

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

На правах рукописи

Райс Виктор Владимирович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ С
ЗАМОРАЖИВАЕМОЙ ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО
ПРОСТРАНСТВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ЦЕННЫХ РУД ЖИЛЬНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ**

**Специальность 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и
строительная)**

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических
наук, профессор
Ковалев Олег Владимирович

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В ЗОНЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР | 12 |
| 1.1 Состояние сырьевой базы и перспективы эксплуатации месторождений криолитозоны с учетом природно-климатических и социально-экономических факторов | 12 |
| 1.2 Анализ особенностей эксплуатации месторождений полезных ископаемых на территории криолитозоны | 22 |
| 1.3 Анализ и обобщение отечественного опыта разработки месторождений криолитозоны с использованием замораживаемой закладки..... | 24 |
| 1.3.1 Опыт разработки угольных месторождений с использованием замораживаемой закладки | 29 |
| 1.3.2 Опыт разработки россыпных месторождений с использованием замораживаемой закладки | 34 |
| 1.3.3 Опыт разработки рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки | 40 |
| 1.4 Анализ и обобщение зарубежного опыта разработки месторождений криолитозоны с использованием замораживаемой закладки..... | 48 |
| 1.5 Анализ технологий разработки месторождений ценных руд и разработка направлений совершенствования технологических схем выемки жил малой и средней мощности..... | 52 |
| 1.6 Выводы по главе 1..... | 60 |
| ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕННЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЬДА ИЛИ ЛЬДОПОРОДЫ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗАКЛАДКИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА | 65 |

| | |
|---|------------|
| 2.1 Особенности эксплуатации горных выработок в условиях криолитозоны | 65 |
| 2.2 Анализ параметров технологических схем отработки ценных руд жильных месторождений малой и средней мощности..... | 70 |
| 2.3 Обоснование параметров технологий отработки ценных руд жильных месторождений малой и средней мощности в условиях криолитозоны | 76 |
| 2.4 Выводы по главе 2..... | 91 |
| ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЗАМОРАЖИВАЕМОЙ ЗАКЛАДКИ... | 93 |
| 3.1 Основные свойства льда и льдокомпозиов, определяющие параметры замораживаемых закладочных массивов..... | 93 |
| 3.2 Свойства и состав наполнителей для льдокомпозиов, применяемых для создания замораживаемой закладки..... | 106 |
| 3.3 Исследование механических свойств различных материалов и обоснование состава замораживаемой закладочной смеси | 119 |
| 3.4 Выводы по главе 3..... | 144 |
| ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕННЫХ РУД ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ С ЛЕДЯНОЙ И ЛЬДОПОРОДНОЙ ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА | 148 |
| 4.1 Разработка технологических схем отработки ценных рудных жил на месторождении Лунное и обоснование параметров технологий отбойки руды и параметров льдопородной закладки..... | 148 |
| 4.2 Внедрение разработанной технологической схемы отработки ценных рудных жил на месторождении Лунное и анализ технико-экономических результатов использования разработанной технологии | 156 |

| | |
|--|------------|
| 4.3 Анализ особенностей выемки руды и разработка рекомендаций по организации работ по созданию льдопородного закладочного массива на месторождении Арылах..... | 170 |
| 4.4 Выводы по главе 4..... | 181 |
| ГЛАВА 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, А ТАКЖЕ УСЛОВИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЦЕННЫХ РУД ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ СИСТЕМАМИ С ЗАМОРАЖИВАЕМОЙ ЗАКЛАДКОЙ | 183 |
| 5.1 Оценка экологического эффекта от внедрения разработанной геотехнологии с льдопородной закладкой на месторождении Лунное..... | 183 |
| 5.2 Оценка параметров безопасности ведения горных работ при внедрении замораживаемой закладки на месторождениях Лунное и Арылах..... | 185 |
| 5.3 Оценка экономической эффективности внедрения разработанной технологической схемы на месторождении Арылах..... | 190 |
| 5.4 Выводы по главе 5..... | 191 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 192 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 195 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о применении результатов диссертационного исследования | 216 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Добыча полезных ископаемых в криолитозоне, инфраструктура которой зачастую развита очень слабо, обходится в несколько раз дороже, чем в других районах. Суммарная площадь территории криолитозоны на планете составляет около 40 % (включая Гренландию и Антарктиду), а территория Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) составляет около 10,5 млн. км². При этом сырье, добываемое в данном регионе РФ, имеет значительный экспортный спрос (около 12 % ВВП). Ведение горных работ в условиях криолитозоны характеризуется рядом природных факторов, определяющих технологию разработки, основные из которых: суровые климатические условия и мерзлое состояние вмещающих пород; сложный и труднодоступный рельеф местности; снижение прочности породы при оттаивании; существенные особенности при организации вентиляции и пылеподавления (смерзание руды, заполнение старых выработок льдом и т.д.).

В настоящее время запасы минеральных образований жильных месторождений приурочены к крутопадающим рудным телам малой мощности (до 3 м), среди которых преобладают крутопадающие жилы с углом падения более 60°. Основное количество руды сегодня добывается из таких жил, и в перспективе эта тенденция не изменится. Развитие науки и техники существенно изменяет окружающий мир и технологический уклад многих производств, но повышение эффективности горных предприятий наряду с внедрением новой техники, всегда базировалось на совершенствовании существующих и создании новых технологий, в том числе и при разработке жильных месторождений.

Начиная с 30-х годов следующие организации проводили исследования эффективности систем разработки с ледяной закладкой: ВНИИ-1, ВНИМИ, ЛГИ, МГОУ, ИГД СО РАН, Канадский центр минеральных и энергетических технологий (CANMET), Лаврентийский университет (г. Большой Садбери, Канада) и др. В работах Ю.В. Михайлова, В.И. Емельянова, Г.А. Каткова, Г.П. Необутова, В.Г. Гринева, Дж. Найта, М. Гарриса, В. Горски, Д. Казакидиса и др. приведён детальный обзор и анализ практического применения технологии с

использованием смерзающейся закладки. Данные технологии целесообразны к использованию только при отрицательных температурах вмещающих пород, что соответствует верхним горизонтам разрабатываемых месторождений, поэтому зачастую они используются ограниченный период работы горных предприятий на начальных этапах их эксплуатации. При этом многообразие факторов, которые оказывают влияние на время замораживания закладочного массива, таких как: горно-геологические условия, температура и скорость движения рудничного воздуха, начальная температура и количество жидкого и твёрдого материала, температура вмещающих пород, закладки и площадь контакта между ними, являются причиной отсутствия четкого практического механизма формирования замораживаемого массива в течение технологически заданного периода времени. В связи с этим требуется дальнейшее изучение указанных аспектов и настоящая работа, направленная на создание технологических схем разработки крутопадающих жильных месторождений с льдопородной закладкой и обоснование их параметров, является актуальной.

Цель работы. Создание эффективной технологии подземной добычи ценных руд в условиях криолитозоны, обеспечивающей снижение потерь и разубоживания руды, на базе разработки методики для расчета параметров технологических схем отработки жильных крутопадающих месторождений малой и средней мощности с использованием льдопородной (льдокомпозитной) закладки выработанного пространства.

Идея. Повышение эффективности отработки крутопадающих ценных рудных жил должно базироваться на внедрении бесцеликовой отработки запасов, за счет использования льдопородных закладочных массивов при послойном их намораживании, которое должно совмещаться с другими операциями технологического цикла.

Основные задачи исследований:

1. Проанализировать природно-климатические условия и особенности разработки месторождений полезных ископаемых в зоне развития многолетнемерзлых пород.

2. Определить основные требования к порядку отработки подземных выемочных участков при разработке месторождений ценных руд в условиях многолетней мерзлоты.

3. Установить причины низкого извлечения и высокого разубоживания руды в определенных горно-геологических условиях и предложить решения, направленные на повышение показателей отработки запасов.

4. Установить факторы, влияющие на скорость кристаллизации закладочного материала применительно к условиям горных выработок, а именно: рациональные соотношения объёмов воды и заполнителя из пустых пород и различных добавок (в том числе отходов производств), при различных температурах указанных компонентов и влияние климатических факторов (температуры и скорости воздуха) на скорость охлаждения закладочного массива.

5. Исследовать зависимость прочностных свойств закладочного массива от гранулометрического и вещественного состава слагающих его компонентов.

6. Разработать новые технологические схемы, а также модернизировать и адаптировать существующие для добычи подземным способом ценных руд основных месторождений криолитозоны при различной их мощности с применением прогрессивного оборудования.

Личный вклад автора. Автором работы выполнен анализ научно-технической и патентной информации отечественных и зарубежных источников, архивных данных, посвященных изучению особенностей условий криолитозоны, а также ведению разработки подземных горных работ с применения систем с закладкой в условиях многолетнемерзлых пород. Исследованы закономерности формирования замораживаемого закладочного массива в условиях криолитозоны и создана эффективная технологическая схема подземной отработки ценных рудных жил, обеспечивающей снижение потерь и разубоживания руды при обеспечении высокой производительности очистных блоков и всего предприятия за счет внедрения современного оборудования и комплексной механизации технологических процессов.

Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении практического осуществления замораживания закладки на опытном участке на территории месторождения Лунное Магаданской области, характеризующейся развитием многолетнемерзлых пород на глубину до 300 м, а также в выполнении лабораторных исследований оптимальных составов и прочностных свойств закладочных смесей. Кроме того, был произведен опытно-промышленный эксперимент замораживаемой закладки на месторождении Лунное. Вместе с тем, предложены программы для оптимизированного формирования замораживаемого массива. Разработаны новые технологические схемы подземной добычи ценных руд, которые позволяют минимизировать потери и разубоживание руды.

Сформулированы цель и задачи исследований, разработана методика и проведены лабораторные и натурные исследования, сформулированы основные научные положения и выводы.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использовался комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение практического опыта отработки жильных месторождений криолитозоны; лабораторные эксперименты по механическим испытаниям замороженных льдопородных смесей различного гранулометрического состава и с использованием различных укрепляющих и теплоизоляционных добавок; физическое моделирование процессов образования намораживаемой породной закладки из местных материалов и отходов производства; натурные производственные эксперименты по внедрению новых технологических схем и обоснованию их параметров; опытно-промышленное испытание разработанной технологии.

Научная новизна:

1. Установлена зависимость разубоживания руды от изменения пролета выработанного пространства, мощности жилы и изменения угла ее наклона в пределах отбиваемого веера.

2. Установлены закономерности прочностных свойств закладки от их гранулометрического состава при использовании укрепляющих компонентов и

теплоизоляционных отходов производств (резинокордовых отходов) позволяющие рассчитывать параметры технологических схем в условиях конкретных производств.

Основные защищаемые положения:

1. Повышение технико-экономических показателей отработки тонких крутопадающих жил ценных руд с полной закладкой выработанного пространства необходимо осуществлять на базе внедрения мелкошпуровой вместо скважинной отбойки руды и технологических схем с льдопородной закладкой с заданными технологическими, прочностными и теплоизоляционными параметрами.

2. Расчет технологических параметров, мощности и устойчивости закладочных массивов необходимо вести с использованием полученных зависимостей прочности закладочного льдокомпозиционного массива от его состава и содержания различных компонентов.

3. Разработанная технологическая схема отработки ценных руд с частичной закладкой выработанного пространства послойным намораживанием с обоснованным составом по содержанию и крупности компонентов позволяет повысить извлечение, снизить разубоживание руды и сократить время отработки блока.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Разработана методика обоснования рациональных параметров скважинной или мелкошпуровой отбойки руды при отработке тонких и маломощных жил в зависимости от горно-геологических условий их залегания.

2. Разработаны способы возведения закладочного массива различного гранулометрического состава и при использовании различных (укрепляющих или теплоизоляционных) добавок.

3. Обоснованы требования к технологическим схемам отработки крутопадающих жильных месторождений малой мощности в условиях криолитозоны.

4. Сформулированы требования к вещественному и гранулометрическому составу закладки при использовании послойного намораживания закладочного

массива при заданной мощности слоя или технологически обусловленном времени замораживания.

5. Разработана технологическая схема отработки рудной жилы мощностью до 3,0 м с льдопородной закладкой выработанного пространства, позволяющая перейти к бесцеликовой отработке, снизить потери и разубоживание руды.

6. Разработаны различные варианты технологических схем и определены требования к порядку отработки подземных выемочных участков (с применением прогрессивного оборудования) при разработке месторождений ценных руд из тонких и маломощных жил в условиях многолетней мерзлоты.

7. Разработаны и защищены патентами способы возведения закладочного массива при разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты.

8. Разработанная схема принята к экспериментальному внедрению и получено положительное заключение о результатах внедрения.

Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций. С целью испытаний по проверке технологических параметров с применением замораживаемой закладки выработанного пространства был проведён ряд экспериментальных работ в условиях месторождения Лунное на одном из участков VII рудной зоны, были установлены оптимальные составы закладочного материала (мерзлая порода и вода), определения устойчивости и температурного режима замороженного породного массива и вмещающих пород.

Реализация результатов исследований. Результаты, полученные при подготовке диссертации, рекомендуются к применению при ведении подземных горных работ на месторождениях, расположенных в условиях многолетней мерзлоты. Полученные результаты исследований и разработанные технологические схемы отработки крутопадающих рудных жил с использованием льдопородной (льдокомпозитной) закладки могут быть использованы для решения проблемы повышения показателей эффективности подземных горных работ, а также снижения техногенной и антропогенной нагрузки на окружающую среду. Результаты исследований предложены компаниям, осуществляющим разработку месторождений в условиях действия отрицательных температур.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: «Проблемы недропользования» («Горный университет», Санкт-Петербург, 2015 г.), «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2015 г.), «Innovations in Mineral Resource Value Chains - Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management» (TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany, 2015 г.), «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2016 г.), «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербург, 2017 г.), а также на заседаниях кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Горного университета (Санкт-Петербург, 2014-2018 гг.).

Личный вклад автора. Сформулированы цель и задачи исследований, разработана методика и проведены лабораторные и натурные исследования, сформулированы основные научные положения и выводы.

Публикации. Результаты диссертации отражены в 11 опубликованных работах, 3 из которых в журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки России; получено 2 патента.

Объем и структура работы. Текст диссертационной работы состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, изложенных на 216 страницах машинописного текста, и содержит 79 рисунков, 38 таблиц и список литературы из 189 наименований.

Автор выражает глубокую признательность за неоценимую помощь и поддержку на всех этапах подготовки диссертационной работы научному руководителю д.т.н., проф. О.В. Ковалеву. Автор благодарит зав. кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых д.т.н., проф. В.П. Зубова, преподавателей и сотрудников кафедры за обсуждение материалов диссертации и критические замечания к работе.

ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В ЗОНЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

1.1 Состояние сырьевой базы и перспективы эксплуатации месторождений криолитозоны с учетом природно-климатических и социально-экономических факторов

Криолитозона – верхний слой земной коры, характеризующийся круглогодичной отрицательной температурой слагающих его пород и почв. В настоящее время широкое распространение получил термин “многолетнемерзлые породы” (ММП), которые также именуются вечной или многолетней мерзлотой [32]. ММП принято считать породы, температура которых остается отрицательной на протяжении двух или более последовательных лет. В физико-геологическом смысле криолитозона представляет собой часть объема литосферы, ограниченного нулевой изотермой [41].

Суммарная площадь криолитозоны на планете Земля составляет около 40 % ее поверхности (включая Гренландию и Антарктиду), а вместе с сезонным промерзанием она составляет 60 % [49]. Вместе с тем, 24 % площади суши Северного полушария занято криолитозоной (около 22,8 млн. км²), в том числе более чем 11 млн. км² в России, охватывая около 65 % территории страны [146, 169].

Главной отличительной чертой криолитозоны выступает исключительный радиационный и водно-тепловой баланс, который способствует превалированию отрицательных и низких положительных температур, что подтверждает принадлежность к уникальной термодинамической области [48].

На современном этапе используется классификация криолитозоны, представленная на рисунке 1.1 [47, 49, 84].

Криолитозона подразделяется на следующие типы [65]: переходный (температура пород изменяется от 0 до -1 °С); полупереходный (температура пород от -1 до -2 °С); длительно-устойчивый (температура пород от -2 до -5 °С);

устойчивый (температура пород от -5 до -10 °С); арктический (температура пород от -10 до -15 °С); полярный (температура пород от -15 °С).

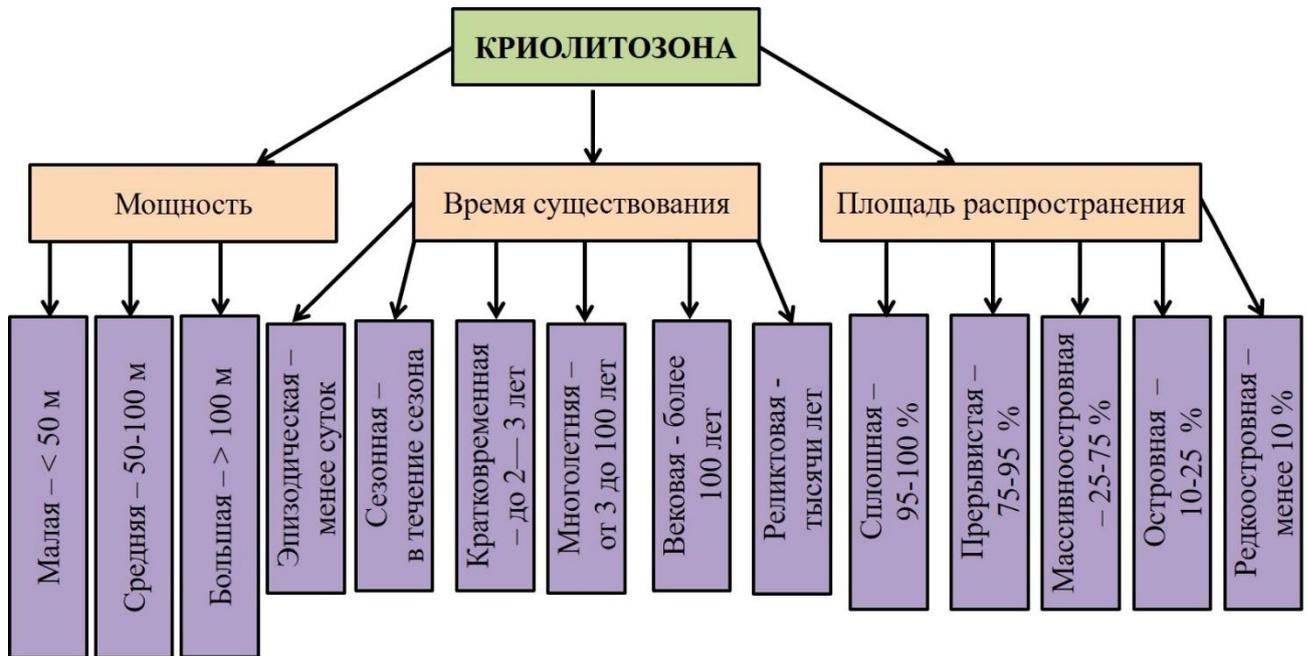


Рисунок 1.1 – Классификация криолитозоны по мощности, времени существования пород в мерзлом состоянии и площади распространения

Структура (состав) мерзлоты определяется физико-географическими условиями и представлена на рисунке 1.2 [168]. Исходя из комбинаций выше перечисленных факторов, территория России характеризуется большим разнообразием геокриологических условий (рисунок 1.3, таблица 1.1) [141]. В северной геокриологической зоне мощности криолитозоны преимущественно превышают 300 м, достигая 1500 м. В южной геокриологической зоне распространены ММП с мощностями, зонально уменьшающимися с севера на юг от $100\div 150$ м до единиц метров [47; 49, 119]. Так, территория многолетней криолитозоны России характеризуется следующим диапазоном изменения среднегодовых температур горных пород: в южной геокриологической зоне от $+2$ °С до -2 °С, в северной геокриологической зоне от 0 °С до -15 °С и ниже. К климатическим особенностям территории криолитозоны России следует отнести резко континентальный климат, где среднемесячная температура воздуха отличается низкими значениями (в Северной Якутии в январе $t_{cp}=-45\div -47$ °С) и малоснежными зимами: $70\div 150$ см (в Забайкалье снижается до $10\div 25$ см) [94].

Согласно географическому расположению, Арктика представляет собой часть суши и водных пространств, расположенные севернее полярного круга ($66^{\circ}33''$ северной широты). К северу от этой широты наблюдаются явления полярного дня (на протяжении некоторого времени летом солнце не заходит) и полярной ночи (в определённый период зимой солнце не восходит).

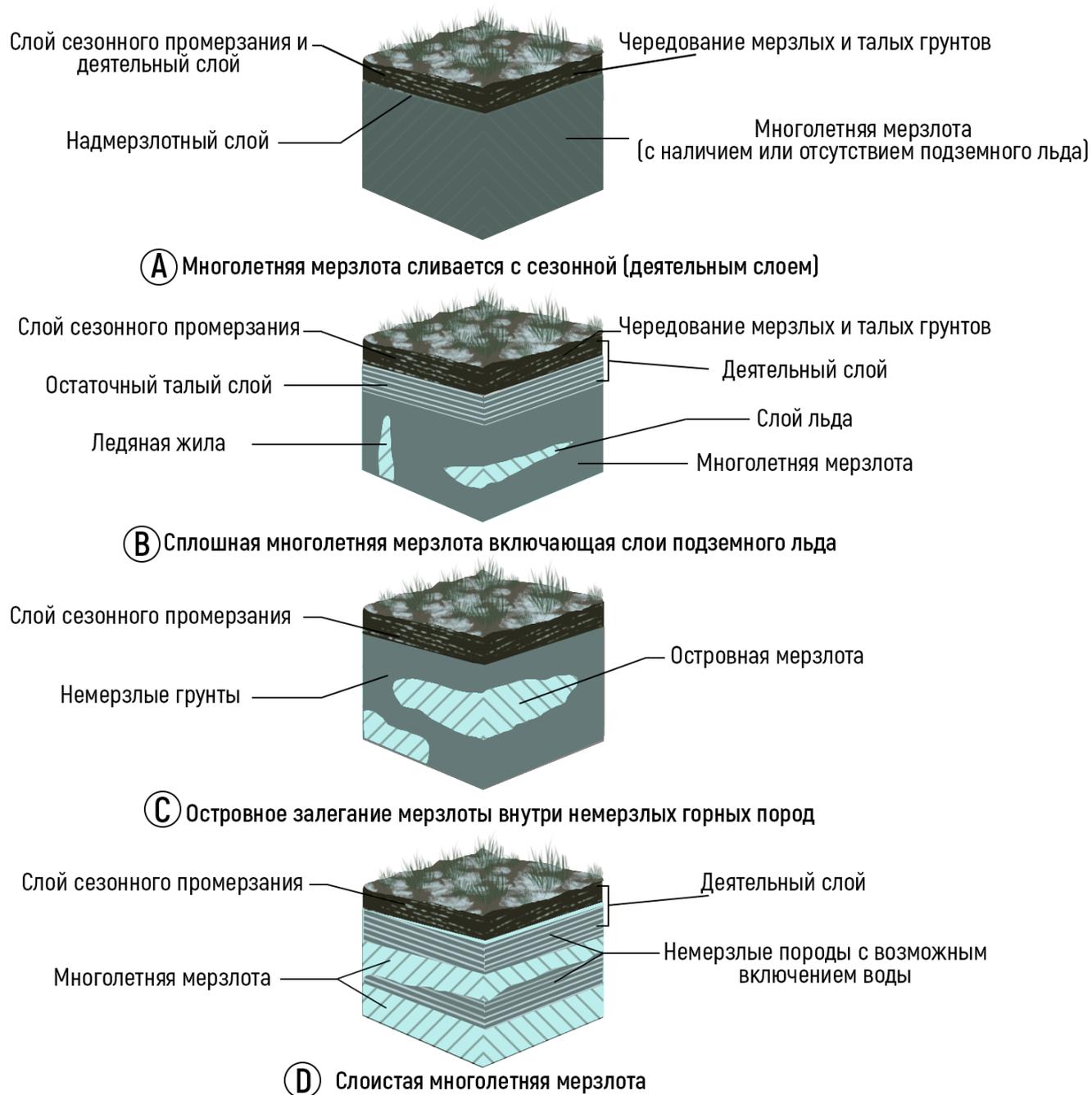


Рисунок 1.2 – Основные виды залегания многолетней мерзлоты

С точки зрения климата Арктикой считается территория, где в июле средняя температура не превышает 10°C . Эта климатическая граница (изотерма) совпадает

с границей древесной растительности: севернее этого предела деревья почти не выживают.

