

Санкт-Петербургский государственный университет  
Институт наук о Земле

***ЛАТЫШ Анастасия Андреевна***

**Выпускная квалификационная работа**

Оценка инженерно-геологических условий бортов карьера золоторудного месторождения для обоснования инженерной защиты (Томпонский район, Республика Саха).

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ 5798.2020 «Гидрогеология и инженерная геология»

Научный руководитель:

Ст. пр., к. г. - м. н. Еремеева А. А.

---

Заведующий кафедрой:

Доцент, к. г. - м. н. Бурлуцкий С. Б.

---

Санкт-Петербург

2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Общие сведения .....	5
1.1 Геологическое строение.....	5
1.2 Структурно-тектонические особенности и геоморфологические условия.....	13
1.3 Гидрогеологические условия месторождения .....	17
1.4. Геокриологические условия.....	18
2 Исследования горных пород месторождения .....	20
2.1 Мерзлые породы.....	20
2.2 Скальные породы .....	28
2.3 Рыхлые четвертичные отложения.....	32
2.4 Обоснование физико-механических свойств горных пород для расчетов устойчивости бортов и уступов карьера.....	34
2.4.1 Скальные породы .....	36
2.4.2 Анализ для обоснования устойчивости всех горных пород.....	41
3. Расчет устойчивости элементов карьера .....	46
3.1 Расчет устойчивости бортов карьера и его участков .....	46
3.2 Расчет устойчивости откосов уступов .....	52
3.2.1 Расчет устойчивости откосов уступов, формируемых в скальных породах.....	52
3.2.2 Расчет устойчивости откосов уступов, формируемых в четвертичных отложениях .....	54
4. Инженерная защита .....	55
Заключение .....	66
Список использованной литературы.....	68
Приложение А – Карта распространения многолетнемёрзлых грунтов .....	73
Приложение Б - Физико-механические свойства четвертичных отложений на месторождении «Звезда».....	74
Приложение В - Результаты испытаний физико-механических свойств пород в образцах месторождения «Звезда» .....	76
Приложение Г - Результаты лабораторных испытаний грунтов месторождения «Звезда» .....	78
Приложение Д - Результаты поверочных расчетов устойчивости бортов карьера №1 .....	80
Месторождения «Звезда» .....	80

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Экономическое и социальное развитие страны связано с эффективным вовлечением в освоение минерально-сырьевых ресурсов, и прежде всего - золоторудных. В наше время технологии и технические решения в горнопромышленной отрасли стремительно развиваются, так как условия и глубина залегания полезных ископаемых требует более точных исследований для их разработки. Соответственно работа на карьере становится более сложной, от стадии проектирования до рекультивации карьера. Экономический расчет также немаловажен, т.к. на сегодняшний день существует большое разнообразие видов инженерной защиты, но каждая из которых не везде подойдет по разным параметрам, а также экономически может быть не выгоден.

В настоящее время остро стоит вопрос импортзамещения, поэтому нужно использовать и находить технические решения российских производителей. На горнопромышленных объектах всегда наблюдаются деформации бортов, изменение устойчивости уступов, что ведет к снижению безопасности ведения горных работ, что также является экономически нерентабельно. В изучаемом районе это весьма актуальная тема, т.к. в пределах этой территории расположено большое количество полезных ископаемых и ценного сырья.

**Объектом** данного исследования является карьеры месторождения "Звезда" Томпонского района, Республика Саха.

**Предметом** изучения являются контур карьеров, физико-механические свойства грунтов карьера, условия расположения.

**Методы проведения работы:** оценка инженерно-геологических условий, выбор физико-механических свойств горных пород, слагающих прибортовой массив, расчёт устойчивости бортов и уступов карьеров в конечном положении, технико-экономически расчет инженерной защиты.

**Практический вклад.** Полученная информация будет полезна при выборе инженерной защиты на карьерах, схожих по строению и физико-механическим свойствам в подобных условиях, а в нашей стране таких месторождений много. Также данные об устойчивости бортов карьера необходимы для прогноза изменения и угроз безопасности при работе на объекте.

Научная значимость заключается в разработке инженерной защиты, исследовав инженерно-геологические условия и оценив геотехническое состояние устойчивости откосов отвалов при их проектном положении.

Степень разработанности проблемы: различным аспектам технических решений в горнопромышленной области посвящены работы таких ученых, как К.Терцаги,

Н.Н.Маслов, Н.В.Попов, П.С.Шпаков, Ю.Л.Юнаков, Ю.И.Анистратов, А.Bishop,  
E.A.Spencer, R.E.Goodman, R.John, J.P.Yang.

## 1. Общие сведения

### 1.1 Геологическое строение

В административном плане золоторудное месторождение «Звезда» находится в Томпском районе Якутии, неподалеку п.Хандыга, который является районным центром. Поселок Звёздный расположен в устье ручья М. Крики и постоянного населения не имеет.

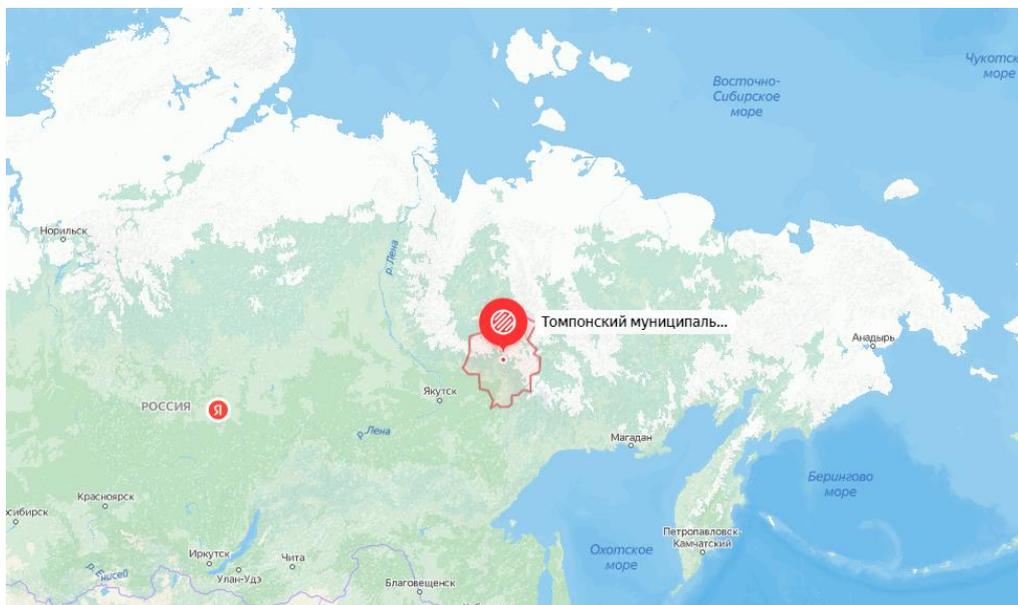


Рисунок 1 – Местоположение месторождения «Звезда»

Месторождение было открыто в 1951 году. До 1959 года месторождение изучалось в ходе рекогносцировочных и поисковых работ геологоразведочными бригадами экспедиции Якутского территориального геологического объединения. В 1963-1986 годах на месторождении были завершены все этапы разведки, в результате чего были утверждены запасы. Далее продолжались геологоразведочные работы на склонах месторождения, проводилась оценка запасов с использованием геостатических методов и программного обеспечения Micromine и Datamine; и из-за недостаточной плотности разведочной сетки значительная часть запасов С2 была отнесена к предполагаемым ресурсам. Месторождение изучалось до 2018 года, в итоге чего было произведено 376,820 м колонкового бурения, 108,035 м подземных выработок.

Месторождение занимает западную часть хребта Гаята-Мунтар и простирается от западного берега реки Топра на юге до бассейна ручья Безымянного на севере. Рельеф с ярко выраженным альпинотипным характером представляет собой расчлененное среднегорье с узкими скалистыми водоразделами и крутыми выпуклыми склонами. Для рельефа месторождения характерны широкие сглаженные водоразделы и относительно пологие, выпуклые склоны, в нижних частях которых наблюдаются полого-наклонные уступы.

Территория, отведенная под разработку месторождения «Звезда», в соответствии с картой общего сейсмического районирования ОСР-2015, относится к зонам 7-балльных сотрясений.[6]

Климат района резко континентальный, основной особенностью которого являются большие перепады низких зимних и высоких летних температур воздуха. Период положительных температур наступает с начала мая и продолжается до двадцатых чисел сентября. Среднемесячная максимальная температура наблюдается в июле – +15,8 °С, среднемесячная минимальная температура в январе – -41,5°С. Более подробные климатические параметры представлены в таблице 1 [1]. Снежный покров ложится в начале октября, на отметках выше 1000 м – в начале сентября. Устойчивые морозы начинаются в двадцатых числах декабря. Зима района малоснежна. В холодное время года характерны приземные инверсии, в результате чего нарушена зональность метеофакторов. Для всех природных процессов основным источником энергии является солнечная радиация.

Почвы промерзают в конце августа-начале сентября. Оттепель начинается в конце мая – начале июня. Глубина сезонного оттаивания зависит от рельефа местности, типа и влажности почвы, ландшафтных условий и рельефа.

Речная сеть района принадлежит бассейну р.Топра, которая пересекает территорию с востока на запад и впадает в реку Алан. Основными притоками реки являются ручьи Безымянного, Карам, Кольцевой, Октябрьский и др. Река Топра берет начало на юго-западной части хребта Гаята-Мунтар. Длина реки 400 км, общая площадь вместе с ручьем Безымянного – 2110 км<sup>2</sup>. Река Топра образует сток в течение всего года со средним объёмом 0,543 км<sup>3</sup> в год. Большая часть годового стока реки (76,7%) формируется летом, в основном за счёт атмосферных осадков.

Питание рек преимущественно дождевое и снеговое, а также подземное. Максимальный сток формируется в период дождевых паводков. Весеннее половодье – второй по водности период. Летне-осенняя межень прерывается паводками, достигающими по высоте максимума половодья, зимняя межень продолжительная, устойчивая.

Таблица 1 – Климатические параметры изучаемого района

Абсолютная минимальная температура воздуха, °С	-60
Абсолютная максимальная температура воздуха, °С	37
Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца, %	76
Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее теплого месяца, %	64

Количество осадков за ноябрь - март, мм	33
Количество осадков за апрель - октябрь, мм	262
Суточный максимум осадков, мм	55
Годовое парциальное давление водяного пара, гПа	4
Климатический район	IA

В тектоническом отношении район расположен в пределах двух региональных тектонических структур: Южно-Верхоянского синклиниория, относящегося к Верхоянскому коллизионному складчатому поясу и Охотско-Чукотского вулcano-плутонического пояса.

Крупнейшей структурной единицей, характеризующей месторождение является Южно-Верхоянская часть Верхоянской складчатой области. Южно-Верхоянская часть представляет собой клин разлома, зажатый между двумя блоками, Сибирской платформой с запада и Охотским массивом с востока, и простирающийся на 500 км с юга на север, имея ширину 200 км. Основными структурами, образующий этот район, являются три крупных тектонических блока. Кыллахская зона соединения с Сибирской платформой, Сетте-Дабанским антиклинорием и Южно-Верхоянской синклиналью, которая имеет сложную геологическую обстановку, предопределённую широко развитыми глубокими разломами и складчатыми смещениями [2].

Западная часть территории (зона Кыллах) образована терригенно-карбонатными отложениями, возрастом от нижнего рифея до ородовика, содержащим более поздние рифейские долеритовые пороги и поперечные с севера на юг девонские долеритовые дайки. Тектонически зона образована сложными надвиговыми структурами.

Сете-Дабанский антиклинорий образован разнообразными вулканическими терригенно-карбонатными отложениями возрастом от среднего рифея до нижнего каменноугольного периода. Разломы имеют ориентацию почти с севера на юг и характеризуются надвигающимися синистральными (левостронними) скольжениями. На рисунке 2 изображены залегания среднего рифея Сете-Дабанского антиклинория.



Рисунок 2 – Несогласное залегание талынской свиты среднего рифея [3].

Южно-Верхоянский синклиниорий образован отложениями песчаника, аргиллита, алевролита, возрастом от среднего каменноугольного до среднеюрского периода, сложенными и разделенными двумя системами тектонических дислокаций совместного складывания, которые характеризуются смещением вверх и сдвигом и ориентацией с севера на юг. В зонах ранее существовавших разломов породы нарушены гранитоидными дайками.

Рудное поле месторождения «Звезда» находится в западной части Южно-Верхоянского синклинория, имеющего сложное геологическое строение с характерным широким развитием субмеридиональных глубинных разломов и складчатых дислокаций. Структурная схема района месторождения по Г.Н. Гамянину приведена на рисунке 3.

Рудное поле месторождения представляет собой вытянутый с юга на север пояс, простирающийся на 12,5 км от западного берега реки Топра на юге до бассейна ручья Безымянного на севере. Ширина рудного поля достигает 5 км. На месторождении выделено 117 рудных тел, 38 из которых содержат запасы золота. По составу руды месторождения относятся к кварц-алюмосиликатному золото-мышьяковистому малосульфидному типу.

Основную ценность в рудах имеют золото и серебро. Золото залегает в кварцевой и сульфидной вмещающей жильной породе.

Всего выделено три основных морфологических типа рудных тел:

Первый – главный структурно-морфологический тип рудного тела, имеющий длину 4,8 км и мощность 1,6 км, в котором сосредоточено 75% запасов золота. Рудное тело представляет собой протяженные минерализованные зоны дробления сравнительно большой (до 10 и более метров) мощности, сложенные в различной степени гидротермально измененными, катаклазированными породами с вкрапленным и прожилково-вкрапленным типом сульфидной и жильной минерализации. Зоны содержат в среднем около 30 % жильного кварцевого материала и около 5 % сульфидов. Золото в рудах субмикроскопическое, видимые выделения отсутствуют;

Второй – единое рудное тело, объединяющее субпараллельные кварцевые жилы с разделяющими их прослойками минерализованных вмещающих пород (жильные зоны №№ 8, 32, 20, 56, 56а, 56б и др.). Рудное тело содержит 21 % от общего баланса запасов руды и имеет относительно небольшие размеры в сравнении с другими рудными зонами. Зона содержит до 60 % кварцевого материала и 2-3 % сульфидов;

Третий – отдельные кварцевые жилы небольшой мощности, расположенные поперечно по отношению к рудным и жильным зонам. Зона содержит 4 % от общего баланса запасов руды.

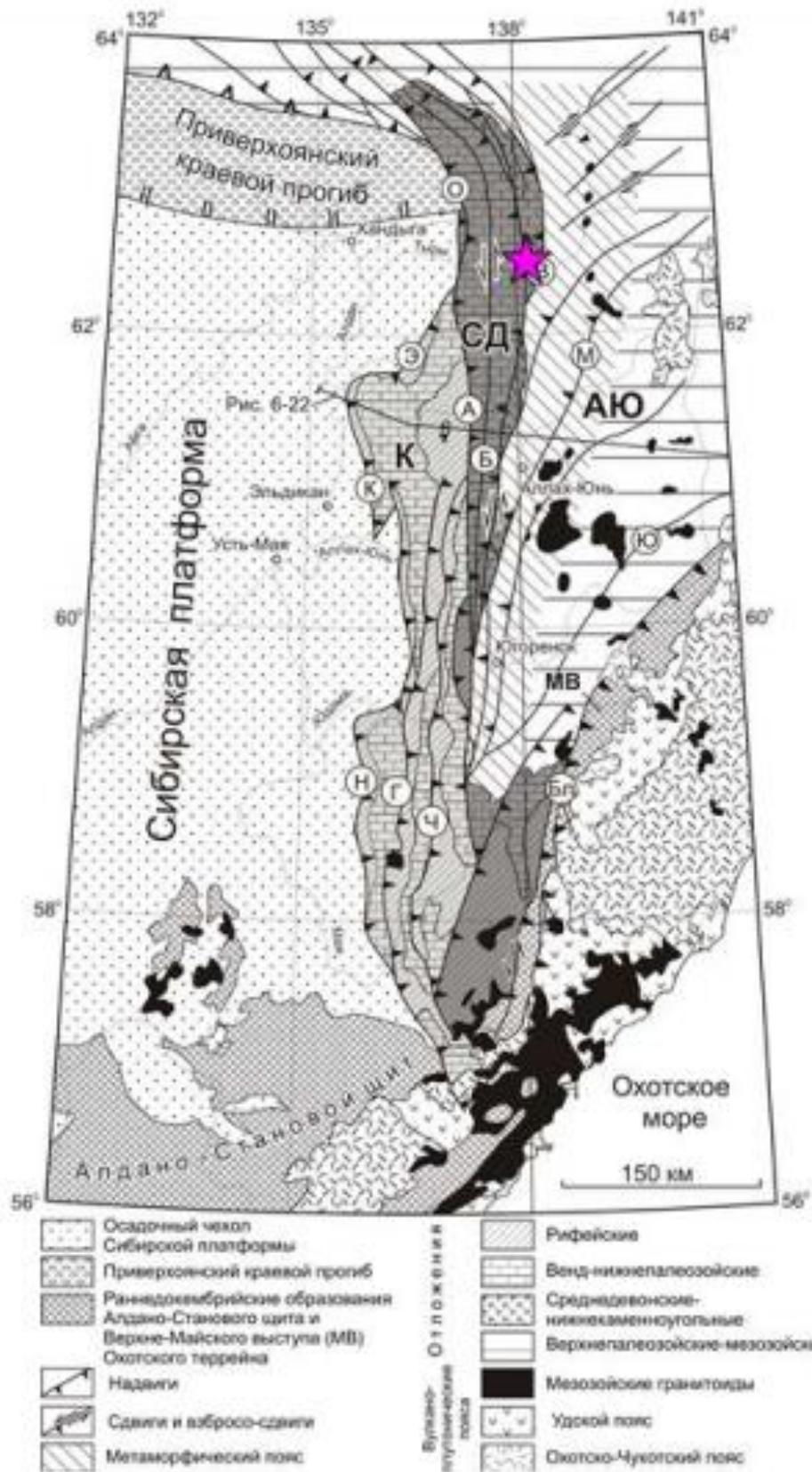


Рисунок 3 - Структурная схема района месторождения по Г.Н. Гамянин (звездочкой обозначено месторождение «Звезда»). Обозначения на карте: тектонические зоны - К-Кыллахская, СД-Сете-Дабанская, АЮ-Аллах-Юньская.Разломы: К-Кыллахский, О-Окраинный, Б-Бурхалинский, М-Минорский, Ю-Юдомский, Бл-Биллякчанский, Н-

Нельсканский, Э-Эбейке- Хаятинский, Г-Гувиндинский, Ч-Чагдинский, А-Акринский, В-Восточно-Сетте-Дабанский

Четвертичные отложения представлены делювиальными, элювиальными, аллювиальными образованиями и ледниковыми отложениями. Элювиальные образования занимают около 5 % территории. Делювиальные отложения локализованы на склонах долин водотока и имеют мощность от 0,5 м до 10 м и более. Аллювиальные образования приурочены к долине р.Топра, их мощность колеблется от 13 м до 90 м. Ледниковые отложения находятся в долинах рек Безымянного и Карам мощностью 55 - 60 м.

Разрез коренных пород месторождения «Звезда» от поверхности вглубь массива представлен в таблице 2. Геологическая карта участка горных работ приведена на рисунке 5.

Прибортовой массив карьера сложен алевролитами, глинистыми сланцами, песчаниками верхнекарбон-среднепермского возраста.

Изверженные породы в пределах месторождения пользуются незначительным распространением. Они представлены дайками диоритовых порфиритов и лампрофиров протяженностью от первых десятков метров до 3 км и мощностью до десяти метров.

Таблица 2 – Разрез коренных пород месторождения «Звезда»

Стратиграфическая единица	Обозначение	Описание	Общая мощность
Верхняя подсвита бонсолчанской свиты	P1bn2	Верхняя часть сложена слоистыми алевролитами, основание – линзующимся пластом светло-серых и серых песчаников мощностью до 30 м, вскрытых штольнями № 6 и № 19 на горизонтах 1150-1250 м.	Видимая мощность в створе рудной зоны № 1 -400 м
Нижняя подсвита бонсолчанской свиты	P1bn1	Верхняя часть представляет собой алевропелитовый разрез, аналогичный суркеченскому. В основании свиты находится линзующийся пласт светло-серых и серых песчаников мощностью до 40 м, вскрытый серией скважин в интервале абсолютных отметок 400-500 м.	650 м
Халыинская свита нижней перми	P1hl	В верхней части преимущественно алевролиты и аргиллиты массивной текстуры. Ниже - слоистые алевролиты с градационной текстурой слоистости, оползневыми и мутьевыми гравитационными осложнениями. В нижней части - линзующийся пласт светло-	450 м

		серых песчаников мощностью до 20 м, вскрытый скважинами №№ 13 а, 644 б, 250.	
Суркеченская свита верхнего карбона	C3sr	Нерасчлененная алевропелитовая толща глинистой сероцветной формации. Вскрытая мощность по скважине № 644 б – 200 м.	около 4000 м

На рисунке 4 можно увидеть грунтовые условия на инженерно-геологической карте.

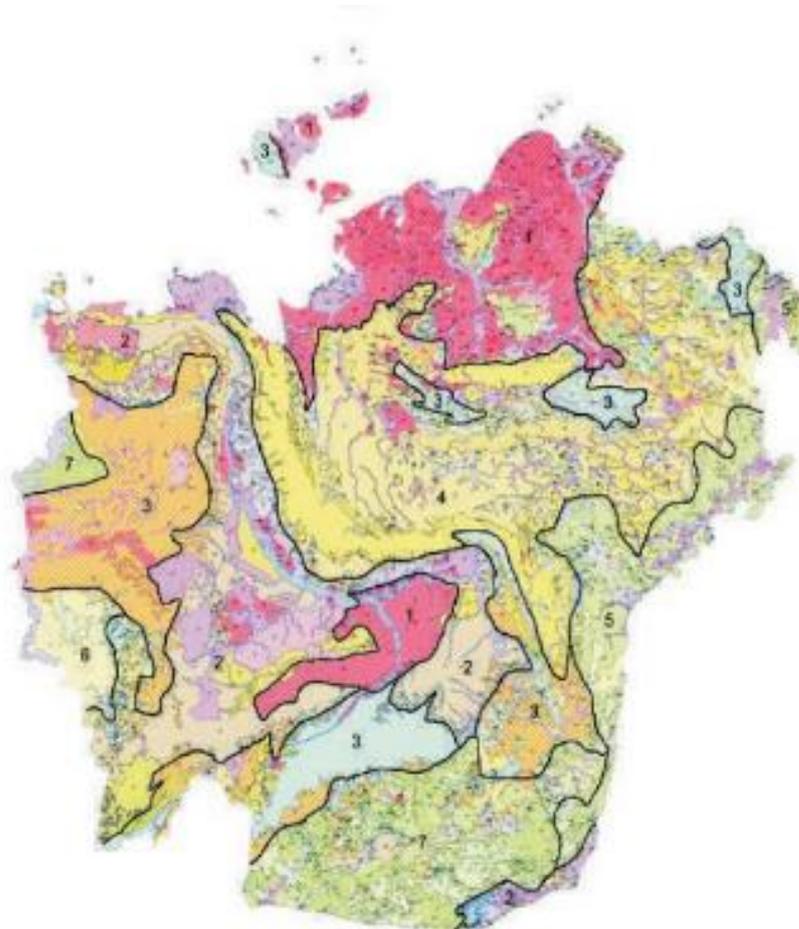


Рисунок 4 – Обобщенный вид слоя грунтовых условий на инженерно-геологической карте. Цифрами обозначены основные виды грунтов и их сочетаний: 1 – дисперсные льдистые; 2 – дисперсные и полускальные; 3 – карбонатные; 4 – полускальные терригенные; 5 – полускальные и скальные магматогенные; 6 – скальные магматогенные. [7]

По данным В.А.Дубова (1936), который выполнил комплексную повторную интерпретацию геофизических исследований, выполненных в течение нескольких лет, месторождение «Звезда» имеет следующие глубинные структурные особенности:

1. Область с высокой плотностью разноориентированных тектонических дислокаций, отраженных в магнитных параметрах гравитационного поля

2. Ограничение стенкой регионального поперечного сгиба разрывов Конрада и Мохо в кристаллическом фундаменте.

