \pm 14$). Величина максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 = 2,7 \pm 0,6$ МПа (S_H), величина вертикального нормального напряжения $\sigma_3 = 0,8 \pm 0,2$ МПа (S_V), величина минимального горизонтального нормального напряжения $\sigma_2 = 1,7 \pm 0,5$ МПа (S_h);

б) в интервале $74,2 \pm 11,9$ м величина максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 = 5,5 \pm 1,0$ МПа (S_H), величина вертикального нормального напряжения $\sigma_3 = 2,0 \pm 0,3$ МПа (S_V), величина минимального горизонтального нормального напряжения $\sigma_2 = 2,9 \pm 0,5$ МПа (S_h). Максимальные главные горизонтальные нормальные напряжения имеют северо-восточное-юго-западное направление ($N 77 \pm 2$);

в) В интервале $92,9 \pm 1,6$ м величина максимального горизонтального напряжения $\sigma_1 = 7,7 \pm 0,2$ МПа (S_H), величина вертикального нормального напряжения $\sigma_3 = 2,5 \pm 0,1$ МПа (S_V), величина минимального горизонтального нормального напряжения $\sigma_2 = 4,4 \pm 0,2$ МПа (S_h). Максимальные главные горизонтальные нормальные напряжения имеют северное (южное) направление ($N 180 \pm 6$).

Подобное неравномерное распределение напряжений обусловлено влиянием карьера на напряженно-деформированное состояние массива.

На основе выполненных исследований установлено неравномерности распределения горизонтальных и вертикальных напряжений с преобладанием тектонических напряжений, которое можно охарактеризовать соотношением главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Направление действия максимального главного напряжения как Северо-Западное-Юго-Восточное.

Для отдельных критических участков карьера Пустынное (нижние горизонты ЮВ и СЗ бортов), где имеется динамические проявления горного

давления в виде обрушений уступов была поставлена задача по определению напряженно-деформированного состояния горного массива и определения их безопасных углов наклона.

Численное моделирование было выполнено с использованием программного обеспечения RS2 RocScience [16], где стабильность откоса количественно оценивается с использованием метода снижения прочности на сдвиг (SSR). Основными прогнозными показателями при оценке устойчивости массива при моделировании численными методами в программе RS2 RocScience являются коэффициент запаса SRF (Strength Factor) и показатель общего смещения (Total Displacement).

В таблице 4.3.3 приведены КЗУ расчетных профилей карьера Пустынное, полученные методами численного моделирования (SFR).

По итогам моделирования отдельных критических участков карьера Пустынное были определены наиболее напряженные площадки (Ю-З борт в отметках (+300) м - (+380) м и С-В борта карьера Пустынное в отметках (+345) м - (+445) м), где наблюдается неблагоприятное воздействие напряжений на прибортовой массив. Уменьшение угла уступов на 5–10 градусов приводит к стабилизации этих участков.

Была решена задача по определению неблагоприятного воздействия напряжений на отдельные участки бортов карьера Пустынное и обоснованию их безопасных углов наклона.

Практическое значение. Была решена проблема нестабильности участка бортов карьера Пустынное.

Необходимо разработать методы контурного взрывания и проверить их эффективность, прежде чем приступать к выемке бортов карьера согласно предлагаемым конечным проектным откосам. Эффективность каждого контурного взрыва должна отслеживаться и анализироваться для того, чтобы проект контурного взрыва мог быть скорректирован в соответствии с изменяющимися условиями откосов.

Учет неравномерности распределения горизонтальных и вертикальных напряжений позволит повысить безопасность проведения горных работ и эффективность применения средств и способов поддержания горных выработок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 И. Фоменко. Математическое моделирование состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами. Кандидатская диссертация. М., 2001 г.
- 2 С. Нуну. Исследование проблемы неустойчивости бортов карьеров Британской Колумбии. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. РАН Сибирское отделение, 2018 г. УДК №622.271.333.
- 3 С.В. Усанов, Ю.П. Коновалова, Е.Ю. Ефремов, О.Д. Харисова, А.В. Усанова. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения. ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург, 2022г. Стр. 111–118.
- 4 Read and P.F. Stacey. Guidelines for Open Pit Slope Design. CSIRO Publishing, Melbourne, 2009, p 510.
- 5 Standard Test Method for Determination of In-Situ Stress in Rock using the Hydraulic Fracturing Method. American Society for Testing and Materials, ASTM D4645, Washington, 1997. P. 3.
- 6 Hubbert, M.K., & Willis, D. G. (1957). Mechanics of hydraulic fracturing. Journal of American Association of Petroleum Geologists. Pp. 239–257.
- 7 B.C. Haimson, F.H. Cornet. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40. ISSN 1879-2073. Oxford; New York: Pergamon Press. New York, 1973, pp. 17-18.
- 8 Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. ASTM D4543-19, Washington, 2019.
- 9 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens. ASTM D7263-09, Washington, 2009.
- 10 ГОСТ 5180–2015 «Методы лабораторного определения физических характеристик». М., 2015 г., 23 стр.
- 11 Z.T. Bieniawski, M.J. Bernede. ISRM «Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials». Elsevier ISRM Volume 16, 2003, pp.138-140.
- 12 ГОСТ 28985–91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии». М., 1991 г., 11 стр.
- 13 K. Sakkas, S. Kapelari, D. Panias, P. Nomikos, A. Sofianos. ISRM «Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials». Elsevier ISRM Volume 1, 2014, pp. 285 – 290.
- 14 ISRM «Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression». Elsevier ISRM Volume 20, 1983, pp. 285 – 290.
- 15 ISRM (1978) Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials Part 2: Suggested Method for determining indirect tensile strength by the Brazil Test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Volume 15, pp. 99-103.
- 16 D.V. Griffiths. Stability analysis of highly variable soils by elastoplastic finite Elements Rocscience Inc., Phase2 users guide Version 2.1.

International Centre for Mechanical Sciences CISM, volume 426, Colorado School of Mines, 2004, pp. 159-229.

17 А.М. Хайруллаев, Н.О. Бердинова, С.А. Съедина, Г.Б. Абдыкаримова, А.А. Алтаева. Трехмерное блочное моделирование геомеханических свойств рудного месторождения с использованием современных ГГИС. Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан. ISSN 2224-5278. Алматы, 2022г. Стр. 58–69.

18 E. Hoek, E. T. Brown. The Hoek-Brown failure criterion and GSI. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, pp. 1—19