Южной границей Арктики считается либо Северный полярный круг (21 млн км²), либо южная граница тундры (27 млн км²). Протяжённость арктического побережья составляет 38,7 тыс. км, из них территория России занимает 22,6 тыс. км [70].

Таблица 1.1 -Распространение, мощность, границы толщи пород с отрицательной температурой (пояснение к рисунку 1.3)

| |
|---|
| А. Распространение и мощность субэдральных криогенных толщ. Распространение криогенных толщ (КТ) |
| сплошное: мощность КТ, м: 1 — 1000÷1500, реже более; 2 — 500÷1000; 3 — 500÷700; 4 — 500÷700 до 1000; 5 — 500÷600; 6 — 400÷600 до 1000; 7 — 400÷500; 8 — 300÷500; 9 — 300÷500 до 800÷1000; 10 — 300÷400; 11 — 200÷400; 12 — 200÷400 до 300÷500; 13 — 100÷300; 14 — прерывистое: 50—100 м; 15,16 — прерывистое и массивно-островное (15—25÷100м; 16 — 25÷100м, реже до 200÷300м); 17 — прерывистое, массивно-островное и островное: от 0 до 100 м; 18 — массивно-островное: 25÷50 м; 19 — островное: 25 м; 20 — от островного до сплошного: мощность от 0 до 1000 м, реже более |
| Б. Распространение и мощность субмаринных криогенных толщ |
| 21 — распространение КТ сплошное: мощность КТ от 0 до 300 м, реже более |
| В. Границы |
| 22 — современной области распространения КТ (по И. Я. Баранову, В. В. Баулину, Н. Г. Оберману); 23 — Северной (а) и Южной (б) геофизиологических зон (по С. М. Фотиеву); 24 — районов распространения реликтовых КТ (по В. В. Баулину, Н. Г. Оберману и С. М. Фотиеву); 25 — районов с различной мощностью и прерывистостью КТ; 26 — отсутствие мерзлоты в пределах государства. |

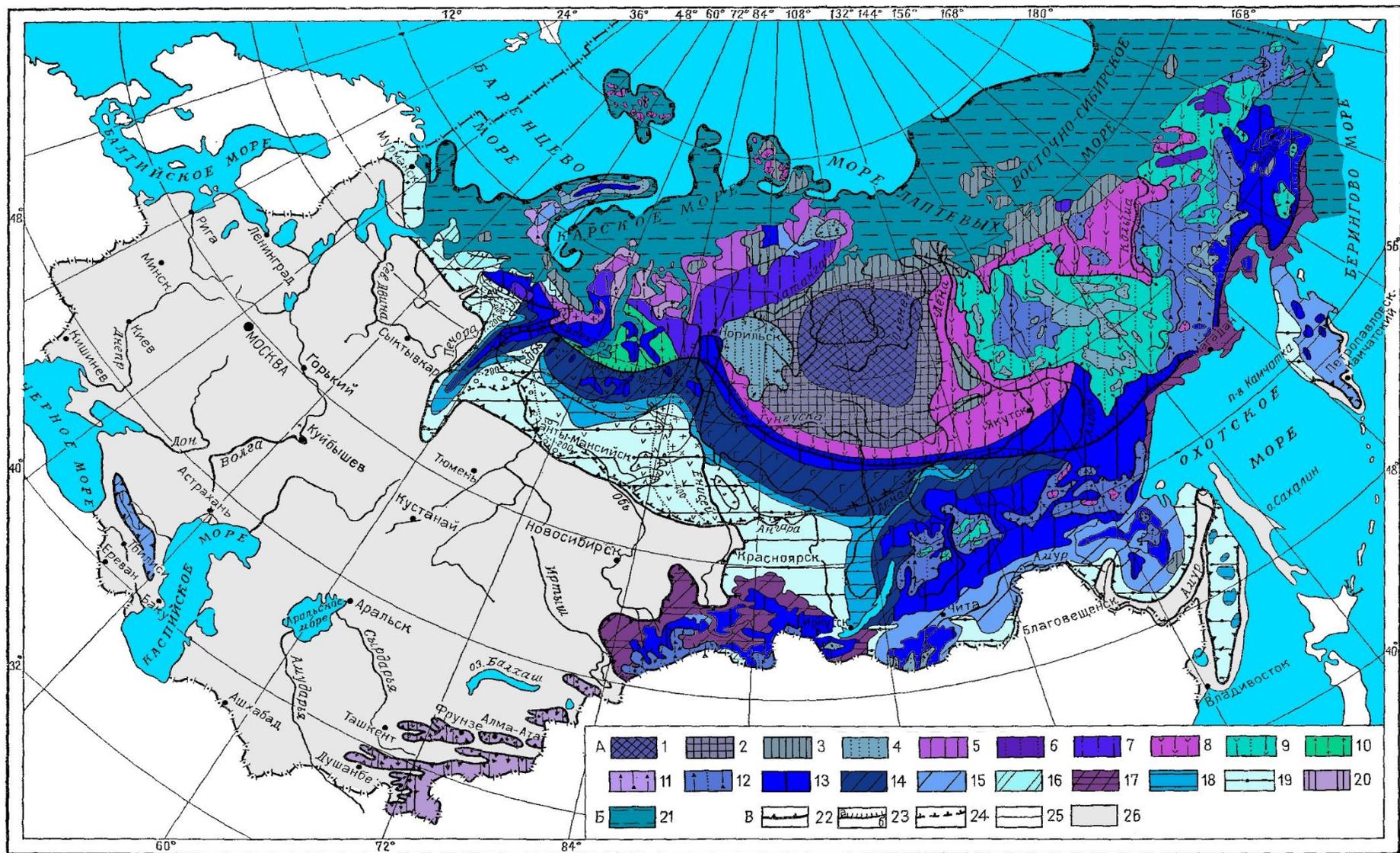


Рисунок 1.3 – Схематическая карта распространения и мощности толщи пород с отрицательной температурой на территории СССР

К Арктическому региону относятся территории России, США, Канады, Швеции, Финляндии, Норвегии, Дании (Гренландия и Фарерские острова), Исландии. По Северному Ледовитому океану проходит около 20 тыс. км государственной границы РФ. Вместе с тем, континентальный шельф РФ насчитывает более 4 млн км² (41 % площади Арктики) [59].

В настоящее время при прогнозировании добычи полезных ископаемых в Арктике – необходимо знать текущее состояние криолитозоны. В арктических и прилегающих регионах Севера расположено около 30 % запасов полезных ископаемых планеты (рисунок 1.4).

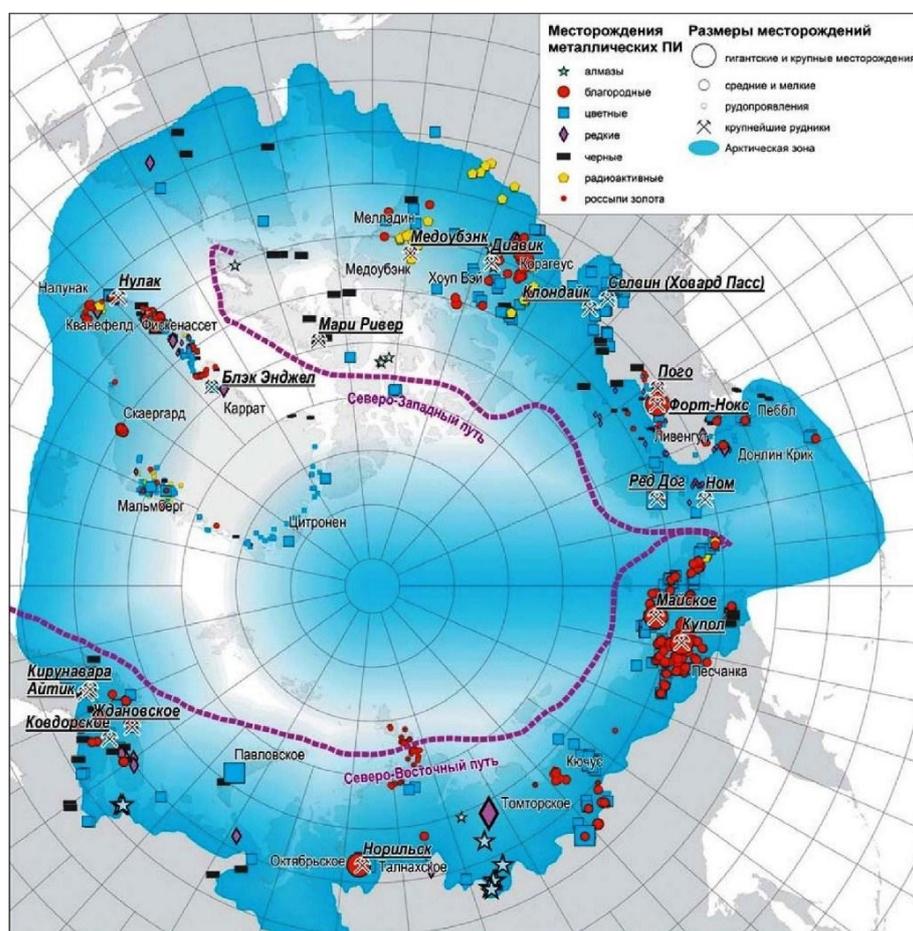


Рисунок 1.4 – Положение крупных и суперкрупных месторождений твердых полезных ископаемых (ПИ) в Циркум-Арктической зоне

Таким образом, минерально-сырьевая база (МСБ) и динамика её развития определяют высокую значимость в арктических странах. При рациональном природопользовании в течение относительно продолжительного отрезка времени Арктика и Север будут иметь преимущество по сравнению с экономически

развитыми регионами, где минеральные ресурсы исчерпаны и менее значимы [154].

При освоении ресурсов твёрдых полезных ископаемых (ТПИ) в АЗ, можно выделить три крупных сектора: 1) североамериканский; 2) скандинавский; 3) российский.

Месторождения 12 видов полезных ископаемых составляют Арктическую минерально-сырьевую базу (МСБ) цветных и благородных металлов (рисунок 1.5, 1.6). В Арктической зоне известно более 100 месторождений, находящихся на различных стадиях освоения.

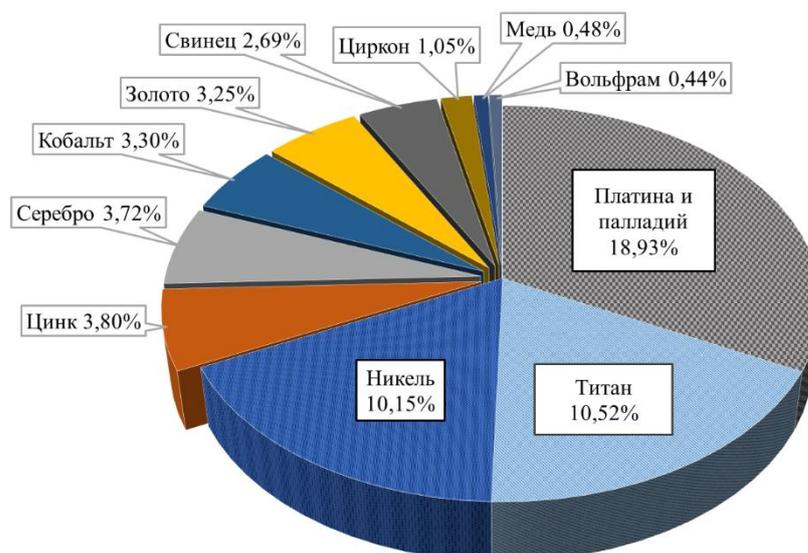


Рисунок 1.5 – Доля Арктики в мировых запасах полезных ископаемых

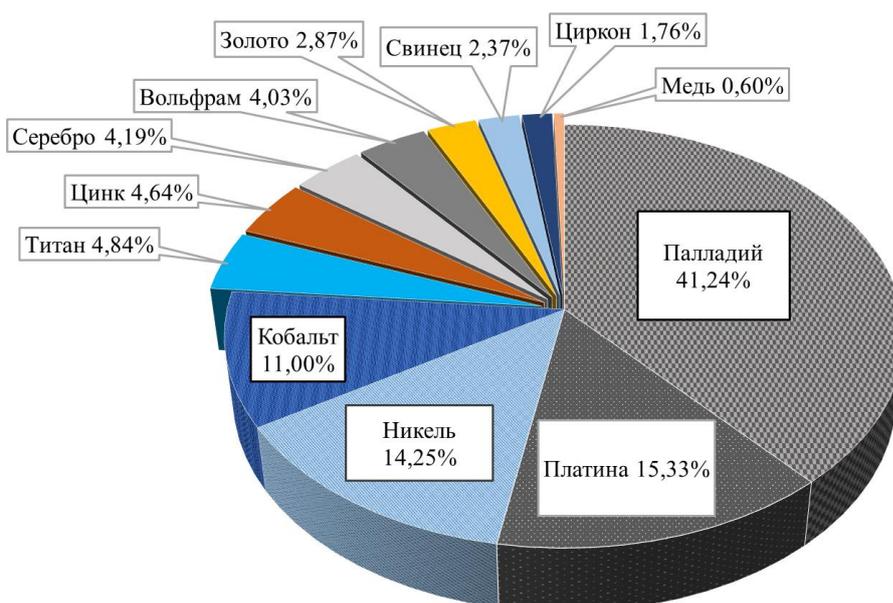


Рисунок 1.6 – Доля Арктики в глобальной добыче полезных ископаемых

Состав АЗРФ определён в Указе Президента [90], в Постановлении Президиума ЦИК СССР [91], а также в других нормативных актах СССР и РФ [134]. Важным является то, что около 56 % действующих шахт и рудников на территории России расположены в условиях проявления вечной мерзлоты. Недра и богатство природно-ресурсной базы АЗРФ имеют стратегическое и экономическое значение для страны (почти 12 % ВВП), а также наибольшую экспортную привлекательность (более 25 % всего экспорта) (рисунок 1.7, 1.8) [7, 12, 23, 93].

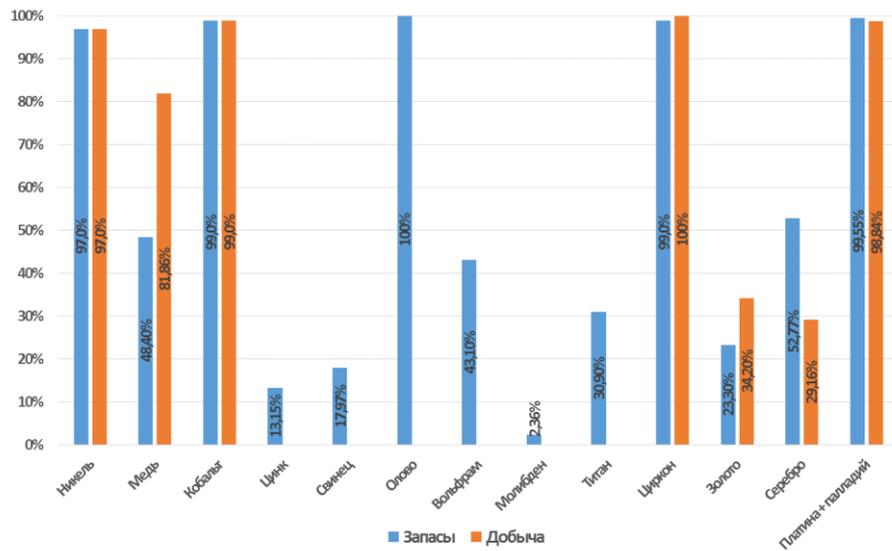


Рисунок 1.7 – Доля российских арктических запасов и добычи относительно всей Арктической зоны планеты

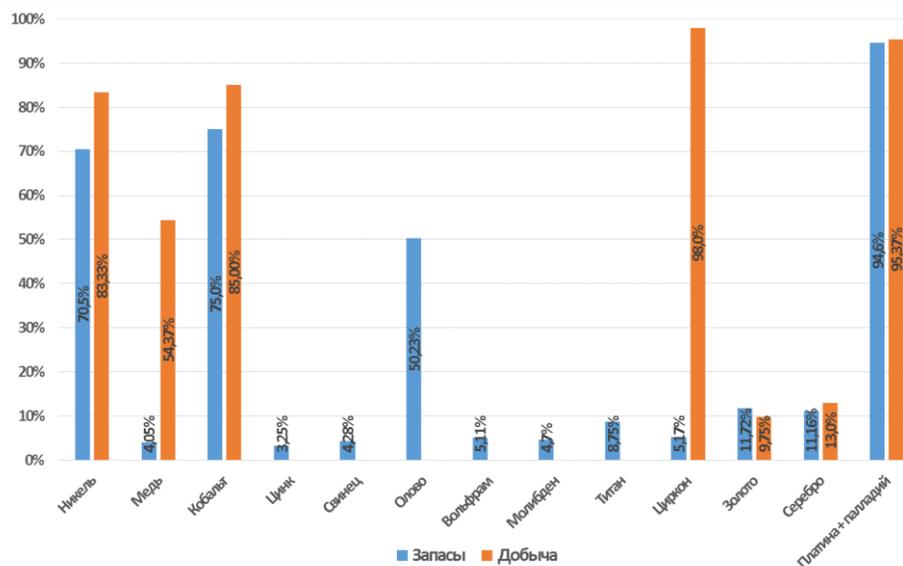


Рисунок 1.8 – Доля Арктической зоны России относительно общероссийских показателей

Таким образом, Арктика является одним из самых богатых регионов Земного шара по минерально-сырьевому потенциалу [103, 128]. В основном, недра Арктики превосходят остальные территории в категории прогнозных ресурсов, а также по совокупным запасам основных видов полезных ископаемых, которые в АЗРФ имеют больший потенциал по сравнению с другими странами (рисунок 1.9).

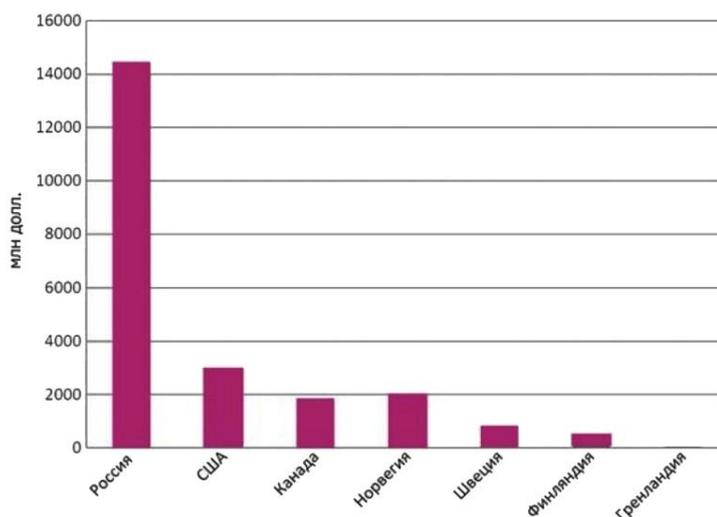


Рисунок 1.9 – Суммарная стоимость цветных и благородных металлов, добытых в Циркум-Арктической зоне в 2012 г.

Следует отметить, что Российская Федерация обладает значительной сырьевой базой серебра (около 7 % мировых ресурсов), подавляющая часть которого находится в АЗ. Собственно серебряные месторождения распространены в Верхояно-Колымской металлогенической провинции, захватывающей территорию Республики Саха (Якутия), Магаданской области и Хабаровского края, в Охотско-Чукотском поясе, простирающемся вдоль побережья Тихого океана [33, 34, 35, 36, 39].

Одиннадцать наиболее значимых собственно серебряных месторождений (в том числе пять золото-серебряных) разведаны в Магаданской области, суммарно они содержат 11,7 тыс. т, или почти 10 % российских запасов серебра. Среднее содержание серебра в рудах собственно серебряных объектов колеблется в широких пределах, от 185 до 1222 г/т.

Ведущим производителем серебра является крупный холдинг АО «Полиметалл», обеспечивающий около половины добычи серебра в России и

входящий в десятку крупнейших мировых производителей. В 2015 г. его предприятиями добыто 1142 т серебра. Среди активов компании один из крупнейших серебряных рудников в мире – подземный рудник Дукат, разрабатывающий одноименное золото-серебряное месторождение в Магаданской области. Дукатский хаб также включает еще три подземных рудника, разрабатывающих золото-серебряное Лунное и собственно серебряные Гольцовое и Арылахское месторождения в Магаданской области, руды которых перерабатываются совместно на Омсукчанской золотоизвлекательной фабрике (ЗИФ) и фабрике Лунное (таблица 1.2). Дукатский рудный район очень перспективен с точки зрения прироста запасов серебра, здесь локализовано 5,4 тыс.т ресурсов категории P_1 . Большая их часть приурочена к флангам и глубоким горизонтам Дукатского и Лунного месторождений. Известны также проявления собственно серебряного, золото-серебряного и серебряно-полиметаллического типов, в том числе с оловом, для последних характерно самое богатое оруденение – до 2,6 кг/т серебра. Обеспеченность предприятий хаба запасами серебра составляет 12-16 лет. Компания ведет работы по расширению ресурсной базы предприятий, концентрируя ГРР на прилегающих участках и ближайших месторождениях.

В связи с этим, объектом внедрения технологии льдозакладки было выбрано одно из этих месторождений, что будет подробно рассмотрено в разделе 4.1.

Таблица 1.2 – Основные серебряные и серебряносодержащие месторождения АО «Серебро Магадана» [38]

| Месторождение | Геолого-промышленный тип | Запасы, т | | Доля в балансовых запасах РФ, % | Содержание серебра в рудах, г/т | Добыча в 2015 г., т |
|---------------|--------------------------|-----------|--------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| | | A+B+C1 | C2 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Дукатское | Золото-серебряный | 5738,5 | 1254 | 5,9 | 638,1 | 733,9 |
| Лунное | Серебряно-золотой | 390,9 | 1222,1 | 1,4 | 432,4 | 134 |
| Гольцовое | Серебряный | 679,7 | 643,4 | 1,1 | 1233,6 | 97,5 |

Однако, несмотря на указанные преимущества, АЗРФ характеризуется наличием значимых рисков и угроз в социально-демографической, экономической,

экологической и иных сферах. Сильная уязвимость арктической природы в этой специфической зоне планеты предопределяет дополнительное изучение и рассмотрение проблем максимального сохранения естественной среды обитания, приоритетность разработки и реализации рациональной эколого-сбалансированной модели природопользования [69].