3. Разнообразная ориентация гравитационных аномалий разной глубины на северо-восток и северо-запад, отражающая поднятия рифейских и раннепалеозойских структур, которые были развиты на обратной стороне вышеупомянутого поперечного понижения.

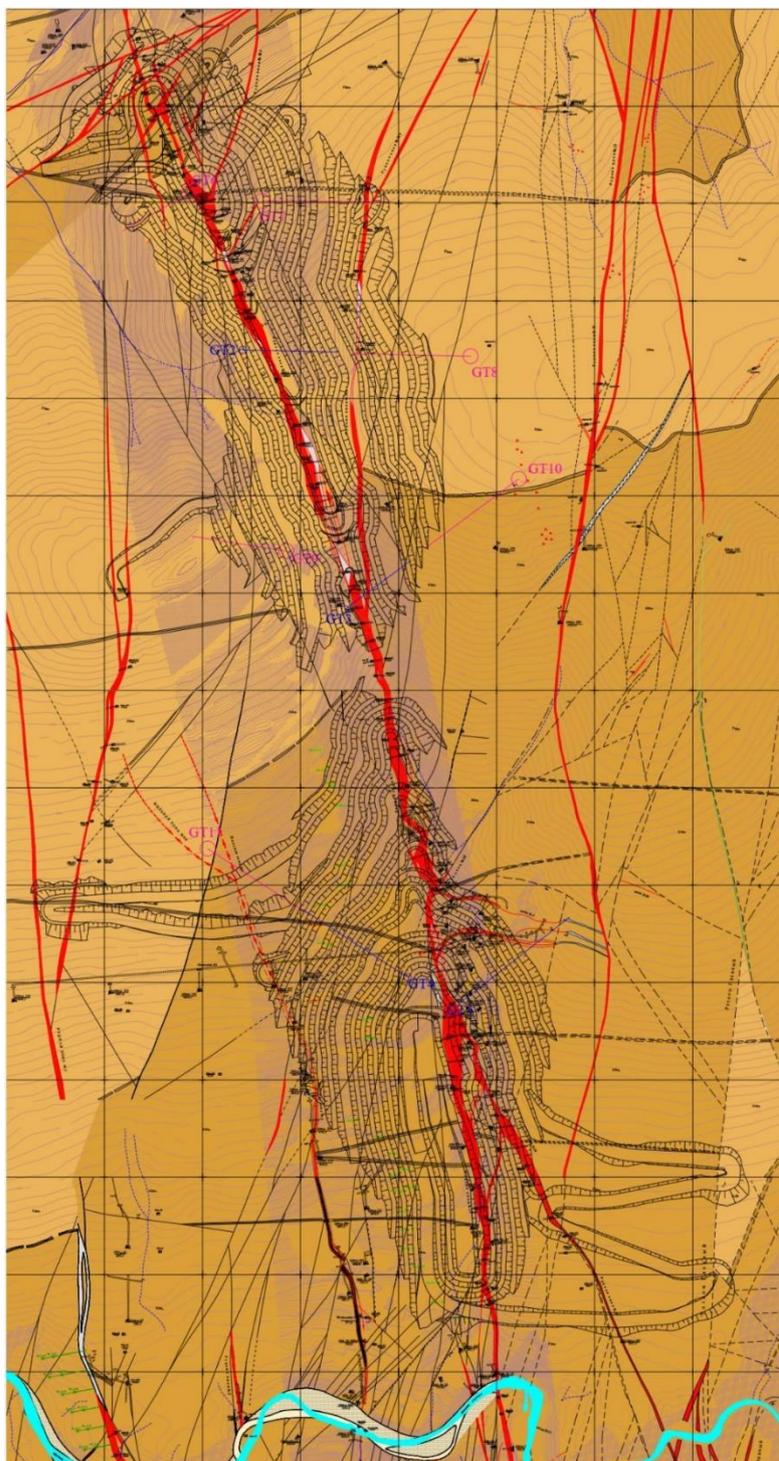


Рисунок 5 – Геологическая карта участка горных работ с нанесёнными контурами карьеров

## 1.2 Структурно-тектонические особенности и геоморфологические условия

Как было сказано упомянуто выше, изучаемый район расположен в пределах двух региональных тектонических структур: Южно-Верхоянского синклинория и Охотско-Чукотского вулcano-плутонического пояса. Данное месторождение расположено в центральной части Южно-Верхоянской горной области. В пределах этой области выделяют массивный и альпинотипный высокогорный и среднегорный рельеф.

Массивное высокогорье обрамляет участки альпинотипного высокогорья. Массивное высокогорье характеризуется в основном широкими сглаженными водоразделами с абсолютными отметками до 1800 - 2100 м и относительными превышениями до 700 - 1100 м.

Значительную часть территории занимает среднегорный рельеф, который характеризуется пологими широкими, реже узкими, сглаженными водоразделами. Абсолютные отметки достигают 1500 - 1700 м, а относительные превышения 400 - 600 м, углы наклона склонов достигают 25 - 35°. Преобладают процессы делювиально-осыпного и делювиально-солифлюкционного сноса.

Рельеф территории подразделяется на две генетические категории: денудационный и аккумулятивный.

Денудационный рельеф преобладает. Он образован комплексом склоновых процессов при участии экзарационной деятельности ледников. Экзарационная деятельность ледников выразилась в формировании двухступенчатых трогов и каровых лестниц.

Аккумулятивный рельеф образован речной, ледниковой и водно-ледниковой деятельностью. Речные формы представлены поймой, надпойменными террасами и конусами выноса.

В структурно-тектоническом отношении район работ приурочен к резко асимметричной Дыбинской антиклинали коробчатого типа. Район работ обусловлен субмеридиальными и субширотными тектоническими нарушениями, которые разделяются на следующие системы:

1. Звездная;
2. Курумская;
3. Сунтурская;
4. Сентаньинская.

Звездная система является основной рудовмещающей структурой. Разломы системы имеют падение западного направления под углом  $70^{\circ} \div 80^{\circ}$ , реже – обратное или

вертикальное, преобладающее простирание –  $350^\circ$ . Разломы простираются на север на 15 км, после чего они постепенно уменьшаются, на юге разломы концентрируются в узкий пояс и постепенно перетекают в Сунтарскую систему разломов. Звездная система обуславливается наличием подвижек, имеющих сдвиговой характер. Сдвиги представлены зонами смятия и дробления мощностью до 40 м, образующими плитообразные ветвящиеся тела с четкими тектоническими контактами.

Курумская система обусловлена интенсивно трещиноватыми зонами с продольными кварцевыми жилами. Мощность зон до 60 м, простирание  $260\div 280^\circ$ , падение вертикальное, реже  $60\div 80^\circ$ , к северу или югу.

Разломы Сунтарской системы, представленные тектоническими швами с северо-восточным простиранием  $35\div 60$  и крутым углом падения на северо-запад  $60\div 70$ , залегают в южной и северной областях месторождения. Некоторые разломы простираются на несколько сотен метров мощностью до нескольких метров.

Сетаньинская система представлена непротяженными зонами или линейно вытянутыми участками повышенной концентрации вертикально залегающих трещин отрыва северо-западного ( $300\div 340^\circ$ ) простирания. Мощность этих структур составляет от нескольких метров до 50 м, а длина – от 100 до 200 м. Они представляют собой эшелонированные структуры, заполненные кварцевыми жилами. Некоторые структуры Сетаньинской системы вмещают золоторудную минерализацию.

Трещиноватость является одним из основных факторов, оказывающих влияние на устойчивость бортов карьеров. В результате исследований трещин были выделены различные системы.

По замерам, проведенным по штольням №№ 1, 3, 5, 7, выявлено 8 наиболее распространенных систем трещин:

- система трещин с азимутом падения  $10\div 170^\circ$ , углом падения  $70-90^\circ$ ;
- система трещин с азимутом падения  $315^\circ$ , углом падения  $70-90^\circ$ ;
- система трещин с азимутом падения  $85\div 270^\circ$ , углом падения  $90^\circ$ ;
- система трещин с азимутом падения  $225^\circ$ , углом падения  $85^\circ$ ;
- система трещин с азимутом падения  $230^\circ$ , углом падения  $40-50^\circ$ ;
- система трещин с азимутом падения  $120\div 170^\circ$ , углом падения  $30-60^\circ$ ;
- система трещин с азимутом падения  $20\div 30^\circ$ , углом падения  $70-80^\circ$ ;
- система трещин с азимутом падения  $0\div 5^\circ$ , углом падения  $0-10^\circ$ .

По двум штольням №№ 8 и 15 выделены три наиболее распространенные системы трещин:

- система субпараллельных трещин с азимутом падения  $310 \div 10^\circ$ , углом падения  $30 \div 50^\circ$ ;
- система субпараллельных трещин с азимутом падения  $200 \div 240^\circ$ , углом падения  $30 \div 50^\circ$ ;
- система субпараллельных трещин с азимутом падения  $140 \div 170^\circ$ , углом падения  $45 \div 65^\circ$ .

Общая характеристика систем трещин, развитых на горизонте 1300 м в пределах штолен № 6 и 6а представлена в таблице 3.

В 2017 году на месторождении было проведено геомеханическое бурение с отбором ориентированного керна. Всего было пробурено 4 ориентированные скважины GT-02, GT-03, GT-04, GT-05, рисунок 6 [4].

Таблица 3 – Общая характеристика систем трещин, развитых на горизонте 1300 м штолен №6

Система трещин	Азимут падения, град.	Угол падения, град.	Протяженность, м	Ширина раскрытия, мм	Коэффициент трещинной пустотности, %	Льдистость, %	Модуль трещиноватости, трещин пог. м	Материал, заполняющий трещины
<b>Висячий бок</b>								
I	0-180	80-90	0,5-1,7	5,4	0,25	0,20	23,0	-
II	325-330	70-90	1,0-1,5	5,3	0,17	0,10	16,0	-
III	245	70-90	0,5-2,0	3,4	0,25	0,20	36,0	-
IV	0-5	0-8	0,5-3,5	3,1	0,25	0,15	40,0	-
V	200-205	50-56	0,5-1,0	7,5	0,40	0,32	26,0	-
<b>Лежачий бок</b>								
I	308-312	80-90	0,2-1,4	4,5	0,25	0,20	28,0	кварц перетертый
II	240-250	80-88	0,1-0,5	6,8	0,17	0,08	12,5	кварц, лед
III	200	40-45	0,5-2,0	4,3	0,30	0,21	35,0	лед, кварц
IV	0-5	12-20	0,1-0,6	3,9	0,22	0,20	28,0	лед
V	170-175	16-28	0,8-2,5	2,5	0,20	0,20	39,0	лед

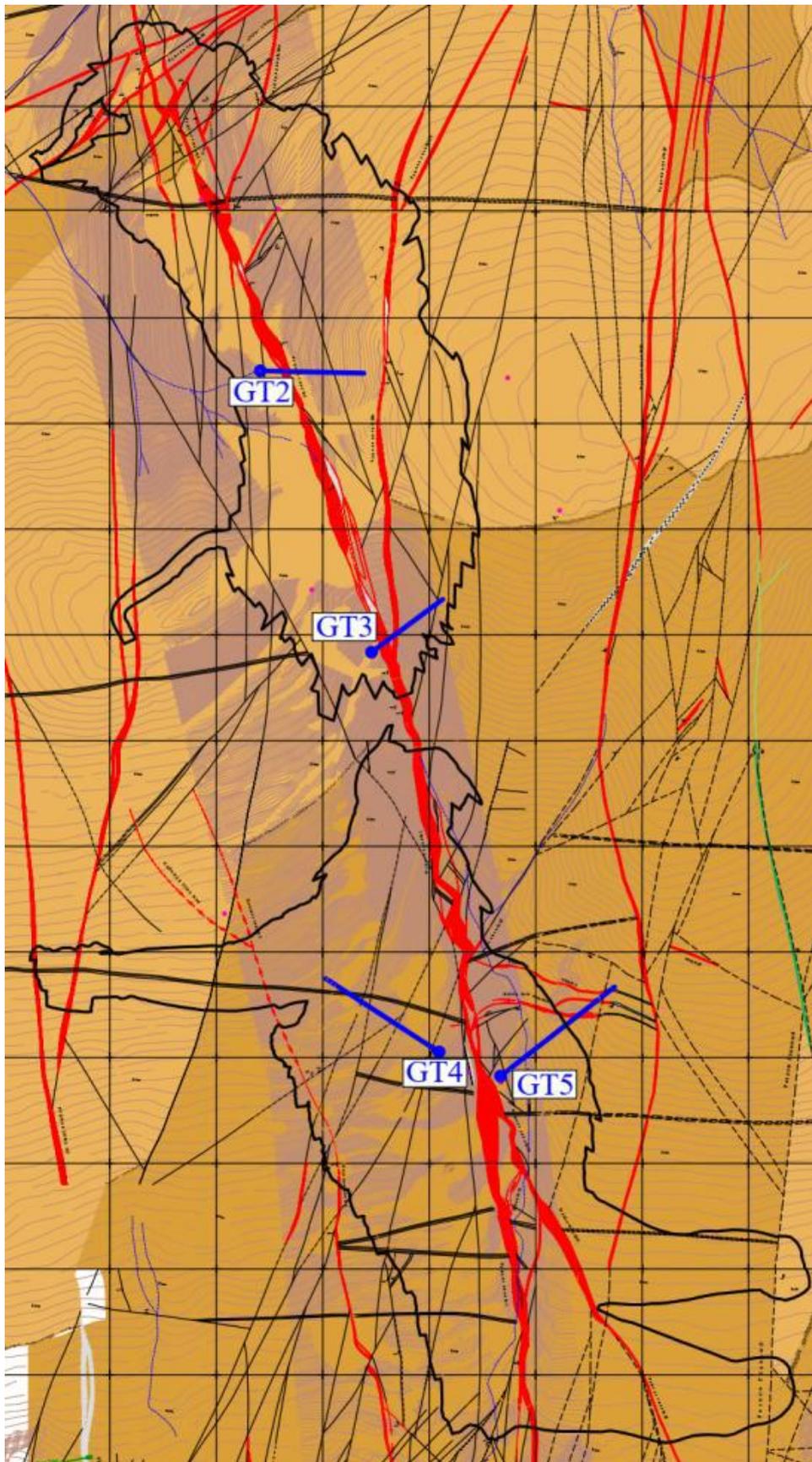


Рисунок 6 - Расположение ориентированных скважин на проектируемых карьерах  
Месторождения «Звезда»

### 1.3 Гидрогеологические условия месторождения

В гидрогеологическом плане месторождение локализовано в Южно-Верхоянском кристаллическом массиве второго порядка. Для района характерно преимущественное распространение трещинно-жильных вод в коренных породах.

Как отмечалось выше, основными притоками месторождения являются: река Топра, ручьи Карам, Безымянный, Кольцевой. Химический состав поверхностных вод – гидрокарбонатный магниевый-кальциевый, но, в отличие от р. Топра, воды ручьев Карам и Безымянный имеют меньшую концентрацию ионов водорода и содержание магния, а также они менее минерализованы и менее жесткие. Сток ручьев продолжается со второй половины мая до половины ноября, сток реки Топра продолжается круглый год.

На рассматриваемой территории основной водоприток формируется за счет атмосферных осадков теплого периода. На наветренных склонах наблюдается увеличение атмосферных осадков, а на подветренных уменьшение. Атмосферные осадки зависят от циркуляции атмосферы, ее сезонных изменений.

Многолетнемерзлые гидрогеологические условия характеризуются непрерывным развитием массива вечномерзлых пород, толщина которых варьируется в районе месторождения от 250 до 330 м на водосборах и склонах северной стороны до 130-210 м на склонах южной стороны, до 80-110 м в долине ручьев и малых рек, а сплошная мерзлота развилась только в долине реки Топра.

На рисунке 7 можно увидеть схему подземного водоносного горизонта месторождения звезда «Звезда».

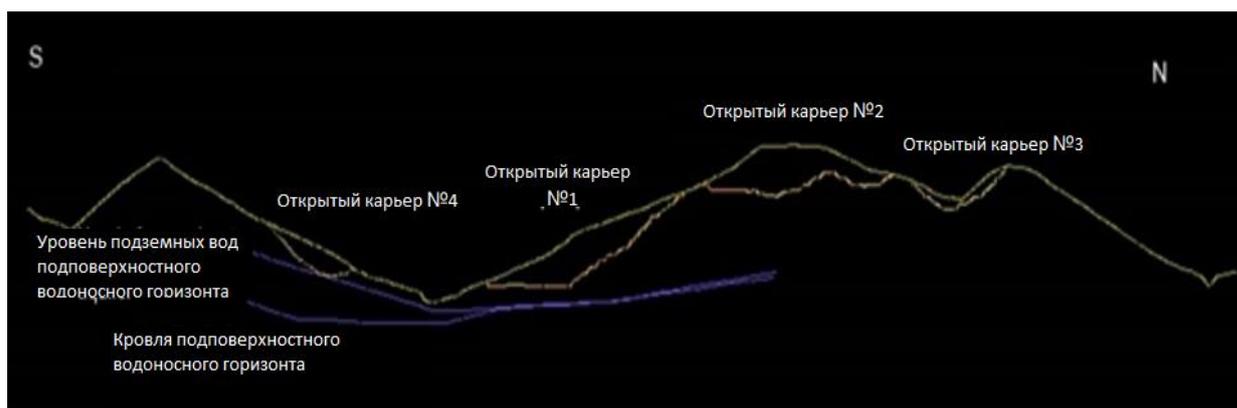


Рисунок 7 – Схема вечномёрзлого водоносного горизонта и контуры карьеров 1,2,3 и 4.

В соответствии с расположением относительно толщи многолетнемерзлых пород подземные воды классифицируются на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные.

Надмерзлотные воды включают в себя как воды сезонно-талого слоя мощностью 0,3-1,1 м, проявляющиеся в теплый период, так и воды несквозных сезонных таликов

мощностью 6,5-11,5 м, активность которых имеет единичный и нерегулярный характер. Надмерзлотные воды относятся ко всем типам четвертичных отложений.

Межмерзлотные воды содержатся в гравийно-галенчиковых отложениях с песчаным заполнителем мощностью 25-80 м., а также подстилающих песчано-глинистых сланцах нижней перми и представлены водоносными горизонтами аллювиальных отложений.

Подмерзлотные воды с характерным трещиновато-жильным типом содержатся в трещиноватых, раздробленных алевролитах и песчаниках. Мощность подмерзлотных вод находится в пределах от 80-120 м до 200-350 м в зависимости от мощности многолетнемерзлых пород.

#### **1.4. Геокриологические условия**

В большей части массив горных пород, подлежащий разработке открытым способом, находится в мерзлом состоянии. Промерзание грунтов, представленных четвертичными отложениями, происходит в конце августа – начале сентября. Оттаивание начинается в конце мая – начале июня.

В связи с повсеместным развитием сплошной толщи ММП, классификация подземных вод производится относительно их пространственных взаимоотношений с толщей ММП.

Мощность толщи многолетнемерзлых пород изменяется от 250-330 м на водоразделах и склонах северной экспозиции до 130-210 м на склонах южной экспозиции, в долинах ручьев и небольших речек мощность толщи уменьшается до 80-110 м и только в крупной долине р.Топра наблюдается сквозной талик. Поскольку вода в криолитозоне (ниже сезонно-талого слоя) постоянно находится в твердой фазе, то это обуславливает водонепроницаемость толщи многолетнемерзлых пород.

В ледниковых отложениях, по троговым долинам руч. Карам, Безымянный и в районе сквозной долины руч. Льдовье и Речной вскрываются подземные льды.

Протаивание грунтов в районе месторождения начинается в июне и заканчивается во второй половине сентября. Наибольшая мощность слоя сезонного оттаивания наблюдается на участках склонов, покрытых лиственничным сухостоем и карликовой березой и достигает 0,9-1,35 м. Глубина оттаивания на склонах южной экспозиции больше, чем на северной, и составляет 1,1-1,5 м [5].

По данным [6], глубина сезонного протаивания колеблется от 0,4÷0,8 м до 1÷2 м. В руслах ручьев глубина протаивания достигает 6÷7 м. В аллювиальных отложениях выявлены жильные льды мощностью до 4 – 5 м и протяженностью до 15÷30 м. Протайка льдов вызывает проявления термокарста, а также увеличение обводнения устьевых частей штолен.

Температурные измерения грунтов показали, что на глубине 10 м температура находится в пределах  $-4,3 \div -5,1^{\circ}\text{C}$ , на глубине 10 м по талой толще в днище р. Топра  $0,8^{\circ}\text{C}$ .

## 2 Исследования горных пород месторождения

### 2.1 Мерзлые породы

Согласно ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. Грунт мерзлый – это грунт, имеющий отрицательную или нулевую температуру, содержащий видимые ледяные включения и/или лед-цемент, за счет которых образованы криогенные структурные связи [8].

Самым главным признаком замерзания грунтов, горных пород, почв и любых других дисперсных тел является кристаллизация в порах льда. Процесс кристаллизации льда в порах грунтов сопровождается целым рядом сложнейших физико-механических явлений и процессов: миграцией воды, смерзанием минеральных частиц грунта, увеличением концентрации поровых растворов и др. Эти явления и процессы формируют новые свойства замерзших грунтов, отличные от свойств немерзлых грунтов. Первостепенную роль в этом играет процесс цементации в той или иной степени минеральных частиц льдом. В таблице 4 указана классификация мерзлых грунтов по Н.А. Цытовичу [9].

Таблица 4 – Наименования мерзлых грунтов в зависимости от времени их существования

<i>Наименование</i>	<i>Время существования</i>
Вечномерзлые	Века и тысячелетия
Многолетнемерзлые	От нескольких лет ( но не менее трёх) до нескольких десятилетий
Сезонномерзлые	От 1 до 2 сезонов
Кратковременномерзлые	От нескольких часов до нескольких суток ( не регулярно возникающие)

Многолетнемерзлые породы в свою очередь подразделяются на сингенетические – возникшие в одно геологическое время с образованием самой породы, и эпигенетические – промерзавшие после накопления и формирования толщи пород. Особые свойства мерзлых пород определяются наличием в них влаги.[10]

Площадь распространения многолетней мерзлоты занимает 66 % площади России, приложение А [11]. На рисунке 8 можно увидеть более подробную карту распространения многолетнемерзлых пород.



Рисунок 8 - Карта распространения многолетнемерзлых пород.[12]

Основной особенностью мерзлых пород являются различные показания прочностных характеристик в талом и мерзлом состояниях. Эти различия зависят от влажности, пористости, степени трещиноватости, дисперсности, длительности нагрузки, льдистости, наличия ледяных прослоек и углов их расположения, процентного содержания незамёрзшей воды, а также циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО). В зависимости от совокупности этих факторов породы могут вести себя как твердые или пластичные тела, причем поведение дисперсных и монолитных (скальных) пород может быть весьма различным.

Мерзлый грунт представляет собой совокупность органоминеральных частиц с включениями незамёрзшей воды (растворов) и газов, связанных поровым льдом.

По физическому состоянию вечномёрзлые грунты разделяют на три вида:

- твердомерзлые, к таким относится, цементированный («смерзшийся») песок, который ведет себя как скальный грунт;
- пластично-мерзлые, примером могут быть цементированные льдом глинистые грунты, которые содержат также воду в жидком состоянии; эти грунты под нагрузкой могут сжиматься;
- сыпучемерзлые – в виде песка, гравия и им подобным, в которых обломки и частицы не цементированы льдом и грунты находятся в рыхлом состоянии [13].

В условиях низких температур лед оказывает цементующее действие на дисперсные породы, в результате чего по структуре они становятся схожими с монолитами.

В результате смерзания происходят изменения прочностных свойств мерзлых грунтовых пород. Этому вопросу посвящено множество исследований, анализируя которые, можно выделить следующие особенности:

1. В условиях отрицательных температур наблюдается увеличение прочностных характеристик грунта.