1.2 Анализ особенностей эксплуатации месторождений полезных ископаемых на территории криолитозоны

Ведение горных работ в условиях криолитозоны характеризуется несколькими характерными особенностями, которые кардинально отличают их от идентичных работ в других районах. Эти особенности являются результатом совместного воздействия комплекса специфических природных условий – климатических, географических и геологических, а также социально-экономических. Специфичность эксплуатации ММП заключается в наличии следующих природных факторов, определяющих технологию разработки и осложняющих ведение горных работ:

1. Суровые климатические условия и мерзлое состояние вмещающих пород;
2. Сложный и труднодоступный рельеф местности с наличием большого количества рек и ключей, что затрудняет строительство постоянных дорог;
3. Зачастую сложные горно-геологические условия залегания полезного ископаемого;
4. Отсутствие видимой визуальной границы между полезным ископаемым и вмещающими породами (мощность жилы или пласта определяется, как правило, по данным эксплуатационного опробования);
5. Особенности зоны многолетней мерзлоты, а именно:
 - наличие активного слоя, который оттаивает в течение лета и замерзает снова зимой,

- существование неоднородной структуры, особенно включения воды или талых прослоек, ледяных линз, ледяных клиньев и грунтов с большим содержанием льда, в котором его объём превышает объём пористости оттаявшего грунта;

6. Потеря прочности породы при оттаивании;

7. Изменение прочностных параметров горных пород (при понижении глубины разработки с верхних горизонтов) при переходе из слоя вечной мерзлоты на (горизонт) положительных температур;

8. Сложность в организации пылеподавления;

9. Специфические требования при организации вентиляции;

10. Смерзание отбитой горной массы;

11. Заполнение старых выработок льдом [76,161];

12. Положительное влияние мерзлоты на устойчивость выработок при кратковременном поддержании и наличие отрицательных эффектов при длительной эксплуатации выработок;

13. Наличие влаги в породах повышает их вязкость (особенно проявляется при разрушении рыхлых пород);

14. Породы (особенно рыхлые) с большим содержанием влаги в мерзлом состоянии требуют повышенного расхода ВВ и имеют более высокое сопротивление при бурении.

Вследствие этих негативных факторов добыча и переработка минерального сырья в подобных условиях в среднем дороже в 3-5 раз по сравнению с другими регионами. Следовательно, только самые богатые месторождения экономически привлекательны в таких условиях, которые требуют специальных подходов к проектированию, эксплуатации и обслуживанию при добыче и обогащении полезных ископаемых, а также утилизации хвостов и поддержки инфраструктуры.

Однако, несмотря на все сложности, горные работы ведутся в арктических частях Америки и Евразии в течение многих сотен лет [68, 176]. В то же время, только в XX столетии в арктических регионах Канады и России начались крупномасштабные горные работы по освоению рудных залежей.

При неустойчивом режиме мерзлоты известно осыпание и вываливание хорошо закрепленной кровли пласта крупными кусками под влиянием теплого воздуха в вентиляционной сбойке, а также «оплывание» боков выработок при их проходке в пльвунных (или аналогичных по своим физическим свойствам породах). Различие условий проведения выработок в зоне мерзлоты весьма убедительно доказывается опытом Воркутинского месторождения, где шахты и шурфы, проводившиеся всего на расстоянии в несколько десятков метров, или почти не требовали водоотлива или попадали в пльвунные породы с большим притоком воды. Таким образом, условия работ в зоне мерзлоты могут быть различными.

1.3 Анализ и обобщение отечественного опыта разработки месторождений криолитозоны с использованием замораживаемой закладки

Первым патентом по использованию замораживаемой закладки является «Крепление выработок и поверхности» Артура Лангерфельда (США), заявка на который была подана 11 марта 1913 года и опубликованный 5 декабря 1916 года [181]. Особенностью технологии является не намораживание льда в шахте, как в более современных способах, а использование уже готового льда. Технология была рекомендована для создания искусственных (временных) целиков из льда для поддержания выработанного пространства при доизвлечении угольных целиков. Данный способ можно описать следующим образом: заготовленный заранее лёд опускается в шахту, которым заполняют все полости, а затем и шахтный ствол, бремсерг и т.д. (рисунок 1.10). Если А. Лангерфельд первым официально описал возможность использования готового льда для крепления горных выработок, то П.А. Леонов (4 августа 1931 года) первым предложил создавать ледяную закладку непосредственно в закладываемой выработке [159].

Добыча полезных ископаемых с закладкой выработанного пространства позволяет обеспечить безопасность ведения горных работ, сохранность земной

поверхности, минимизировать потери и разубоживание добываемой руды, а также утилизировать часть отходов производства. Вместе с тем, технология весьма дорогостоящая и, как правило, она используется при добыче ценного минерального сырья.

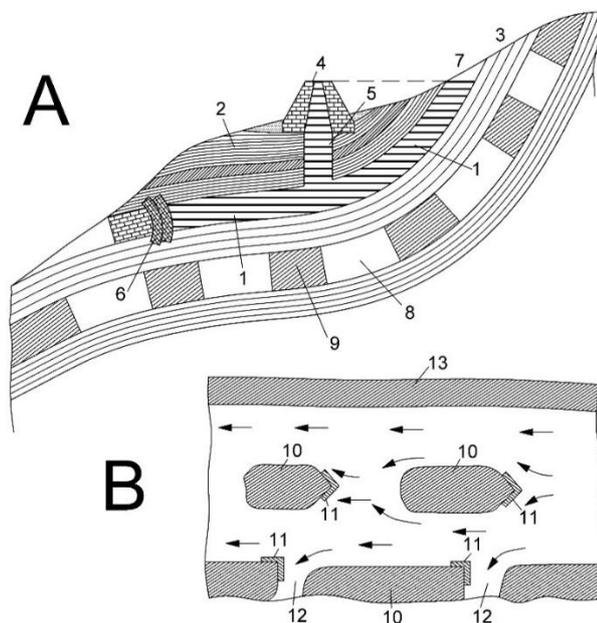


Рисунок 1.10 - Схема заполнения шахты льдом:

А - вертикальный разрез: 1 – слой, который добывается и заполняется льдом; 2 - неразрабатываемый слой; 3 – бремсберг; 4 - подпорная труба или полая конструкция, построенная на стволе шахты; 5,6 - ограждение или перемычка; 7 – обнажение льда, заполняющего выработанное пространство шахты; 8 – отработанный участок слоя с оставлением целиков; 9 - столбы угля (целики);

В – план шахтных целиков: 10,11 – водорезная (ледорезная) конструкция; 12 – (откаточный) квершлаг; 13 - межпанельный (либо межкамерный) целик.

Стрелками показано направление для заполнения льдом выработок.

В информационно-техническом справочнике, утвержденном приказом Росстандарта от 15 декабря 2017 г. № 2840 и введенном в действие с 1 июня 2018 г, наилучшей доступной технологией при разработке коренных (рудных) месторождений драгоценных металлов подземным способом значится закладка выработанного пространства [38]. Данная технология заключается в следующем: «...применении систем разработки с закладкой выработанного пространства породами от проходческих работ со снижением количества складироваемых пустых пород на поверхности, ликвидацией формирования подземных полостей и отрицательных гравитационных процессов. Использование современных

маневренных погрузочно-доставочных машин (ПДМ), в ковше которых транспортируется порода, позволяет добиться высокого уровня производительности закладочных работ».

Присутствие ММП обеспечивает достаточно хорошие условия для применения смерзающейся закладки, представляющей собой, пустую породу, смоченную водой по соответствующей технологии и далее замороженную. Учитывая вышесказанное, чрезвычайно актуальной и достаточно сложной задачей является выбор обоснованных технологий, которые способствуют рациональной и эффективной отработки месторождений в условиях применения смерзающейся закладки для разнообразных и сложных горно-геологических и теплофизических условий [89].

Под термином замораживаемая закладка понимается разновидность закладки, в которой лёд выступает в качестве связующего элемента, соединяющего остальные компоненты закладочной смеси (породу, песок, шлаки, опилки и др.) или как основной материал закладки. Таким образом, льдопородная закладка является подвидом (разновидностью) замораживаемой.

Регионы с устойчивыми холодными зимами (число дней с температурой ниже -10°C - более 100 дней в году), относятся к благоприятным для применения замораживаемой закладки [10].

Обзор патентной информации и научно-технической литературы позволил выявить современное состояние изученности данного вопроса и накопленный практический опыт. Так, в разные годы к отечественным научным и проектным институтам страны, занимающимся технологическими аспектами данного вопроса, относились ВНИИ-1, ЛГИ (Санкт-Петербургский Горный институт), Унипромедь, ВНИПИгорцветмет (сейчас ЗАО «Золотопроект»), Институт горного дела Севера СО РАН, Гипроцветмет, ИПКОН РАН, ИГД ДВО РАН, МГОУ. Кроме того, известен зарубежный опыт исследований по данной тематике учеными из Швеции, Норвегии, Дании, Финляндии, США, Канады, Германии и др. Экспериментальные работы по льдозакладке выработанных пространств производились на угольных шахтах в Аркаглинском районе и около Тикси, на

рудниках, разрабатывающих месторождения цветных металлов, на приисках, ведущих разработку мерзлых золотоносных россыпей подземным способом.

В 1931 году более 50 % залежей угля Прокопьевского района было представлено мощными пластами от 5,5 до 20 м, а в отдельных случаях до 40 м, отработка которых требовала применения особых систем разработки. Считалось, что наиболее целесообразно будет отрабатывать такие пласты способом с закладкой. В отдельных же случаях, особенно при штольневых работах, применять системы с обрушением кровли.

Учитывая отрицательное влияние холода на сухую и мокрую закладку, П.А. Леонов предложил новый вид закладки – ледяную закладку, в двух основных вариантах ее реализации: замораживание воды в горной выработке или формирование льда на поверхности, дальнейшая его транспортировка и закладка в ВП (рисунок 1.11). При этом предпочтение отдавалось второму варианту, так как подача в выработки значительных объёмов холодного воздуха для намораживания льда отрицательно влияет на здоровье шахтеров.

Отмечалось, что лёд по своим физическим свойствам вполне пригоден как закладочный материал, а для определения целесообразности применения ледяной закладки (по способу П.А. Леонова) требовалось выяснить её рентабельность и экономическую выгоду с помощью промышленных опытов, которые на тот момент не были проведены [159]. Первый опыт показал, что намораживание слоев льда в выработках требует значительных затрат времени, что приводило к значительному отставанию от фронта очистных работ, необходимость широкой сети трубопроводов в выработках с отрицательной температурой и сезонность таких работ (и некоторые иные факторы) существенно сдерживали их широкое внедрение. В результате предпочтение отдавалось сухой закладке [140].

характеристик этого весьма сложного процесса, анализ которого требует определить глубину распространения охлажденной зоны или время, которое необходимо затратить на создание ее определенной мощности. Данный вопрос не являлся темой представленного исследования и был подробно изучен другими авторами (Бакакин В.П., Хохолов Ю.А., Михайлов Ю.В.). Следует отметить, что для точных аналитических расчетов надо установить все факторы, влияющие на процесс теплообмена, их изменение во времени и пространстве, и далее, пользуясь взаимной связью, определить из неё требуемые характеристики [10].

Подробно рассмотрим отечественный и зарубежный опыт промышленного и экспериментального внедрения замораживаемой закладки на различных месторождениях и кратко остановимся на системах разработки, предлагаемых различными научными и проектными институтами. На данный момент рассматриваемые в работе системы разработки не нашли широкомасштабного применения на практике по тем или иным причинам.

1.3.1 Опыт разработки угольных месторождений с использованием замораживаемой закладки

В 1951 г. ВНИИ-1 проводил опыты по послойному намораживанию льда в угольных шахтах Аркагалы, где для намораживания 1 м^3 льда расходовалось от 11 до 35 тыс. м^3 воздуха. Скорость непрерывного послойного намораживания льда составила около 2,5 см в сутки. [150].

Блинский А.И. предложил способ использования холодного воздуха земной поверхности для послойного намораживания воды в подземных очистных выработках с целью их полной закладки льдом. На рисунке 1.12 приведена схема разработки мощного пологопадающего пласта с полной закладкой очистных выработок льдом. В зимнее время с помощью вентилятора в очистную выработку подаётся холодный наружный воздух и послойно намораживается лед. Трубопровод и корпус насоса после полива продуваются подогретым сжатым воздухом. В случае разработки мощных пластов угля в условиях многолетней

мерзлоты, пласт отрабатывается слоями толщиной в 4-6 м, с шириной камер от 5 до 10 м (и целиков такой же ширины), и полной закладкой выработанного пространства льдом. По окончании закладки отработанных камер льдом производится полное извлечение междукамерных целиков. Очистные выработки, полученные от выемки междукамерных целиков, также полностью закладываются льдом. Таким образом, весь мощный пласт угля отрабатывается без потерь. При подготовке панели к разработке с закладкой очистных выработок льдом панельные штреки для откатки и проветривания нарезаются через каждые 100÷200 м. При этом длина камер будет равна 50÷100 м. Расстояния между шурфами или скважинами большого диаметра, по которым нагнетается холодный воздух во время ледяной закладки, принимается не более 150÷200 м.

Разработку крутопадающих пластов угля средней мощности в условиях вечной мерзлоты можно производить при наличии горизонтально расположенной линии очистного забоя (рисунок 1.13).

Выработанное пространство вслед за подвиганием очистного забоя заполняется льдом путем послойного замораживания воды. Если в одном из блоков производится послойное намораживание льда, то в другом спаренном блоке осуществляется отбойка полезного ископаемого и доставка его скрепером по льду к углеспуску. Отбойка производится с устроенного из досок настила, уложенного на временных распорных стойках. Таким образом, совмещаются работа скрепера и отбойка полезного ископаемого. Углеспуск и вентиляционные ходки крепятся срубовой крепью, а стороны, соприкасающиеся с замороженным льдом, обшиваются тёсом. Углеспуск имеет два отделения, которые в верхней части используются для нагнетания холодного воздуха при производстве послойного намораживания льда. На верхнем штреке этот воздух направляется по нужному отделению, что позволяет устранить проникновение большого потока холодного

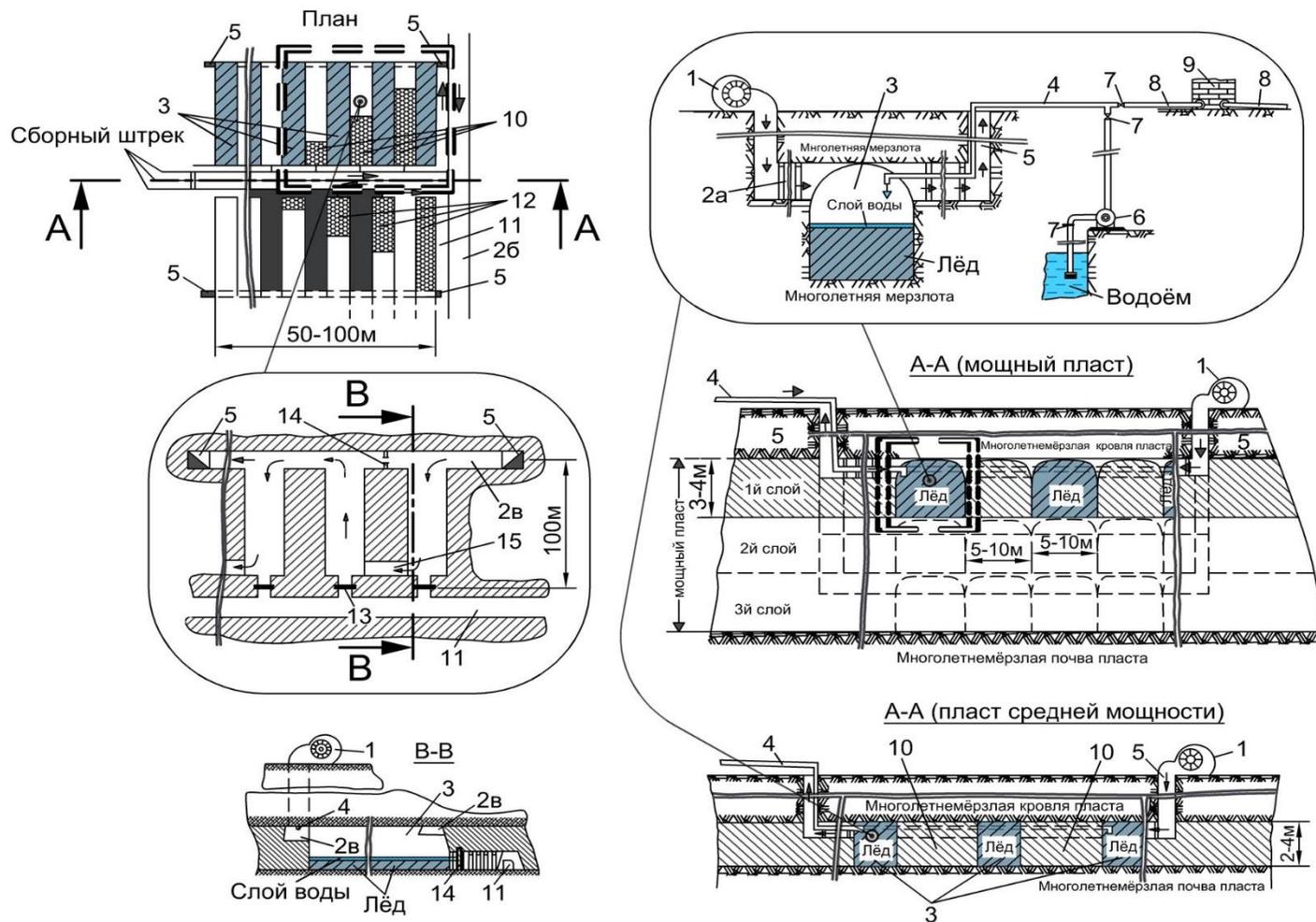


Рисунок 1.12 – Полная схема закладки льдом горных выработок:

1 - вентилятор; 2а - вентиляционный ходок, 2б - вентиляционный штрек, 2в - вентиляционная сбойка; 3 - заложенные или закладываемые льдом камеры (для мощных пластов) или столбы (при средней мощности); 4 - трубопровод для нагнетания воды в камеры; 5 - шурф или скважина; 6 - центробежный насос, нагнетающий воду; 7 - задвижка; 8 - трубопровод сжатого воздуха; 9 – воздухоподогреватель; 10 - выемка камер между ледяными целиками; 11 - главный откаточный штрек; 12 - выемка камер в целике; 13 - перемычка; 14 - вентиляционная дверь; 15 - сбойка между камерами

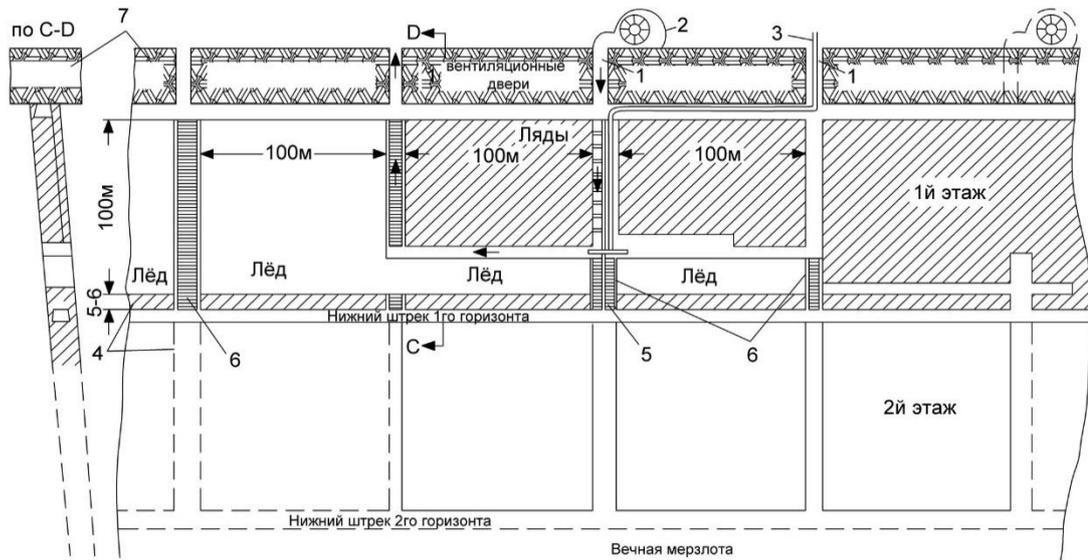


Рисунок 1.13 - Система разработки крутопадающих пластов угля в условиях многолетней мерзлоты:

1 — шурф; 2 — вентилятор, нагнетающий холодный воздух для послойного намораживания воды; 3 — трубопровод для нагнетания воды; 4 — целик угля; 5 — углеспуск; 6 — сплошная венцовая (срубовая) крепь; 7 — наносы

воздуха в забой блока, где заняты рабочие на отбойке угля. При разработке нижних блоков углеспуски первого горизонта используются для нагнетания холодного воздуха, а также для вентиляции.

В период года с положительной температурой воздуха предлагалось поддерживать отрицательную температуру в очистных выработках с помощью абсорбционной холодильной установки, охлаждающей воздух до $-20 \div -30$ °С.

В 50-ые годы Зильберборд А.Ф. предложил способ отработки мощного пологопадающего пласта камерно-столбовой системой с закладкой льдом. Разрабатываемый пласт мощностью в среднем 20 м, залегание пласта пологое. Горизонт делится на панели длиной 600 м, шириной 90 м, которые разрабатываются камерно-столбовой системой. Очистные работы ведутся только в камерах, длина которых обуславливается шириной панели, составляет 85 м, ширина камеры принята равной 8 м. Такие же размеры имеют и междуканальные целики. Пласт вырабатывается на полную мощность. Для перечисленных условий был разработан способ по закладке камер льдом.

Работы по закладке и выемке производятся одновременно, но в разных крыльях шахтного поля. Вода подается по трубопроводу, причем суточный запас

воды закачивается в одну из камер верхних горизонтов. Схема производства работ по закладке камеры и примерный порядок выемки целиков приведены на рисунке 1.14.