Изменения прочностных характеристик на стадии фазового перехода поровой воды (превращения воды в лед) для различных пород различны, и на ранних стадиях промерзания грунта имеется четкая зависимость от льдистости и наличия незамерзшей воды.

При понижении температуры от  $-1$  до  $-2$  °С количество незамерзшей воды при испытаниях на сжатие для песка уменьшается на 0,1 %, для глины на 5 %, что в свою очередь приводило к увлечению предела прочности на сжатие первого на 15 %, второго на 35 %. При дальнейшем понижении температуры прочность на сжатие также увеличивалась, что помимо наличия льдистости и количества незамёрзшей воды обуславливается изменением прочности льда, интенсивность возрастания которого меняется по сложному закону.

При понижении температуры до  $-20$  °С интенсивность увеличения прочности льда снижается, но при дальнейшем снижении температуры прочность возрастает. Увеличение прочности льда в свою очередь обусловлено тем, что при понижении температуры подвижность атомов, имеющих слабую водородную связь, уменьшается, что приводит к увеличению прочности, для которой имеется предел. Стоит отметить, что изменение скорости движения атомов в структурной решетке при различных температурах (до  $-20$  и до  $-55$ ) имеет разный характер.

Сопротивление мерзлых грунтов на растяжение в 5-6 раз меньше сопротивления на сжатие, что объясняется увеличением числа контактов между частицами и уменьшением расстояния между ними при сжатии и меньшим числом контактов и увеличении расстояния при растяжении.

Пределы прочности на сжатие и растяжение при понижении температуры возрастают, а также зависят от состава грунта, степени льдистости, влажности, текстуры и т.д. Кроме того, прочностные характеристики мерзлого грунта зависят от скорости приложения нагрузки. Важно также отметить, что многолетнемерзлые грунты обладают пределом прочности на растяжение.

При сдвиговой нагрузке сопротивление мерзлого грунта зависит от температуры, величины внешнего давления и влажности. Чем ниже температура, тем больше сопротивление грунта при сдвиговой нагрузке, а также тем больше сцепление и угол внутреннего трения. При температурах близких к 0, угол внутреннего трения, в сравнении

с углом внутреннего трения талой породы, практически не меняется, зато наблюдается увеличение значений сцепления. Наряду с вышеуказанными факторами, которые оказывают влияние на прочность грунта при сдвиговых нагрузках, установлена также ее зависимость от текстуры.

Сравнивая массивную и слоистую текстуру грунта, льдистость последнего будет выше, а так как лед обладает большими прочностными характеристиками, чем массивная текстура грунта, то грунт с такой текстурой также обладает большими прочностными характеристиками, чем слоистый мерзлый грунт, если зона сдвига проходит через ледяные прослойки [14]. Оценивая прочностные характеристики слоистого грунта, необходимо учитывать, что чем больше площадь контакта заполнена льдом, тем выше показатель прочности. Если сравнивать прочностные показания при сдвиге между зоной направления усилия, проходящей через ледяную прослойку, пересекающей массивную текстуру или проходящей по контакту между льдом и породой, то наименьший показатель прочности наблюдается у последнего варианта (рисунок 9), поэтому направление разрушения усилия тоже оказывает влияние на прочностные показатели.

2. Изменение прочности грунта при его замораживании в значительной мере зависит от исходной степени водонасыщения

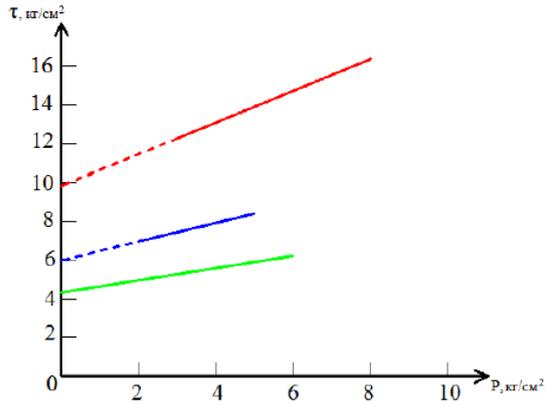
Влияние плотности и влажности на прочность смерзания песчаника рассмотрены в работе [15]. Результаты исследований показали, что при увеличении влажности от 5 % до 15 % и понижении температуры от -5 до -15 прочность на сдвиг возрастает в 5 раз. При увеличении плотности с 1,5 г/см<sup>3</sup> до 1,8 г/см<sup>3</sup> прочность возрастает в 4,6 раз. Разуплотненные породы с влажностью менее 5 % не смерзались.

При доведении грунта до полной водонасыщенности практически все его поры становятся заполнены водой. При отрицательных температурах вода превращается в лед, в результате чего частицы грунта скрепляются и превращаются в единый монолит.

Однако при дальнейшем увеличении влажности до полной водонасыщенности и перенасыщенности прочность пород снижается и приближается к прочности льда, рисунок 10 и 11.

3. Прочностные характеристики грунта зависят от скорости приложения нагрузки (мгновенная и длительная нагрузка).

Мгновенная прочность – прочность, характеризующая сопротивление грунта от прикладываемой к нему кратковременной нагрузки. Предельно-длительная прочность – прочность, характеризующая сопротивление грунта нагрузкам, при которых деформация имеет затухающий характер и не переходит в вязко-пластичное течение, которое заканчивается разрушением.



$\tau$  – сопротивление породы сдвигу,  $P$  – нормальная нагрузка, красная линия – грунтовый лед, синяя линия – суглинок слоистой текстуры, зеленая линия – суглинок массивной текстуры

Рисунок 9 - Диаграмма сдвига мерзлого грунта и льда при быстром приложении нагрузки [14]

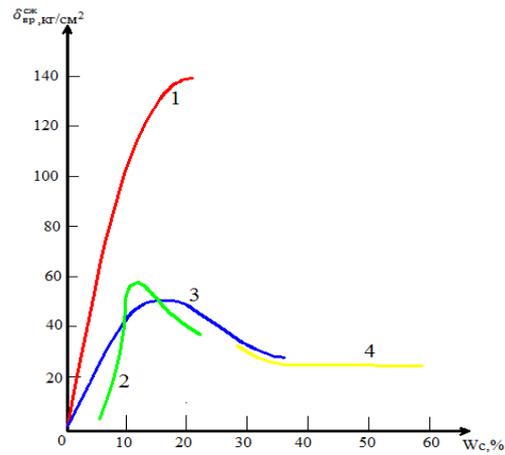


Рисунок 10 -Зависимость временного сопротивления сжатию  $\delta_{вр}^{сж}$  мерзлых грунтов от их суммарной влажности  $Wc$

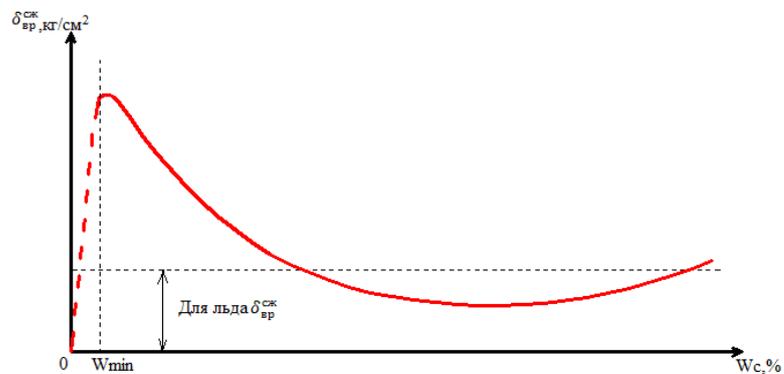


Рисунок 11 - Общий характер зависимости сопротивления мерзлых грунтов сжатию  $\delta_{вр}^{сж}$  от влажности  $W_c$

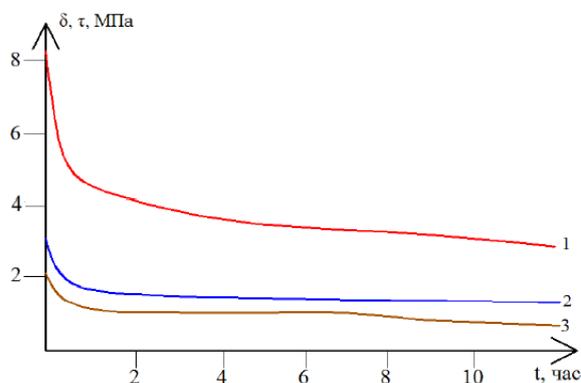
Различие между мгновенной и длительной прочностью заключается в том, что при мгновенных нагрузках лед характеризуется высокими прочностными характеристиками, что, соответственно, приводит к повышению сопротивляемости грунта нагрузке. В то время как для активации процесса таяния требуется время.

При длительном воздействии внешних сил, в связи с таянием льда, возникает релаксационное напряжение, которое проявляется в виде затухающей или не затухающей ползучести, что способствует нарушению контактов связей, образованию микро- и макротрещин и т.д. [16].

Длительная прочность мерзлых грунтов в 2-15 раз меньше мгновенной прочности. Снижение длительной прочности зависит от типа грунта, степени льдистости – влажности, температуры и вида напряженного состояния.

Исходя из анализа сравнения прочностных характеристик мерзлого грунта при мгновенных и длительных нагрузках можно сказать, что предел прочности на сжатие при длительных нагрузках снижается в 1,5-3 раза, на растяжение – в 12-15 раз, на сдвиг – в 2,5-6,5 раз. Резкое снижение прочности наблюдалось в начальной стадии процесса, затем интенсивность снижения резко замедлялась и образцы разрушались через 250-350 дней.

Также, сравнивая прочностные характеристики мерзлого грунта при различной скорости нагружения, следует отметить, что прочность на сжатие имеет наибольший показатель как при мгновенной, так и при длительной нагрузке, рисунок 12. Прочность на сжатие при мгновенных нагрузках больше прочности на растяжении в 2,6 раза, и больше, чем при сдвиге, в 3,1 раз. Для предельно-длительной прочности эти соотношения составляют 2,64 и 3,63 соответственно. Большая прочность на сжатие обусловлена в первую очередь тем, что при сближении частиц силы молекулярного сцепления увеличиваются, как указывалось выше.



(1 – одноосное сжатие, 2 – растяжение, 3 – чистый срез)

Рисунок 12 – Кривые длительной прочности келловейской супеси ( $t=-10^{\circ}\text{C}$ ) при различных видах испытаний

Различия между мгновенной и длительной прочностью характеризует график зависимости предела прочности на сдвиг от времени воздействия нагрузки, рисунок 13.

Как показывает график, пересечение кривой с осью ординат характеризует значение мгновенной прочности. С течением времени происходит уменьшение сопротивляемости грунта внешним нагрузкам, связанное, как указывалось выше, с таянием льда в породе, что приводит к снижению прочностных характеристик.

Мгновенная прочность в свою очередь зависит от скорости нагружения, чем больше скорость, тем выше показатель предела прочности, рисунок 14. Также очень резко выражена зависимость мгновенной прочности от температуры и влажности, как показано на рисунке 15.

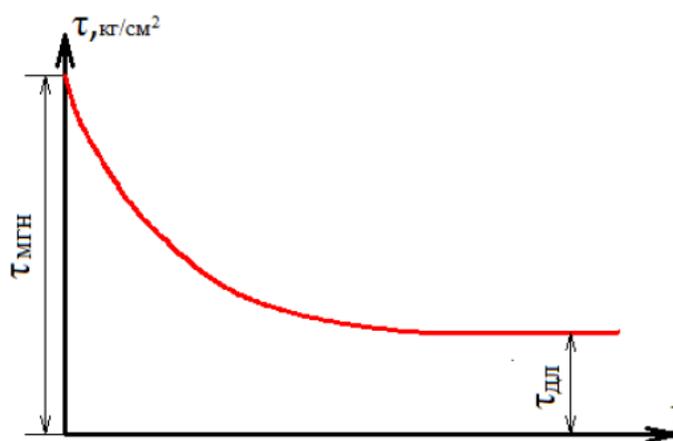


Рисунок 13 - Зависимость сопротивления мерзлого грунта сдвигу от продолжительности действия сдвигающего усилия

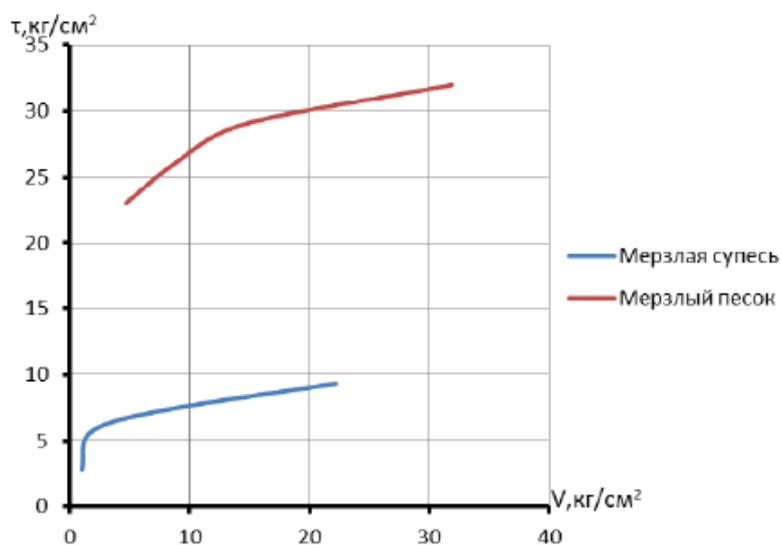
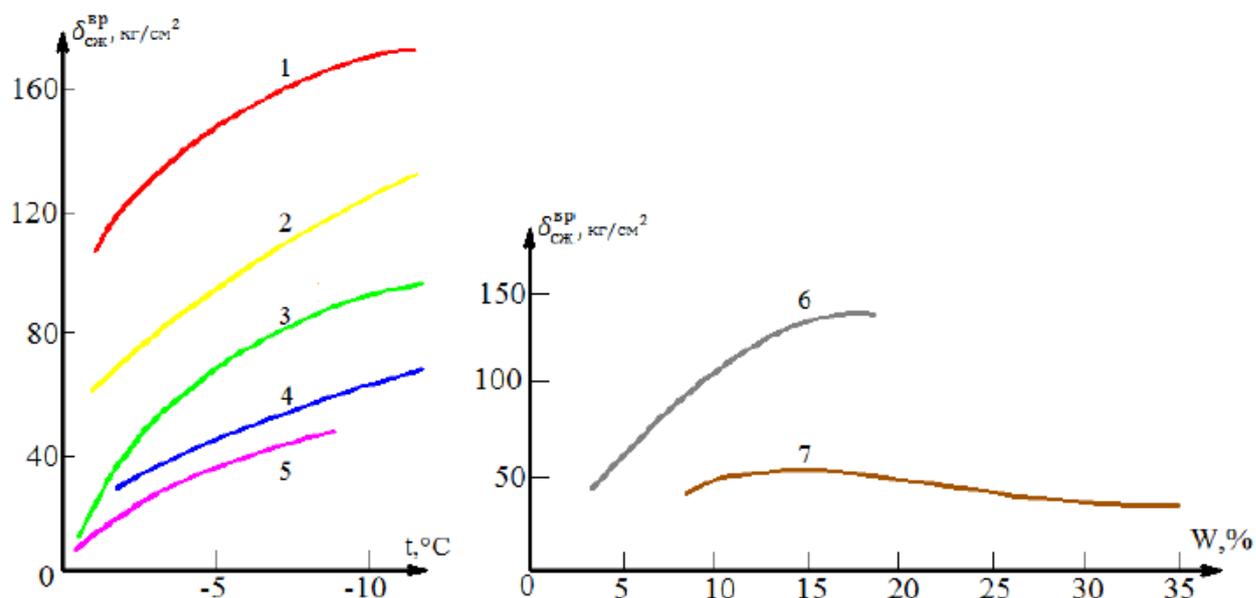


Рисунок 14 - Зависимость прочности смерзания  $\tau$ , кг/см<sup>2</sup> от скорости напряжения  $V$ , кг/см<sup>2</sup> в 1 минуту



1-пылеватый песок; 2 – кварцевый песок; 3 – супесь; 4 - глина, суглинок тяжелый;  
5 – лед; 6 – песок; 7 – глина

Рисунок 15 - Зависимость временного сопротивления сжатию мерзлого грунта от температуры и влажности

Для оценки длительной порочности грунтов часть опытов проводилась ступенчатым способом нагружения, то есть каждую ступень нагрузки выдерживали до затухания деформации или установления пластического течения. Включая все ступени, продолжительность опытов составляла 2,5-3 месяца. При проведении испытаний при одинаковых нагрузках образец льда разрушался (фактически плавлением) в течение длительного времени, в то время как мерзлый грунт массивной структуры разрушался всего за пару минут. Это связано с тем, что лед имеет меньшую скорость течения, а, следовательно, большую сопротивляемость к малым нагрузкам, нежели мерзлый грунт. Такая же зависимость наблюдается при длительном воздействии нагрузки до 2,5-3 месяцев. Исходя из этого видно, что лед в мерзлом грунте при длительности нагружения до 3 месяцев, оказывает такое же положительное влияние на прочностные характеристики грунтов, как и при мгновенных нагрузках. Однако при построении кривых длительной прочности мерзлых грунтов и льда можно спрогнозировать, что в определенный момент лед становится менее прочным, чем мерзлый грунт, и будет негативно влиять на прочность грунта слоистой структуры. При оценке прочности грунтов необходимо исходить из предела величины деформации, а не из значения предельной длительной прочности, так как

лед имеет большее сопротивление к разрушению, вязкость и небольшую скорость пластического течения в сравнении с мерзлым грунтом.

## 2.2 Скальные породы

В криологических условиях воздействие отрицательных температур на скальные породы приводит к снижению их прочностных характеристик за счет расклинивающего действия льда в трещинах и порах. Процесс снижения прочности неоднозначен и для различных пород протекает по-разному. Определяющую роль в снижении прочности крепких пород играет степень пористости и трещиноватости, а также минералогический состав, тип заполнителя пор и трещин и другие факторы. Анализ результатов исследований прочности крепких пород в условиях мерзлоты, проведенных различными учеными, позволяет выделить следующие особенности:

1. Прочность скальных горных пород и их контактов в криологических условиях больше прочности тех же пород в талом состоянии.

Прочностные свойства скальных и полускальных горных пород в условиях криолитозоны увеличиваются по сравнению с теми же породами в талом состоянии, таблицы 5 и 6 [17.18].

Однако, в данных работах также отмечается, что при влажности менее 0,2 % прочность пород в образце в талом и мерзлом состояниях практически не изменяется. Это относится к скальным породам, характеризующимся низкой пористостью, т. е. скальные породы в этом случае являются сухими и при отрицательной температуре находятся в морозном (охлажденном) состоянии.

Таблица 6 - Прочность в образце мерзлых и талых скальных и полускальных пород

Породы	Мерзлые породы		Талые породы		Влажность W.%	Месторождение
	Сцепление в образце $C_0$ , кг/см <sup>2</sup>	Угол внутреннего трения $\phi$ , град.	Сцепление в образце $C_0$ , кг/см <sup>2</sup>	Угол внутреннего трения $\phi$ , град.		
Диабазы	300	36.5	230	36	0.66	ПО «Якуталмаз»
Известняки глинистые	160	37	106	37	1.6	То же
Известняки песчанистые	90	36	58	36	1.4	- » -
Алевролиты	100	30	50	30	6.5	- » -

Мергель с прослоями песчаника	110	32	75	26	4.6	- » -
Мергель	37	35	8	35	12.0	- » -
Песчаник крупнозернистый (цемент железисто-гидрослюдистый)	208	-	160	33	-	Нерюнгринское каменноугольное
Песчаник мелкозернистый (цемент карбонатный)	260	-	250	33	-	То же

Таблица 6 - Значения сцепления и углов трения по трещинам

Породы	Сплошное заполнение трещин льдом		Частичное заполнение трещин льдом		Немерзлые породы	
	$C', \text{ т/м}^2$	$\varphi', \text{ град.}$	$C', \text{ т/м}^2$	$\varphi', \text{ град.}$	$C', \text{ т/м}^2$	$\varphi', \text{ град.}$
Уголь	14	10	10	14	2	15
Углистый аргиллит	30	15	10	15	2	15
Углистый песчаник	22	18	10	20	2	20

2. Прочность горных пород зависит от температурного режима.

При замораживании горных пород лед увеличивается в объеме и расклинивает поры, что приводит к уменьшению несущей способности породы. При дальнейшем понижении температуры лед перестает расширяться, а соответственно и расклинивать, что приводит к увеличению прочности пород.

Так, например, в работе [19] показано, что предел прочности на сжатие при температурах  $-50 \div -80 \text{ }^\circ\text{C}$  снижается незначительно, при дальнейшем снижении прочность увеличивается и при температуре  $-150 \text{ }^\circ\text{C}$  становится на 50-70 % выше, чем предел прочности при естественных температурах. Изменение прочностных характеристик в работе объясняется двумя факторами:

- 1) развитием микротрещин на границах минеральных зерен под воздействием структурных термических напряжений;
- 2) упрочнением минералов.

Первый фактор оказывает наиболее сильное влияние при температурах  $-50\div-80$  °С и способствует снижению прочности, при дальнейшем снижении температуры при увеличении прочности превалирует второй фактор.

3. При изучении прочностных характеристик мерзлых горных пород следует учитывать их геологическое происхождение.

Если прочность кристаллических низко пористых пород уменьшается с понижением температуры, как показано в пункте 1, то прочность осадочных высокопористых (пористость 12%) и трещиноватых пород увеличивается на 17-45% [20]. В работах Розенбаума М.А. установлено, что прочность мерзлого угля повышается при понижении температуры от  $-2$  до  $-6$  °С, после дальнейшего понижения температуры прочность не меняется. Для определения прочности угля при изменении температуры получена следующая формула:

$$R_t = \frac{R_M}{1 + \left(\frac{R_M}{R_1 - 1}\right)^{\frac{t_M - t}{t}}}$$

где: –  $R_t$  – прочность угля при данной температуре;  $R_M$  – прочность угля при температуре  $-6$  °С и ниже;  $R_1$  – прочность угля при положительной температуре;  $t_M$  – температура пород, соответствующая прочности  $R_M$ ;  $t$  – фактическая температура.

Наличие ледяных прослоек в образцах горной породы способствует уменьшению ее прочности в 2-8 раз. Для расчета прочности породы с ледяными прослойками на ее контактах рекомендуется использовать следующую формулу:

$$R_{ск} = \frac{h}{\frac{h_L}{R_L} + \frac{h_M}{R_M}}$$

где:  $R_M$  – прочность мерзлой породы, МПа;  $R_L$  – прочность льда, МПа;  $h$  – общая высота образца с ледяными прослоями;  $h_M$  – его высота без ледяных прослоев;  $h_L$  – суммарная толщина ледяных прослоев.

4. С уменьшением скорости прикладываемой нагрузки к образцу горных пород их прочность уменьшается.

Прочность льда при длительных нагрузках равна нулю. Прочность пород при длительных нагрузках в условиях отрицательных температур, а также при наличии ледяных прослоек, составляет 30÷40 % от показаний прочности при условно-мгновенных нагрузках. Если отношение сумм высот ледяных прослоек к общей высоте образца больше 0,15, то длительная прочность такого образца равна нулю.

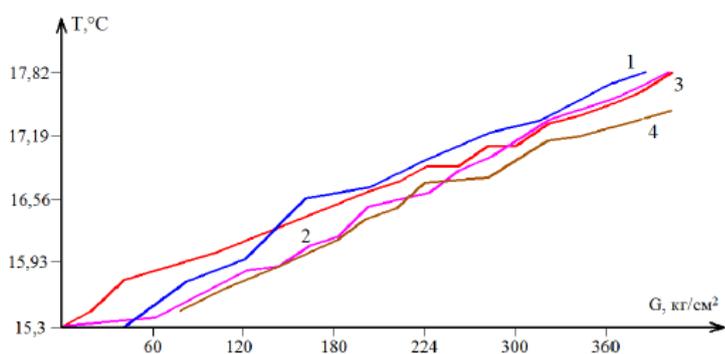
5. Изменение напряжённо-деформационного состояния массива приводит к изменению его температуры.

С помощью специальной установки, создающей всестороннее давление до 60 МПа, было зафиксировано [20], что с повышением напряжения возрастает и температура образцов. При стабилизации напряжения, сохраняется и новое значение температуры. Резкое понижение напряжения сопровождается резким понижением температуры. При циклическом нагружении повышение и понижение температуры происходят в таких же диапазонах, что и в предыдущих циклах. С ростом напряжения до 40 МПа приращения температуры массива в натуральных условиях находилось в пределах  $1,5 \div 3$  °С, в лабораторных условиях приращение температуры образцов составляло  $2,5 \div 3,5$  °С. Такой разброс приращений температуры при увеличении давления связан с тем, что в натуральных условиях происходит теплообмен с воздушной средой, поэтому значения приращений ниже. Исходя из рисунка 16 видно, что зависимость изменения напряжения и температуры имеет линейный характер.

6. Прочность мерзлых горных пород зависит от их исходной водонасыщенности и пористости.

Чем больше пористость и влажность пород, тем больше степень водонасыщения, и тем большее разрушение окажет замерзающая в порах вода при своем расширении.

Сравнивая два образца известняка с пористостью 12 % и ниже 1 %, энергоёмкость при дроблении первого при понижении температур от +20 °С до -5 °С снижается на 42 %, во втором случае на 14 % [21].



(1 – бурый уголь (Анадырь), 2- каменный уголь, 3-бурый уголь (Шураб), 4 – мрамор)

Рисунок 16 - Зависимость приращений температур образцов пород от измененного напряжённого состояния

Анализ испытаний по снижению прочности при увеличении пористости образцов кимберлита, отобранных на карьере Удачный, показал, что образцы с пористостью 5 % и влажностью до 2 % имеют прочностные характеристики в 2 раза меньше, чем при пористости менее 1 %, рисунок 17.

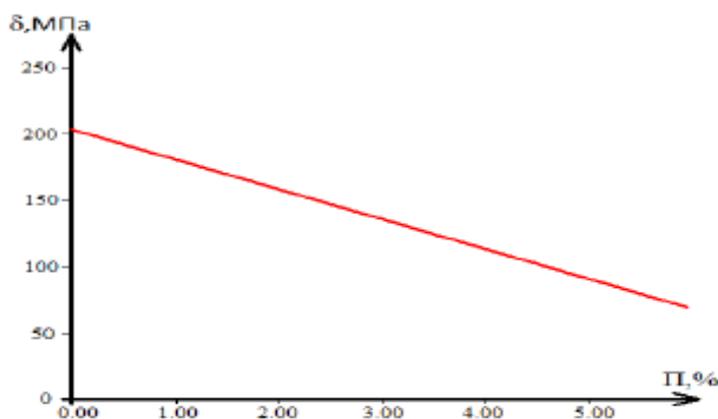


Рисунок 17 - Зависимость прочности пород от пористости

### 2.3 Рыхлые четвертичные отложения

Исследования состава и свойств пород рыхлых четвертичных отложений были проведены в 2018 г. на территориях месторождения «Звезда», отведенных под основания внешних отвалов 1, 2, 3, 4 и 5, которые будут располагаться в приконтурных зонах карьеров №1 и 2.

Было изучено геологическое строение территорий, отведенных под основания отвалов, до глубины 15,0 м.

В геологическом строении оснований отвалов принимают участие отложения пермского возраста ( $P_{1-2}$ ), которые в основном перекрыты с поверхности верхнеплейстоцен-голоценовыми элювиальными ( $e_{Q_{III-IV}}$ ), аллювиальными ( $a_{Q_{III-IV}}$ ), и элювиально-делювиальными ( $ed_{Q_{III-IV}}$ ), а также современными техногенными отложениями ( $t_{Q_{IV}}$ ).

К специфическим грунтам инженерно-геологическими изысканиями были отнесены техногенные, элювиальные отложения а также локально распространённые ледогрунты.

Согласно [8] техногенный грунт – это грунт, измененный, перемещенный или образованный в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека.

Техногенные отложения имеют локальное распространение и относятся к насыпям автодорог и навалам грунта.

Элювиальные отложения имеют практически повсеместное распространение, залегают непосредственно на коренных породах.

Было выделено 8 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). В таблицах 7 и 8 приведено описание ИГЭ относящихся к четвертичным отложениям.

Таблица 7 – Список инженерно-геологических элементов мерзлых грунтов

ИГЭ	Описание
<b>Современные техногенные отложения (tQIV)</b>	
1	Щебенистый грунт мерзлый с суглинистым заполнителем до 30%, слабольдистый.
<b>Четвертичные образования (QIII-IV)</b>	
0.1	Ледогрунт
<b>Верхнеплейстоцен-голоценовые элювиально-делювиальные отложения (edQIII-IV)</b>	
1.1	Суглинок легкий, песчанистый, мерзлый, слабольдистый прослоями нельдистый, с дресвой и щебнем до 25 %
1.2	Супесь пылеватая, мерзлая, слабольдистая прослоями нельдистая и льдистая, с дресвой и щебнем до 25%
1.3	Суглинок легкий, пылеватый, мерзлый, слабольдистый прослоями нельдистый с дресвой и щебнем до 10%
<b>Верхнеплейстоцен-голоценовые аллювиальные отложения (eQIII-IV)</b>	
1.4	Галечниковый грунт мерзлый, слабольдистый и льдистый, с песчаным заполнителем до 40%
<b>Верхнеплейстоцен-голоценовые элювиальные отложения (eQIII-IV)</b>	
2.1	Щебенистый грунт мерзлый, слабольдистый, с суглинистым заполнителем до 30%
2.2	Дресвяный грунт мерзлый, слабольдистый, с суглинистым и супесчаным заполнителем до 30%

Таблица 8 - Список инженерно-геологических элементов слоя сезонного оттаивания

ИГЭ	Описание
<b>Верхнеплейстоцен-голоценовые элювиально-делювиальные четвертичные отложения (edQIII-IV)</b>	
6.1	Суглинок тугопластичный, легкий, пылеватый, прослоями мягкопластичный, с дресвой и щебнем до 25%
6.2	Супесь пластичная пылеватая с включением дресвы и щебня до 25%
<b>Верхнеплейстоцен-голоценовые аллювиальные отложения (eQIII-IV)</b>	
1.4т	Галечниковый грунт с суглинистым заполнителем до 30%, водонасыщенный
<b>Элювиальные четвертичные отложения (eQIV)</b>	
7.1	Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем до 30%, маловлажный
7.2	Дресвяный грунт с суглинистым заполнителем до 30%, маловлажный

Прочностные свойства рыхлых пород зависят от состояния грунта: талый или мерзлый. При испытаниях мерзлых грунтов определялось лишь эквивалентное сцепление, результаты испытаний представлены в таблице 1 приложения Б. В то время как для расчетов устойчивости откосов необходимо иметь величины сцепления и углов внутреннего трения горных пород. Поэтому оценить прочностные свойства мерзлых пород не представляется возможным. В связи с этим для расчетов принимался наихудший случай, а именно физико-механические свойства талых пород.

Были выделены в отдельные ИГЭ грунты слоя сезонного оттаивания в талом состоянии. Расчетные физико-механические свойства талых пород представлены в таблице 2 приложения Б.

## 2.4 Обоснование физико-механических свойств горных пород для расчетов устойчивости бортов и уступов карьера

Необходимость поддержки устойчивости массива пород в процессе развития горных работ очевидна. Особенности инженерно-геологических условий, в том числе литолого-петрографического состава, физико-механических свойств, структурной нарушенности, параметров естественного поля напряжений требуют индивидуального подхода к процессу прогноза поведения массива пород при вскрытии их горными выработками.

Сокращение негативных последствий возможно только при чётком понимании процессов развивающихся в сфере взаимодействия природно-технических систем

Изменения состояния природно-технической системы в ходе техногенных воздействий иллюстрирует функциональная блок-схема на рисунке 18.

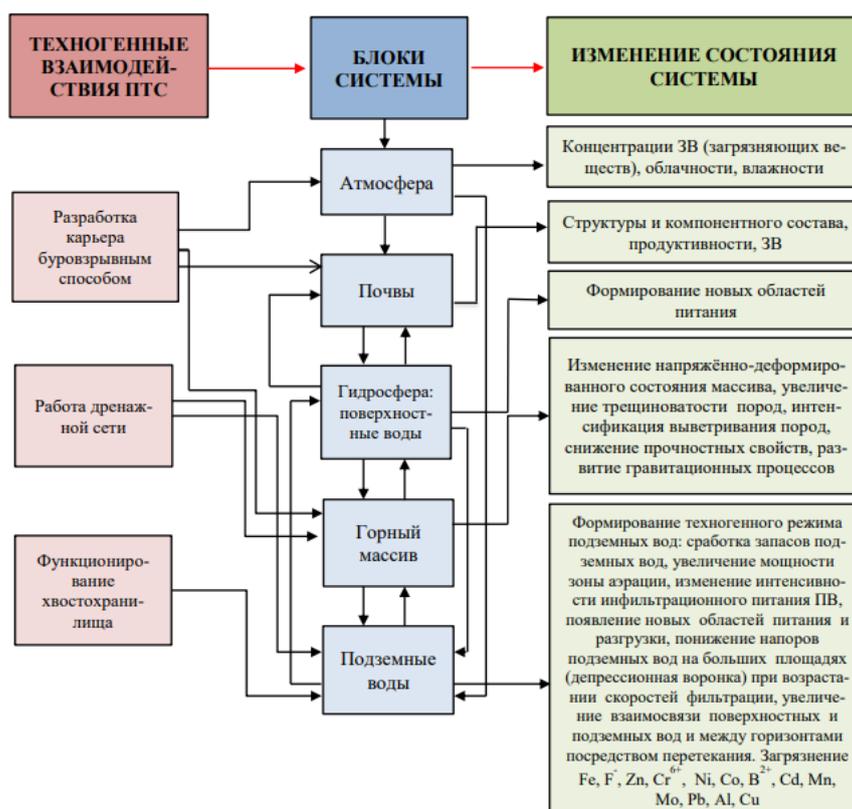


Рисунок 18 - Функциональная блок-схема природно-технической системы активноразрабатываемого месторождения [22]

Основными характеристиками физико-механических свойств массива пород, используемыми в расчетах устойчивости откосов, являются: показатели прочности пород – угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) и сцепление ( $C$ ), а также сопротивляемость сдвигу по естественным поверхностям ослабления горного массива (по контактам слоев в слоистом массиве, по трещинам, тектоническим нарушениям и другим поверхностям ослабления) – угол трения ( $\varphi$ ) и сцепление ( $C$ ). Кроме того, необходимо учитывать и другие физические характеристики пород, в том числе плотность ( $p$ ), влажность ( $W$ ) и температуру ( $t$ ) горных пород.

Важной особенностью изучаемого месторождения является то, что оно расположено в районе развития многолетней мерзлоты. В среднем мощность многолетнемерзлых пород составляет 250-300 м. Причем на склонах северной экспозиции в среднем 160-190 м, на южной – 140-170 м.

В геологическом строении прибортовой массив рассматриваемого карьера разделен на 2 комплекса – покровный и вмещающий, породы которых резко отличаются по условиям залегания, структуре, физическим и водным свойствам.

Покровный комплекс приурочен к толще четвертичных отложений, представленных элювиально-делювиальными грубообломочными образованиями, мощностью от 1 до 38 метров, а также песчано-суглинистыми ледниковыми отложениями с валунами и галькой (мощность до 60 м). В долинах крупных рек развиты песчано-гравийные аллювиальные отложения, мощность которых в долине р.Тыры достигает 88 метров. Непосредственно в районе расположения проектируемого карьера, согласно разрезам, мощность четвертичных отложений составляет от первых метров до 29 м (на восточном борту карьера № 2). Из этого следует, что четвертичные отложения не окажут существенного влияния на устойчивость бортов карьера в целом.

Прибортовой массив карьера преимущественно сложен из крепких скальных пород, представленных песчаниками, алевролитами и их разновидностями.

Алевролиты и их разновидности имеют наибольшее распространение в осадочной толще и в основном представлены кварцем -70 %, полевым шпатом -5 %, реже листочками мусковита. Обломочная часть алевролитов от общей породы составляет 65-75 %. Для пород характерен темно-серый и черный цвет, обусловленный содержанием тонкораспыленного углистого материала.

Наименьшее распространение в массиве имеют песчаники. Они не превышают первых процентов от общего объема горных пород в разрезе и представляют собой массивную, крепкую, мелко-среднезернистую породу, темно-серого цвета, кварц-полевопатового состава. Обломочная часть составляет 50-65 % от общей массы породы и представлена в основном кварцем, реже полевыми шпатами, обломками эффузивов. Размер зерен колеблется от 0,2–0,3 мм до 0,4 мм. Форма зерен угловато-окатанная. Цемент кремнисто-карбонатный. Тип цементации базальный, реже – крустификационный. Текстура массивная.

#### 2.4.1 Скальные породы

Изучение прочностных свойств вмещающих пород и руд месторождения проводилось как при разведке месторождения, так и при опытной его эксплуатации в большом объеме в течение ряда лет различными организациями. Наиболее полные сведения о физико-механических свойствах всех литологических разновидностей пород отражены в работах Читинского филиала института ВНИПИГорцветмет, СО РАН института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова и данные испытаний физико-механических свойств пород, выполненных Иргиредметом. Данные о результатах испытаний физико-механических свойств пород представлены в таблицах Приложения В.

Анализ результатов лабораторных испытаний образцов горных пород, полученных в различное время и разными организациями, весьма различаются. В тоже время следует отметить, что свойства пород характеризуются относительно высокими прочностными показателями.

Расчетный метод построения паспорта прочности горной породы по ГОСТу 21153.8-88 [23] основан на экспериментальной зависимости предельных нормальных и касательных напряжений. Данная зависимость описывается с использованием прочности на одноосное сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) и растяжение ( $\sigma_p$ ). При построении паспорта прочности используются среднеарифметические значения пределов прочности на одноосное сжатие и растяжение.

Согласно таблице приложения В, среднее значение предела прочности при мгновенном сжатии и растяжении в образцах пород составят:

– для алевролитов:  $\sigma_{сж}= 83,25$  МПа ( $\sigma_{сж}=120\div 1545$  кг/см<sup>2</sup>),  $\sigma_p=14,75$  МПа ( $\sigma_p=20\div 275$  кг/см<sup>2</sup>);

– для алевролитовых сланцев:  $\sigma_{сж}= 88,25$  МПа,  $\sigma_p=17,15$  МПа;

– для песчаников:  $\sigma_{сж}= 136,25$  МПа,  $\sigma_p=17,5$  МПа.

Значения сцепления ( $C$ ) и угла внутреннего трения ( $\varphi$ ), полученные в соответствии с ГОСТ 21153.8-88 составили:

– для алевролитов:  $\varphi =29,9$ ,  $C_{обр.}=24,4$  МПа;

– для алевролитовых сланцев:  $\varphi = 26,6$ ,  $C_{обр.} = 28$  МПа;

– для песчаников:  $\varphi = 37,7$ ,  $C_{обр.} = 34,7$  МПа.

Стоит отметить, что алевролитовый сланец сложно выделить в разрезе, и, учитывая его значения прочностных свойств, данные породы далее будут отнесены к разновидностям алевролитов.

Анализ результатов испытаний физико-механических свойств пород в образцах, показал, что во всех испытаниях наблюдается заниженный в несколько раз предел прочности на растяжение. Занижение данной величины приводит к увеличению угла внутреннего трения и занижению величины сцепления. Весьма низкое значение прочности на растяжение может быть связано с методикой испытания. В связи с этим в обосновании прочностных свойств горных пород данные результаты не рассматривались.

Стоит также отметить, что приведенные в последней таблице приложения В величины углов внутреннего трения завышены. В связи с этим нами был произведен пересчет согласно ГОСТ 21153.8-88. Результаты пересчета показали, что жильный кварц отличается завышенными прочностными свойствами, в то время как песчано-глинистые сланцы (алевролиты и их разновидности) весьма хорошо сходятся с результатами более поздних лет. В связи с этим результаты испытаний жильного кварца далее не рассматриваются.

В процессе выполнения работы были определены показатели предела прочности при одноосном сжатии и растяжении в различных состояниях, показатель предела прочности при трехосном сжатии, деформационные свойства (модуль упругости/деформации, коэффициент Пуассона), показатели предела прочности при сдвиге по естественной трещине и по распилу (трехстадийные сдвиги), предел прочности при срезе со сжатием. Результаты лабораторных испытаний приведены в приложении Г.

Для прогнозирования устойчивости откосов бортов и уступов карьеров в условиях криолитозоны были проведены дополнительные испытания горных пород:

1. Определение сдвиговых характеристик горных пород при естественной влажности и полностью водонасыщенных при отрицательных температурах, сопоставимых с температурой в массиве.

2. Определение сдвиговых характеристик горных пород при циклах замораживания-оттаивания.

3. Определение сдвиговых характеристик по естественным трещинам и распилу горных пород.

4. Определение сдвиговых характеристик по естественным трещинам с разным заполнением льда.

Для возможности анализа и сопоставления результатов испытаний, проведенных различными методами, использовались образцы, отобранные с близких горизонтов.

Лабораторные испытания проводились на образцах алевролитов, отобранных со скважин GT-1 - GT-4 и образцах алевролита с прослойками песчаника, отобранных из скважины GT-11.

Результаты испытаний горных пород и их контактов в различном состоянии приведены в таблицах 9-12.

Таблица 9 - Результаты испытаний на одноосное сжатие горных пород, находящихся в различных состояниях

Наименование породы	Номер скважины	Прочность на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ , Мпа для различных состояний горной породы		
		Талое	Мерзлое	Водонасыщенное
Алевролит	GT-1	113,7	144,5	151,7
	GT-1	134,8	136,3	159,2
	GT-1	175,6	156,5	149,6
Среднее		141,4	145,7	153,5
Алевролит с прослойками песчаника	Gt-11	163,4	158,7	105,2
	Gt-11	220,0	200,8	187,7
	Gt-11	141,2	168,9	124,2
	Gt-11	153,7	183,2	149,9
	Gt-11	196,0	133,3	175,0
Среднее		174,9	169,0	148,4
Среднее по горным породам		162,3	160,3	150,3
Коэффициент вариации, %		21,2	14,6	17,4

Таблица 10 - Результаты испытаний на растяжение горных пород, находящихся в различных состояниях

Наименование породы	Номер скважины	Прочность на одноосное растяжение $\sigma_r$ , Мпа для различных состояний горной породы		
		Талое	Мерзлое	Водонасыщенное
Алевролит	GT-1	10,3	23,96	12,32
	GT-1	14,76	16,1	8,7
	GT-1	13,05	13,05	18,49
	GT-2	13,52	14,55	18,76
	GT-2	18,32	12,32	16,5
Среднее		14,0	16,0	15,0
Алевролит с прослойками песчаника	Gt-11	17,8	17,17	14,55
	Gt-11	13,08	22,94	18,46
	Gt-11	14,35	30,58	23,69
	Gt-11	20,98	20,98	13,98
	Gt-11	20,34	18,24	24,26
Среднее		17,3	22,0	19,0
Среднее по горным породам		15,7	18,5	17,5

Коэффициент вариации, %	24,5	31,9	27,3
-------------------------	------	------	------

Таблица 11 - Результаты испытаний методом среза со сжатием образцов алевролита, находящихся в различных состояниях

Состояние образца	Номер скважины	Сцепление С, МПа	Угол трения $\varphi$ , град.
Талое	GT-01,02,03	28,0	37,6
	GT-11	27,7	36,8
Водонасыщенное	GT-11	28,8	35,5
Мерзлое	GT-04	17,7	41,1
	GT-11	21,2	38,8
Циклы З-О	GT-01,02,03	20,7	39,5
	GT-11	23,4	40,6
Среднее		23,9	38,6
Коэффициент вариации, %		18,1	5,3

Таблица 12 - Результаты определений показателей сдвигу вдоль плоскости распила и естественной трещины при различном состоянии горных пород.

Наименование породы	Номер скважины	Температура испытания, °С	Заполнение трещины льдом, %	Сцепление С, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град
сдвиг вдоль плоскости распила					
Алевролит	GT-01	20	–	0,17	27,2
Алевролит с прослойками песчаника	GT-11	20	–	0,11	24,2
Среднее по породам				0,14	25,7
сдвиг вдоль естественной трещины					
Алевролит	GT-10	20	–	0,30	19,0
	GT-04			0,15	29,0
Алевролит с прослойками песчаника	GT-11	20	–	0,33	20,1
Алевропесчаник	GT-10	20	–	0,54	21,6
Среднее по породам				0,33	22,4
Алевролит	GT-02	-10	50%	0,14	24,8
	GT-02			0,01	37,7
	GT-10			0,28	23,3
Алевропесчаник	GT-10	-10	50%	0,19	30,1
Алевролит с прослойками песчаника	GT-11	-10	50%	0,19	21,8
Среднее по породам				0,17	26,6
Алевролит	GT-04	-10	100%	0,20	26,3
	GT-02			0,20	30,2
	GT-10			0,24	21,7
Алевропесчаник	GT-10	-10	100%	0,38	26,9

Алевролит с прослойками песчаника	GT-11	-10	100%	0,34	21,1
Среднее по породам				0,26	23,4

Для определения величин сцепления и углов внутреннего трения образцов горных пород в различных состояниях на основании таблиц 7-8 был использован ГОСТ 21153.8-88. Результаты пересчета приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Результаты определения характеристик сопротивлению сдвигу путем пересчета через сжатие и растяжение, в соответствии с ГОСТом 21153.8-88.

Наименование породы	Талое		Мерзлое		Водонасыщенное	
	Сцепление С, МПа	Угол трения $\phi$ , град.	Сцепление С, МПа	Угол трения $\phi$ , град.	Сцепление С, МПа	Угол трения $\phi$ , град.
Алевролит	39,3	37,2	40,2	36,3	42,7	37,3
Алевролит с прослойками песчаника	48,5	37,2	46,8	34,6	41,1	34,7

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее:

1. Испытания образцов горных пород.

При сравнении результатов испытаний образцов в талом, водонасыщенном и мерзлом состояниях установлено, что:

- прочность при одноосном сжатии отличается на 4-8 %;
- прочность на растяжение – на 7-12 %.

Коэффициент вариации показателей прочности на одноосное сжатие и растяжение при испытании образцов в различных состояниях не превосходил 31,9 %.

Наименьший коэффициент вариации наблюдался у величин сцепления и угла внутреннего трения, полученных методом среза со сжатием.

2. Результаты испытаний вдоль поверхности распилов и естественных трещин.

Результаты испытаний вдоль поверхности распилов и естественных трещин горных пород показали, что величины сцепления по естественной трещине в несколько раз выше данной величины по распилам. В то время как величины углов внутреннего трения изменяются не столь сильно. Отличия величин сцепления объясняются наличием четко выраженной шероховатости у естественных трещин:

- при частичном заполнении естественных трещин льдом (50 %) величина сцепления по сравнению с тальными условиями уменьшается практически в два раза, а угол внутреннего трения увеличивается на 5 градусов. Вероятнее всего это связано с тем, что на всей площади контакта взаимодействие поверхностей осуществляется большей частью на участках расположения льда. В связи с этим при уменьшении площади контактирующих поверхностей уменьшается и величина сцепления;

- при полном заполнении естественных трещин льдом величина сцепления имеет промежуточное значение между естественной трещиной и распилом, а угол внутреннего трения практически не изменяется. Это связано с тем, что наличие льда частично или полностью может нивелировать шероховатость поверхности.

Заполнение льдом неровностей на контакте приводит к своего рода «сглаживанию» поверхностей. В этом случае сглаживание поверхности может приводить к усреднению всех шероховатых трещин.