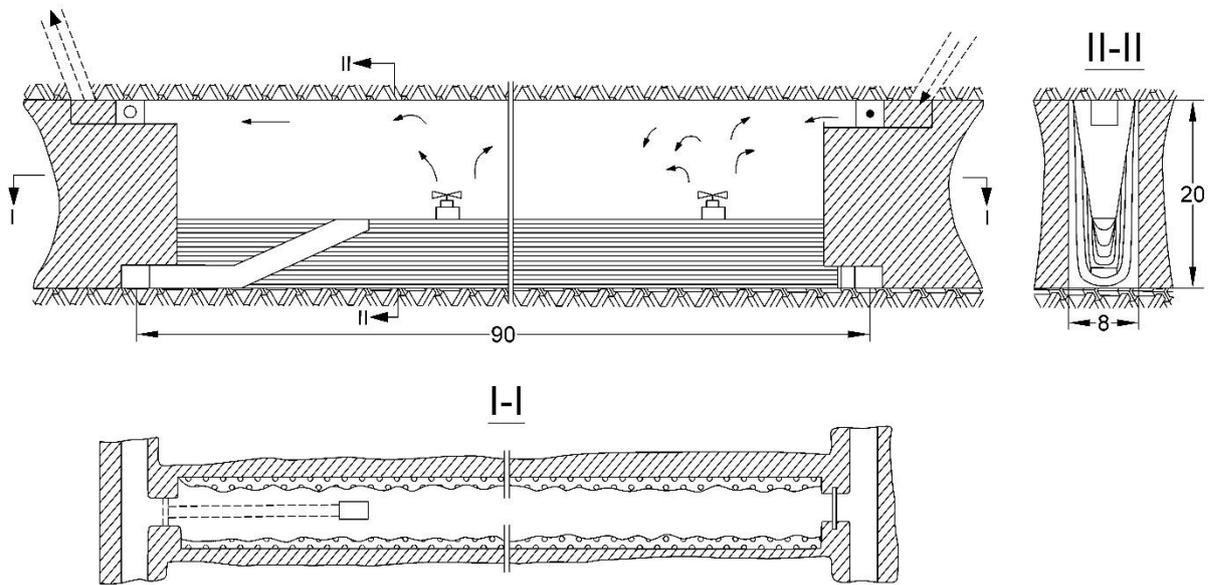


Рисунок 1.14 - Схема работ по закладке камеры

Указанная камерно-столбовая система разработки позволяет при высокой производительности труда значительно сократить расход крепежного леса, а в сочетании с льдозакладкой избежать больших потерь угля, намного упростив работы по управлению горным давлением. Интенсивное предварительное проветривание в морозные месяцы позволяет значительно лучше использовать охлаждающую способность воздуха при намораживании льда в подземных выработках [50]. Для намораживания больших объемов льда скорость движения воздуха, а, следовательно, и его расход, должны быть весьма велики, что в свою очередь требует вентиляторов большой мощности, особенно в начале закладочных работ. Данный способ позволяет намораживать в течение суток 100-150 м³ льда, что дает возможность увязать закладку льдом выработанного пространства с работами по выемке.

Использование льда в качестве закладочного материала в шахтах при разработке мощных пластов позволяет устранить трудоемкие работы по управлению кровлей и повышает безопасность работ в очистных выработках.

Разработка мощных пластов камерной системой с полной ледяной закладкой очистных выработок осуществляется без потерь полезного ископаемого в междукамерных целиках. Полная ледяная закладка очистных выработок при разработке мощных пластов позволяет в 2-3 раза сократить расход привозного крепежного материала. Использование естественного холода зимнего воздуха для производства ледяной закладки позволяет улучшить технико-экономические показатели угольных шахт, расположенных в северных районах [14]. Однако зачастую работы по намораживанию закладки кратно отстают от работ по выемке полезного ископаемого, что существенно ограничивает широкое использование рассматриваемой технологии.

1.3.2 Опыт разработки россыпных месторождений с использованием замораживаемой закладки

В настоящее время наблюдается снижение объема добычи из подземных россыпных месторождений, и можно предположить, что через 10-15 лет их промышленная отработка не будет иметь существенного экономического значения для России. Для россыпного золота наблюдается общая тенденция последних десятилетий – уменьшение добычи, а также доли в запасах и ресурсах минерально-сырьевой базы в России [72]. Крупных инвесторов не привлекают россыпи (за исключением отдельных месторождений) [8]. Таким образом, сложившаяся ситуация в меньшей степени будет способствовать изучению, освоению и использованию многолетнемерзлых россыпных месторождений, а также развитию на них новых технических средств и технологических возможностей. В виду этого, разработка россыпных месторождений с использованием замораживаемой закладки в диссертационной работе будет рассмотрена обзорно, с целью адаптации способов применительно к коренным месторождениям.

Отличительной особенностью разработки многолетнемерзлых россыпей является сезонная добыча, арктический климат и мерзлое состояние золотоносных рыхлых пород [107, 136]. Снижение устойчивости выработок в результате

естественной оттайки мерзлых песков (растепления), появление водопритока, ухудшение вентиляции затрудняет ведение подземных работ в тёплое время, поэтому летом разработку и обогащение песков ведут открытым способом. Наличие необходимого количества воды для промывки песков, также является положительным фактором. В холодный период года практически отсутствует водоотлив и появляется высокая устойчивость выработок, поэтому ведут подземные работы [76]. Необходимо подчеркнуть, что угольные и рудные месторождения отличаются от россыпных тем, что последние слагаются мерзлыми рыхлыми аллювиальными отложениями, содержащими значительное количество льда и в значительной степени варьируют свои прочностные свойства, которые определяются температурно-влажностным режимом пород, связанным с тепловым режимом шахт. В данном разделе рассмотрены только технологические схемы разработки мерзлых россыпей, как наиболее близкие по условиям применения замораживаемой закладки на рудных месторождениях криолитозоны.

Общеизвестно, что к наиболее крупным золотоносным провинциям мира относится Дальневосточный регион страны (включая Северо-Восток и Якутию), причем добыча большей части золота осуществляется из многолетнемерзлых россыпных месторождений (в том числе техногенных), с преобладанием подземного способа разработки [57, 137]. Разработка данных месторождений производится в основном камерно-лавной системой (рисунок 1.15, а), способной решить проблему эксплуатации ряда месторождений, находящихся в сложных мерзлотно-геологических условиях. По сравнению с ранее применяемой столбовой разработкой камерно-лавная система обеспечивает снижение трудовых затрат и лесных материалов за счет разреженной сетки крепления выработанного пространства. От сплошной системы разработки широких россыпей отказались в пользу камерно-лавных из-за участившихся обрушений пород основной кровли и завалов лав [40].

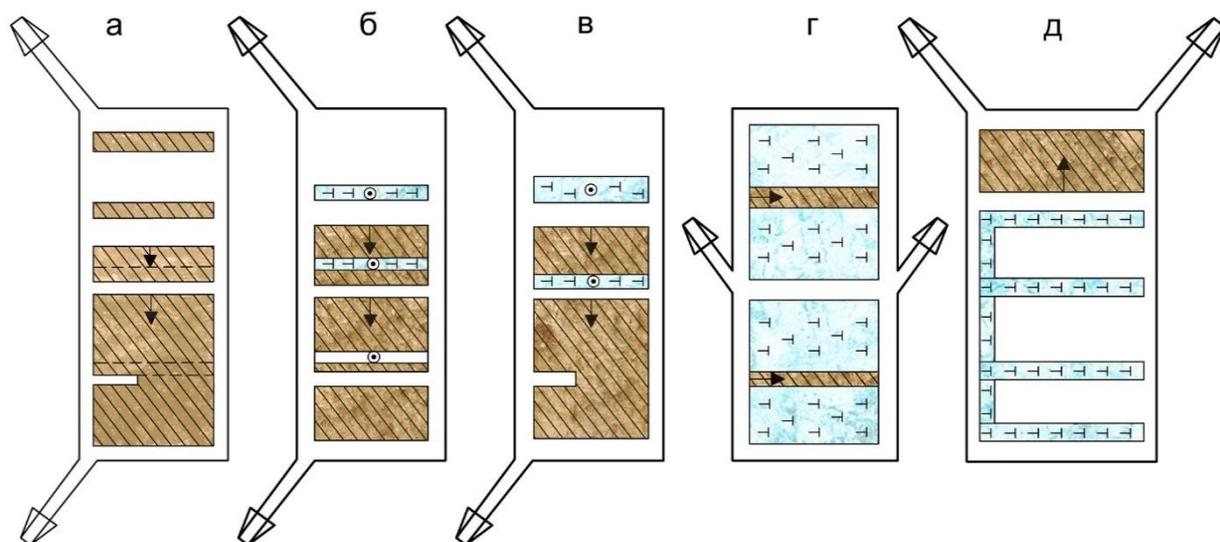


Рисунок 1.15 - Принципиальные схемы поддержания выработанного пространства с помощью породных и ледяных целиков:

а – камерно-лавная система разработки с оставлением породных целиков; б – с возведением ледяных целиков в специально пройденных выработках; в – в расширенных междукамерных рассечках; г – с целиками, образованными в результате замерзания вода в затопленных выработках; д – столбовые системы разработки с возведением целиков вслед за подвиганием очистного забоя

Недостатком камерно-лавной системы является значительный удельный объем подготовительно-нарезных выработок (до 25-30 %), стоимость 1 м³ которых в два раза выше очистных, а производительность труда при их проходке в два раза ниже [118]. Существенным недостатком являются также значительные потери продуктивных песков в междукамерных целиках [150]. Потери полезного ископаемого (зависящие от системы разработки) при столбовой системе составляют 2-5 %, при камерных 8-12 %, достигая в сложных горно-геологических условиях 20 % [51]. Хотя послойное намораживание как тип закладки и способ управления кровлей применялось в условиях подземной разработки россыпных месторождений Северо-Востока ранее, научное обоснование и первый промышленный эксперимент по использованию льда в виде закладочного материала на разработке россыпей осуществлён в мировой горной практике в 1969 г. (прииск «Курчатовский») [149]. К этому времени относится и начало проведения комплексных исследований ВНИИ-1 совместно с Полярным горно-обогатительным комбинатом (ГОКом), выполненных в 1974-1976 гг., которые

позволили разработать оптимальные технологические параметры возведения ледяных целиков в шахтных условиях, провести опытно-промышленную проверку технологии отработки шахт с искусственными целиками, а также сделать её технико-экономическую оценку [151]. В результате экспериментов установлено, что оптимальная толщина слоя воды при послойном намораживании с учетом технологических условий и технико-экономических показателей составляет $1,5 \div 2$ см (большее значение – при более низких температурах атмосферного воздуха). Испытания данной технологии в производственных условиях показали техническую возможность и экономическую целесообразность её применения на россыпных шахтах Северо-Востока [125]. Позднее ВНИИ-1 предложил несколько вариантов возведения искусственных целиков на основе льда, которые были апробированы в производственных условиях (см. рисунок 1.15):

- **вариант 1** - послойное намораживание льда путем подачи воды с дневной поверхности через скважину в специальную «глухую» выработку (см. рисунок 1.15, б), в результате послойно намораживалось 9 искусственных целиков длиной 50 м, шириной $3,5 \div 4$ м и высотой $2,2 \div 2,5$ м. Общая продолжительность возведения ледяных целиков 35-40 суток из них $40 \div 45$ % составили простои по организационно-техническим причинам [124, 127];

- **вариант 2** - возведение ледяных целиков путем подачи воды через скважину в специально расширенных и отгороженных гидроизоляционными перемычками выработках (см. рисунок 1.15, в); послойно намораживалось 8 ледяных целиков длиной 50 м, шириной 3 м и высотой 2,6 м. Общая продолжительность возведения целиков $40 \div 50$ суток, себестоимость намораживания 1 м^3 льда дороже первого варианта на 29 % [150];

- **вариант 3** – поддержание кровли в камерах-лавах производится ледяными целиками, образованными путем полного затопления шахты (см. рисунок 1.15, г); минимальное время, необходимое для полного замерзания воды в условиях шахт прииска «Ленинградский» и аналогичных им (при температуре вмещающих пород, равной $-4 \div -5$ °С и мощности около 2 м) – три года (средняя скорость роста льда равна $0,3 \div 0,4$ м в год на одну плоскость намерзания [9]);

- **вариант 4** – возведение ледяной крепи (намороженной на поверхности) вслед за подвиганием лавы (ледяной массив разрезают на блоки размером $2 \times 2 \times 1,4$ м с помощью электрического тока); ледяные целики возводятся в два ряда с расстоянием между рядами 12 м, размер ледяных блоков $2 \times 2 \times 1,6$ м, ширина сдвоенного ледяного целика 4,1 м (см. рисунок 1.15, д); основной недостаток – высокая трудоемкость [161];

- **вариант 5** – наиболее рациональным способом создания искусственных целиков является применение льдопородных опор, в качестве основного компонента которых может служить материал продуктов промывки (гравийно-галечный материал), что позволит резко сократить расход воды, необходимой для образования мерзлой монолитной смеси; наиболее рациональной системой разработки с применением самоходной техники и крепления льдопородными опорами является панельно-столбовая (шахтное поле разбивается на эксплуатационные участки – панели, каждая панель подготавливается оконтуривающими штреками, отработка столбов производится сплошной выемкой от бортов россыпи по направлению к штреку – рисунок 1.16).

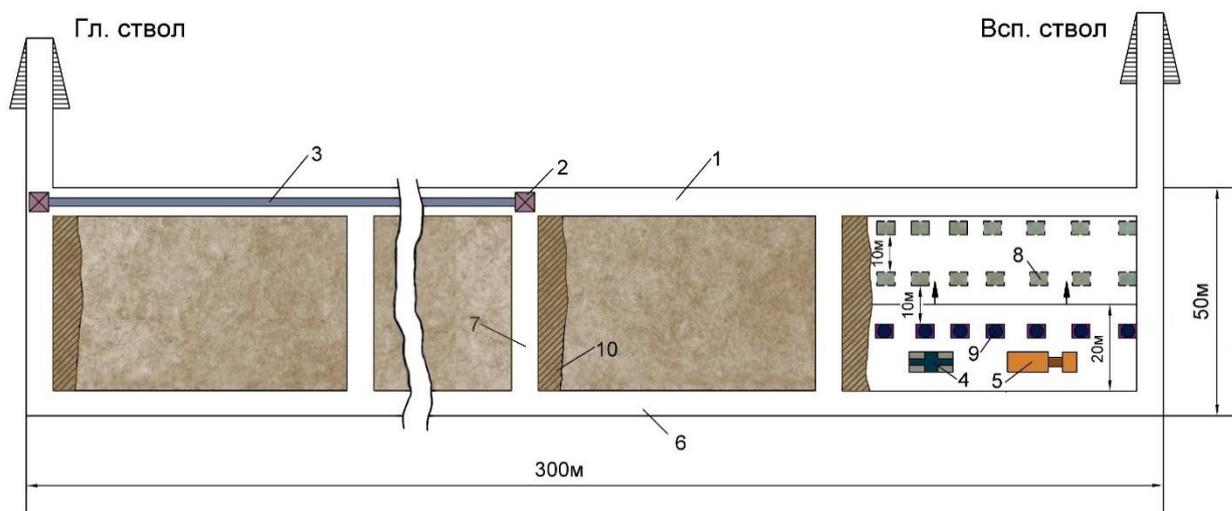


Рисунок 1.16 - Панельно-столбовая система разработки с использованием льдопородных опор: 1 - транспортный штрек; 2 - разгрузочный бункер; 3 - конвейер; 4 - буровая каретка; 5 - погрузочно-доставочная машина; 6 - вентиляционный штрек; 7 - панельный штрек; 8 - льдопородные опоры; 9 - пневмобаллонные крепи; 10-панельный целик [162].

Технология возведения искусственных льдопородных целиков в данном варианте имеет следующую последовательность: на поверхности шахты в

предварительно сооруженную гидроизоляционную металлическую опалубку насыпается слой гравийно-галечного материала мощностью $0,3\div 0,5$ м и заливают необходимое количество воды [74]. После полного замораживания слоя приступают к замораживанию последующих слоев. Таким образом, можно намораживать льдопородные блоки любых размеров [135].

На рисунке 1.17 приведены схемы деформации породного и ледяного целиков, из которых видно, что при одинаковой суммарной величине оседания кровли её расслоение в случае поддержания ледяными целиками происходит с меньшей интенсивностью, вследствие податливости и увеличения опорной площади последних. Следовательно, в камерах, ограниченных породными целиками, обрушение нижней отслаивающейся пачки пород кровли может произойти гораздо раньше, чем в камерах с ледяными целиками, т. е. применение искусственных ледяных целиков обеспечивает более безопасные условия труда при очистной добыче песков.

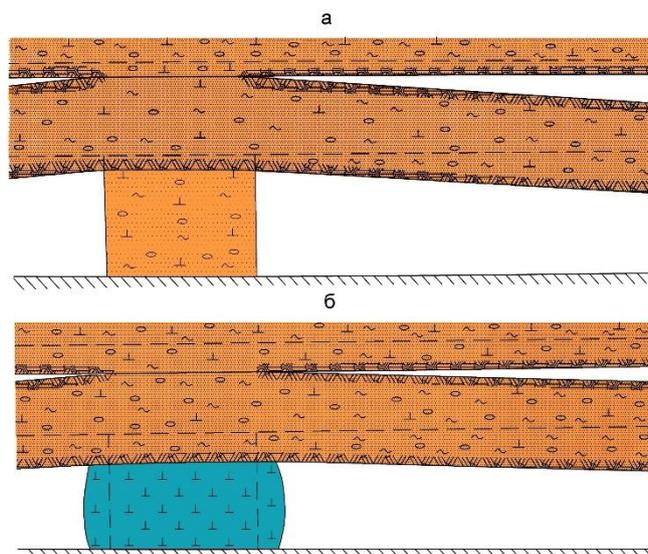


Рисунок 1.17 - Схемы деформации породного (а) и ледяного (б) целиков во взаимодействии с оседающей и расслаивающейся кровлей

При создании любой новой технологии требуется, чтобы она была не только технически осуществима, но и экономически целесообразна. Экономическая оценка эффективности применения вышеперечисленных 5 вариантов ВНИИ-1, показала, что из всех способов возведения ледяных целиков предпочтение отдается 5-му как более экономичному, а из трех первых вариантов наиболее целесообразно

применение 3-го, который предусматривает затопление и последующую повторную отработку шахты только по целикам (не требует дополнительных затрат на приобретение и внедрение какого-либо нового горного оборудования и машин, ранее не применявшихся на предприятиях) [161].

Основные причины, сдерживающие применение намораживания на россыпных шахтах в зоне многолетней мерзлоты – это длительность возведения закладочного массива (3-4 года), а также дефицит воды в зимний период на некоторых месторождениях [42, 160].

1.3.3 Опыт разработки рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки

Первое обобщение использования льда в качестве закладочного материала, опыты его промышленного применения, а также анализ его практического использования и рациональность применения в горной промышленности были проведены В.П. Бакакиным [10].

Наиболее основательно и в достаточно крупном промышленном объеме льдозакладка была применена на руднике № 3/6 Норильского горно-металлургического комбината (впоследствии с 1959 г. и до закрытия в 1965 г. назывался "Таймырский"). Месторождение представлено группой залежей медно-никелевых руд с углом падения $2\div 20^\circ$. Промышленная мощность $2\div 60$ м. Мощность отдельных жил $3\div 5$ м, расстояние между ними до 10 м. Породы и руды месторождения относятся к крепким, так коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова составляет для габродиабазов – 10, руды – $8\div 14$; объемный вес руды $3\div 4,5$ т/м³. Глубина залегания месторождения от поверхности варьировалась от 40 до 100 м. Залежь вскрыта штольнями, штреками и рудоспусками. Рудное тело подготовлено этажными панельными штреками, из которых через 60 м проведены уклоны. Сечение откаточных штреков $6,5$ м², панельных штреков и уклонов 5 м² [82].

Выемка производилась камерно-столбовой системой, в которой для предохранения от обрушения между камерами оставлялись ленточные целики шириной 4 м, обрабатываемые впоследствии при заложенных камерах. Необходимость в закладке камер была обусловлена стремлением к полному извлечению богатых руд без оставления целиков. Параметры системы: ширина камер 11 м, длина 50 м (реже до 70 м), высота от 2 до 8÷9 м в местах раздува залежи и прирезки богатых руд; междукамерных целиков 4 м, панельных целиков 6÷8 м.

В 1949 г были начаты единичные опыты по намораживанию льда в очистных выработках. Средняя температура с ноября по март составляла -22 °С. При этом режиме для заполнения камеры объёмом 1500 м³ льдом на всю высоту очистного пространства (3 м) понадобилось 60÷80 суток при послойном намораживании льда и 30÷40 суток при смешанной закладке льдом и породой.

В 1950 г начались промышленные испытания по закладке выработанных камер льдом. Намораживание льда производили без изменения режима проветривания, существующего на руднике, при естественной температуре в камерах ($-2,5$ летом и -6 °С зимой, в основном при температуре -4 ÷ -5 °С). В тупиковую камеру с поверхности закачивалось до 1000 м³ воды 2 раза в месяц, где вода охлаждалась до температуры $0,5$ ÷ 1 °С. Предварительно в закладываемой камере устанавливались 2 перемычки (из досок и глины): первая на нижней части камеры изолировала от проникновения воды в откаточную выработку, вторая на верхней части служила для образования резервуара (распределительного бассейна) ёмкостью 40 ÷ 50 м³. После окончания подготовительных работ бассейн (образованный верхней перемычкой) заполнялся охлаждённой водой из «подземного резервуара», которая непрерывно поступала в камеру тонкими струями через просверленные в передней стенке отверстия диаметром 4-6 мм. Процесс намораживания шёл непрерывно, и вся вода замерзала доходя до нижней части камеры. Для увеличения активной площади намораживания льда через 15÷20 м по падению, камеру делили поперечными стенками из дерева на несколько участков, образующих уступы намораживаемого льда (рисунок 1.18).