Таким образом, анализ лабораторных испытаний образцов горных пород (монолитов) показал, что воздействие отрицательных температур практически не оказывает влияния на их прочность, что объясняется низким содержанием влаги (влажность не более 0,5%). Однако испытания естественных трещин и распилов демонстрируют двойное влияние отрицательных температур, а именно льда, на их сдвиговую прочность. С одной стороны, лед связывает трещины, и общая несущая способность контактирующих поверхностей увеличивается. С другой стороны, при наличии льда уменьшается площадь взаимодействия контактов, что будет приводить к снижению прочностных свойств по контактам. В тоже время наличие льда в трещинах может усреднять показатели сопротивления сдвигу за счет контактирования не стенок трещин между собой, а льда и горной породы. В этом случае несущая способность будет определяться силой смерзания ледяной прослойки и стенкой трещины.

#### **2.4.2 Анализ для обоснования устойчивости всех горных пород**

Результаты лабораторных испытаний горных пород месторождения «Звезда», выполненных разными организациями в различное время приведены в таблице 14.

Анализ таблицы 14 показывает, что в целом величины сцепления и углов внутреннего трения алевролитов и их разновидностей имеют весьма близкие значения. Самыми высокими прочностными характеристиками обладают песчаники. Наиболее низкие прочностные свойства у кварцевого жильного агрегата.

Таким образом, на основании анализа таблицы 14 в качестве исходных физико-механических характеристик горных пород в образце принимаются следующие значения:

- алевролиты и их разновидности:  $\varphi = 34^\circ$ ,  $C_{обр.} = 29$  МПа,  $\gamma = 2700$  кг/м<sup>3</sup>;
- песчаники:  $\varphi = 39^\circ$ ,  $C_{обр.} = 30$  МПа,  $\gamma = 2750$  кг/м<sup>3</sup>;
- кварцевый жильный агрегат:  $\varphi = 24^\circ$ ,  $C_{обр.} = 21$  МПа,  $\gamma = 2620$  кг/м<sup>3</sup>.

Анализ лабораторных испытаний по контактам горных пород показал, что углы внутреннего трения по распилу и естественной трещине достаточно близки между собой. В то же время величины сцепления по естественной трещине в несколько раз выше данной величины по распилам.

Далее нужно отметить, что устойчивость откосов уступов и бортов карьера зависит от прочности, геологического строения, структуры, тектонической нарушенности и степени обводнённости массива пород и производимых горных работ. В результате обнажения глубинных слоев пород и выполнения различных технологических процессов в массивах горных пород возникают горно-геологические явления – оползни, обрушения, обвалы, осыпи. Наиболее опасный вид разрушения карьерных откосов представляют собой оползни – смещение породных масс по поверхности, называемой поверхностью скольжения (оползания). Эта поверхность отделяет смещающуюся часть породы от неподвижной части [24]. Такие смещения возникают в результате деформирования уступов и бортов карьера в том числе.

Деформирование уступов происходит чаще всего по естественным трещинам, при этом сами трещины представляют собой относительно гладкую поверхность. В связи с этим для расчетов устойчивости уступов принимаются результаты испытаний по распилу. Данные значения характеризуются минимальными прочностными свойствами для рассматриваемой горной породы.

Таблица 14 - Сопоставление результатов лабораторных исследований, выполненных разными организациями

Наименование породы	Физико-механические свойства горных пород в образце		
	Сцепление С, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>
Алевролит и их разновидности (в том числе алевролитовые сланцы)	ВНИПИгорцветмет (приложение В)		
	26,2	28,3	2740
	Иргиредмет (приложение В)		
	31,2	27,1	2690
	Санкт-Петербургский горный университет		
	Пересчет через сжатие и растяжение в соответствии с ГОСТом 21153.8-88 (приложение Г)		
	26,6	31	2710
	Испытания методом объемного сжатия		
	24,1	38	2710
Испытания методом среза со сжатием			

	26,7	39,7	2710
	Испытания образцов для талых условий (таблица 13)		
	43,9	37,2	
	Пересчет через сжатие и растяжение в соответствии с ГОСТом 21153.8-88, для образцов в талом состоянии (приложение Г)		
	27,9	37,2	2710
<b>Среднее</b>	29	34	2706
Песчаник	ВНИПИгорцветмет (приложение В)		
	34,7	37,7	2650
	Санкт-Петербургский горный университет		
	Пересчет через сжатие и растяжение в соответствии с ГОСТом 21153.8-88 (приложение Г)		
	38,4	36	2750
	Испытания методом объемного сжатия		
	29,1	43,1	2750
Среднее	Испытания методом среза со сжатием		
	15,6	41,2	2750
	30	39	2750
Кварцевый жильный агрегат	Санкт-Петербургский горный университет		
	Пересчет через сжатие и растяжение в соответствии с ГОСТом 21153.8-88 (приложение Г)		
	22,4	14,6	2623
	Испытания методом объемного сжатия		
	7,7	29,3	2623
Среднее	Испытания методом среза со сжатием		
	31,9	29,4	2623
	21	24	2623

Для расчетов устойчивости бортов карьеров принимаются результаты испытаний по естественным трещинам с учетом реальной шероховатости контакта. Однако для получения более надежного результата и учета возможного негативного влияния льда в трещинах сцепление по контактам горных пород уменьшалось в два раза, а угол внутреннего трения оставался без изменения.

Таким образом, для расчетов приняты следующие прочностные свойства по контактам горных пород:

- для расчетов устойчивости уступов: сцепление  $C=0,100$  МПа, угол трения  $\varphi=28^\circ$ ;
- для расчетов устойчивости бортов: сцепление  $C=0,165$  МПа, угол трения  $\varphi=28^\circ$ .

Многолетними исследованиями установлено, что угол внутреннего трения, определенный в лабораторных условиях на малогабаритных образцах, может с достаточной надежностью характеризовать внутреннее трение массива пород. Однако сцепление в

образце не может характеризовать массив, т.к. последний представляет собой не монолит, а трещиноватую среду. Наличие в массиве горных пород трещин, разбивающих его на отдельные блоки, приводит к значительному снижению прочности массива по сравнению с прочностью образца.

Величина сцепления пород в массиве  $C_m$  определяется формуле:

$$C_m = \frac{c_0 - c'}{1 + a \ln \frac{H}{l}} + C'$$

где:  $C_0$  – сцепление в образце, МПа;

$C$  – сцепление по контактам между блоками пород, МПа;

$H$  – высота прибортового массива, м;

$l$  – средний размер элементарного структурного блока массива, ограниченного трещинами, м;

$a$  – коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и степени и характера трещиноватости.

Значения коэффициента « $a$ » для различных типов пород выбирается по таблице 1 («Методические указания...» [25]). Для данного типа вмещающих пород –  $a = 6$ , размер структурного блока, ограниченного естественными трещинами, принят равным 0,4 м.

Принадлежность проектируемого карьера к нагорному типу обуславливает большой разброс его бортов по высоте. На восточном борту карьера № 1 максимальная высота борта составляет порядка 500 м. Необходимо отметить, что использование для расчетов максимальной высоты откоса приводит к занижению сцепления в массиве и, соответственно, к повышению надежности определяемого коэффициента запаса устойчивости.

Величина коэффициента структурного ослабления для алевролитов и их разновидностей, песчаников составила 0,028, а для кварцевого жильного агрегата – 0,031.

Проведенный анализ строения пород четвертичных отложений месторождения «Звезда» показывает, что в приконтурной зоне карьеров четвертичные отложения представлены в большинстве своём щебенистым и дресвяным грунтами с суглинистым заполнителем до 30%, маловлажными (ИГЭ 7.1 и 7.2), приложение Б. Необходимо отметить, что значения для ИГЭ 7.1 и 7.2 в приложении Б приведены средние расчетные значения без учета коэффициента надежности по результатам полевых испытаний на срез целиков, всего было проведено 12 испытаний. Поскольку полевые исследования проводились в октябре-декабре 2017 г., то данные результаты соответствуют мерзлым породам. В связи с этим для расчетов устойчивости в прочностные свойства ИГЭ 7.1 и 7.2

необходимо ввести коэффициент надежности, тогда сцепление составит 6 кПа, а угол внутреннего трения 36 градусов.

Принимая во внимание, следующие положения:

- во вмещающем массиве коренных пород весьма сложно выделить различные литологические разности;
- коренные осадочные отложения представлены в большей степени алевролитам (порядка 70-80 %);
- алевролиты имеют близкие прочностные характеристики с песчаниками.

Можно сделать заключение, что коренные породы вмещающего массива можно охарактеризовать едиными физико-механическими свойствами.

В свою очередь физико-механические свойства четвертичных отложений будут характеризоваться показателями щебенистого и дресвяного грунта с суглинистым заполнителем до 30%, маловлажными (ИГЭ 7.1 и 7.2).

Принятые для расчетов устойчивости бортов карьера и уступов физико-механические свойства горных пород и их контактов приведены в таблице 15.

Таблица 15 - Физико-механические свойства горных пород в массиве, принятые для расчетов устойчивости бортов и уступов месторождения «Звезда»

Наименование породы	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Сцепление в массиве С, МПа	Угол внутреннего трения (для контактов угол трения) $\varphi$ ( $\varphi'$ ), град.
Четвертичные отложения: Щебенистый и дресвяный грунт с суглинистым заполнителем до 30%, маловлажный	2110	0,006	36
Скальные породы, слагающие прибортовой массив, преимущественно из алевролитов и его разновидностей	2700	0,820	34
Кварцевый жильный агрегат	2620	0,640	24
Контакт			
– для уступов	-	0,100	28
– для бортов		0,165	28

### 3. Расчет устойчивости элементов карьера

#### 3.1 Расчет устойчивости бортов карьера и его участков

Для визуализации расчетов нужно знать элементы карьера.

Схемы карьеров и уступов представлены на рисунках 19 -20.

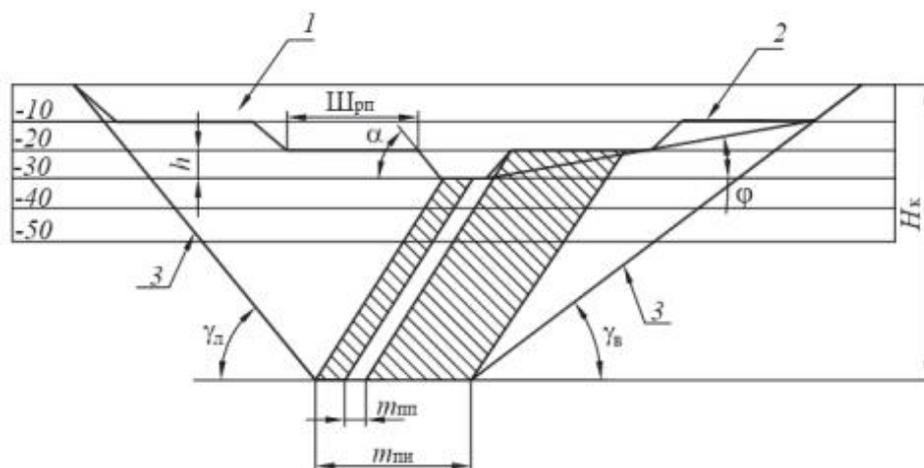


Рисунок 19 - Элементы и параметры карьера: 1 – выработанное пространство; 2 – рабочий борт карьера; 3 – конечные контуры карьера;  $\alpha$  – угол откоса уступа;  $\varphi$  – угол откоса рабочего борта;  $\gamma_b$  – угол откоса нерабочего борта со стороны висячего бока залежи;  $\gamma_n$  – угол откоса нерабочего борта со стороны лежащего бока залежи; Ш<sub>р.п</sub> – ширина рабочей площадки; h – высота уступа; H<sub>к</sub> – конечная глубина карьера; B<sub>в</sub> – ширина карьера по верхнему контуру; L<sub>в</sub> – длина карьера по верхнему контуру; b<sub>т</sub> – ширина траншеи

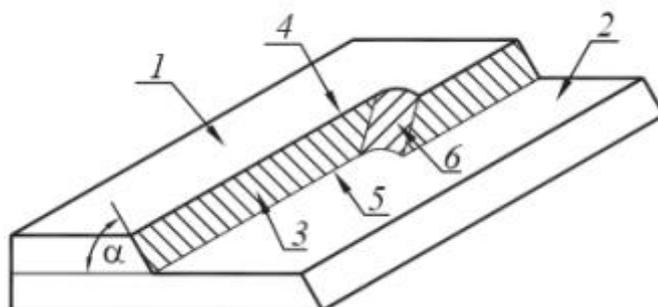


Рисунок 20 - Схема уступа: 1 – верхняя площадка уступа; 2 – нижняя площадка уступа; 3 – откос уступа; 4 – верхняя бровка уступа; 5 – нижняя бровка уступа; 6 – забой уступа;  $\alpha$  – угол откоса уступа

Месторождение при открытой разработке разделяется на отдельные горизонтальные или наклонные слои. Каждый верхний слой отрабатывают с опережением по отношению к нижнему, в результате чего борт карьера, т. е. его боковые поверхности, имеют ступенчатую или уступную форму.

Уступом называется часть толщи пород, имеющая рабочую поверхность в форме ступени и разрабатываемая самостоятельными средствами выемки, погрузки и транспорта (рисунок 20). Обычно высота уступа принимается не менее высоты черпания экскаватора и на большинстве карьеров составляет 10–15 м, а иногда достигает 20–40 м.

Различают рабочие и нерабочие уступы. На рабочих уступах производится выемка пород или добыча полезного ископаемого. Уступ имеет нижнюю и верхнюю площадки, откос и бровки.

Откосом уступа называется наклонная поверхность, ограничивающая уступ со стороны выработанного пространства. Линии пересечения откоса уступа с его верхней и нижней площадками называются, соответственно, верхней и нижней бровками.

Горизонтальные поверхности рабочего уступа, ограничивающие его по высоте, называют нижней и верхней площадками. Площадка, на которой расположено оборудование для разработки, называется рабочей площадкой. Ширина рабочих площадок составляет 40–70 м и более. Площадка уступа, характеризуемая высотной отметкой, называется горизонтом. Площадки, на которых работы не производятся, называются бермами. Различают предохранительные и транспортные бермы.

Измерив расстояние по вертикали между верхней и нижней площадками, находят высоту уступа. Ее величина зависит от рабочих размеров применяемого выемочно-погрузочного оборудования и физико-механических свойств пород [26].

Прибортовой массив карьеров № 1 и 2 сложен прочными осадочными многолетнемерзлыми породами, представленными в основном алевритом и его разновидностями, реже песчаником и кварцевым жильным агрегатом. На месторождении «Звезда» достаточно широко распространены тектонические нарушения, в основном субвертикального падения различного простирания.

Месторождение расположено в зоне развития многолетней мерзлоты мощностью порядка 250-300 м. Причем на склонах северной экспозиции в среднем 160-190 м, на южной – 140-170 м.

В данной работе рассматривается карьер №1.

В районе карьера № 1 имеется три участка, на которых ранее была выполнена отработка руд подземным способом. Данные участки могут оказать влияние на деформирование земной поверхности и привести к изменению прочностных свойств горных пород.

Геомеханическими исследованиями установлено, что надежность расчетов при оценке устойчивости бортов карьеров и уступов зависит не только от достоверности исходных прочностных свойств сопротивления сдвигу горных пород и инженерно-геологических условий прибортового массива, но и от степени соответствия принятой расчетной модели реальной схеме распределения напряжений в прибортовом массиве и схеме его деформирования (разрушения).

При отсутствии в массиве поверхностей ослабления, способных реализоваться в поверхности скольжения, разрушение прибортового массива при достижении предельного равновесия происходит в виде обрушения или оползания по монотонной, близкой по форме к круглоцилиндрической поверхности. Если в прибортовом массиве имеются поверхности ослабления в виде четко выраженной слоистости, сланцеватости, тектонических нарушений и трещин большого протяжения, сопротивляемость сдвигу по которым существенно слабее окружающих пород, то поверхность скольжения (разрушения) частично или полностью может совпадать с какой-либо из них.

Необходимо отметить, что для осадочных пород характерно наличие протяженных контактов на границе слоев, которые при разгрузке и вскрытии горными работами могут реализовываться в поверхности скольжения и приводить к снижению устойчивости прибортового массива [27].

Согласно данным ориентированного бурения скважин GT-2, 3, 4, 5 и диаграммам трещиноватости, установлено, что в прибортовом массиве имеется крутопадающая слоистость с углами падения от 64 до 74° при азимуте падения 274-299°.

На основании анализа инженерно-геологических условий были выбраны соответствующие расчетные схемы, которые характеризуют условия возможного деформирования прибортового массива:

– разрушение откосов при отсутствии в массиве поверхностей ослабления, способных реализоваться в поверхности скольжения. При достижении предельного равновесия

деформирование массива происходит по монотонной поверхности, близкой по форме к круглоцилиндрической. Расчетная схема – однородный (квазиизотропный) откос;

– разрушение откоса в массиве осуществляется по поверхностям скольжения, которые частично или полностью совпадают с естественными поверхностями ослабления

(трещинами). В данном случае поверхность скольжения в верхней части будет проходить по ослабленному контакту при условии  $\alpha < \beta < 70^\circ$ ;  $\beta > \varphi'$ , а в нижней будет переходить в форму монотонной криволинейной поверхности.

На основании анализа инженерно-геологических условий были выбраны соответствующие расчетные схемы, которые характеризуют условия возможного деформирования прибортового массива:

– разрушение откосов при отсутствии в массиве поверхностей ослабления, способных реализоваться в поверхности скольжения. При достижении предельного равновесия деформирование массива происходит по монотонной поверхности, близкой по форме к круглоцилиндрической. Расчетная схема – однородный (квазиизотропный) откос;

– разрушение откоса в массиве осуществляется по поверхностям скольжения, которые частично или полностью совпадают с естественными поверхностями ослабления (трещинами). В данном случае поверхность скольжения в верхней части будет проходить по ослабленному контакту при условии  $\alpha < \beta < 70^\circ$ ;  $\beta > \varphi'$ , а в нижней будет переходить в форму монотонной криволинейной поверхности.

При анализе элементов залегания слоистости и азимутов падения бортов учитывалось, что если простирание поверхностей ослабления отличалось от простирания поверхности откоса более чем на  $20^\circ$ , то данные элементы залегания слоистости в расчетах не учитывались, и принималась схема «однородный откос».[28]

На карьере № 1 простирание всех участков борта карьера отличалось от простирания напластования от  $23^\circ$  до  $71^\circ$ , и поэтому для расчетов использовалась одна схема – однородный откос.

Физико-механические свойства горных пород, принятые для расчетов устойчивости бортов карьеров и их участков, приведены в таблице 15.

На основании анализа условий осадочных месторождений [28], а также результатов испытаний контактов горных пород для расчетов были приняты следующие физико-механические свойства тектонических нарушений: угол трения  $\varphi = 28^\circ$ , сцепление  $C = 0,10$  Мпа.

Учёт зон влияния подземных очистных выработок на устойчивость бортов карьера № 1 проводился на основании предоставленных материалов АО «Полиметалл Инжиниринг» «Рекомендации по открытой отработке карьера вблизи подземных горных выработок [28. Влияние подземных выработок на устойчивость бортов карьера при расчётах учитывалось путём снижения величины сцепления в массиве в 1,5 раза в зонах влияния выработок [29].

Месторождение «Звезда» расположено в сейсмически активном районе. Для расчетов принималась возможная интенсивность колебаний грунта в 7 баллов по шкале MSK-64 [30].

Оценка устойчивости откосов с учетом сейсмического воздействия от землетрясений проводилась с использованием псевдостатического подхода [33]. При данном подходе действие сейсмических сил рассматривается так же, как и действие статических сил, и расчет осуществляется по правилам статики. При этом коэффициенты, учитывающие динамические особенности проектируемых сооружений, принимают равными единице, а направление сейсмической нагрузки совпадает с направлением сдвигающих сил. В этом случае сейсмическая сила  $Q_c$  определяется:

$$Q_c = K_0 \cdot K_1 \cdot P \cdot k_c$$

где:  $K_0$  – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность ( $K_0=1,5$ );

$K_1$  – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений ( $K_1=0,25$ );

$P$  – нагрузка, вызывающая инерционную силу (вес призмы возможного обрушения), т;

$k_c$  – коэффициент сейсмичности, который представляет собой значения ускорения колебаний в долях  $g$ .

Значение коэффициента сейсмичности для 7-балльной зоны составляет  $0,1g$ .

Коэффициент запаса устойчивости для бортов карьеров месторождения принимается равным 1,3. Однако данное значение коэффициента запаса принимается к обычным условиям, без учета сейсмичности района.

Методика выбора необходимой величины коэффициента запаса для откосов при сейсмическом воздействии землетрясений отличается от обычных условий. Основным отличием является то, что при воздействии сейсмических колебаний во время относительно кратковременного воздействия волны на откос, последний не должен перейти в предельное состояние.

Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости, полученное с учетом сейсмических сил, должно быть:

– согласно «Методическому пособию по определению углов откосов уступов и углов наклона бортов карьеров, сложенных многолетнемерзлыми породами, Л: ВНИМИ, 1972 г.» не менее 1,02; [18]

– согласно мировой практике [31] не менее 1,0-1,05.

Из приведенного анализа следует, что коэффициент запаса в момент сейсмического воздействия, согласно различным документам должен находиться в диапазоне 1,00-1,05. В связи с этим для расчетов устойчивости бортов карьеров и их участков принимается максимальное значение равное 1,05. В случае если расчетное значение коэффициента запаса составит менее 1,05, необходимо осуществлять корректировку параметров откоса для повышения общей его устойчивости.

Таким образом, на основании анализа нормативных и методических документов, для расчетов принимаются следующие нормативные значения коэффициентов запаса:

- без учета сейсмического воздействия – 1,30;
- с учетом сейсмического воздействия – 1,05.

Расчет устойчивости бортов карьера с использованием вышеуказанных схем деформирования откосов выполнялся методом многоугольника сил. Ввиду формирования бортов карьера в зоне распространения вечной мерзлоты, расчеты устойчивости откосов выполнялись для дренированных условий. Результаты расчётов и расчеты устойчивости по профилям приведены в приложении Д.

План карьера №1 месторождения «Звезда» с нанесёнными расчётными профилями представлен на рисунке 21.

Важно отметить, что проведенные расчеты устойчивости бортов карьера №1 и его элементов при его положении на конец отработки показали, что с учетом (и без учета) сейсмического воздействия землетрясений с интенсивностью колебаний грунта в 7 баллов по шкале MSK-64 устойчивость прибортового массива обеспечивается с коэффициентом запаса не ниже нормативного.

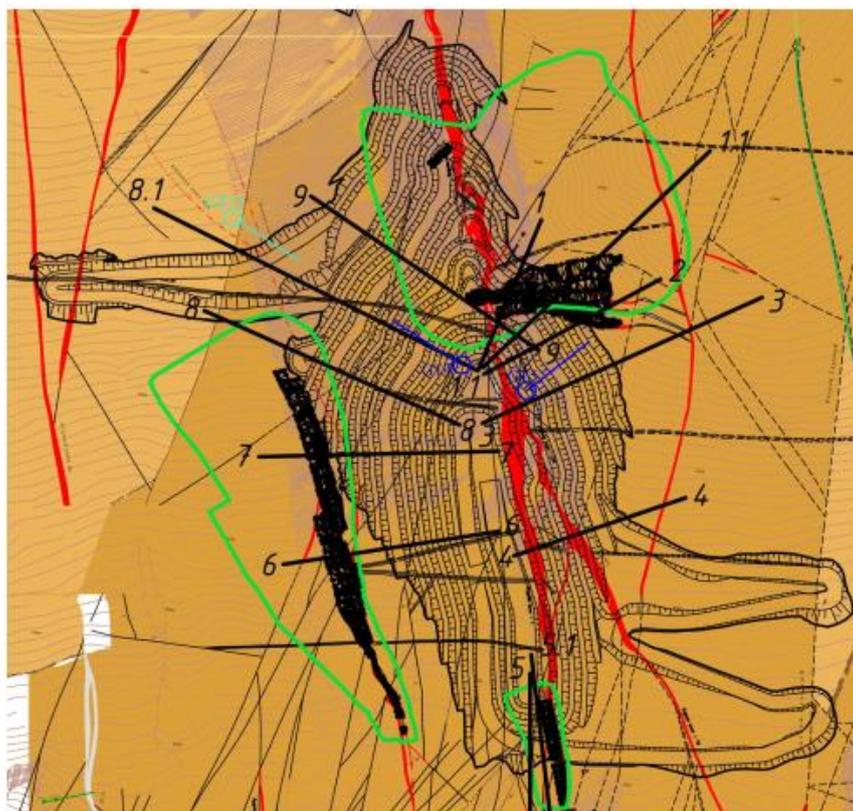


Рисунок 21 – План карьера № 1 с нанесёнными расчётными профилями и зонами влияния подземных очистных выработок

### **3.2 Расчет устойчивости откосов уступов**

#### **3.2.1 Расчет устойчивости откосов уступов, формируемых в скальных породах**

Расчет устойчивости откосов уступов осуществляется исходя из физико-механических свойств горных пород и их контактов, а также анализа падения и простираения трещин относительно положения уступа.