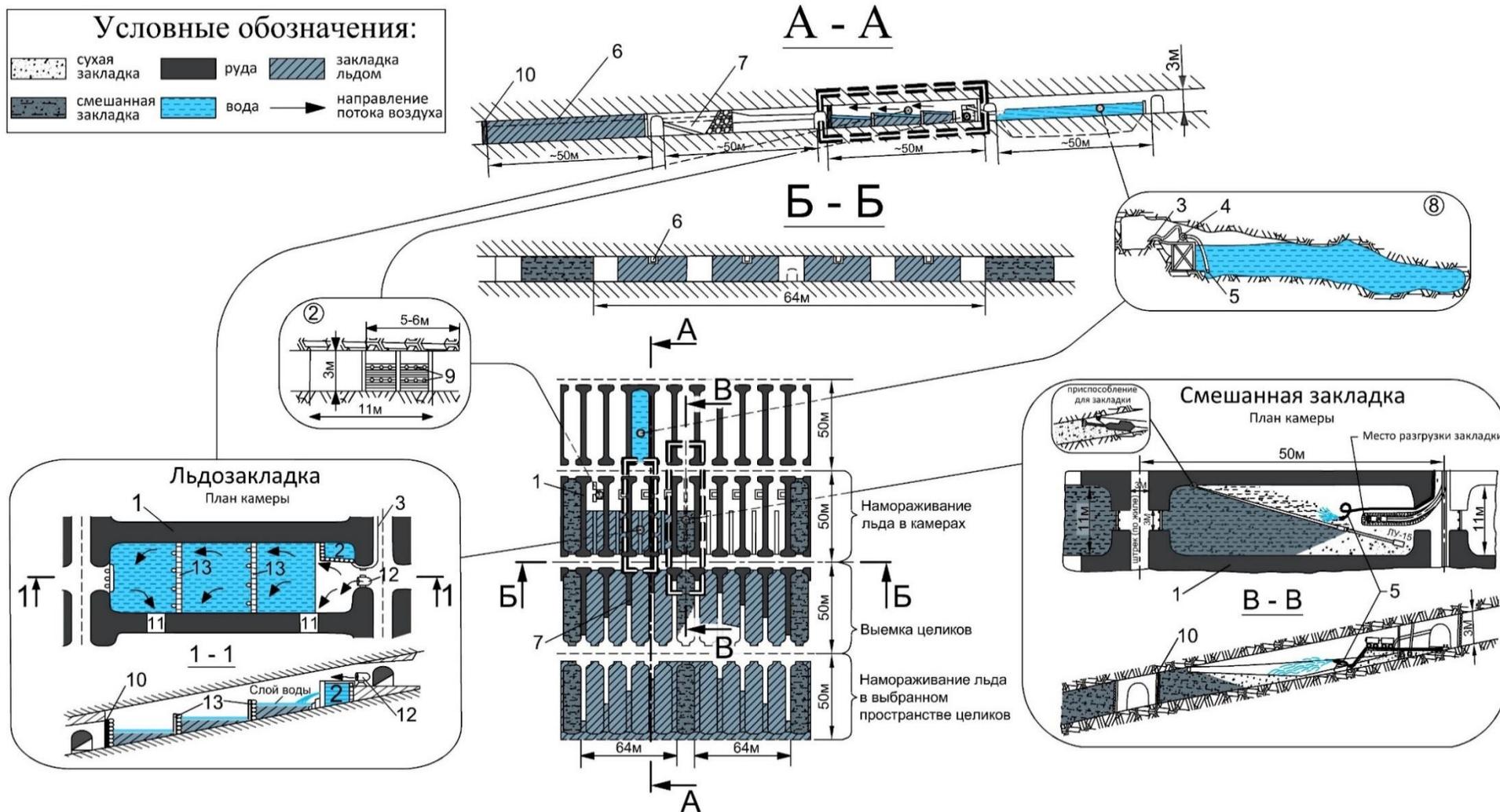


Рисунок 1.18 - Полная схема организации работ по закладке выработанного пространства: 1 — рудные целики; 2 — распределительный бассейн в камере (объем 50 м³); 3 — водопровод; 4 — центробежный насос; 5 — водозаборный шланг; 6 — вентиляционный канал; 7 — выемка межкамерного целика; 8 — камера-бассейн (объем до 1000 м³); 9 — отверстия (d = 4—6 мм); 10 — водонепроницаемая перегородка; 11 — сбойка; 12 — вентилятор; 13 — ограждение из досок

Кроме того, на руднике широко применялось цементирование льдом сухой закладки, для чего в нижней части камеры, заполненной водой, сооружалась деревянная перемышка (с герметизацией глиной). Далее в камеру периодически закачивали $40\div 50$ м³ воды, охлажденной в бассейне. Первая порция воды в закладке замерзала полностью в течение 10-12 дней, а последующие – через 3-4 суток. Процесс замерзания воды при создании смешанной закладки происходил в 1,5 раза быстрее, чем при послойном замораживании. Полив водой производили периодически, по мере заполнения камеры породой. Монолиты из породы и льда хорошо выдерживали повышенное горное давление. Работы по льдозакладке проводились в период с 1951 г по 1956 г в объеме – до 40 000 м³ льда в год. В 1953 г объём льда, заложенного в камеры достиг почти 5 000 м³ в месяц. По отношению ко всему объему закладочных работ объём ледяной закладки в 1956 г. составлял 27÷30 %.

Экономическая выгода от внедрения на руднике льдозакладки составила свыше 1,8 млн. руб. в год. На протяжении всего времени промышленного применения льда для закладки, работы велись без учета результатов экспериментальных исследований и без использования средств и методов, интенсифицирующих процесс намораживания льдозакладки.

Отдельного рассмотрения заслуживают способы искусственное замораживания с применением криогенных хладагентов. В 1960 г Ушаков В.М. предложил способ льдозакладки для зон с положительной температурой [150]. При этом способе закладки в выработанном пространстве монтируют огороженные перемышками трубопроводы для циркуляции рассола, затем производят заполнение выработанных камер породой, насыщенной водой. За счет циркуляции хладагента в трубах происходит промораживание гидрозакладки до превращения её в льдопородный целик. Данный способ разработки месторождения и управления горным давлением показан на рисунке 1.19. Под руководством сотрудников Ленинградского горного института в 1973-1976 гг. были проведены исследования на руднике

Каула-Котсельваара комбината Печенганикель [43, 44]. Производственным опытом предшествовали аналитические и лабораторные исследования. В 1975-1976 гг. на руднике Каула-Котсельваара была проведена экспериментальная отработка междукамерного целика с предварительным замораживанием закладки соседних камер.

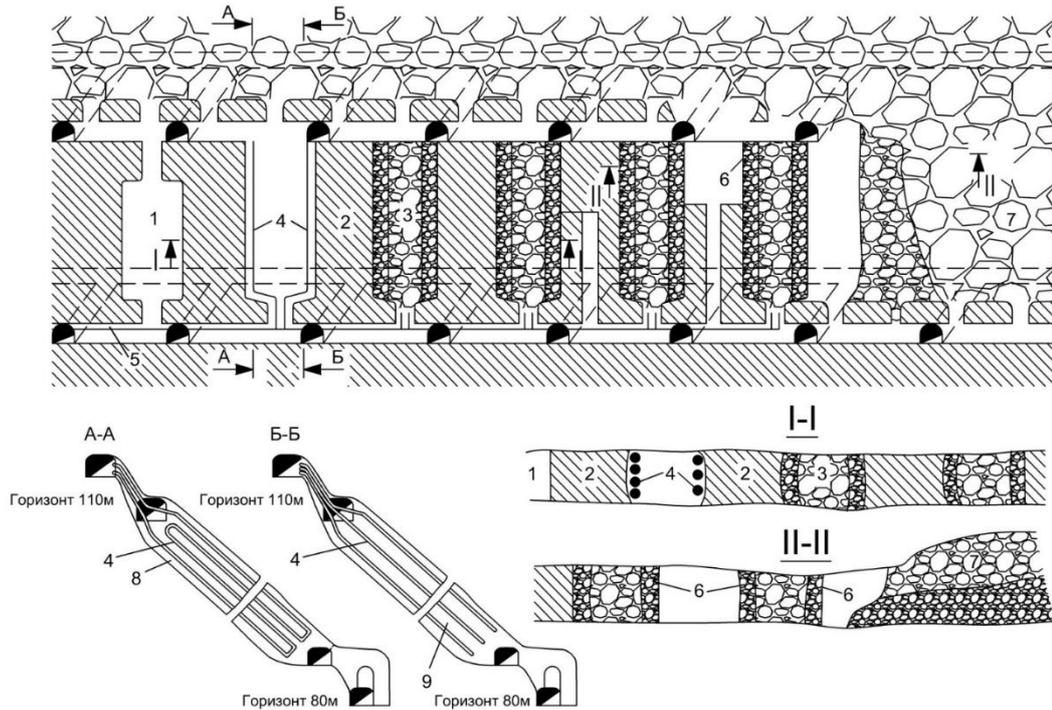


Рисунок 1.19 -Схема разработки пологопадающего рудного тела с выемкой междукамерных целиков под защитой временных опор - льдопородных стенок:
 1 - камера; 2 - рудный целик; 3 - закладка; 4 - замораживающие колонки (змеевик); 5 - рассолопроводы; 6 - льдопородная стенка; 7 - обрушенные породы; 8 - заложная камера блока № 19; 9 - заложная камера блока № 20

Выемка залежи осуществлялась в две стадии: в первую стадию короткими забоями отработывали камеры с оставлением между ними рудных целиков. Отработанные камеры закладывали пустой породой, подавая в закладку воду и замораживая специальными колонками с рассольным охлаждением. После закладки камер на второй стадии производили выемку междукамерных целиков [95]. Рудное тело было представлено филлитами и брекчией средней мощностью 3 м с углом падения 33-35°. Разработка осуществлялась камерно-столбовой системой с ленточными целиками. Ширина камер 20-22 м, длина по падению 30-35 м, ширина междукамерных целиков 10 м.

Для осуществления эксперимента по длине отработанных камер в 1,5 м от междукамерного целика были установлены замораживающие колонки диаметром 0,1 м (расстояние между колонками 1 м), закрепленные на стойках распорной крепи. После монтажа и подключения колонок к холодильной установке, камеры были заполнены породой от проходки горных выработок. В качестве закладочного материала использовали породы, получаемые при проходке выработок (филлиты), крупностью 0-200 мм. Перед замораживанием закладочный материал увлажняли до 8-10 %, подавая воду непосредственно в камеру. Полученные данные позволили обосновать рациональные режимы замораживания и необходимую толщину льдопородных опор ($b = 3 \div 4$ м при прочности замороженных пород со средней влажностью около 10 % в пределах 5÷7 МПа) [43]. По окончании закладки камер и монтажа, колонки подсоединяли к замораживающей станции, смонтированной в заезде между полевым и рудным штреками горизонта 110 м вблизи от опытных блоков. В блоке № 20 были смонтированы обычные колонки из трех стальных труб диаметром 114 мм, а в блоке № 19 – в виде змеевика из четырех труб. Для замораживания использовали холодильную установку ФДС-20М в одноступенчатом варианте с холодопроизводительностью 30 тыс.ккал/ч. В качестве хладагента использовали фреон-22, а в качестве хладоносителя – водный раствор хлористого кальция. Камеры холодильной установки проветривали за счет общешахтной депрессии. Первый период замораживания продолжался с 26 января до 7 марта 1976 г. Толщина образовавшихся льдопородных стенок в камерах блоков № 19 и № 20 составляла соответственно 3,6 м и 3,5 м. После отключения холодильной установки был произведен массовый взрыв междукамерного целика объемом 400 м³ при расходе 673 кг ВВ. Применение камерной системы разработки с замораживанием закладки при выемке междукамерных целиков по сравнению с применяемой на руднике системой слоевого обрушения способствовало улучшению основных технико-экономических показателей: уменьшение

потерь руды с 12 до 4,2 %, разубоживания с 8,8 до 4,3 %, снижение себестоимость с 12,32 до 9,4 руб/т.

Эксперимент показал, что применение замораживания на отдельных участках при общей положительной температуре рудничного воздуха не оказывает значительного влияния на общешахтное проветривание и температуру воздуха. При полном обнажении стенок замороженной закладки температура воздуха в очистной камере понижается всего лишь на $1 \div 1,5^{\circ}\text{C}$.

Эксперимент был успешно завершён в мае 1976 г. Таким образом, данный способ закладки для условий Северо-Востока может быть рекомендован при создании льдопородных целиков в подмерзлотных зонах. Охлаждение рассола в замораживающих трубах может быть произведено за счет отрицательных температур наружного воздуха.

Большую роль в изучении вопроса использования явления смерзания и оттаивания для совершенствования разработки рудных месторождений играют теоретико-экспериментальные работы кафедры разработки рудных месторождений и горной теплофизики ЛГИ под научным руководством проф. Ю.Д. Дядькина. Начав свои первые работы в 1973-1976 гг. на руднике Каула-Котсельваара комбината «Печенганикель», они продолжили в 1984-1986 гг. лабораторные и шахтные исследования на Наталкинском месторождении (рудник им. А. Матросова) ПО «Северовостокзолото» [104].

Опытно-промышленные испытания показали на незначительные недостатки у рассматриваемой технологии и удорожание работ на 10 % по сравнению с применяемой системой разработки с магазинированием. Основным результатом экспериментальных работ стало доказательство возможности применения льдопородной закладки в условиях рудника.

В 80-х годах 20 века ИГДС СО РАН была разработана и впоследствии внедрена в промышленных масштабах (использовалась до 2007 года) технология камерной выемки руды с льдопородной закладкой, на золоторудном месторождении Бадран (Якутия) артель старателей "Западная" (сейчас Западная Голд Майнинг Лимитед). Принципиальная схема технологии

ведения горных работ на руднике Бадран приведена на рисунке 1.20. Рудное тело (средней мощности) разделено на выемочные горизонты, расположенные по падению через 50 м, по простиранию ограниченные наклонными стволами. Горизонт отрабатывают в две стадии: вынимают первичные камеры (1) через одну, закладывают, промораживают; после этого вынимают междукамерные рудные целики (2). Отработка камер идёт в нисходящем порядке выемки слоев по восстанию рудного тела. Отбойка - мелкошпуровая, уборка и доставка - скреперная (4). По окончании очистных работ сооружается бетонная перемычка (3). Закладочный материал (1) подается с поверхности через породоспуск (6), кроме того используются пустые породы от проведения выработок. Рядом с породоспуском находится скважина для водоводного шланга (5), служащего для подачи воды в закладываемые камеры. Слои возводят мощностью $0,4 \div 0,6$ м, количество воды изменяется в пределах от 11 до 23 % от объема закладки.

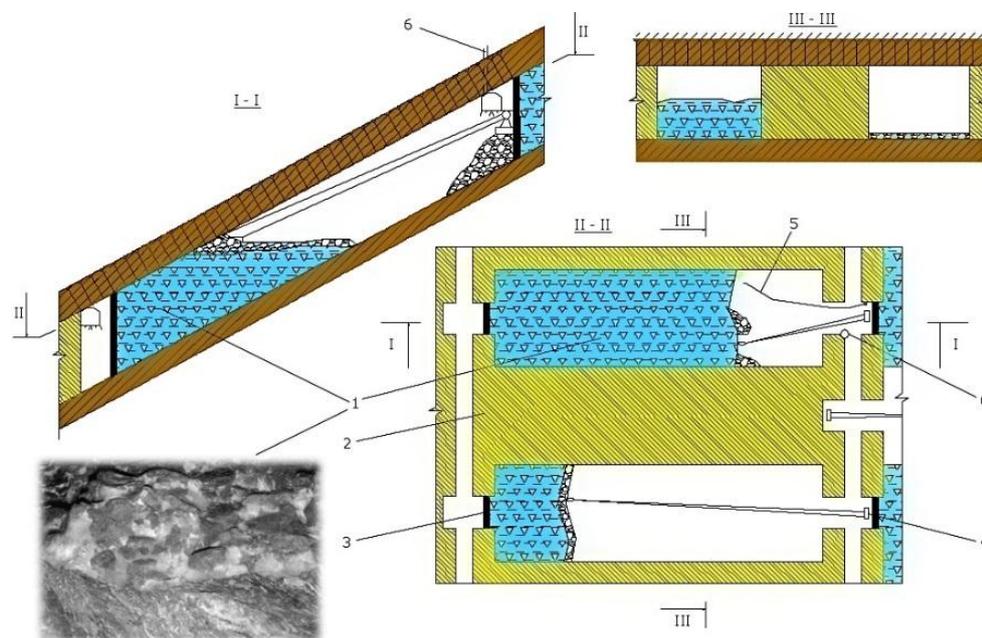


Рисунок 1.20 - Принципиальная схема технологии добычи руды с использованием льдопородной закладки на руднике Бадран: 1 – первичные камеры (с закладочным материалом [76]); 2 – временные междукамерные целики; 3 – бетонная перемычка; 4 – скреперная лебедка; 5 – водоводный шланг; 6 – породоспуск

Камеры второй очереди (2) отрабатываются после набора искусственными льдопородными целиками (1) необходимой нормативной прочности на сжатие ($3 \div 5$ МПа). Междукамерные целики отрабатывают через

1,5÷2 месяца после закладки смежных первичных камер [88]. Для закладки камеры объемом 40 тыс.м³, погашаемого наклонного ствола (2456 м³), потребовалось 72 тыс.т предварительно фракционированной отвальной породы и 8500 м³ воды. В заполненное породой выработанное пространство вода подавалась самотеком. Для интенсификации процесса смерзания в камеру нагнетался холодный воздух вентилятором местного проветривания ВМ-6М.

Промышленное внедрение технологии добычи руды с замораживаемой закладкой успешно осуществлено на золоторудном месторождении Бадран (Якутия), где первоначально использовалась камерно-столбовая система. В результате удалось снизить потери в 10 раз (до 3 %), а разубоживание – в 1,5 раза (до 21 %). Добыча руды составила более 400 тыс.т. [101].

1.4 Анализ и обобщение зарубежного опыта разработки месторождений криолитозоны с использованием замораживаемой закладки

Отдельного внимания заслуживает зарубежный опыт применения замораживаемой закладки. Одним из первых предприятий, которое применило ледяную закладку стал рудник «Рэнкин» (The North Rankin Nickel Mine) в Канаде. Добыча на предприятии велась с 1957 по 1962 гг. В 1958 г. на руднике «Рэнкин» была успешно применена закладка выработанного пространства дробленным льдом, который намораживали на поверхности и по специальной выработке подавали в шахту. Новый метод оказался весьма экономичным: 1 м³ льдозакладки обходился предприятию в 0,12 долл., тогда как 1 м³ закладки хвостами обогатительной фабрики и гравием стоил 2 долл. В течение года было наморожено около 25 тыс. м³ льда и сэкономлено 50 тыс. долл, что подтверждает высокую эффективность льдозакладки [52, 126, 150].

На руднике шведской компании «Болиден» ледяная закладка применялась при разработке рудной залежи мощностью 6 м (рисунок 1.21),

температуре горного массива $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (таблица 1.3). Число рабочих дней в году – 225. Способ слоевой нисходящей выемки руды под ледяным целиком разработан фирмой Минделко.

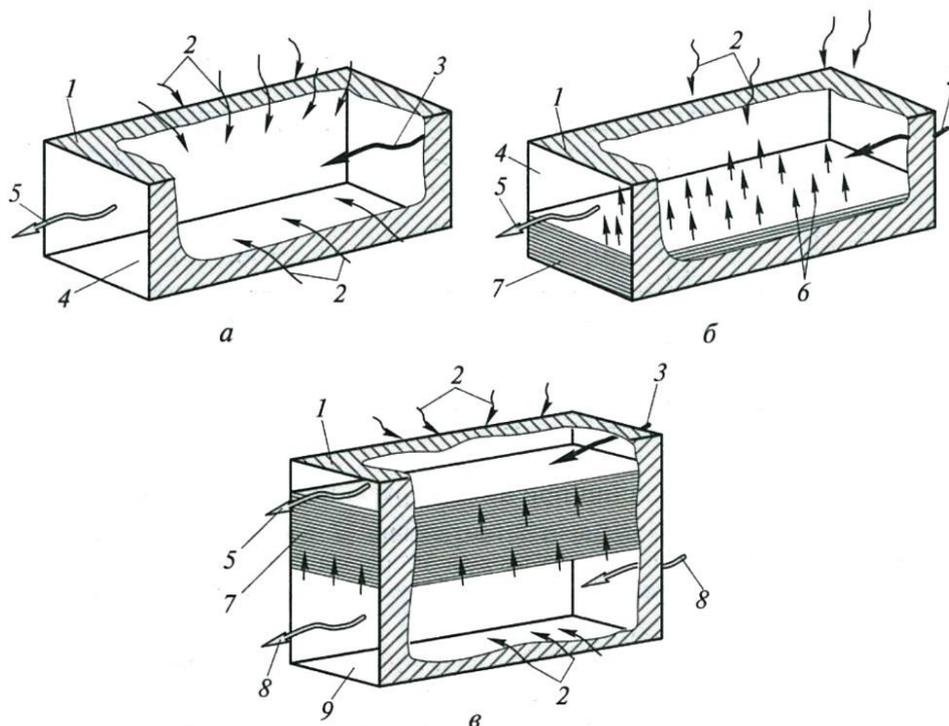


Рисунок 1.21 - Технологические стадии разработки руды под ледяным целиком [79]: а - первая стадия (предварительное охлаждение горного массива); б – вторая стадия (формирование ледяного закладочного массива); в - третья стадия (выемка руды с сохранением ледяного массива); 1 - вмещающие породы; 2 - перенос теплоты вмещающих пород; 3 — холодный воздух; 4 - закладываемая выработка; 5 - нагретый воздух; 6 - наращивание льда; 7 - ледяной массив; 8 - воздух рудничной вентиляции; 9 - очистное пространство под ледяным целиком.

Первоначально охлаждался горный массив, температура которого не должна превышать $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем намораживалась потолочина, под которой осуществлялась выемка руды при постоянном охлаждении потолочины сверху потоком воздуха, при этом не допускается смешивания с вентиляционной струей.

Таблица 1.3 – Рекомендуемые параметры при получении ледяной закладки

| Поток воздуха | | | |
|--|------------------------------|--|-----|
| Температура, $^{\circ}\text{C}$ | $-15\div-25^{\circ}\text{C}$ | Скорость, м/с | 4÷5 |
| Закладка | | | |
| Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ | 918 | Удельная теплоемкость, $\text{ккал}/(\text{кг}^{\circ}\text{C})$ | 0,5 |
| Теплота плавления, $\text{ккал}/\text{кг}$ | 80 | Коэффициент Пуассона | 0,5 |

Более высокой прочности и температуроустойчивости ледяной закладки добивались добавлением мелкого материала («хвостов» обогатительной фабрики) до 70 % по весу. Добыча руды происходит на нескольких горизонтах в процессе замораживания нового слоя льда (около 2 недель) с целью организации непрерывности производства [17].

В зависимости от климатических условий на 1 м³ добытой руды потребуется до 2 м³ льда. Себестоимость 1 т добытого полезного ископаемого возросла на 2 долл. при использовании льдозакладки. Предложенный метод позволяет увеличить извлечение руды, уменьшить ее разубоживание и сократить издержки производства на 50 % [139]. На рисунке 1.22 представлена технологическая схема горных работ под ледяным целиком.

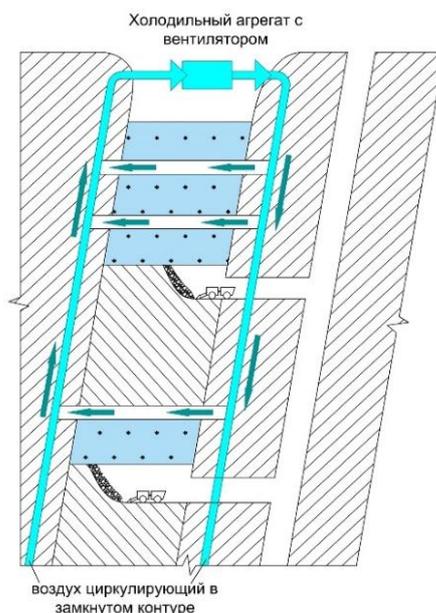


Рисунок 1.22 - Вариант слоевой выемки руды с нисходящим порядком отработки слоёв

Лабораторные исследования, связанные с возможностью применения замораживаемой закладки, определения времени ее замерзания, прочности при естественном и искусственном охлаждении с помощью хладагента были проведены Горным институтом технического университета Клаузаль [139, 170].

Хеннинг Фангель предложил использовать глетчерный лед на руднике Биджовагге (Bidjovagge) в Северной Норвегии, в качестве закладочного

материала [153]. Глетчерный лед, полученный из искусственного или естественного снега (расположенного на склонах гор) накапливают в старом карьере для применения в качестве искусственной потолочины при подземных работах (рисунок 1.23, А).

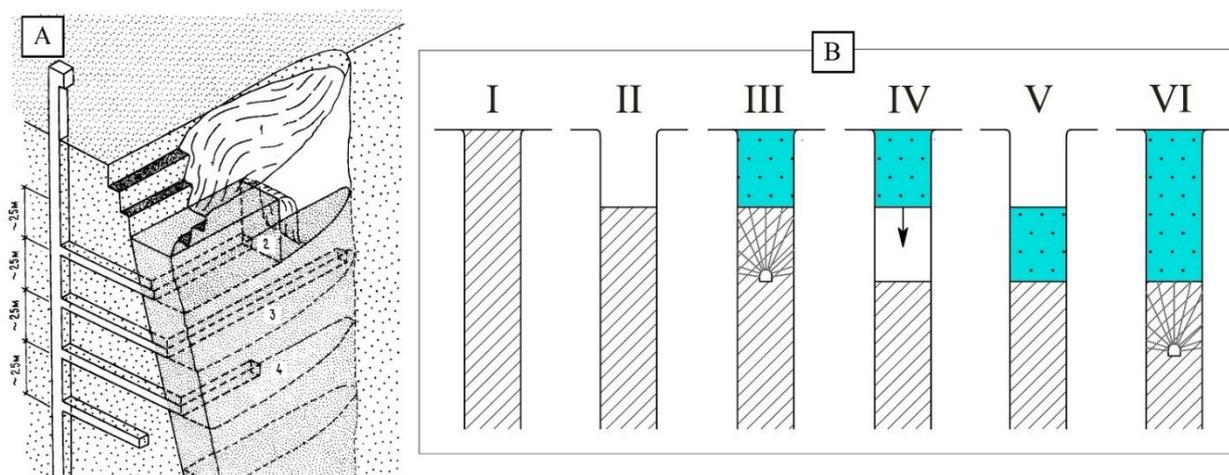


Рисунок 1.23 - А – система разработки месторождения с закладкой выработанного пространства из отработанного карьера искусственным льдом: 1 – отработанный карьер, заполненный искусственным ледником; 2 – откаточный горизонт, расположенный на 25 м ниже дна карьера; 3 – горизонт подсечки; 4 – подготовительный горизонт; В – поэтапная добыча: I – крутое и маломощное рудное тело во вмещающих породах; II – открытая разработка месторождения; III, VI – заполнение выработанного пространства льдом и подготовка к взрыву руды непосредственно под ледяным телом; IV – извлечение взорванной массы во время опускания ледяного тела вследствие отсутствия донной опоры; V – добавление льда (далее процесс повторяется)

Проведенные экономические расчеты показали, что внедрение вышеназванной технологии дает возможность снизить себестоимость подземной добычи до 15 норв.крон/т (при 10 норв.крон/т при открытых горных работах), а также получить дополнительную прибыль от разработки участков залежей низкосортных руд [153]. Схема поэтапной добычи полезных ископаемых с помощью заполнения льдом с охлаждающей поверхности путем постепенного опускания ледяного массива представлена на рисунке 1.23, В.

Следует отметить, использование подэтажной системы разработки с замораживаемой закладкой на свинцово-цинковом руднике Полярис в северной Канаде. Разрабатываемое рудное тело имело мощность более 90 м и обрабатывалось 30-ти метровыми подэтажами шириной 15 м. Каждый подэтаж имел предохранительный целик шириной 18 м, который обрабатывался на всю

высоту этажа, оставляя открытой льдопородную закладку высотой 90 м. Мощность предприятия по добыче составляла 1 млн.т руды в год.

1.5 Анализ технологий разработки месторождений ценных руд и разработка направлений совершенствования технологических схем выемки жил малой и средней мощности

Как показал анализ и обобщение мирового и отечественного опыта использования смерзающейся закладки существуют три принципиальных варианта организации работ по льдозакладке – в первом варианте работы по добыче и закладке ведутся одновременно (сюда же стоит отнести системы с использованием искусственного замораживания закладки); во втором варианте в летний период ведется только добыча руды, а в зимнее время выработанное пространство заполняется льдом; в третьем варианте – после выемки части камер весь рудник «затапливается и промораживается» в течение 3-4 лет, после чего извлекается оставшаяся часть запасов. Наиболее приемлем первый вариант (с точки зрения организации всего технологического комплекса работы рудника). По второму варианту значительно увеличивается фронт очистных работ и расходы, связанные с более продолжительным поддержанием выработок (транспортных, охлаждающих, вентиляционных) и других коммуникаций и устройств. Третий вариант наиболее экономичен и надежен, однако применим только при незначительной мощности рудных тел (до 3-5 м) и требует «консервации» на 4 года (или более) всего рудника и повторной проходки выработок по льду. Принципиальные варианты организации закладочных работ приведены на рисунке 1.24. Необходимо отметить, что сухая закладка может возводиться в любое время года, а замораживаемая закладка может возводиться только при наличии устойчивых отрицательных температур ниже -10°C .

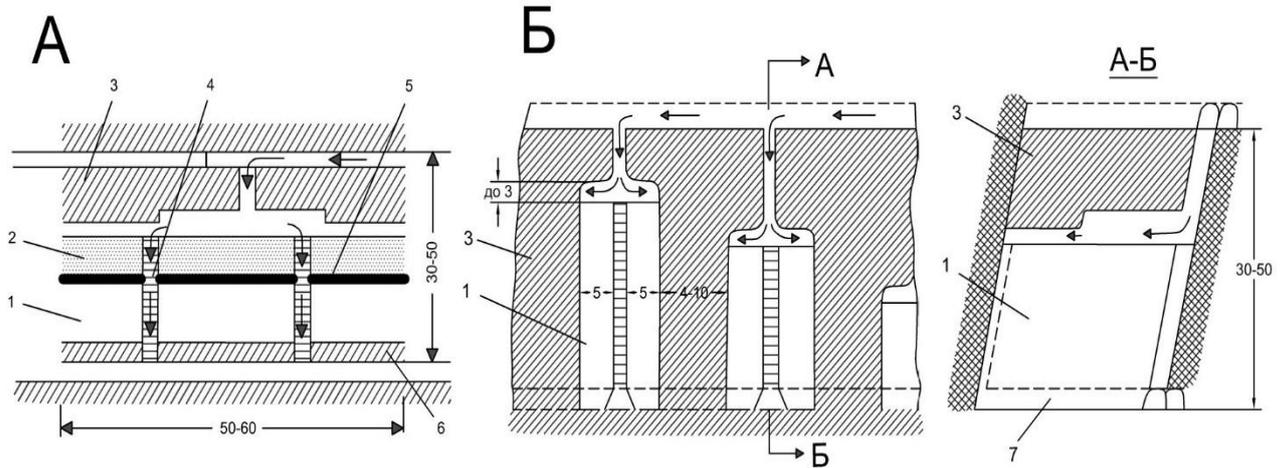


Рисунок 1.24 – А- Разработка слоями с комбинированной закладкой; Б - разработка слоями с выемкой камерами; 1 - лёд; 2 - сухая закладка; 3 - руда; 4 - рудоспуск; 5 - теплоизоляционное покрытие; 6 - целик; 7- вентиляционная просечка

Наиболее перспективным является послойное намораживание закладочного массива с использованием пустых пород на базе механизации самоходной техникой, что позволяет обеспечить высокую производительность труда рабочих и значительную производственную мощность рудника.

Для значительного числа месторождений весьма актуальным является намораживание льдопородных массивов на границе с поверхностью или потолочин, отделяющих карьеры от рудников при переходе с открытого способа отработки к подземному. Пример такой технологической схемы приведен на рисунке 1.25 (блок 1-Б рудной зоны 1 гор. 703 на руднике "Нежданинском" ПО "Якутзолото"). Эффективность данной технологической схемы была подтверждена на практике, и ее внедрение позволило отработать запасы с минимальными потерями и низким разубоживанием руды. Но главным фактором, сдерживающим широкомасштабное внедрение таких технологий, является значительная продолжительность процесса наморозки льдопородной закладки, особенно при температуре выше -10°C [37].

способ отбойки – мелкошпуровой. Объем выработанного очистного пространства блока № 1 составил 2 365 м³, мощность 1,6 м, длина блока 75 м, высота от 5 до 27 м; блок № 2 – 2 6750 м³, мощность 2,8 м, длина блока 100 м, высота от 16 до 31 м.

Закладка блоков производилась с поверхности засыпкой мерзлой породы (слой 3÷4 м) и поливом водой. Закладка производилась делювием бульдозерами. Количество породы и воды составляло 10:1. Закладка блоков позволила извлечь целики и дополнительно извлечь тысячи тонн руды, и получить экономический эффект около 700 тыс.руб [61].

На Дукатском месторождении при отработке маломощных и средней мощности рудных тел рассматривалась сплошная система разработки восходящими слоями с закладкой выработанного пространства дроблеными горными породами с упрочнением поверхностного слоя льдопородной закладкой (рисунок 1.27) в холодный период времени и твердеющей смесью – в теплый период (1-2 месяца в году) [46].

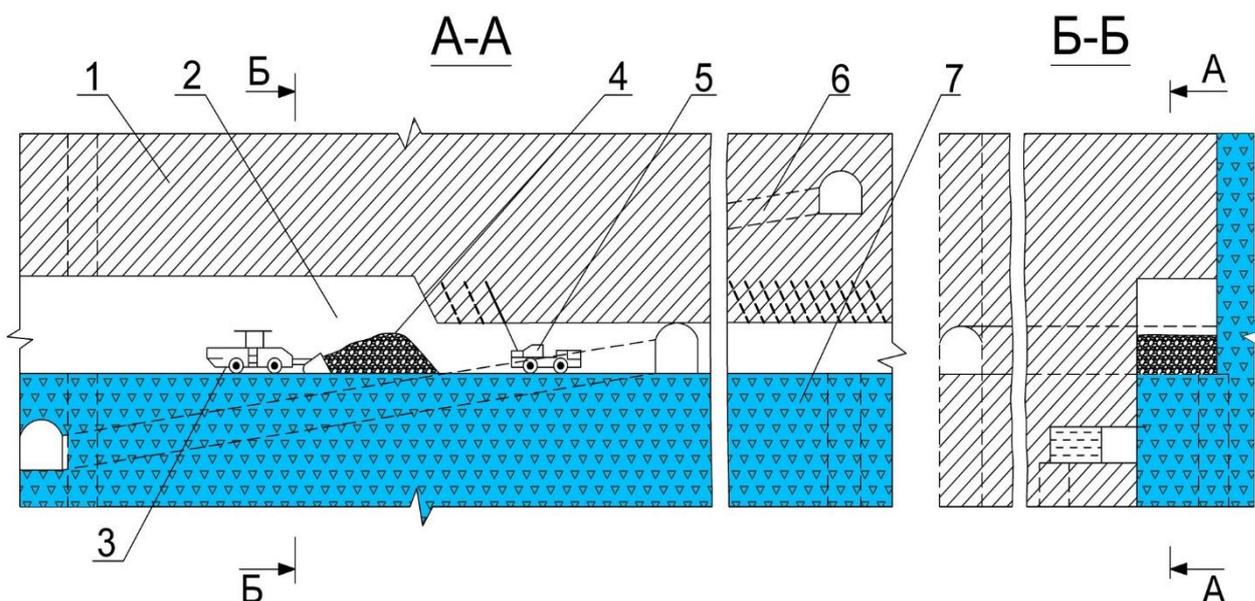


Рисунок 1.27 – Вариант сплошной системы разработки с льдопородной закладкой и восходящим порядком выемки слоев: 1 – горный массив; 2 – очистное пространство; 3 – погрузочно-доставочная машина; 4 – отбитая рудная масса; 5 – самоходная буровая установка; 6 – уклон; 7 – льдопородная закладка

При температуре -20 °С льдопородная смесь составила: щебень с размерами куса 70 мм – 60 %, песок 2÷5 мм – 30 %, вода – 10 % (на 1 м³:

1600 кг щебня, 700 кг песка и 170 кг воды). Инертные заполнители, составляющие основную по массе долю закладочной смеси получают на дробильно-сортировочном пункте. Предлагаемая схема отработки Дукатского месторождения позволяет обеспечить высокий уровень механизации и увеличить производительность забойного рабочего с $12\div 18$ т/см до $35\div 40$ т/см, снизить потери руды до 2 %, разубоживание до $8\div 10$ % и др. [80].

Применительно к III рудной зоне (Дукатского месторождения), мощностью более $5\div 7$ м была разработана камерная система выемки с льдопородной закладкой (рисунок 1.28) [46]. После отработки первоначальной камеры отрабатывается смежная камера и одновременно формируется льдопородная закладка в первоначальной камере. Далее отрабатывают последующие смежные камеры с одновременной льдопородной закладкой ранее отработанных камер. Для изоляции льдопородной закладки от рудничной атмосферы в теплое время года оставляется временная потолочина, которая обрушается в последнюю очередь. Камеры отрабатывают в направлении к льдопородной закладке ранее отработанных камер. Сравнение технико-экономических показателей двух систем разработки: двухстадийной выемки и камерной с льдопородной закладкой показало, что применение последней обеспечивает снижение периода подготовки как первоначальной, так и вторичной камер (с 8,6 до 5,2 мес. и с 6,5 до 4,3 мес. соответственно); удельного расхода ВВ на вторичное дробление – с 200 до 150 г/т; потерь руды – с 14,5 % до 5,0 %, разубоживания – с 21,9 % до 11 %.

Для мощных месторождений разработаны варианты камерной системы с подэтажной отбойкой руды на плоское горизонтальное днище с применением дистанционно управляемых погрузочно-доставочных машин и погашением выработанного пространства льдопородной закладкой, а также камерная система с наклонным днищем [99].

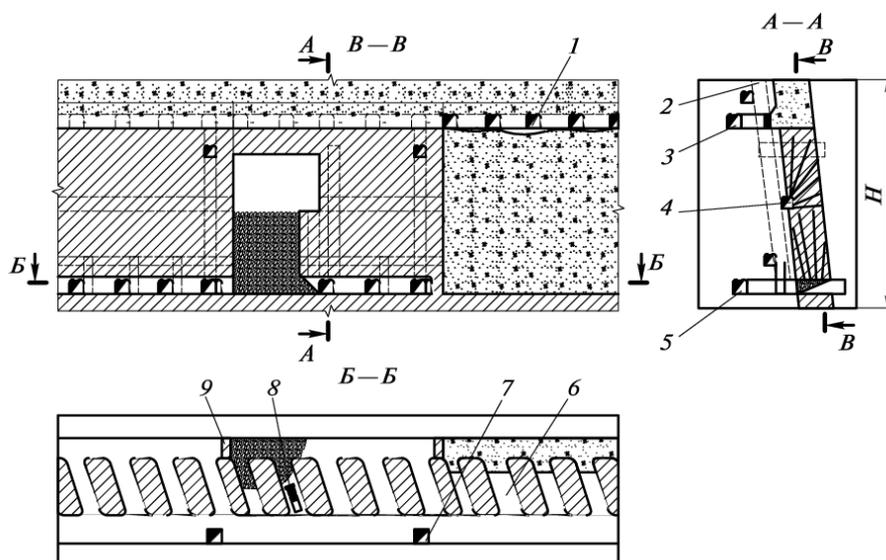


Рисунок 1.28 – Камерная система разработки с льдопородной закладкой в III рудной зоне Дукатского месторождения: 1 – закладочный орт; 2 – вентиляционный восстающий; 3 – вентиляционный штрек; 4 – буровая выработка; 5 – доставочный штрек; 6 – погрузочный заезд; 7 – рудоспуск; 8 – ПДМ с ДУ; 9 – изолирующая перемышка

В данной работе в качестве экспериментальной базы принято месторождение Лунное, которое в значительной мере аналогично Дукатскому (рудным зонам со средней и малой мощностью). Особенностью рудных тел на Дукатском и Лунном месторождениях является их залегание. Практически полностью рудные тела располагаются в пределах низкогорья и среднегорья. Мощность толщи ММП в условиях низкогорья составляет 150-300 м и температура у подошвы яруса годовых обменов – минус 2,5-5 °С. Под площадями среднегорья эти показатели составляют соответственно 300-350 и более метров и минус 7,5 °С.

Величина геотермической ступени на участках низкогорья и среднегорья достигает 50-60 м на 1 °С. Мощность сезонного талого слоя изменяется от 0,4 до 3,0 м.

С учетом состава вмещающих пород и их сочетания Дукатское и Лунное месторождения относятся к типу месторождений с неслоистым массивом горных пород.

Рудное тело VII рудной зоны (VII р.з.) месторождения Лунное имеет минеральный состав, представленный кварц-родонитовым типом руды и

определенные структурно-текстурные особенности. В подчиненном количестве и переменных соотношениях присутствуют родохрозит, адуляр, кальцит, хлорит, эпидот. Сульфидные минералы развиты в виде вкрапленности, гнезд, линзовидных прожилков в призальбандовых и центральных частях жил. Представлены они пиритом, халькопиритом, галенитом, сфалеритом, редко марказитом, арсенопиритом. С ними тесно ассоциирует серебряная минерализация. Структура руды мелкокристаллическая, текстуры колломорфные, тонкоритмичные, полосчатые, иногда брекчиевидные.

Руды среднеустойчивые. Вмещающие породы: алевролиты среднестойчивые. Система трещин хаотичная и может разбивать массив на большие и малые блоки, вследствие чего на данном участке возможно заколообразование, что в свою очередь может привести к вывалу значительной массы горных пород. Важным фактором является наличие многолетней мерзлоты и заполнение трещин льдом, повышают устойчивость обнажений пород при сохранении минусовой температуры.

Согласно инструкции «По выбору типов, параметров крепи и технологии их возведения для подземных рудников ГОК «Дукат» и ГОК «Лунное» породы можно отнести к II категории устойчивости. При длительной эксплуатации выработки, возможно обрушение пород по бортам и кровле выработки.

Месторождение обрабатывается этажной системой с полевой подготовкой и подэтажной скважинной отбойкой руды и закладкой выработанного пространства пустыми породами. Мощность рудного тела 0,5-2,8 м, высота подэтажа 15 м. Запасы блока 2279 т, время отработки и закладки блока ~6 мес., нагрузка на блок ~600 т/мес.

Особенностью данного типа рудников является обособленная отработка нескольких рудных зон, которые фактически являются отдельными рудниками. На рудниках используется полная механизация технологических процессов на базе самоходной техники (ПДМ, буровые установки и др.), что

позволяет обрабатывать подземные запасы рудной зоны в среднем от 3 до 10 лет. Обогащение руды происходит на Омсукчанской ЗИФ и ЗИФ ГОК «Лунное», относящихся к Дукатскому хабу.

Отработка ведется с закладкой выработанного пространства пустыми породами. Для управления горным давлением оставляются межблоковые и межэтажные целики шириной 4-6 м., извлечение которых после закладки ВП пустой породой становится небезопасным. Закладка выработанного пространства служит почвой буровых подэтажных выработок при отбойке вышележащих этажей. При скважинной отбойке руды имеет место значительное количество вывалов пустой породы, что приводит к значительному разубоживанию руды. Подробно технология и факторы, оказывающие влияние на основные технико-экономические показатели рудника рассматриваются во второй главе, а в настоящем разделе отметим, что одним из основных направлений совершенствования технологии на данном предприятии и на многих аналогичных производствах в зоне вечной мерзлоты является внедрение смерзающейся закладки выработанного пространства.

Как показал приведенный анализ теоретических материалов и результатов экспериментальных исследований внедрение технологий отработки рудных (и иных) месторождений со смерзающейся закладкой позволяет значительно увеличить извлечение руды, снизить ее разубоживание, снизить отрицательные проявления горного давления и существенно улучшить технико-экономические показатели работы предприятий. Однако внедрение смерзающейся закладки требует существенных изменений технологических процессов на предприятии, которые будут успешными только в случае глубокого анализа влияющих параметров, а также правильного расчета и взаимоувязки технологических параметров подготовительных, нарезных, очистных и закладочных работ. Именно этому вопросу посвящена настоящая исследовательская работа.

1.6 Выводы по главе 1

Добыча полезных ископаемых в криолитозоне, инфраструктура которой зачастую развита очень слабо, обходится намного дороже (в несколько раз), чем в других районах. Суммарная площадь территории криолитозоны на планете Земля составляет около 40 % (включая Гренландию и Антарктиду), а территория АЗРФ составляет около 10,5 млн. км². При этом сырье, добываемое в данном регионе, имеет значительный экспортный потенциал (около 12 % ВВП). Ведение горных работ в условиях криолитозоны характеризуется рядом особенностей (природных факторов), определяющих технологию разработки, основные из которых: суровые климатические условия и мерзлое состояние вмещающих пород; сложный и труднодоступный рельеф местности; снижение прочности породы при оттаивании; существенные особенности при организации вентиляции и пылеподавления (смерзание руды, заполнение старых выработок льдом и т.д.).

По основным показателям вклада в экономику страны минерально-сырьевой комплекс Арктической зоны представляет собой один из самых богатых регионов, в том числе и при отработке ценных руд жильных месторождений, которые зачастую отрабатываются с закладкой ВП. Данная технология позволяет минимизировать потери и разубоживание добываемой руды, повысить безопасность ведения горных работ, сохранить земную поверхность, а также утилизировать часть отходов производства. Вместе с тем, технология весьма дорогостоящая и, используется в основном при добыче ценного минерального сырья.

Следует отметить, что технологические схемы с применением льдопородной закладки при разработке пластовых (угольных), россыпных и ценных рудных подземных месторождений в криолитозоне имеют следующие, представленные ниже, существенные особенности.

При отработке угольных пластов закладка используется для предотвращения сдвижений земной поверхности, прорывов воды,

профилактики самовозгорания и при разработке мощных угольных пластов требуются большие объёмы закладки – более 10 000 м³ для одной камеры. В то время как на рудных месторождениях закладку применяют для управления горным давлением (обеспечения безопасных условий очистной выемки), и обеспечения безопасных условий доизвлечения (предварительного извлечения) целиков. Несмотря на единичные случаи использования закладки льдом (или смешанной закладки) на угольных шахтах, технология не нашла широкого применения, в виду отсутствия достаточного количества закладочного материала. Внедрение льдозакладки на россыпных месторождениях позволило снизить потери металла в недрах и получить значительный экономический эффект, но при этом необходимо предусмотреть создание определенного запаса воды в естественном или искусственном водоёме.

Использование в криолитозоне опыта из других регионов страны затруднено, поскольку неадаптированный перенос результатов изысканий, проектирования, технологий и средств механизации закладочных работ из районов страны, где отсутствует мерзлота на условия разработки многолетнемерзлых россыпей и рудников затруднён и не нашел практической значимости из-за различных специфических факторов. Применение закладки цементными смесями в отрицательных температурах практически не используется, что обусловлено значительными издержками при строительстве и эксплуатации закладочных комплексов.

Для месторождений ценных руд характерно наклонное и крутопадающее залегание рудных тел, мощностью от 0,8 до 20 м и соответствующие системы разработки (с магазинированием руды, слоевая выемка и др.) [53]. Благоприятными климатическими условиями для применения замораживаемой закладки служат территории, на которых наблюдаются устойчивые холодные зимы, характеризующиеся температурой ниже –10 °С более 100 дней в году. К таким районам относятся: Магаданская область, Республика Саха (Якутия), Чукотский автономный округ, Забайкалье,

Амурская область, Заполярье, Алтай, Сибирь, Полярный и Приполярный Урал.