При отсутствии в массиве поверхностей ослабления, способных реализоваться в поверхности скольжения, расчет устойчивости уступа выполняется по схеме однородного откоса.

В случае наличия потенциальных поверхностей ослабления расчет устойчивости уступов выполняется по схемам, позволяющим учесть соответствующие возможные механизмы разрушения откоса.

Параметры откосов уступов в конечном положении, согласно проекту [35], следующие:

- в горных породах незатронутых выветривание: высота 30 м и угол откоса 65 и 70°;
- в выветрелых горных породах высота 30 м и угол откоса 45°;
- проектная ширина предохранительных берм –10 м.

Анализ элементов залегания естественных трещин и азимутов падения уступов позволил выявить следующие возможные схемы деформирования откосов уступов на месторождении «Звезда»:

- однородный откос;
- плоское разрушение по трещине;
- клин.

Уступы, при наличии подсекающих трещин, рекомендуется заоткашивать под углами наклона этих трещин. Однако при небольшой высоте откос допустимо формировать под более крутыми углами.

При условии подрезки откосов горными работами оценка их устойчивости при падении поверхностей ослабления (контактов слоев) в выработанное пространство под углом большим угла трения ( $\beta > \varphi'$ ) и при угле откоса уступа большем угла падения поверхности ослабления ( $\alpha > \beta$ ) осуществляется по следующей формуле [44]:

$$h_y = 2C' \cos \varphi' \sin \alpha / \rho \sin (\beta - \varphi') \sin (\alpha - \beta)$$

где:  $\alpha$  – угол наклона откоса уступа;

$\beta$  – угол наклона слабого контакта;

$C'$  и  $\varphi'$  – сцепление и угол трения по контакту;

$\rho$  – плотность пород массива.

При неблагоприятном залегании относительно уступа двух пересекающихся трещин может происходить вывал клиновидных отдельностей, рисунок 22. Оценка устойчивости уступа при таких условиях осуществлялась по формуле ниже [44]:

$$h = \frac{3C' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi} \left( \frac{\sin \beta_1}{\sin \delta_2} + \frac{\sin \beta_2}{\sin \delta_1} \right)}{\gamma \sin(\beta_1 + \beta_2) (\operatorname{ctg} \delta_2 - \operatorname{ctg} \alpha) (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} \varphi')}$$

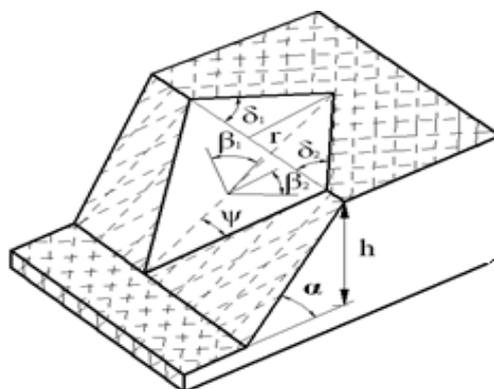


Рисунок 22 – Обрушение клиновидного блока

Принятые для расчетов устойчивости уступов физико-механические свойства горных пород и контактов приведены в таблице 15.

Коэффициент запаса устойчивости для откосов уступов, поставленных в конечное положение, для условий месторождения принимается в соответствии с [28]  $n=1,5$ .

Расчеты устойчивости бортов карьеров показали, что при учете в расчетах сейсмического воздействия с интенсивностью колебаний 7 баллов коэффициент запаса не

снижается менее 1,05. Поэтому для уступов приводятся результаты расчетов как для обычных условий.

Проведенные расчеты устойчивости откосов уступов карьера, поставленных в конечном положении, показали, что их устойчивость обеспечивается с коэффициентом запаса не ниже нормативного.

### **3.2.2 Расчет устойчивости откосов уступов, формируемых в четвертичных отложениях**

Четвертичные отложения месторождения представлены в основной массе щебенистым грунтом с суглинистым заполнителем до 30%.

Неблагоприятные условия формирования уступов в рыхлых четвертичных отложениях мощностью от 2 до 29 м обусловлены совокупностью низких прочностных характеристик четвертичных отложений и нагорным типом месторождения с протяжёнными естественными склонами (с углами падения в сторону карьерной выработки от 7 до 48°).

В предоставленных материалах АО «Полиметалл Инжиниринг» высота уступов формируемых в четвертичных отложениях от 2 до 12 м, углы откосов уступов находятся в пределах от 33 до 60°.

На основании анализа инженерно-геологических условий уступов карьера месторождения для расчетов их устойчивости принималась схема однородного откоса.

Нормативный коэффициент запаса для уступов, формируемых в четвертичных отложениях, принят  $n=1,2$  [45].

Результаты расчётов представлены в таблице 16.

Из таблицы 16 следует, что полученные коэффициенты запаса выше нормативного значения  $n=1.2$ . Однако учитывая процессы выветривания, которые наиболее интенсивно будут проявляться при циклическом смерзании и оттаивания, уступы в четвертичных отложениях будут выколаживаться до угла естественного откоса. В связи с этим откосы в четвертичных отложениях лучше уменьшить до 35°.

На борту карьера в районе профилей 1, 1.1, 2 и 3, по причине превышения угла наклона основания над углом естественного откоса рекомендуется произвести уборку горных пород на верхних уступах.

Таблица 16 - Поверочные расчеты устойчивости уступов (или части уступов) карьера №1 месторождения, формируемых в четвертичных отложениях

Расчетный профиль	Высота	Угол откоса уступа,	Мощность (нормальная),м	Угол наклона основания,	Коэффициент запаса
-------------------	--------	---------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------

	уступа, м	град.		градус	устойчивости, n
1	-	40	8	40	-
1.1	-	37	15	37	-
2	-	48	2.5	48	-
3	-	36	2.5	36	-
4	10.8	35	7	10	1.48
5 верхний уступ	3.5	60	5.5	0	1.28
5 нижний уступ	2	35	5.5	0	2.7
5.1	7	48	8	0	1.23
6	7	35	7	0	1.66
7 верхний уступ	3.5	49	10.5	0	1.58
7 нижний уступ	7	35	10.5	7	1.66
8	1.79	67	4.6	23	1.58
8.1	14	35	5.8	23	1.39
9	14	35	5	27	1.39

#### 4. Инженерная защита

Согласно статистике Международной организации труда, на мировую горнодобывающую промышленность приходится до 5 % случаев смертельного травматизма, что в количественном выражении составляет около 15 тыс. случаев в год. Основной причиной высокой аварийности горной отрасли и, в частности, открытых горных работ является потеря устойчивости горных выработок в результате проявления различных опасных геологических процессов: оползней, камнепадов, обрушений, просадок, фильтрационных деформаций и т. д. [46]

Согласно СП 436.1325800.2018 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов» оползни, обвалы и осыпи, представляют собой смещение грунтов и горных пород на склоне под действием сил гравитации, а также дополнительных внешних природных и техногенных воздействий.

Проектирование инженерной защиты, согласно нормативным документам, предусматривает разработку комплекса мероприятий, обеспечивающих предотвращение оползневых и обвальных проявлений в зависимости от требований их функционального назначения и охраны природной среды или устранение отрицательных воздействий при невозможности или нецелесообразности предотвращения развития оползней и обвалов. [47]

Производство современных весьма крупных карьеров инновационного поколения реализуется за счёт использования специальных высокоэффективных и энергосберегающих

технологий и комплексных систем наблюдения. На практике проектируемые параметры уступов и бортов карьеров могут достигать предельных значений, что, в свою очередь, создаёт высокий уровень риска их вероятных катастрофических разрушений с соответствующими экономическими последствиями. Как правило, возведение и эксплуатация горнопромышленных комплексов ведутся в сложных природно-климатических и горно-геологических условиях, а также связаны с интенсивным освоением новых территорий. Следовательно, одним из наиболее эффективных решений проблем в сфере промышленной безопасности может служить внедрение технологий инженерной защиты.

Мировая конъюнктура рынка инженерной защиты представлена большим многообразием типовых и высокотехнологических решений (рисунок 23), которые находят широкое применение и в горнодобывающей промышленности, — это механические анкерные и свайные крепи, подпорные сооружения, инъекции, изолирующие покрытия, противокаменная или противолавинные системы и конструкции, защита от подтоплений и т. д. (рисунок 24).

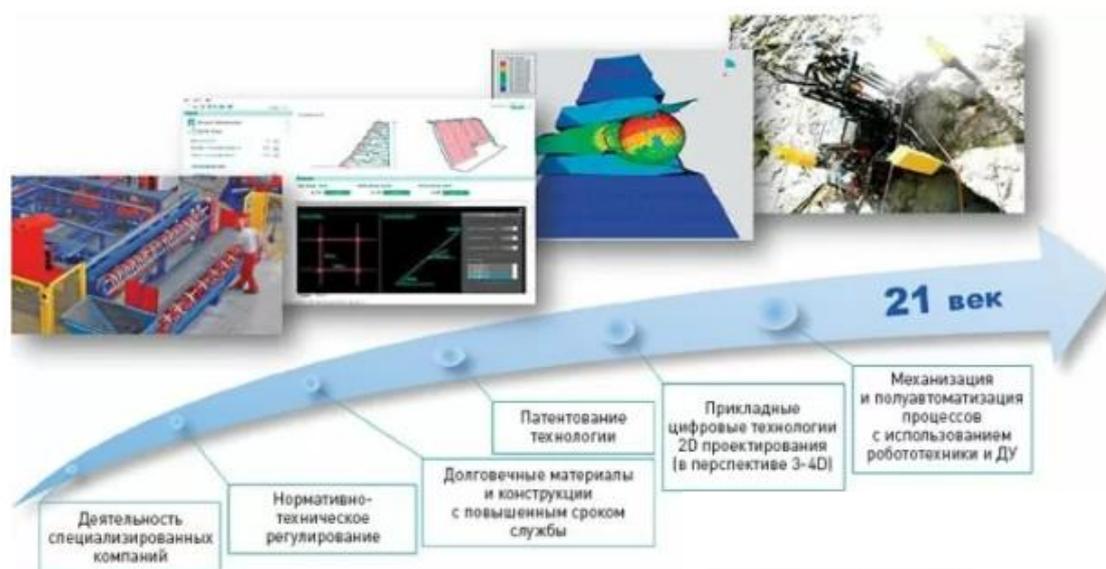


Рисунок 23 – Современная конъюнктура мирового рынка инженерной защиты

Целевыми задачами внедрения инженерной защиты на карьерах являются:

- безопасность персонала;
- предотвращение ущерба горной (в том числе роботизированной) технике и капитальным сооружениям;
- сохранность и устойчивость горных выработок;
- надежность дорожных коммуникаций, опор и фундаментов;
- безопасность и устойчивость капитальных сооружений (отвалов, гидротехнических сооружений и водоотводных каналов);

- повышение качества рекультивации нарушенных земель;
- комплексная многофункциональная и многоуровневая защита.

Инженерную защиту капитальных объектов наиболее разумно предусматривать заранее - на стадии разработки проектов их строительства, на основе детальных инженерных изысканий и прогнозной оценки развития опасных геологических процессов. При выполнении ответственных видов работ вблизи откосов с нахождением в зоне возможного падения скальных обломков людей или горной техники необходима организация их временной защиты.

Принципы и подходы к рациональному выбору типовых решений применительно к разрабатываемым карьерам должны основываться на дифференцированном выборе инженерно-технических средств с целью многофункционального обеспечения геодинамической безопасности различных горных объектов в выявленных потенциально опасных зонах в зависимости от инженерно-геологических и горнотехнических условий. Техничко-экономическое обоснование проектов включает в себя комплексную сравнительную оценку затрат по отношению к другим технологическим приемам с учетом величины достигнутых материальных эффектов или предотвращенного ущерба. Использование прикладных цифровых технологий, а также методов инструментальной диагностики или геомониторинга на этапе геотехнического сопровождения работ способствует принятию оптимальных, надежных и эффективных управленческих решений.



Рисунок 24 – Инновационные технологии инженерной защиты на карьерах

На основании собранных сведений об участке карьера выделены три основных группы риска (рисунок 25):

- 1) Возможные крупные вывалы блоков (Красный маркер );
- 2) Потенциальные оползания четвертичных отложений, вызванные гравитационными и техногенными процессами (Синий маркер);
- 3) Объемные осыпи мелкофракционных продуктов выветривания (Желтый маркер).

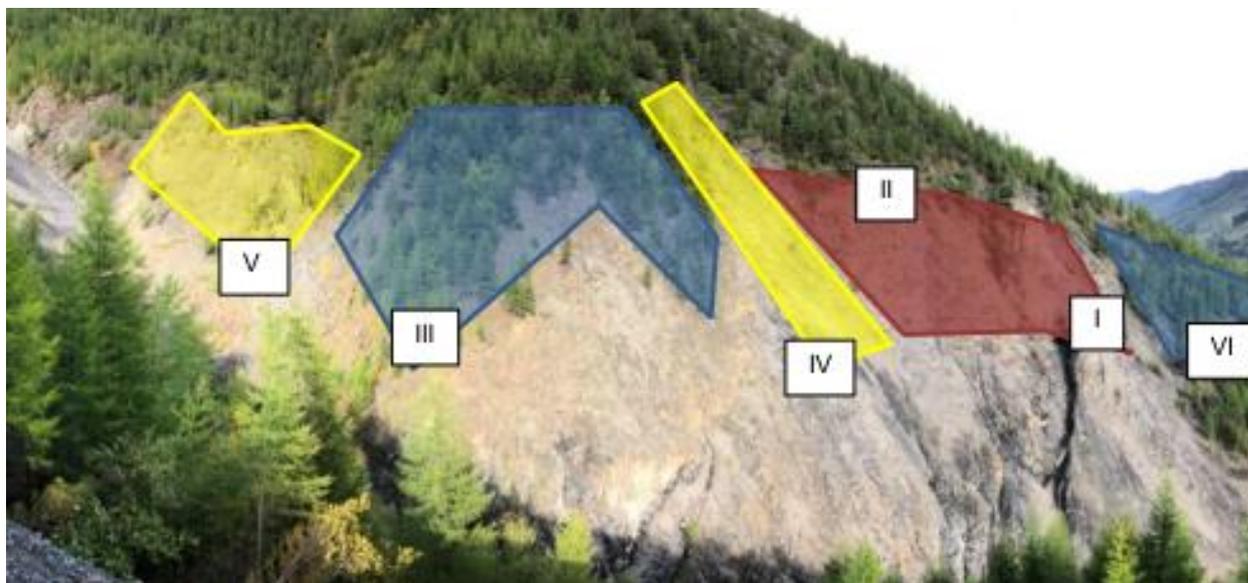


Рисунок 25 – Границы основных участков с потенциальными группами риска

Анализ группы 1. (Участки I, II). Обозначенные участки характеризуется наличием выходов скальных пород. Фрагменты отличаются крупностью (крупность блока на основании косвенных признаков определена как  $1 \text{ м}^3$ ) и представляют опасность для эксплуатации карьера (рисунок 26). Общий угол падения склона на данном участке позволяет делать выводы о высокой потенциальной энергии блоков.

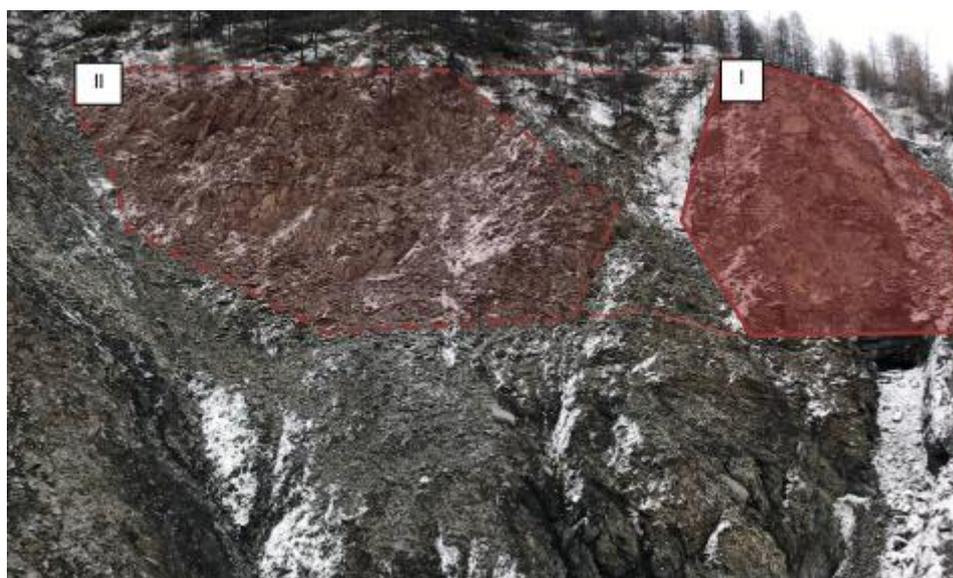


Рисунок 26 – Границы участка I и II

Анализ геометрических очертаний участков позволяет судить о высокой вероятности крупного единовременного вывала для участка I и невысокой вероятности такого события для участка II. В качестве мер снижения риска на участке I может быть рекомендована установка активной системы стабилизации скального склона (несмотря на его труднодоступность для ведения работ). Участок II не может считаться высокорисковым с точки зрения единовременного вывала, в данной связи эффективной мерой может быть применение как активной системы закрепления, так и камнеулавливающих конструкций ниже зоны зарождения камнепада. Площадь участка I предварительно (с учетом сложности рельефа) оценена в 1500 м<sup>2</sup>. Протяженность зоны барьера под участком II оценена в 100 пог.м.

Анализ группы 2. (Участок III,VI) Зона потенциального развития оползневых процессов характеризуется наличием многолетних растений и достаточно большой площадью. Опираясь на данные о границе карьера можно сделать вывод о том, что подрезка четвертичных отложений будет выполнена на нескольких участках и объем подрезки может быть оценен как значительный. В качестве основных рисков могут быть выделены: оползания четвертичных пород в зоне подрезки и выпадение отдельных блоков из области выше зоны подрезки. Эффективным способом снижения риска на указанных участках может быть комбинация мер, главной из которых должен стать регулярный мониторинг зон с применением радаров контроля устойчивости. Дополнительной является применение (продление линии) камнеулавливающего барьера и закрепление зон подрезки с помощью системы активного закрепления склонов для создания «подошвы» и стабилизации вышележащих толщ пород. Общая площадь закрепления оценивается в 3700 м<sup>2</sup>. Общая протяженность конструкций барьеров оценивается в 264 пог.м.

Анализ группа 3 (Участок IV,V) Осыпи мелких обломочных материалов представляют наименьший риск – переполнение верхней и последующих предохранительных берм. Для снижения риска при таких событиях, связанного с выпадением крупных блоков или объемом осыпей, могут применяться камнеулавливающие барьеры, аттенюаторы или драпировочные завесы. Однако сохраняется необходимость в периодической чистке и обслуживании данных конструкций.

Согласно анализу рисков можно предложить два варианта инженерной защиты. В связи с высокой стоимостью зарубежного продукта, проблемами с поставками и задачами импортозамещения были приведены варианты импортной инженерной защиты и отечественной.

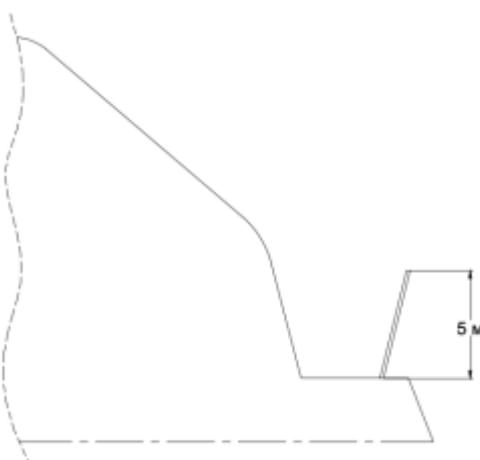
Первый вариант защиты швейцарской компании Geobrugg представляет собой комбинированную схему установки систем инженерной защиты, т.к. условия риска на разных участках разные.

Оптимальным решением для участка I представляется применение системы вида нагель+сеть – возможность преднатяжения сети к поверхности склона позволит минимизировать смещения пород в зоне закрепления и предотвратить объемный единовременный вывал. В качестве основного несущего элемента системы рассматривается высокопрочная стальная сеть на основе канатов спиральной свивки, обладающая достаточной прочностью и жесткостью для работы в соответствующих условиях (общий угол и геометрия склона, тип породы и ее свойства).

Для обеспечения глобальной устойчивости склона участки закрепляются нагельным поле.

Границы участка II и борта карьера рекомендуется перекрыть камнеулавливающим барьером. Конструкция барьера отличается малыми нагрузками на нагели, что позволит существенно сократить объем затрат на буровые работы.

Для участков III и VI может быть рекомендовано устройство камнеулавливающих барьеров общей протяженностью 264 пог. м.(эффективная высота 5 м.) и дополнительное крепление зон четвертичных отложений в области подрезки в случае развития деформаций с применением системы ТЕССО (адаптированной для открытых карьеров). Конструкции барьера рассчитаны на единовременные вывалы до 0,15 тыс. м<sup>3</sup>. Для увеличения эффективности применяемого барьера лучше его устанавливать на земляной вал высотой около 1 м. Барьеры устанавливаются на бровках защитных верхних (первых) берм, и сохраняют свою функциональность (максимальную энергетическую емкость) даже при их заполнении мелкими обломками на 1/3 эффективной высоты. [48]



### Рисунок 27 – Противокаменная падный барьер

Инженерная защита участков IV предполагает продление линий барьера участков II и III без изменения типа конструкций.

В качестве инженерной защиты участка V возможно применение аттенюатора на основании сети ТЕССО. Общий вид представлен на рисунке 28. Данная конструкция отличается высокой мобильностью (возможность переместить конструкцию на иной участок) и позволяет уменьшить риск падения обломков пород из зоны выше по склону. В случае фиксации объемных деформаций массива на участке аттенюатор может быть преобразован в систему активного закрепления.

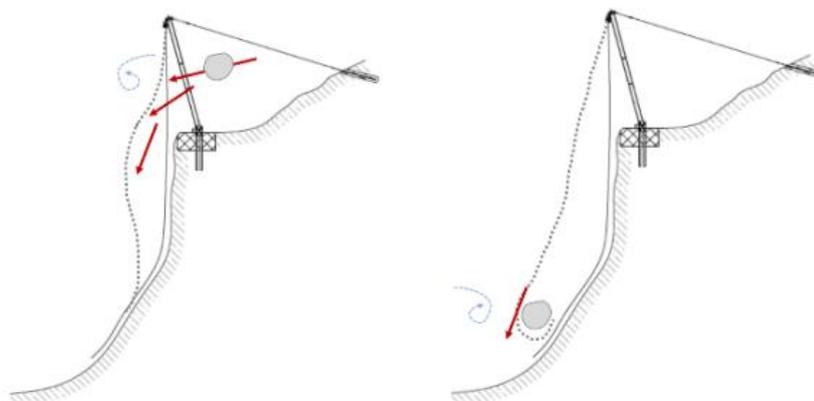


Рисунок 28 – Схема работы аттенюатора

Второй вариант инженерной защиты российского производителя компании Мас-saferrі представляет собой систему гибких камнеулавливающих систем с анкерным креплением и гибридными барьерами.