Впервые закладка заготовленным льдом была предложена Артуром Лангерфельдом (США), а закладка намораживанием льда непосредственно в выработке П.А. Леоновым. В достаточно крупном промышленном объеме льдозакладка была применена в 50 годы на руднике № 3/6 Норильского ГМК, а также на норвежских и канадских рудниках, и показала достаточную, в том числе экономическую эффективность. Мощность предприятия по добыче составляла до 1 млн. т руды в год.

В значительном числе случаев отсутствие механизма технологической взаимосвязи между периодом замораживания закладочных смесей и скоростью подвигания фронта горных работ [99], а также трудоемкость и сложность технологии закладочных работ не позволяли довести эту идею до промышленного внедрения [123]. При этом необходимо отметить, что внедрение полной льдопородной закладки на предприятии зачастую не требуется и более рациональным является использование комбинированной закладки с элементами незаложенных выработанных пространств.

В климатических условиях Северо-Востока наиболее эффективно проведение работ по возведению искусственных ледяных целиков в период с ноября по апрель, когда температура атмосферного воздуха позволяет добиться необходимой скорости намораживания льда в шахтах [75].

В настоящее время научно и технологически обоснована возможность возведения устойчивых закладочных массивов в течение технологически необходимого периода времени за счет подачи в них как естественного холода так и за счет использования криогенной техники [99]. Намораживание ведут слоями толщиной от 5 до 20 см. Интенсивность намораживания 10÷20 см/сут при температуре воздушного потока -20÷-50 °С и скорости его движения 1÷1,5 м/с. Прочность льда при температуре от -4 до -9 °С находится в пределах 2,5÷5,0 МПа.

Механические свойства льда вполне удовлетворяют требованиям, которые обычно предъявляют к материалу закладки, а в некоторых отношениях и превосходят их при условии сохранения в выработанном пространстве заданного температурного режима [10, 31]. Удерживать горный массив в зоне отрицательных температур позволяют определённые условия теплообмена и скорости (количество) вентиляционных потоков, а также аккумуляция холода для дальнейшего применения в летний период.

Важно отметить, что без изменения режима проветривания и усиления конвективного теплообмена в камерах при естественной температуре (в горных выработках), технология формирования замораживаемой закладки трудоёмка и низкопроизводительна.

Допустимая нагрузка на лед определяется не только величиной допустимых напряжений, но величиной и скоростью пластической деформации льда, причем это свойство льда (деформироваться без разрушения) является во многих случаях положительным фактором [123]. Применение искусственных целиков из льдопородной закладки, которые характеризуются более высокой прочностью, позволяет существенно увеличить несущую способность искусственных опор, которые в случае необходимости могут быть ослаблены при заданном режиме растепления [62].

Таким образом, повышение эффективности горных предприятий на базе внедрения современного оборудования и ресурсосберегающих технологий, которые позволяют достичь максимального экономического эффекта при минимальных негативных экологических ущербах, в первую очередь должно базироваться на совершенствовании существующих и создании новых технологических схем, в том числе и при разработке жильных месторождений.

Начиная с 30-х годов, проводятся исследования эффективности применения систем с ледяной закладкой в условиях ММП, в рассмотренных в данной главе работах приведён обзор и анализ практического применения технологии с использованием смерзающейся закладки. Влияние на время замораживания закладочного массива оказывает многообразие факторов:

температура (рудничного воздуха, жидкого связующего, твёрдого наполнителя, вмещающих пород, закладки), скорость рудничного воздуха, количество жидкого и твёрдого материала, площадь контакта между вмещающими породами и закладкой. В виду чего, отсутствует четкий практический механизм формирования замораживаемого массива в течение технологически заданного периода времени. В связи с этим, требуется дальнейшее изучение указанных аспектов и настоящая работа, направленная на создание технологических схем разработки крутопадающих жильных месторождений с льдопородной закладкой и обоснование их параметров, является актуальной.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕННЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЬДА ИЛИ ЛЬДОПОРОДЫ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЗАКЛАДКИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

2.1 Особенности эксплуатации горных выработок в условиях криолитозоны

Мерзлые горные породы, сцементированные льдом, который часто заполняет все трещины и придает ей свойства монолита, весьма устойчивы. Поэтому в тех случаях, когда геотермический режим мерзлой зоны сохраняется без изменений в течение всего срока службы горных выработок, крепление их значительно облегчается или даже полностью исключается. Однако часто первоначальный температурный режим нарушается и становится неустойчивым, например, вследствие нарушения поверхностного покрова, прогрева пород за счет температуры вентиляционной струи, подмерзлотных слоев породы, выделений тепла при дыхании людей и работе техники (машин) и т.д. Это приводит к растеплению горных выработок (рисунок 2.1). В зависимости от температуры вмещающих пород и температуры вентиляционной струи в выработках могут появляться водопитоки или они могут заполняться льдом (рисунок 2.2).

Проблемы устойчивости имеют краткосрочный и долгосрочный характер. К проблемам краткосрочного характера можно отнести обрушения и вывалы пород, а также возможность, в некоторых типах пород и условиях, внезапных вывалов породы вследствие её отслаивания (рисунок 2.3). При температурах, близких к замерзанию, поровая вода может быть не в замороженном состоянии или быть даже слегка оттаявшей, в результате чего возможно внезапное обрушение кровли (рисунок 2.4). Проблемы долгосрочного характера представляют собой продолжение проблем,

описанных выше и, кроме того, возникает угроза разрушения стволов в результате деформации грунта.



Рисунок 2.1 - Растепление и повторное замерзание горных выработок



Рисунок 2.2 - Заполнение выработки льдом

Скорость оттаивания зависит от разности температуры рудничного воздуха и горных пород, от теплоемкости и теплопроводности пород и материалов крепления, а также от объемного содержания воды в горных породах.

Состояние горных пород после оттаивания, а, следовательно, и условия поддержания выработок определяются первоначальным характером и структурой пород, изменениями, происшедшими в ней под влиянием низкой температуры, степенью влажности и водообильности пород. Коренные породы в зоне многолетней мерзлоты относительно редко бывают «сухими». Обычно они как бы пронизаны включениями льда различной формы и размеров – от жилок и тонких прослоек до значительных по размерам жил, пропластков, штоков и т.д.

Изучение ледяных жил в Юконе [38] убедительно показывает, что образование жильных трещин может быть вызвано лишь силой кристаллизации льда. Давление, которое при этом неизбежно развивается приводит к расширению ранее совершенно незаметных трещин. По мере увеличения глубины залегания пород, а, следовательно, и давления, под которым они находятся, уменьшается расширение трещин, но нарушение связности между частицами все же происходит. При оттаивании порода распадается на отдельные, образовавшиеся под действием силы кристаллизации льда.



Рисунок 2.3 – Обрушение пород с бортов выработки вследствие таяния мерзлых пород



Рисунок 2.4 – Пример отслоения горной массы с кровли выработки на одном из рудных месторождений Хабаровского края

В осадочных породах такие мелкие трещины чаще всего образуются в плоскостях напластования, поэтому при оттаивании происходит отслаивание породы. Если эти трещины пересекают породу в различных направлениях, то при оттаивании значительного давления на крепь может и не быть. В этом случае происходит лишь обыгрывание крепи, как это наблюдалось, например, в подготовительных и очистных выработках угольных шахт на острове Шпицберген. Следовательно, в зависимости от характера и структуры пород при их оттаивании могут происходить все виды обрушений (осыпание, обвалы, куполение, обрушение и т. д.). Величина зоны обрушения зависит от глубины оттаивания и может, очевидно, с течением времени возрастать. Аналогичные явления происходят и при оттаивании рыхлых пород (наносов), если только их влажность незначительна [55]. При переувлажненности пород наносов, в связи с большим содержанием в них мелких фракций, создаются все предпосылки для их превращения после оттаивания в пльвуны. Наличие водоносных пород за крепью выработки особенно опасно в тех случаях, когда температура протекающего по выработке воздуха меняется в зависимости от времени года. Тогда вокруг выработки образуется деятельный слой и давление, развивающееся при замерзании, окажется настолько значительным, что ему не в состоянии противостоять рудничная крепь, деформация и поломки которой становятся неизбежными. В более неблагоприятных условиях находятся устья шахт и штолен.

Вопросы о методах и материалах для крепления относительно легко разрешаются для выработок, пройденных в коренных породах особенно, если не требуется полной защиты выработок от подтока воды при оттаивании горных пород. В этом случае возможно отслаивание пород, которое происходит менее интенсивно при нормальных условиях, поэтому здесь можно применять обычное крепление. Кроме того, рекомендуется уменьшение сечения выработки, усиление крепления и особенно тщательная затяжка кровли и боков выработки [15].

К мероприятиям для предупреждения образования деятельного слоя вокруг выработок следует отнести опыт промышленного строительства в зоне распространения мерзлоты и, в частности, те мероприятия, которые разработаны для защиты от нарушений фундаментов зданий. Эти мероприятия подробно описаны в литературе и основаны либо на принципе сохранения, либо уничтожения вечной мерзлоты [14, 22, 42,43].

Применение принципа сохранения вечной мерзлоты дает возможность использовать лучшие свойства мерзлых пород (прочность, устойчивость, водонепроницаемость).

Сохранение мерзлоты достигается следующими способами:

1. Применением теплоизоляционных прокладок между креплением и породой, замедляющих процесс передачи тепловых потоков от вентиляционной струи горным породам. Этот метод наиболее эффективен при низких температурах горных пород.

2. Охлаждением поступающего в выработки воздуха. Это мероприятие может быть эффективным лишь для выработок, подающих в шахту свежий воздух. Недостатком метода является необходимость иметь специальные холодильные установки.¹

¹Зимой воздух имеет отрицательную температуру и охлаждает подземные выработки, создавая «запасы холода».

3. Охлаждением горных пород за стенками крепления. Применение этого метода ограничено ввиду его технической сложности.

Принцип уничтожения мерзлоты рационально использовать при относительно небольших отрицательных температурах горных пород. В данном случае приходится принимать меры против вторичного замерзания горных пород. Это может быть достигнуто подогреванием подаваемого в выработки воздуха в зимнее время.

Выбор метода работ зависит от всей совокупности рабочих условий и должен быть технически и экономически обоснован. Недоучет возможности образования вокруг выработок деятельного слоя особенно при значительной водообильности пород может привести к очень тяжелым последствиям.

2.2 Анализ параметров технологических схем отработки ценных руд жильных месторождений малой и средней мощности

Рассмотрим вариант слоевой системы разработки крутопадающих месторождений различной мощности с льдозакладкой. На схеме, представленной на рисунке 2.5, первоначально осуществляется выемка камер шириной от 4 до 12 м, а затем переходят к выемке межкамерных целиков, имеющих ширину от 4 до 6 м [10].

Принимая во внимание расположение некоторых рудников в крайне суровых климатических условиях, представляется целесообразным рассмотреть способ замораживания воды в льдопородной закладке за счет накопленного на поверхности в породах холода.

В данном варианте предварительно (выемка на первой стадии) осуществляется отработка рудных целиков, а затем, после заполнения отработанных пространств льдопородной закладкой, отрабатываются остальные запасы блока (вторая стадия). Для этого через 50÷60 м по простиранию с применением комплекса КПВ-1Б (или КОВ-25) проходятся восстающие, которые расширяются до 15÷20 м (см. рисунок 2.5) [62, 86].

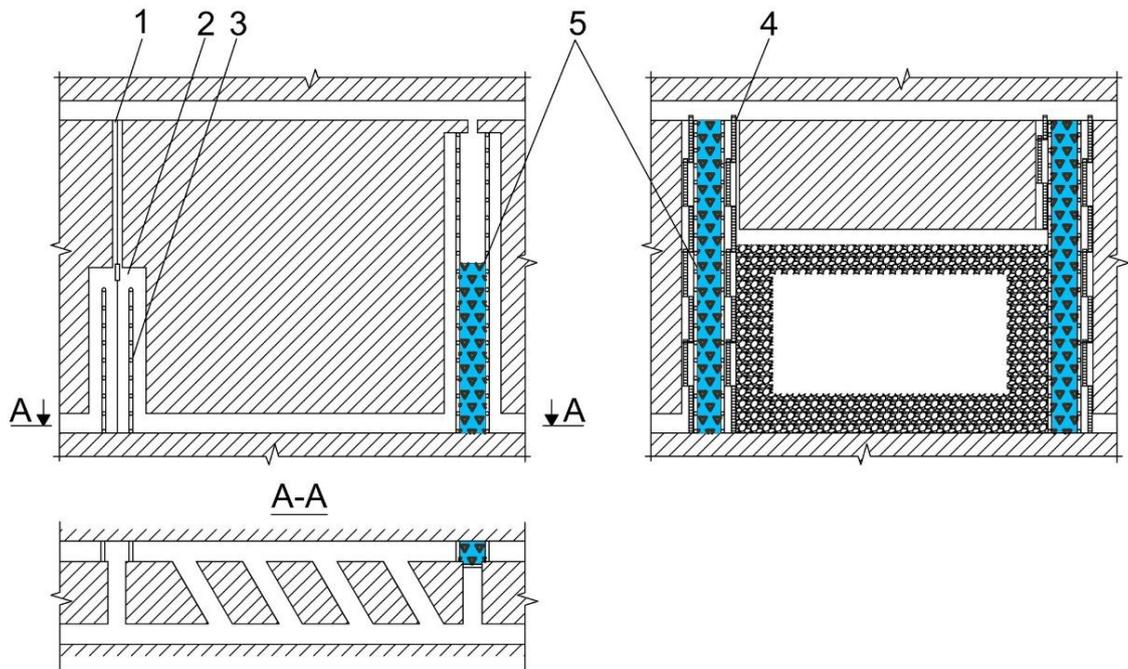


Рисунок 2.5 – Возведение искусственных целиков из льдопородного закладочного материала при разработке крутопадающих тел: 1 – восстающий; 2 – расширение восстающего; 3 – отшивка отделений для закладки и людских ходков; 4 – людские ходки; 5 – отделения для льдопородной закладки

Для увеличения несущей способности искусственных льдопородных целиков, а также поддержания устойчивости обнажений следует производить упрочнение льдопородного закладочного материала следующими способами: применение сетчатых материалов, формирование ограждений перед возведением закладочного массива, его затяжка крепежными материалами из рециклинговых материалов, к которым относятся тросы, крепёжный лес, пиломатериалы, трубы, буровая сталь и т.д. [87]

Рассмотрим отдельно способ разработки крутопадающего маломощного месторождения с льдозакладкой.

При использовании слоевых систем в обычных условиях, после проходки необходимых капитальных выработок, месторождение нарезается восстающими на отдельные блоки. Общепринятые в практике размеры блоков 30÷60 м по восстанию и 60÷80 м по простиранью. Отработка блока ведется горизонтальными или наклонными слоями высотой 2-3 м в направлении снизу вверх. Чаще всего выемка руды и закладочные работы чередуются во времени.

При использовании льда, получаемого способом намораживания, вместо сухой закладки потребуется дополнительно осуществить работы, связанные с устройством специальной насосной станции, прокладкой утепленного водопровода и устройством дополнительной вентиляционной установки. При организации водоснабжения рекомендуется теплоизолировать весь трубопровод и осушить его подогретым сжатым воздухом по окончании работ.

После проходки восстающих и рассечек начинается отработка блока наклонными или горизонтальными слоями. Выработанные слои заполняются льдом путем послойного намораживания воды поливом вслед за продвижением очистного забоя. Очистные и закладочные работы чередуются в смежных блоках. Доставка отбитой руды к рудоспуску производится по льду скрепером или ПДМ.

После окончания уборки и зачистки полотна от рудной мелочи, начинается процесс намораживания льда. Во время наращивания льда на высоту отработанного слоя производится усиленное проветривание, которое осуществляется с поверхности нагнетанием холодного воздуха и его подачей в восстающий одного из обрабатываемых смежных блоков. В каждом из таких восстающих рекомендуется иметь два отделения с перекрытиями, что позволит направить воздушную струю в охлаждаемый забой, изолировав от выработок, где идут очистные работы. Вентиляционные штреки перекрываются на данном участке временными перемычками (рисунок 2.6).

Первичное оледенение для гидроизоляции стенок проводится при температуре ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в объеме $30\div 50$ л на 1 м^2 поливаемой площади с образованием на требуемых участках ледяной корки толщиной в $2\div 4$ см. Намораживание первого слоя льдозакладки можно проводить двумя путями: послойным намораживанием льда на горизонтальных участках или путем периодических поливов.

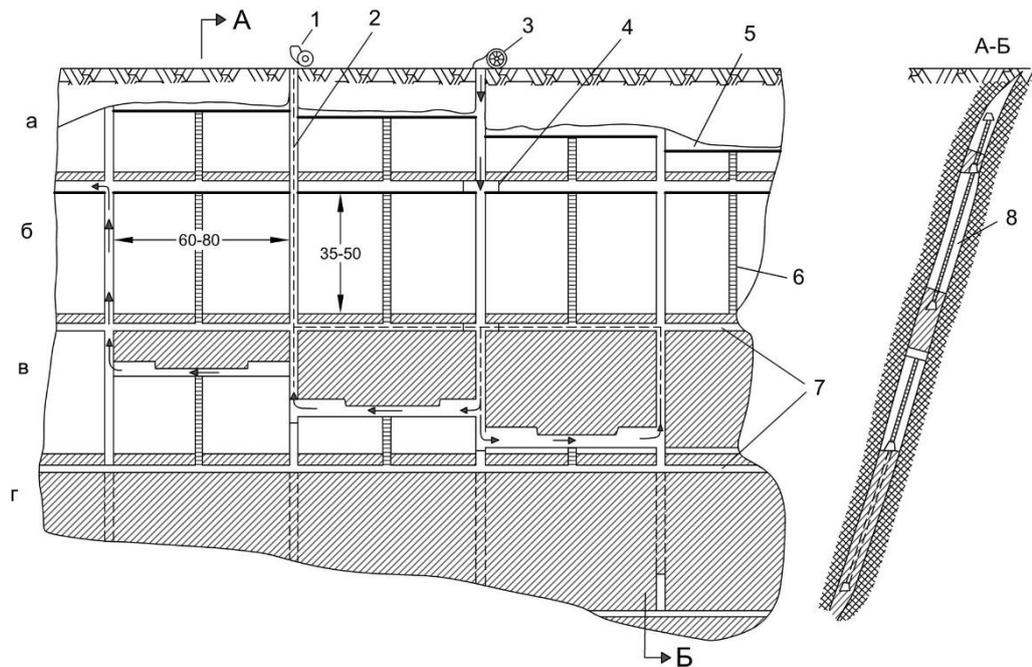


Рисунок 2.6 – Разработка горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства льдом: а – верхний подэтаж (отработан и заложен льдом); б – I этаж (отработан и заложен льдом); в – II этаж (очистные работы); г – III этаж (подготовительные работы); 1 – насосная станция; 2 – водопровод; 3 – вентиляционная установка; 4 – вентиляционные перемычки; 5 – теплоизоляционные покрытия; 6 – рудоспуски; 7 – откаточные штреки; 8 – лед

В летний период можно приступить к горно-подготовительным работам или продолжать добычу с обычной закладкой. При этом при использовании закладочного материала с поверхности необходимо в целях сохранения льдозакладки тщательно перекрыть ее слоем теплоизоляционных материалов. С наступлением холодного периода после достаточного охлаждения забоя работы по намораживанию льда могут быть возобновлены.

Необходимо отметить, что основными параметрами, характеризующими рассматриваемые технологии являются – извлечение руды и ее разубоживание. Наряду с указанными параметрами существует целый ряд иных параметров, характеризующих эффективность той или иной технологии (объемы подготовительных работ, объемы нарезных работ, нагрузка на очистной блок, экономические показатели и т.д.), однако именно указанные два первых параметра являются базовыми, поскольку определяют полноту извлечения полезного ископаемого из недр и количество пустой породы, которая попала в горную массу, и которую приходится транспортировать до

обогачительного передела и утилизировать в отвалах. Поэтому первоначально остановимся на анализе факторов, определяющих количественные показатели именно этих параметров.

Извлечение полезного ископаемого зависит от того какое количество руды остается в недрах как в виде эксплуатационных потерь, так и в виде потерь в целиках различного назначения. Полное извлечение рудной жилы обычно осуществляется путем создания искусственных целиков и последующей отработки основных запасов, или же первоочередной выемкой основных запасов при управлении горным давлением оставлением целиков полезного ископаемого с закладкой (полной или частичной) выработанного пространства с последующей отработкой оставленных целиков.

Отработка целиков требует обеспечения безопасных условий выемки полезного ископаемого в условиях, когда отбойка руды ведется под закладочным массивом, который фактически является уплотненной сыпучей средой.

Таким образом, полное извлечение базируется на доизвлечении (или предварительном извлечении) целиков, в то время как на разубоживание руды влияет очень большое количество параметров как геологических, так и технологических.

Одним из основных параметров, влияющих на разубоживание руды, является характеристика сложности залегания рудного тела. Двумя основными геометрическими характеристиками рудных тел являются мощность жилы (пласта, линзы и т.д.) и угол ее залегания. Однако при сложном залегании рудных тел для характеристики условий залегания используется значительное количество дополнительных параметров – таких как выдержанность угла залегания и мощность рудного тела. Этот параметр характеризуется изменением мощности (или угла залегания) по падению и простиранию рудных тел. Он может составлять до половины мощности жилы (особенно при анализе условий залегания рудных жил малой мощности) на десять метров ее падения (реже простирания). Необходимо отметить, что для

золоторудных месторождений характерно увеличение содержания металла при уменьшении мощности жилы.

Для оценки условий залегания рудных тел используется параметр (Δ), характеризующий геометрию контакта рудного тела и вмещающих пород [73]. Он определяется как отношение суммарной длины контакта (Σl) в любом сечении к площади рудной жилы (ΣS):

$$\Delta = \frac{\Sigma l}{\Sigma S}, \left(\frac{\text{м}}{\text{м}^2} \right) \quad (2.1)$$

Зависимости потерь и разубоживания от этого параметра устанавливаются на базе характерных для данного предприятия эмпирических зависимостей, то есть определяется экспериментальным путем на базе опыта разработки месторождения. Поскольку кроме указанного параметра существенное значение (а при малой мощности жилы – определяющее значение) на потери и разубоживание оказывает мощность жилы и изменение угла наклона жилы (которое в том числе учитывает и рассмотренный выше параметр, но не в полной мере), то рассмотрим более подробно влияние именно этих параметров.

При малой мощности жилы форма отбиваемой полости имеет очень сложную и невыдержанную конфигурацию. Это объясняется тем, что при мощности жилы до 2 м полость в результате взрыва практически соответствует (или очень близка) врубовой полости – то есть условия работы ВВ соответствуют условиям работы при наличии одной обнаженной поверхности. При большой длине отбойных скважин условия работы ВВ в скважине значительно отличаются по ее длине. Чем ближе к устью скважины, тем большее влияние на условия работы ВВ оказывает «вторая обнаженная поверхность – кровля очистной камеры», с которой происходит бурение самих скважин (поскольку основной свободной поверхностью является плоскость очистного забоя). Это приводит к образованию полостей сложной формы («рюмок»), вывалов и увеличения выхода «негабаритов».