Для зон I и II возможно применение удерживающего сооружения, предусматриваемые для предотвращения сдвига, обрушения, обвалов и вывалов грунтов при невозможности или экономической нецелесообразности изменения рельефа склона. В контуре предполагаемого вывала грунтов, согласно анализу рисков описанных выше, предлагается закрепить анкерным креплением неустойчивый блок с применением высокопрочной сетки, как изображено на рисунке 28.

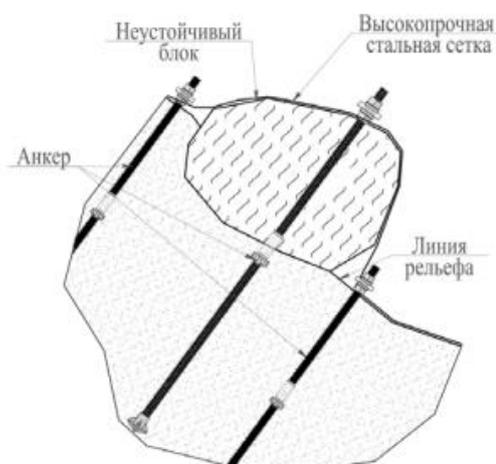


Рисунок 28 – Схема анкерного крепления неустойчивого блока с применением высокопрочной сетки.

По нижнему контуру участков I и II возможно применение гибких противокампнепадных барьеров. Основной задачей гибкого противокампнепадного барьера – остановить движение камней и обломков породы. В реальных условиях это довольно часто достигается при взаимодействии падающего обломка с грунтом во время торможения. Это значит, что защитное сооружение фактически воспринимает часть кинетической энергии обломка, тогда как другая часть поглощается грунтом основания. Схема такого барьера представлена на рисунке 29.

Для участков III и VI возможно применение также камнеулавливающих гибких барьеров, но с другим видом стальной сети. Т.к. при анализе участков было выявлено, что в контурах данных областей потенциально могут быть оползневые процессы и незначительные вывалы выше подрезки зоны четвертичных отложений, тут может быть предложена система гибких противокампнепадных барьеров с оттяжками для удержания опор барьера с мелкозернистой сетью, позволяющей сдержать обломки породы мелкого диаметра, а также с амортизирующими элементами, рисунок 30-31. Амортизирующий элемент – это виток на несущем канате или оттяжке опоры, скрепленный специальной скобой. Во время события с максимальной энергией удара скоба раскрывается, происходит удлинение натяжного каната, освобождая тем самым потенциальную энергию защитной системы. Это техническое решение позволяет конструкции воспринимать большие энергии воздействия от попадающих в нее обломков породы.

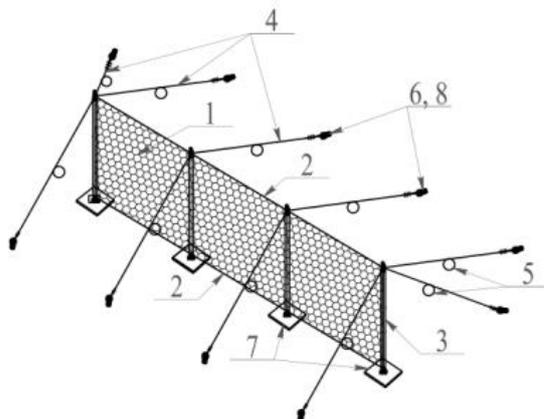


Рисунок 29 – Принципиальная схема гибкого противокампнепадного барьера: 1 – высокопрочная стальная сетка; 2 – несущие канаты; 3 – опоры; 4 – оттяжки; 5 –

амортизирующие элементы; 6 - тормозные элементы; 7 - опорные пластины; 8 - анкерное крепление [49]



Рисунок 30 - Высокочечная стальная сеть в сочетании с мелкозернистой сетью, позволяющей сдерживать обломки породы мелкого диаметра



Рисунок 31 - Амортизирующий элемент на натяжном канате

Инженерной защитой на участке V могут послужить сетчатые НЕА-панели. НЕА-панели – это довольно крепкий продукт в линейке систем драпировки склонов. Он обеспечивает исключительную прочность при низкой деформации. Панели сплетены из одного непрерывного стального троса с высоким пределом прочности, фиксированного в каждой точке пересечения «двойным узлом» запатентованного крепления «НЕА». В отличие от сетей из троса спиральной свивки, конструкция панелей НЕА обеспечивает исключительные характеристики напряжения или натяжения при низкой деформации. На рисунке 32 изображены элементы конструкции, на рисунке 33 укладка системы.

Также, для участков III, VI, V и VI возможно применение гибридных барьеров. Это вид барьеров, плавно переходящих в драпировку. Гибридные барьеры предназначены для гашения кинетической энергии падающего обломка. Такой вид барьеров сочетает в себе камнеулавливающие барьеры с возможностью снижения обслуживания сетчатой панели. Вместо традиционного крепления к нижней опоре, защитная сетка простирается вниз по склону. В данном случае, падающие камни и обломки не будут остановлены так же, как и с помощью камнеулавливающих барьеров, но после взаимодействия с барьером, обломок продолжит свое движение вниз по склону под драпировкой, постепенно замедляя свое движение, вплоть до полной остановки. Для оптимизации защиты может быть установлена

комбинация из защитных барьеров (в виде каскада), обеспечивая экономическую эффективность и безопасность инфраструктуры. Данный вид инженерной защиты представлен на рисунке 34-35.[50]

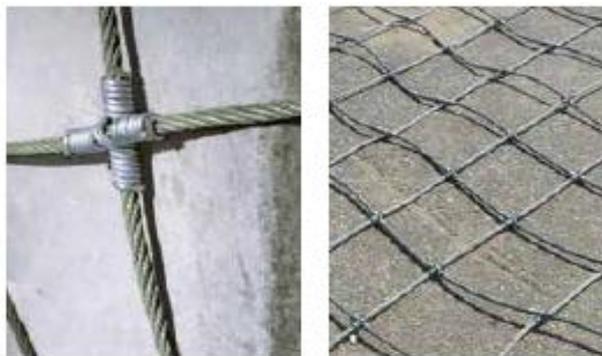


Рисунок 32 – Элементы HEA-панели.



Рисунок 33 – Укладка инженерной защиты HEA-панели



Рисунок 34 -Ряд гибридных барьеров. Установка одной линии гибридных барьеров с длинным шлейфом.



Рисунок 35 - Система гашения. Установка каскада гибридных барьеров с коротким шлейфом.

Рассмотрев разные варианты инженерной защиты было проведен анализ характеристик.

	Вариант 1 Компания Geobrugg	Вариант 2 Компания Massaferrì	
Участок I и II	Системы вида нагель+сеть и камнеулавливающий барьер.	Высокопрочная стальная сеть с анкерным креплением и применением гибких противокампнепадных барьеров	
Участок III и VI	Камнеулавливающие барьеры и дополнительное крепление с применением системы ТЕССО.	Кампеулавливающие гибкие барьеры с другим видом сетки и амортизирующими элементами.	Гибридный барьер
Участок IV и V	Аттенюаторы на основании сети ТЕССО и сама сеть.	Сетчатые НЕА-панели	Гибридный барьер

Характеристики	Вариант 1 Компания Geobrugg	Вариант 2 Компания Massaferrì
Характеристики сети		
Диаметр пряди	6,5 мм	8-10 мм
Разрывная нагрузка проволоки	220 кН/м	230 кН/м
Покрытие	95 % Zn / 5% Al	100% Zn
Характеристики камнеулавливающих барьеров		
Высота барьера	5 м	8 м
Максимальная нагрузка	1000 кДж	5000 кДж

Проанализировав данные характеристик можно сделать вывод, что инженерная защита компании Massaferrì может принимать больше нагрузки и производится из более прочного материала, т.к. состав из цинка 100% прочнее состава с добавлением алюминия.

Таким образом, можно сказать, что инженерная защита отечественного производства ничем не уступает зарубежным компаниям, что позволяет не

приостанавливать работы в горной области и обеспечивать эффективную безопасность производства в условиях отсутствия возможности использования зарубежных технологий.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработка месторождений полезных ископаемых относится к одной и наиболее опасных сфер деятельности человека. Одним из главных факторов аварий на горных предприятиях является потеря устойчивости горных выработок в результате проявления различных опасных геологических процессов. Средством повышения эффективности разработки месторождений является формирование конструктивных элементов карьера на его конечном контуре и внедрение инженерно-технических средств защиты откосов. В данной работе были проанализированы инженерно-геологические условия месторождения «Звезда» в Томпонском районе Якутии и приведены два варианта инженерной защиты. В связи со сложной экономической ситуацией в нашей стране касаясь доставки зарубежного оборудования, материалов и т.д. было сделано сравнение с отечественными материалами и производством.

Одно из наиболее часто упоминаемых проблем импортозамещения – это отсутствие для некоторых зарубежных решений полноценных отечественных аналогов. В данной

работе было установлено, что есть аналоги зарубежной инженерной защиты, полностью соответствующие техническим характеристикам, и даже лучше.

Был проведен анализ рисков участков склона месторождения и предложена для каждого инженерная защита. Наиболее вероятный неблагоприятный вариант развития опасных процессов был установлен на участке I т.к. возможен вывал крупных блоков. Для участка II такой вариант событий не так вероятен, но не исключен. На остальных 4-х участках возможны в основном оползневые процессы и осыпи.

В качестве инженерной защиты склонов были предложены продукты зарубежной компании Geobrugg - камнеулавливающие барьеры и дополнительное крепление с применением системы ТЕССО, аттенюаторы на основании сети ТЕССО, системы вида нагель+сеть. Также, как аналог был рассмотрен вариант немного иного для разных участков инженерного решения российской компании Massafegi. Инженерной защитой в этом случае может послужить высокопрочная стальная сеть с анкерным креплением и применением гибких противокампнепадных барьеров, кампеулавливающие гибкие барьеры с другим видом сетки и амортизирующими элементами и сетчатые НЕА-панели или гибридные барьеры. По техническим характеристикам инженерная защита отечественного производителя ничем не уступает зарубежной.

Таким образом был сделан вывод, что подходы к рациональному выбору типовых решений применительно к разрабатываем карьерам должен основываться на дифференцированном выборе инженерно-технических средств с целью обеспечения геодинамической безопасности и технико-экономических оснований, учитывая нынешние экономические в стране обстоятельства.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. СП 131.13330.2020, Строительная климатология, актуализированная редакция, СНиП 23-01-99\*, действующий – М.: Стандартинформ - 2022 г.
2. Прокопьев А.В., Козьмин Б.М., Смелов А.П., Алпатов В.В., Тимофеев В.Ф. Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия). – М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2001. – 517 с.
3. Магистерская диссертация Калинин Михаил Андреевич «Тектоническая эволюция западной части Южного Верхоянья», 2017 г., Санкт-Петербург.
4. Mineral resource and ore reserve estimate. CSA Global Report № R376.2018
5. Отчет о результатах доразведки золоторудного месторождения «Звезда» с подсчетом запасов по состоянию на 01.03.2009 г. Том 1. Якутск-Красноярск: ОАО Южно-Верхоянская горнодобывающая компания. 2009.

6. Исследования теплового режима месторождения «Звезда», выдача исходных данных для проектирования. Отчет о научно-исследовательской работе. СО институт мерзлотоведения им. П.И Мельникова, Якутск, 2007.
6. СП 14.13330.2018, Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*, действующий – М.: Стандартинформ, 2018 г.
7. В.Б.Спектор, Я.И.Торговкин, А.А.Шестакова. Современная инженерно-геологическая карта Российской Федерации / Наука и техника в Якутии №2 (19) 2010 г, стр.19-23.
8. ГОСТ 25100-2020.Грунты.Классификация.Действующий – М.: Стандартинформ, 2020 г.
- 9.Н.А.Цытович. Механика мерзлых грунтов. Учебное пособие. М.: Высш.шк., 1973. – 448 с.
10. Брушков А.В. Геокриология часть 1. Геолфак МГУ, 2020 г.
11. СП 115.13330.2016 Геофизика опасных природных воздействий. Действующий – М.: Стандартинформ, 2018 г.
12. Кондратьева К.А., Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Романовский Н.Н., Максимова Л.Н., Чижов А.Б. Методика мерзлотной съёмки. М.: Изд-во Московского университета, 1979 г.
13. Т. Смирнова, Н. Крапильская, Т. Алешина. Инженерные изыскания в строительстве инженерных сооружений. Изд. МИСИ-МГСУ Москва, 2020 г.
14. Пекарская, Н.К. Сопротивление сдвигу многолетнемерзлых грунтов различной текстуры и льдистости [Текст] / Н.К. Пекарская // Исследования по физике и механике мерзлых грунтов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – №4. – С. 116-185.
15. Алькова Е.Л., Панишев С.В., Козлов Д.С., Максимов М.С. Экспериментальные исследования прочности на срез мерзлых горных пород на образцах большого размера/ Успехи современного естествознания. Пенза: Издательский дом «Академия Естествознания». – 2016. - №8. – стр. 145-149
16. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. – М.: Стройиздат, 2000. – 464 с.
17. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб: ВНИМИ. 1998. – 208 с.
18. Методическое пособие по определению углов откосов уступов и углов наклона бортов карьеров, сложенных многолетнемерзлыми породами. Л: ВНИМИ. 1972.– 102 с.
19. Москалев А.Н.и др. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии.- Киве: Наукова думка. – 1987. – 248 с.

20. Розенбаум, М. А. Геомеханические основы управления горным давлением при разработке угольных пластов в зоне многолетней мерзлоты Текст.: автореферат дисс. доктора технических наук : 05.15.11, 05.15.02 / М.А. Розенбаум. Гос. НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела. - Санкт-Петербург, 1996.
21. Курилко А.С. Влияние циклов замораживания - оттаивания на массообменные свойства дисперсных горных пород: автореферат... дис. кандидата технических наук: : 05.15.11 / Курилко Александр Сардокович; [Место защиты: Ин-т горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН].- Якутск, 2000.
22. Житинская О.Л. Влияние компонентов инженерно-геологических условий на устойчивость бортов железорудных карьеров при длительной их разработке. Автореферат. Москва, 2018 г.
23. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Издательство стандартов, 1988 г.
24. Проектирование карьеров, Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В., Коваленко В.С., 2009
25. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л. ВНИМИ, 1972. 165 с.
26. Вокин, В. Н. Открытая геотехнология : практикум / В. Н. Вокин, Е. В. Кирюшина, М. Ю. Кадеров. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. – 132 с. ISBN 978-5-7638-3852-7
27. Ольховатенко, В.Е. Методы изучения трещиноватости горных пород [Текст] : учебно-методическое пособие для самостоятельной работы по курсу « Инженерная геология» / В.Е. Ольховатенко, Г.И. Трофимова, Т.В. Ожогина. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 80 с. ISBN 978-5-93057-676-4
28. Рекомендации по открытой отработке карьера вблизи подземных горных выработок. Пояснительная Записка. СПб: «Полиметалл Инжиниринг». 2018 г.
29. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб: ВНИМИ. 1998. – 208 с.
30. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-781\* действующий – М.: Стандартинформ, 2018 г.
31. Руководство по проектированию бортов карьеров, под редакцией Джон Рид, Питер Стейси. Пер. с англ. – Екатеринбург. Правовед. – 2015.–544 с.
32. Панюков П.Н. Инженерная геология. М., Недра, 1978. – 296 с.
33. Иванов И.П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1990. – 302 с.

34. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть I. Производственные процессы: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1985. – 509 с.
35. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. М., Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – 438 с
36. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ: Учебник для вузов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 473 с.
37. Галустьян Э.Л. Геомеханика открытых горных работ: Справочное пособие. – М.: Недра, 1992 – 272 с.
38. Попов В.Н., Шпаков П.С., Юнаков Ю.Л. Управление устойчивостью карьерных откосов: Учебник для вузов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 683 с.
39. Анистратов Ю.И. Технологические процессы открытых горных работ. – М.: ООО «НТЦ «Горное дело», 2007 – 448 с., илл. ISBN 2-247-03477-5
40. Janbu, N., 1954. “Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis”, European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm, Sweden.
41. Janbu, N., 1973. “Slope Stability Computation,” Embankment-Darn Engineering, Casagrande Volume, edited by R. C. Hirschfeld and S. J. Poulos, John Wiley & Sons, New York.
42. Spencer, E., 1967. “A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces” Geotechnique, Vol. 17, No. 1.
43. Abramson Lee, 2001. Slope stability and stabilization [et. Al.]. – 2nd ed New York.
44. Попов И.И., Окатов Р.П. Борьба с оползнями на карьерах. М. Недра. 1980. 239 с.
45. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л. ВНИМИ, 1972. 165 с.
46. Мелихов М.В., Проблемы и перспективы рынка инженерной защиты в горной промышленности при разработке карьеров Горный институт КНЦ РАН. Глобус.Геология и бизнес. <https://www.vnedra.ru/>
47. СП 436.1325800.2018 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов» Действующий – М.: Стандартинформ, 2019 г.
48. Geobrugg AG. <https://www.geobrugg.com/ru/>
49. Мариничев М.Б., Макушева А.В., Защита территорий от камнепадных процессов : учеб. пособие / М. Б. Мариничев, А. В. Макушева. – Краснодар: Изд-во ИЦ МНИФ «Общественная наука», 2017. – 97 с
50. Maccaferri. <https://www.maccaferri.com/ru/>



## Приложение А – Карта распространения многолетнемерзлых грунтов



**Приложение Б - Физико-механические свойства четвертичных отложений на месторождении «Звезда»**

Таблица 1 – Физико-механические свойства мерзлых четвертичных отложений

Стратиграфический индекс	№ ИГЭ	Статистические показатели	Влажность суммарная (природная)	Плотность грунта природного сложения	Рекомендуемые значения													
					Плотность грунта	Коэффициент сжимаемости мерзлого грунта	Компрессионный модуль деформации мерзлого грунт	Коэффициент сжимаемости мерзлого грунта при оттаивании	Коэффициент оттаивания	Эквивалентное сцепление	Сопротивление срезу по поверхности смерзания с материалом фундамента							
												ρ	mf	Ек	м <sub>об</sub>	A <sub>об</sub>	C <sub>eq</sub>	R <sub>ср</sub>
												г/см <sup>3</sup>	МПа <sup>-1</sup>	МПа	МПа <sup>-1</sup>	д.е.	МПа	МПа
tQ <sub>IV</sub>	1	X <sub>n</sub>	0,153	-	Расчетное сопротивление R <sub>0</sub> =2500кПа*													
		X <sub>0,85</sub>	-	-														
		X <sub>0,90</sub>	-	-														
		X <sub>0,95</sub>	-	-														
Q <sub>пнV</sub>	0.1	X <sub>n</sub>	3,139	1,06	-	-	-	-	-	-	-							
		X <sub>0,85</sub>	-	1,02	-	-	-	-	-	-	-							
		X <sub>0,90</sub>	-	1,01	-	-	-	-	-	-	-							
		X <sub>0,95</sub>	-	0,99	-	-	-	-	-	-	-							
eQ <sub>пнV</sub>	1.1	X <sub>n</sub>	0,206	2,00	2,00	0,041	20,2	0,096	0,058	0,124	0,140							
		X <sub>0,85</sub>	-	1,99	1,99	0,046	18,4	0,099	0,063	0,118	0,125							
		X <sub>0,90</sub>	-	1,98	1,98	0,048	17,9	0,100	0,065	0,116	0,121							
		X <sub>0,95</sub>	-	1,98	1,98	0,051	17,1	0,102	0,068	0,113	0,114							
	1.2	X <sub>n</sub>	0,230	1,98	1,98	0,038	23,1	0,078	0,056	0,151	0,138							
		X <sub>0,85</sub>	-	1,96	1,96	0,041	21,9	0,083	0,060	0,147	0,121							
		X <sub>0,90</sub>	-	1,96	1,96	0,043	21,6	0,085	0,061	0,146	0,116							
		X <sub>0,95</sub>	-	1,95	1,95	0,045	21,0	0,087	0,063	0,144	0,109							
	1.3	X <sub>n</sub>	0,274	1,90	1,90	0,047	17,5	0,092	0,077	0,133	0,138							
		X <sub>0,85</sub>	-	1,88	1,88	0,052	15,6	0,105	0,084	0,125	0,130							
		X <sub>0,90</sub>	-	1,88	1,88	0,054	15,1	0,110	0,085	0,123	0,128							
		X <sub>0,95</sub>	-	1,87	1,87	0,057	14,3	0,118	0,089	0,119	0,124							
aQ <sub>пнV</sub>	1.4	X <sub>n</sub>	0,163	2,10	2,10	Расчетное сопротивление R <sub>0</sub> =2500кПа*												
		X <sub>0,85</sub>																
		X <sub>0,90</sub>																
		X <sub>0,95</sub>																
eQ <sub>пнV</sub>	2.1	X <sub>n</sub>	0,141	2,10**	2,10	Расчетное сопротивление R <sub>0</sub> =2500кПа*												
		X <sub>0,85</sub>	-	-	-													
		X <sub>0,90</sub>	-	-	-													
		X <sub>0,95</sub>	-	-	-													
	2.2	X <sub>n</sub>	0,176	2,09**	2,09	Расчетное сопротивление R <sub>0</sub> =2500кПа*												
		X <sub>0,85</sub>	-	-	-													
		X <sub>0,90</sub>	-	-	-													
		X <sub>0,95</sub>	-	-	-													

\*-расчетные сопротивления крупнообломочных грунтов приведены для свайных фундаментов согласно таблице В.1 СП 25.13330.2012

\*\*плотности крупнообломочных грунтов определены методом шурфа-лунки

Таблица 2 - Физико-механические свойства талых пород четвертичных отложений

Стратиграфический индекс	№ ИГЭ	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2011	Статистические показатели	Плотность грунта	Удельное сцепление	Угол внутреннего трения	Модуль деформации с учетом $\tau_{pk}$ в интервале давления 0,1-0,2 МПа
				$\rho$	$C$	$\varphi$	$E_{mk}$
				г/см <sup>3</sup>	МПа	град.	МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
edQ <sub>III-IV</sub>	6.1	Суглинок тугопластичный, легкий, пылеватый, прослоями мягкопластичный, с дресвой и щебнем до 25%	$X_n$	1,99	0,018	19	12,8
			$X_{0,85}$	1,95	0,017	17	11,6
			$X_{0,90}$	1,95	0,017	16	11,2
			$X_{0,95}$	1,93	0,017	15	10,7
edQ <sub>III-IV</sub>	6.2	Супесь пластичная пылеватая с включением дресвы и щебня до 25%	$X_n$	2,02	0,018	19	14,9
			$X_{0,85}$	1,99	0,017	18	14,2
			$X_{0,90}$	1,99	0,016	18	14,0
			$X_{0,95}$	1,98	0,015	18	13,6
aQ <sub>III-IV</sub>	1.4г	Галечниковый грунт с суглинистым заполнителем до 30%, водонасыщенный	$X_n$	2,10	0,009**	42**	-
			$X_{0,85}$				
			$X_{0,90}$				
			$X_{0,95}$				
eQ <sub>IV</sub>	7.1	Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем до 30%, маловлажный	$X_n$	2,10*	0,009*	42*	-
			$X_{0,85}$	-	-	-	-
			$X_{0,90}$	-	-	-	-
			$X_{0,95}$	-	-	-	-
eQ <sub>IV</sub>	7.2	Дресвяный грунт с суглинистым заполнителем до 30%, маловлажный	$X_n$	2,09*	0,008*	40*	-
			$X_{0,85}$	-	-	-	-
			$X_{0,90}$	-	-	-	-
			$X_{0,95}$	-	-	-	-

\* плотность, сцепление и угол внутреннего трения крупнообломочных грунтов приведены по испытаниям на срез целиков

**Приложение В - Результаты испытаний физико-механических свойств пород в образцах месторождения «Звезда»**

Основные показатели физико-механических свойств	Типы горных пород	Ед. изм.	Алевролит			Алевролитовый сланец			Песчаник		
			от	до	средн.	от	до	средн.	от	до	средн.
Плотность		г/см <sup>3</sup>	2,69	2,82	2,74	2,73	2,78	2,74	2,60	2,76	2,65
Общая пористость		%	0,3	5,0	1,6	0,4	4,7	1,7	1,5	3,6	2,0
Влажность		%	0,25	4,4	1,5	0,4	5,0	1,5	1,2	3,1	1,8
Влагосодержание		%	0,32	1,87	0,72	0,54	1,85	0,80	0,73	2,8	1,3
Коэффициент теплопроводности		ккал/м град.	1,8	-	-	1,7	-	-	1,5	1,8	-
Предел прочности на сжатие: - при мгновенном сжатии - при медленном сжатии		кг/см <sup>2</sup> кг/см <sup>2</sup>	120 50	1545 600	- -	115 55	1650 700	- -	450 -	2275 -	- -
Предел прочности на растяжение: - при мгновенной нагрузке - при длительной нагрузке		кг/см <sup>2</sup> кг/см <sup>2</sup>	20 10	275 135	- -	18 9	325 150	- -	50 -	300 -	- -
Коэффициент крепости по М.М. Протодяконову			0,9	11,0	-	0,9	12,0	-	-	-	-
Скорость продольной волны		м/сек	2480	5870	3930	3380	5910	4450	-	-	-
Модуль упругости на сжатие: - при мгновенной нагрузке - при длительной нагрузке		кг/см <sup>2</sup> кг/см <sup>2</sup>	30 10 <sup>3</sup> 58 10 <sup>3</sup>	180 10 <sup>3</sup> 28 10 <sup>3</sup>	85 10 <sup>3</sup> 10 10 <sup>3</sup>	37 10 <sup>3</sup> 9 10 <sup>3</sup>	190 10 <sup>3</sup> 30 10 <sup>3</sup>	90 10 <sup>3</sup> 22 10 <sup>3</sup>	- -	- -	- -
Сцепление: - при мгновенной нагрузке - при длительной нагрузке		кг/см <sup>2</sup> кг/см <sup>2</sup>	25 15	230 115	- -	30 13	250 130	- -	- -	- -	- -
Угол естественного откоса		град.	52	54	53	52,3	54	53	-	-	-

№ п/п	Литология	Без промораживания		С промораживанием			
		Воздушно-сухое состояние		Воздушно-сухое состояние		Водонасыщенное состояние	
		$\sigma_{p1}$ кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{сж1}$ , кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{p2}$ , кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{сж2}$ кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{p3}$ кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{сж3}$ , кг/см <sup>2</sup>
1	Песчаник кварцеванный	31,65	791,00	99,71	2472,72	–	–
2	Песчаник кварцеванный с сульфидами	28,99	629,00	–	–	–	–
3	Алевропесчаник	50,04	804,00	31,81	636,13		
4	Алевропесчаник кварцеванный	40,49	560,00	–	–	–	–
5	Алевропесчаник смятый	8,43	154,00	–	–	–	–
6	Алевропесчаник с сульфидами	26,78	482,00	–	–	36,53	730,647
7	Алевропесчаник кварцеванный с сульфидами	39,40	985,00	30,71	355,03	–	–
8	Алевропесчаник смятый	15,41	331,00	–	–	–	–
9	Алевропесчаник сульфидизированный	26,80	597,00	43,04	1298,21		
10	Алевролитовый сланец	16,72	354,00	–	–	–	–
11	Алевролит кварцеванный	31,71	576,00	–	–	18,24	364,81
12	Алевролит сульфидизированный	41,81	1045,00	30,41	608,21	–	–
13	Алевролит смятый	7,32	147,00	17,39	428,50	–	–
14	Алевролит	24,93	415,00	39,66	793,33	–	–
15	Кварц с включениями алевролита	11,44	365,00	8,71	134,22	0,15	3,03
16	Кварц	62,04	744,00	–	–	–	–
17	Алевропесчаник смятый кварцеванный, сульфидизированный	41,03	636,00	35,39	644,45	38	763,48

№ пробы	Наименование породы (руда)	Объемная масса, $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Предел прочности при одноосном сжатии, $\sigma_{сж}$ , МПа	Предел прочности при одноосном растяжении, $\sigma_p$ , МПа	Сцепление, С, МПа	Угол внутреннего трения, $\rho$ , град.
1	Жильный кварц	2,70	186,6	12,3	37,2*	65*
4	Песчано-глинистые сланцы	2,69	101,8	20,7	29,7**	56**

\* При пересчете в соответствии с ГОСТом 21153.8-88, С=31,2 МПа,  $\rho$ =27,1 град.

\*\* При пересчете в соответствии с ГОСТом 21153.8-88, С=31,2 МПа,  $\rho$ =27,1 град.

**Приложение Г - Результаты лабораторных испытаний грунтов месторождения «Звезда»**

Таблица 1 - Результаты испытаний физико-механических свойств горных пород, выполненных в Санкт-Петербургском горном университете

Литология	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости, 10 <sup>4</sup> МПа	Модуль деформации, 10 <sup>4</sup> МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Предел прочности при одноосном растяжении, МПа	Сцепление С, МПа*	Угол внутреннего трения φ, град.*
Алевролит	2,640-2,733 / 2,710	2,40-6,78 / 4,29	1,80-6,13 / 3,74	0,13-0,26 / 0,19	51,2-161,7 / 102,6	2,7-19,8 / 15,1	28,9	33,0
Алевролит с прослоями песчаника	2,641-2,747 / 2,706	1,33-7,33 / 4,49	0,93-6,9 / 3,98	0,11-0,26 / 0,19	18,7-223,75 / 100,3	5,0-25,2 / 16,3	28,7	31,0
Алевропесчаник	2,667-2,724 / 2,700	2,85-6,06 / 5,00	2,29-5,93 / 4,34	0,12-0,22 / 0,18	49,1-137,1 / 97,7	7,5-28,2 / 16,6	28,3	30,7
Песчанистый алевролит	2,681-2,742 / 2,724	2,42-5,11 / 3,73	2,12-4,69 / 3,13	0,17-0,23 / 0,21	50,0-82,4 / 66,6	8,3-18,0 / 13,3	20,3	27,6
Песчаник	2,634-2,895 / 2,750	3,15-4,98 / 4,14	2,00-4,32 / 3,39	0,11-0,21 / 0,17	56,7-229,6 / 139,4	8,8-21,8 / 16,0	38,4	36,0
Кварцевый жильный агрегат	2,599-2,647 / 2,623	3,61-6,19 / 4,90	3,24-5,04 / 4,14	0,18-0,42 / 0,30	57,2-59,0 / 58,1	18,0-23,2 / 20,6	22,4	14,6

Таблица 2 - Результаты определений показателей сопротивлению сдвигу методом среза со сжатием и при объемном сжатии, выполненных в Санкт-Петербургском горном университете

Литология	Скважины GT №№ 06-11		Скважины GT №№ 01-05	
	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , град.	Сцепление $C$ , МПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , град.
Испытания методом объемного сжатия				
Алевролит	–	–	19,9	50,3
Алевролит с прослоями песчаника	31,0	30,1	12,0	57,2
Алевропесчаник	19,1	39,3	17,2	37,7
Песчаник	29,1	43,1	–	–
Песчанистый алевролит	–	–	11,9	59,0
Кварцевый жильный агрегат	7,7	29,3	–	–
Испытания методом среза со сжатием (косой срез)				
Алевролит	7,3	53,8	28,5	39,2
Алевролит с прослоями песчаника	16,8	45,7	25,0	38,4
Алевропесчаник	3,8	55,1	26,5	41,6
Песчаник	15,6	41,2	–	–
Песчанистый алевролит	–	–	–	–
Кварцевый жильный агрегат	31,9	29,4	–	–

Таблица 3 – Результаты определений показателей сопротивлению сдвигу по распилу и естественной трещине, выполненных в Санкт-Петербургском горном университете

Литология	Сдвиг по распилу		Сдвиг по естественной трещине	
	Сцепление $C'$ , МПа	Угол внутреннего трения $\phi'$ , град.	Сцепление $C'$ , МПа	Угол внутреннего трения $\phi'$ , град.
Алевролит	0,06	26,0	0,27	32,5
Алевролит с прослоями песчаника	0,14	28,1	0,36	27,1
Алевропесчаник	0,09	29,8	0,31	29,1
Песчаник	0,08	25,9	0,65	21,8
Песчанистый алевролит	0,09	28,1	0,23	26,7
Кварцевый жильный агрегат	0,11	29,2	0,49	30,9
Среднее по частным значениям	0,10	27,9	0,33	28,1

**Приложение Д - Результаты поверочных расчетов устойчивости бортов карьера №1**

**Месторождения «Звезда»**

Расчетный профиль	Расчетная поверхность скольжения	Высота участка Н, м	Угол наклона откоса $\alpha$ , град.	Коэффициент запаса устойчивости, n	
				Без учета сейсмического воздействия	С учетом сейсмического воздействия
1-1	ПС-1	330	50	1,36	1,29
	ПС-2	191	50	1,56	1,49
	ПС-3	139	55	2,24	2,17
1.1-1.1	ПС-1	458	49	1,31	1,25
	ПС-2	318	49	1,42	1,35
	ПС-3	133	75	2,10	2,03
	ПС-4	140	56	2,20	2,13
2-2	ПС-1	398	49	1,38	1,31
	ПС-2	121	57	2,38	2,31
	ПС-3	140	56	2,20	2,13
3-3	ПС-1	397	47	1,43	1,36
	ПС-2	388	47	1,44	1,37
	ПС-3	157	57	2,02	1,95
	ПС-4	149	56	2,12	2,05
4-4	ПС-1	225	47	1,81	1,74
	ПС-2	193	54	1,89	1,82
	ПС-3	145	56	2,38	2,31
5-5	ПС-1	90	59	2,72	2,65
5.1-5.1	ПС-1	90	61	2,48	2,41
6-6	ПС-1	209	48	1,97	1,90
	ПС-2	170	53	1,96	1,89
	ПС-3	119	58	2,84	2,77
7-7	ПС-1	299	53	1,45	1,38
	ПС-2	299	53	1,57	1,50
	ПС-3	125	53	2,38	2,31
	ПС-4	174	57	1,91	1,87
8-8	ПС-1	438	50	1,38	1,31
	ПС-2	418	50	1,31	1,25
	ПС-3	193	56	1,71	1,64
	ПС-4	179	57	1,89	1,82
8.1-8.1	ПС-1	440	51	1,32	1,26
	ПС-2	97	56	2,77	2,70
	ПС-3	150	58	2,04	1,97
	ПС-4	140	57	2,16	2,09
9-9	ПС-1	349	48	1,52	1,45
	ПС-2	271	53	1,62	1,55
	ПС-3	120	57	2,40	2,33
	ПС-4	91	60	2,73	2,66
	ПС-5	60	62	2,67	2,60

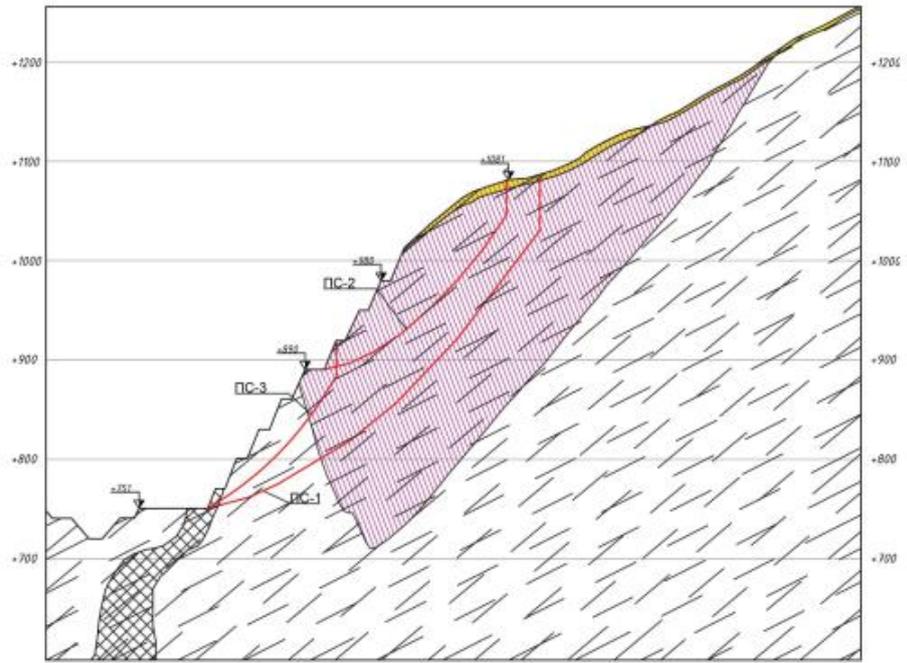


Рисунок 1 – Расчет устойчивости борта карьера по профилю 1-1

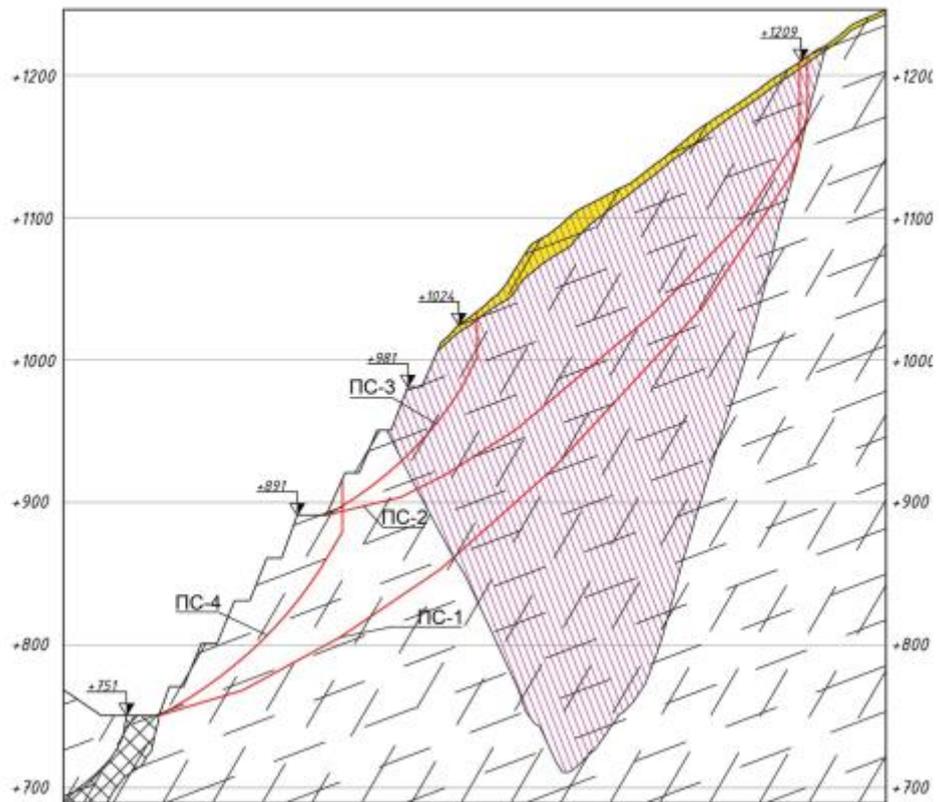


Рисунок 2 - Расчет устойчивости борта карьера по профилю 1.1-1.1

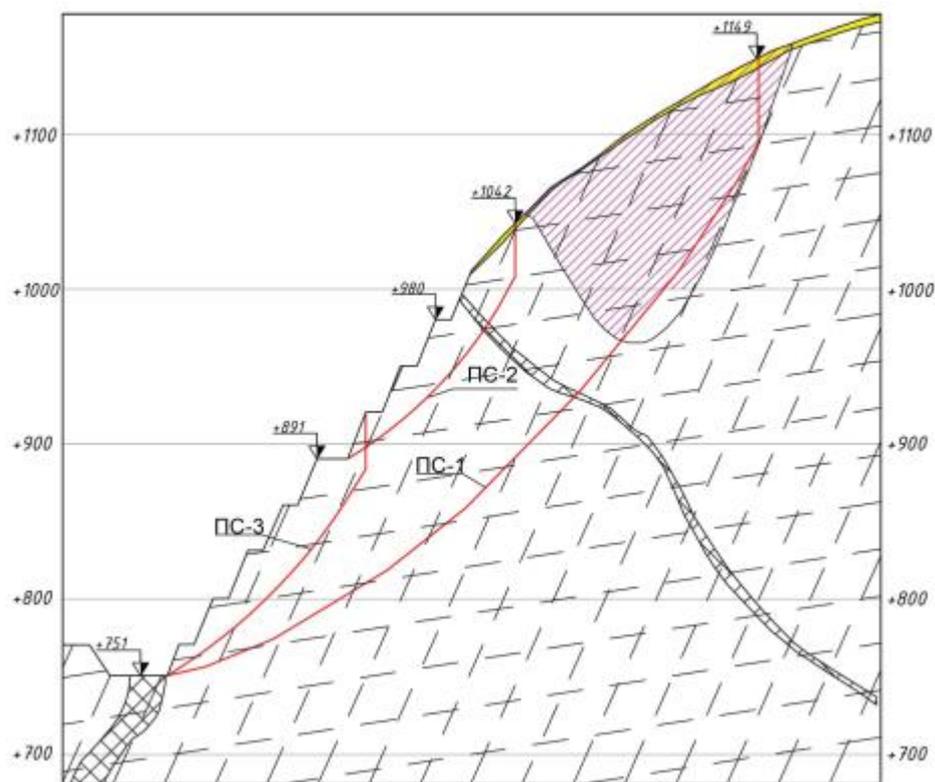


Рисунок 3 - Расчет устойчивости борта карьера по профилю 2-2

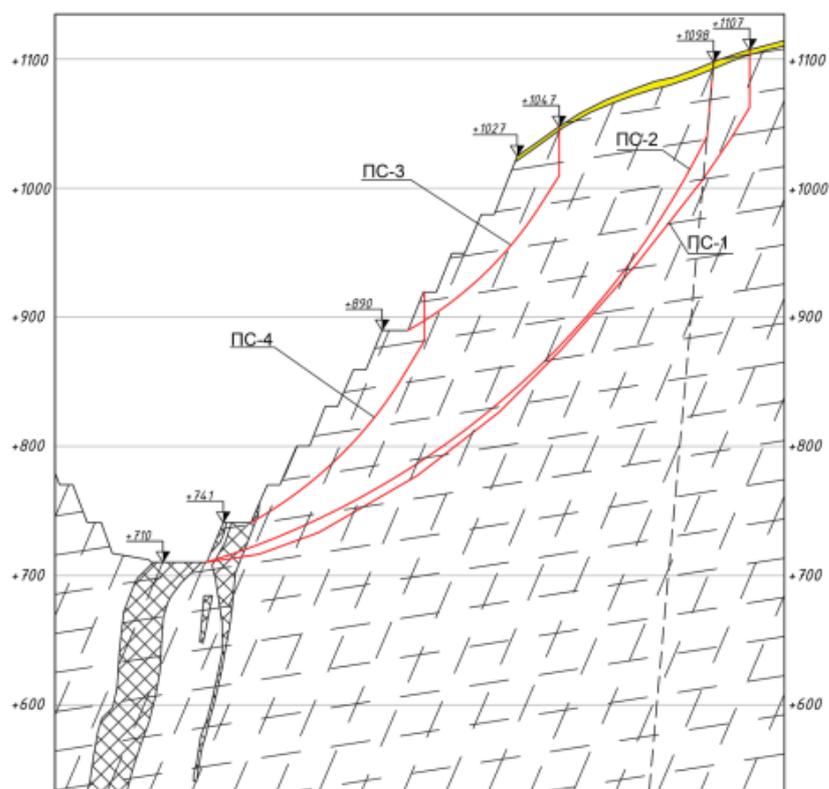


Рисунок 4 - Расчет устойчивости борта карьера по профилю 3-3

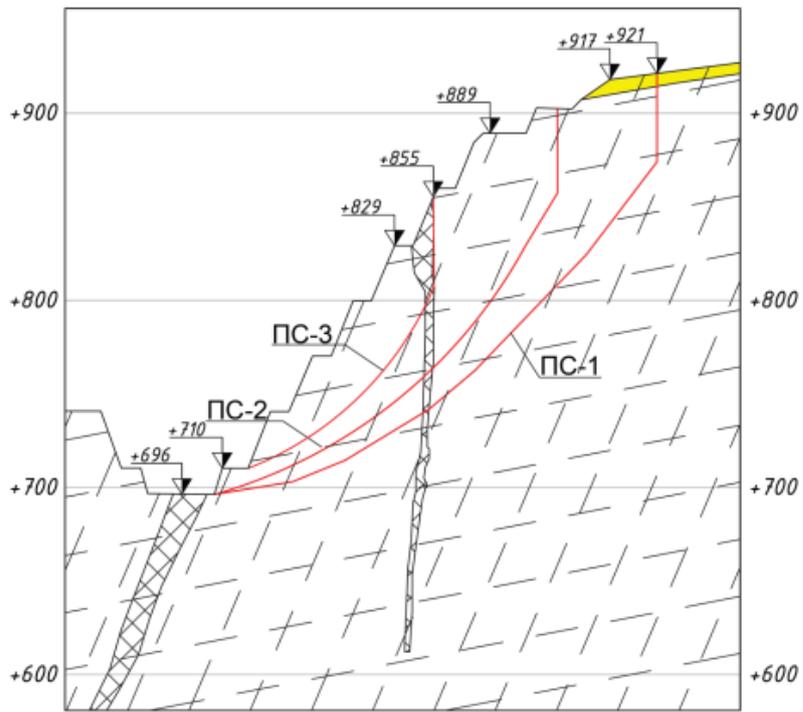


Рисунок 5 – Расчёт устойчивости борта карьера по профилю 4-4

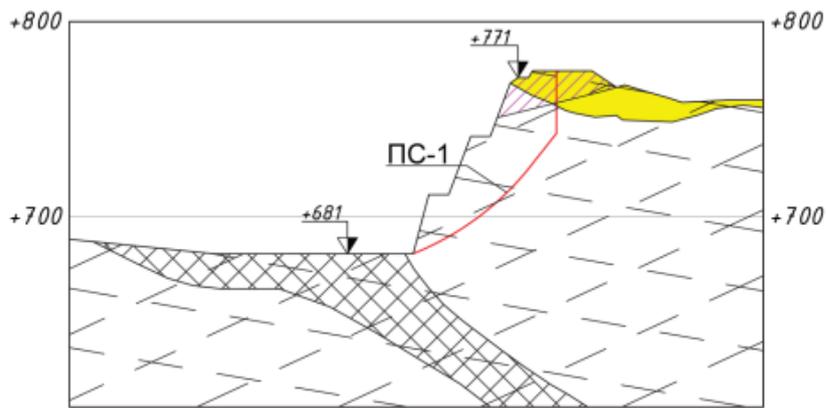


Рисунок 6 – Расчёт устойчивости борта карьера по профилю 5-5

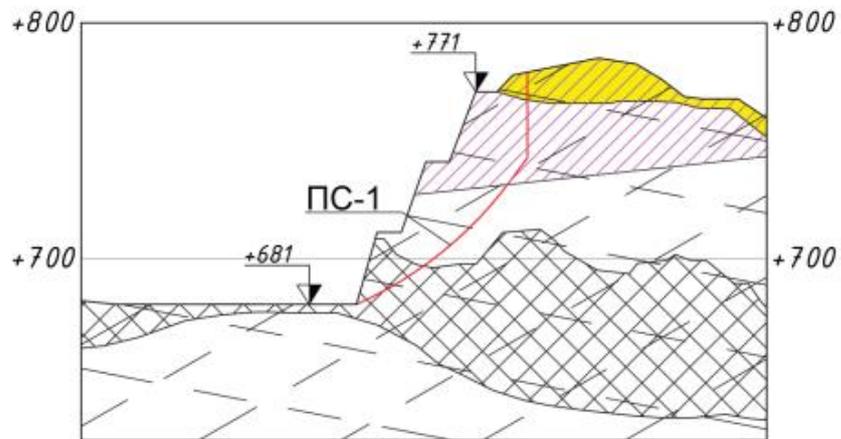


Рисунок 7 - Расчёт устойчивости борта карьера по профилю 5.1