2.3 Обоснование параметров технологий отработки ценных руд жильных месторождений малой и средней мощности в условиях криолитозоны

В данной работе рассматриваются технологии отработки месторождений в криолитозоне, поэтому необходимо отметить, что практически все выводы и рекомендации могут быть использованы только при отработке месторождений в области вечной мерзлоты. При отработке рудников в условиях средних широт могут широко использоваться технологии закладки на базе твердеющих смесей, в то время как в условиях вечной мерзлоты создание подобных технологических комплексов является нецелесообразным в силу целого ряда факторов, как технического, так и социально-экономического и инфраструктурного типов. Поэтому первоначально остановимся на анализе особенностей рассматриваемого типа месторождений и направлений совершенствования технологий их отработки.

К основным особенностям эксплуатации современных месторождений криолитозоны можно отнести следующие (в перечне не рассматриваются особенности инфраструктурного и социально-экономического типов):

- сравнительно малый (иногда незначительный) размер рудной залежи;
- крутое и крутопадающее залегание жил, и как следствие быстрое увеличение глубины горных работ;
- выход рудных жил под наносы или на поверхность и как следствие первоначальная карьерная отработка запасов с переходом на подземную добычу;
- необходимость учитывать по мере отработки запасов особенности перехода горных работ из зоны вечной мерзлоты в зону положительных температур;
- сравнительно малые сроки отработки запасов предприятия (5-30 лет) и значительные трудности при планировании доизвлечения или изменении системы разработки, поскольку при накоплении опыта отработки запасов,

практически нет времени на корректировку подготовки новых горизонтов (сроки подготовки и отработки этажей-горизонтов составляют 1-3 года);

- дискретное залегание жилы (или нескольких отдельных жил) и отработка запасов практически несколькими автономными независимыми подземными предприятиями, которых в единый комплекс «объединяет» только общий парк техники и возможность оперативно «перебрасывать» трудовые ресурсы;

- существенный разброс мощности и условий залегания разрабатываемых жил и соответственно различные технологии отработки запасов.

Разработку технологических схем и обоснование их параметров наиболее целесообразно производить на базе рассмотрения технологии, используемой на конкретном месторождении с привязкой к которому планируется опытно-промышленное испытание разработанных предложений и рекомендаций. Кратко рассмотрим основные характеристики рудной залежи и рудника, который ее разрабатывает. На рисунке 2.7 представлена технологическая схема отработки запасов VII р.з.

Рудник, обрабатывающий месторождение Лунное, состоит из ряда обособленных, обрабатываемых «автономно» рудных зон. Так, VII р.з. вскрыта штольнями на горизонтах +872 м и +925 м.

Рудная жила разбивается на этажи высотой 90 м на всю длину рудника. Подготовка этажа полевая. Крепление определяется индивидуально для каждой конкретной выработки, в зависимости от горно-геологических условий. Затем буровыми штреками этаж разбивается на подэтажи и выемка руды осуществляется снизу вверх бурением скважин из буровых штреков и взрыванием по одному вееру.

Проекция на вертикальную плоскость
блока

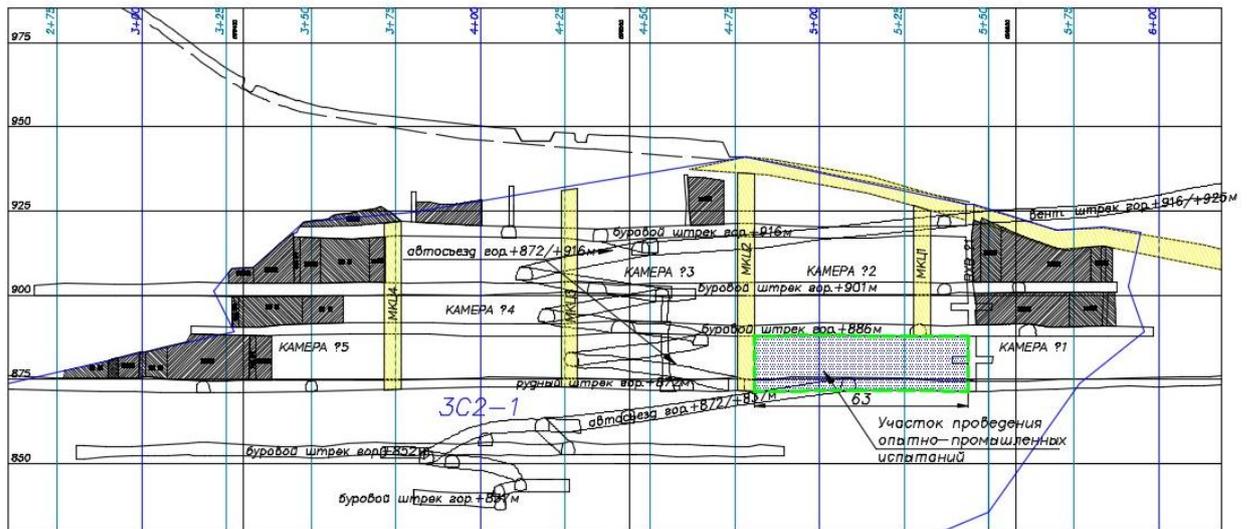


Рисунок 2.7 – Технологическая схема отработки запасов

После взрывания руда убирается и доставляется ПДМ к месту загрузки самосвалов (наклонный съезд). Поскольку выемка руды осуществляется на всю высоту подэтажа до вышележащего бурового штрека, то закладка выработанного пространства производится с вышележащего бурового штрека до почвы этого штрека. Закладка ведется последовательно по мере выемки полезного ископаемого и может совмещаться с операциями по выемке руды при условии отставания закладочных работ на расстояние не менее 30 м. Для закладки используется пустая порода с проходческих работ, отвалов и некондиционная руда. После полной отработки и закладки подэтажа начинается отработка следующего вышележащего подэтажа. Последний подэтаж в этаже не закладывается.

При отработке подэтажа бурение скважин осуществляется по паспортам, разрабатываемым с учётом отбойки предыдущего веера. По мере необходимости вносятся корректировки. Это связано с тем, что разработка типовых паспортов является нецелесообразной из-за значительных потерь и разубоживания руды, поэтому после отбойки очередного веера производится сканирование груди забоя, составляется его сечение, а также разбивка всего объема на блоки дифференцированные по содержанию руды. Затем

утверждается направление скважин и их место заложения, с учетом обеспечения условий полной выемки блоков с содержанием металла более 200 гр/т (все такие блоки должны попасть во внутренний объем блока, оконтуренного скважинами). После бурения скважин производится проверка их соответствия утвержденному паспорту и при отклонении более 5 % от паспорта взрывание таких скважин запрещается и производится их перебуривание. Только после подтверждения соответствия направления скважин паспорту (отклонение менее 5 %) разрешается их зарядание и взрывание. Затем производят сканирование массива, уточняют объемную модель рудной жилы и цикл повторяется.

Как показал анализ параметров добычных работ, разубоживание руды является минимальным (15-25 %) при создании врубовой щели и отходе от нее на 5-9 циклов (около 7-15 м). Затем разубоживание постепенно возрастает на 10-20 % (для разных систем до 30-75 %). Основными факторами, влияющими на разубоживание руды являются – наличие внутреннего засорения жилы (наличие в жиле пустых пород), изменение угла залегания жилы, объем присечки боковых пород (объем вывалов – который зависит от нарушенности массива, вызванного как ведением БВР, так и проявлениями горного давления и др). При наличии значительных вывалов и образовании большого числа заколов и вывалах негабаритов (особенно в боках буровой выработки) очистные работы останавливают, оставляется целик 5-7 м и продолжают очистные работы за этим целиком (фактически камера «разбивается» на две).

Закладка выработанного пространства ведется с вышележащего бурового штрека ПДМ, используемыми для доставки руды и пустых пород от полевой подготовки этажа. Крупность закладочных пород (характерный размер куска) не превышает 200-300 мм и в основном (более 80 %) составляет 50-100 мм.

При ведении скважиной отбойки разубоживание (в среднем по камере) составляет 55-65 %, при этом потери руды (не отбитая руда) составляют до 10 % (что является также очень высоким показателем и следует стремиться к

сведению эксплуатационных потерь до нуля). Эти потери связаны в первую очередь с тем, что добычные скважины пересекают рудную жилу при изменении угла ее залегания. Если обеспечить расположение скважин таким образом, чтобы вся рудная жила находилась внутри оконтуренного скважинами блока, то разубоживание значительно (кратно возрастает). На рисунке 2.8 приведены априорные варианты залегания жилы и рассчитанные для этих вариантов площади отбиваемой руды и пустой породы, их соотношения и расчетное разубоживание.

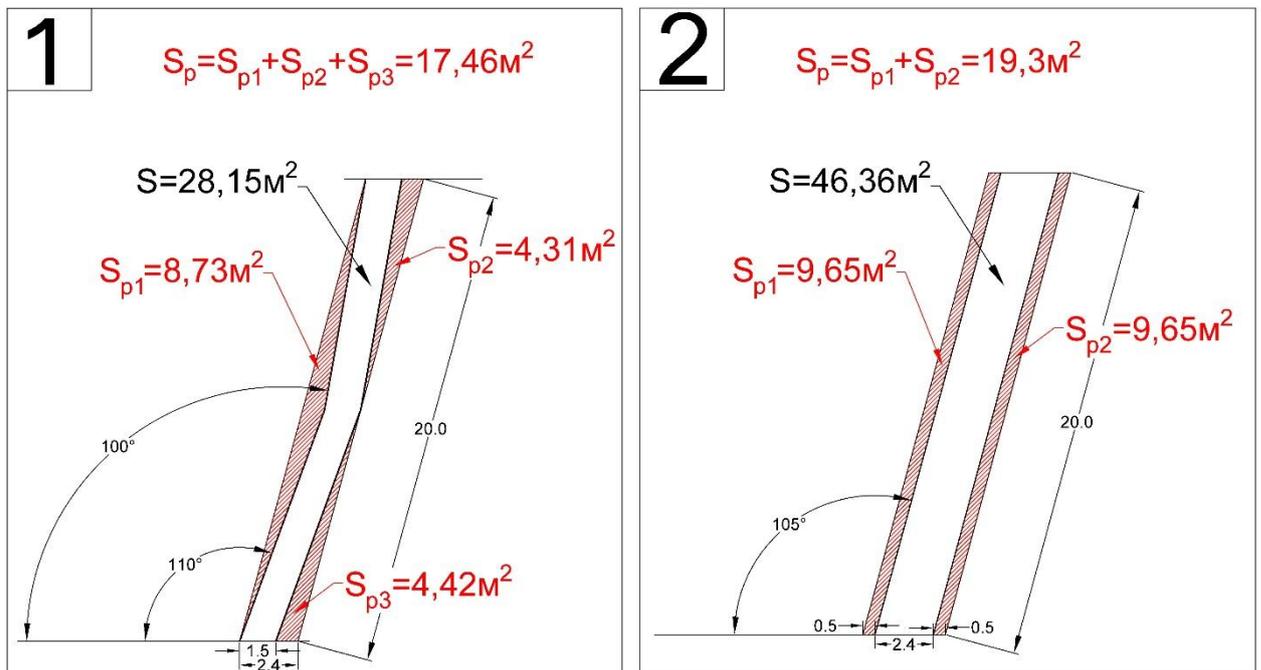


Рисунок 2.8 – Варианты залегания жилы и рассчитанные для этих вариантов площади отбиваемой руды и пустой породы

Так при мощности жилы 1,5 м, выдержанной мощности и угле наклона разубоживание будет минимальным (12 % при присечке боковых пород до 10 см с каждой стороны; и 41 % при присечке боковых пород порядка 50 см с каждой стороны). При изменении мощности жилы на 0,5 м и выдержанном угле наклона минимальное разубоживание составит 15-20 % (присечка до 10 см), а при изменении угла ее наклона с 70 до 80° при выдержанной мощности расчетное разубоживание возрастает до 40 % (при минимальной присечке боковых пород по 10 см) и 56 % (при присечке боковых пород по 0,5 м с каждой стороны). Указанные параметры рассчитаны без учета вывалов,

невыдержанной геометрии очистного пространства и т.д. Необходимо отметить, что соотношение присечки боковых пород к объему руды для рассмотренных условий составляли от 15 % до 120 %. На практике же в условиях значительного изменения мощности и угла наклона объем отбойки разубоживающих пород возрастает и может достигать 150-300 % от объема руды (при этом разубоживание составит 60-75 %), а при уменьшении отбиваемого объема и проектировании потерь в 5-10 % разубоживание снижается до 50-70 % (при этом объем засоряющих пород составляет 100-235 % от объема руды).

При производстве взрывной отбойки скважины бурятся по контуру рудной жилы и вместе с разрушением самой руды происходит частичное разрушение и контура вмещающих пород, что приводит к разубоживанию руды. При смещении скважин от контакта руды и вмещающих пород внутрь жилы увеличиваются потери руды (драгметалла), что является недопустимым. Если оценить объем горной массы как состоящий из руды и присечки вмещающих пород (при этом считать, что площадь присечки является постоянной величиной при определенных принятых условиях) и построить зависимости отношения количества пустой породы к количеству руды от мощности рудной жилы, то они будут иметь вид, представленный на рисунке 2.9 (данная зависимость более наглядна, поскольку показывает не зависимости руды и горной массы, а именно отношение объема пустой породы к объему руды, а разубоживание является функцией этих переменных).

Данная зависимость является идеализированной, поскольку не учитывает от чего зависит присечка боковых пород, а считается, что с каждой стороны жилы она составляет от 10 до 50 см.

Данная проблема характерна только для жил мощностью менее 2,5 м и особенно ярко проявляется при малой мощности жилы (от 0,5 до 1,5 м).

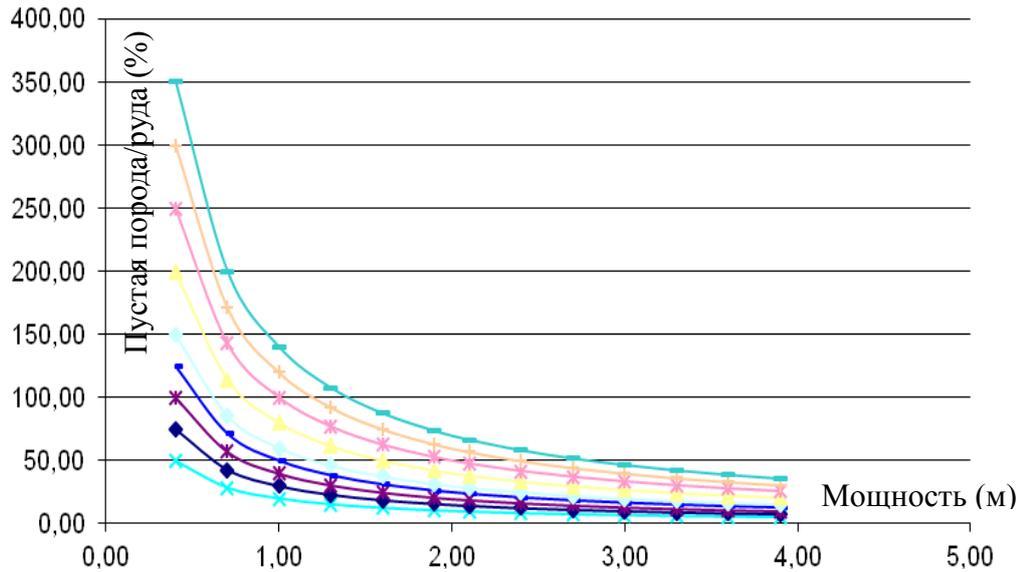


Рисунок 2.9 - Зависимости отношения количества пустой породы к количеству руды (%) от мощности рудной жилы

Для определения основных факторов, оказывающих влияние на эксплуатационные показатели очистных работ в условиях VII р.з. месторождения Лунное, был проведен анализ потерь и разубоживания руды и форм полостей в массиве после производства буровзрывной отбойки руды (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Показатели разубоживания руды по одной из камер гор.+872м (VII р.з., месторождение Лунное)

| № веера | Разубоживание | № веера | Разубоживание |
|---------|---------------|---------|---------------|
| 7 | 71% | 21 | 50% |
| 8 | 71% | 22 | 45% |
| 9 | 74% | 23 | 47% |
| 10 | 76% | 24 | 48% |
| 11 | 76% | 25 | 49% |
| 12 | 75% | 26 | 56% |
| 13 | 75% | 27 | 56% |
| 14 | 60% | 28 | 42% |
| 15 | 57% | 29 | 46% |
| 16 | 56% | 30 | 42% |
| 17 | 51% | 31 | 36% |
| 18 | 57% | 32 | 55% |
| 19 | 59% | 33 | 58% |
| 20 | 61% | 34 | 49% |

В работе также была проанализирована форма отбойных полостей с дифференциацией зон рудной жилы, зон планируемой присечки и зон незапланированной присечки (вывалов, изменение формы полости в результате влияния трещиноватости, изменения свойств жилы и вмещающих пород и т.д.). Схематически указанные области представлены на рисунке 2.10, с выделением типовой формы полости на уровне кровли очистной выработки – так называемая «рюмка».

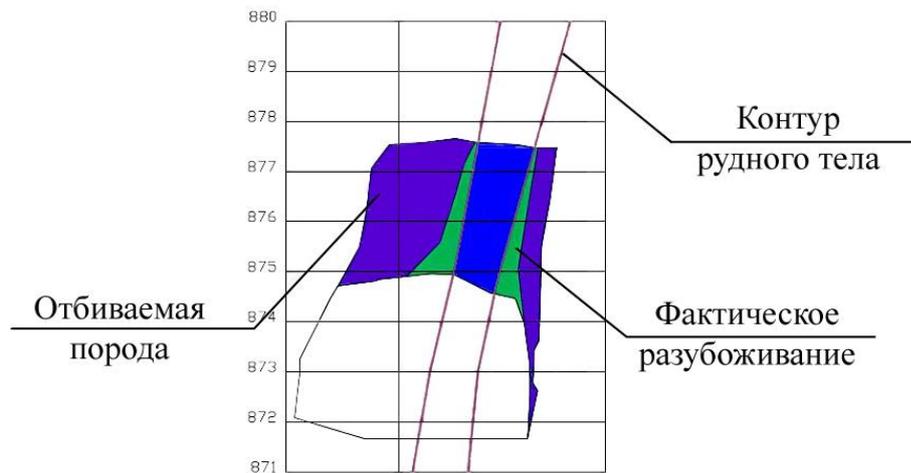


Рисунок 2.10 – Схематический разрез одного из отбитых вееров (выполненный по результатам сканирования)

На представленных ниже рисунках приводятся примеры планирования отбиваемого контура, параметры внутреннего и общего засорения руды при отработке подэтажной системой. Как видно из представленного материала малая мощность рудного тела (0,4 – 1,2 м) является одной из причин (в данном случае основной причиной) высокого планового разубоживания руды. Минимальная вынимаемая мощность жилы составляет 1,2 м. Рудная жила разбивается на блоки, каждый из которых характеризуется определенной принятой геометрией и расчетным значением содержания полезного компонента. На рисунке 2.11 представлены модели отбиваемых блоков в вертикальных координатах горизонтов (каждый блок соответствует определенному вееру скважин) с указанием геометрии блока в целом, геометрии выделенных подблоков, ранжированных по содержанию металла и

указанием среднего содержания полезного компонента в блоке. На рисунке 2.11 (а-г) представлены разрезы плановых (планируемых) контуров отбойки с указанием содержания и первичное засорения; на рисунке 2.11 (е-ж) проведён анализ плановых и фактических контуров отбойки с указанием вторичного разубоживания.

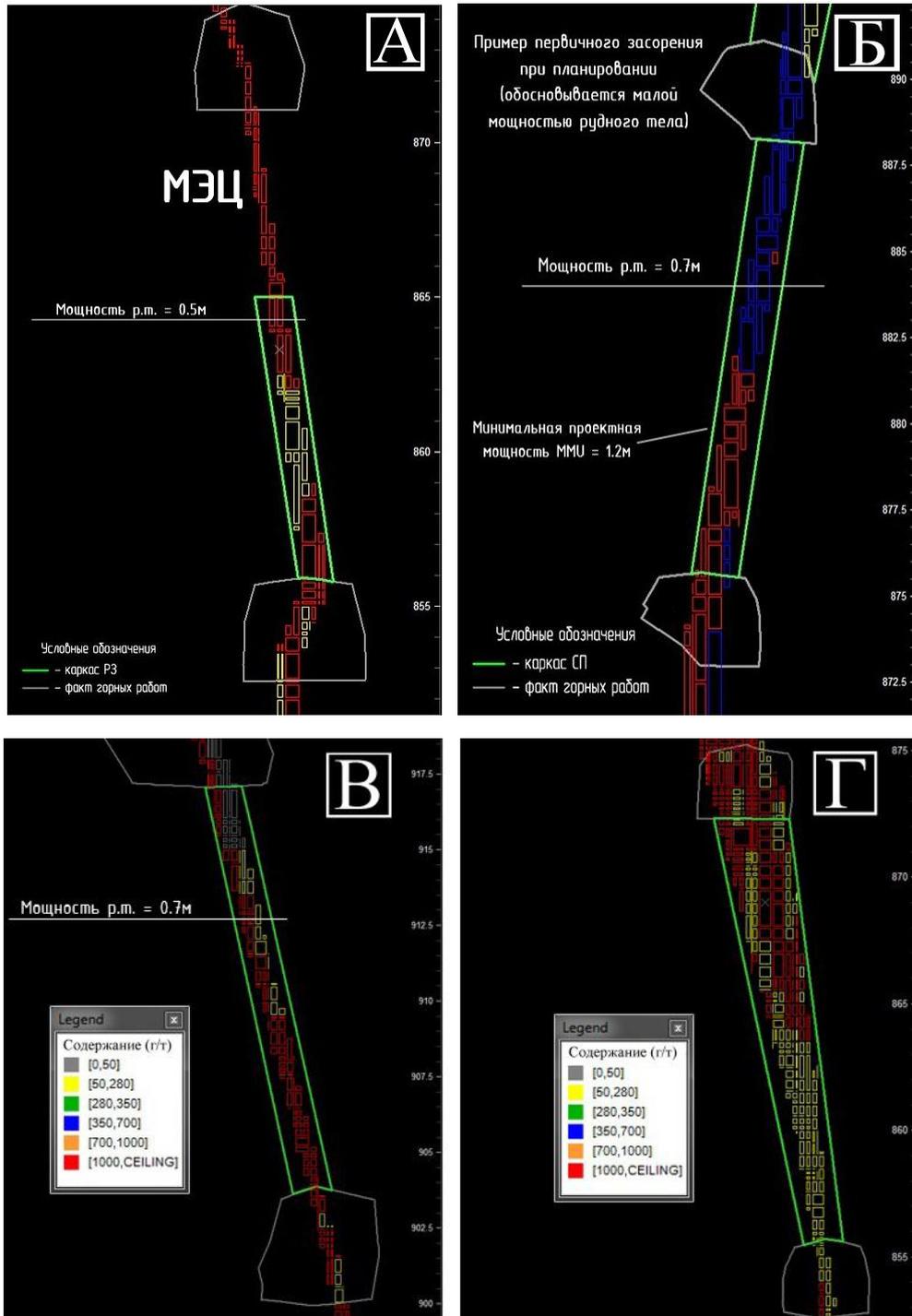


Рисунок 2.11 – Разрезы выемочных единиц с указанием содержания, засорения и мощности р.т.

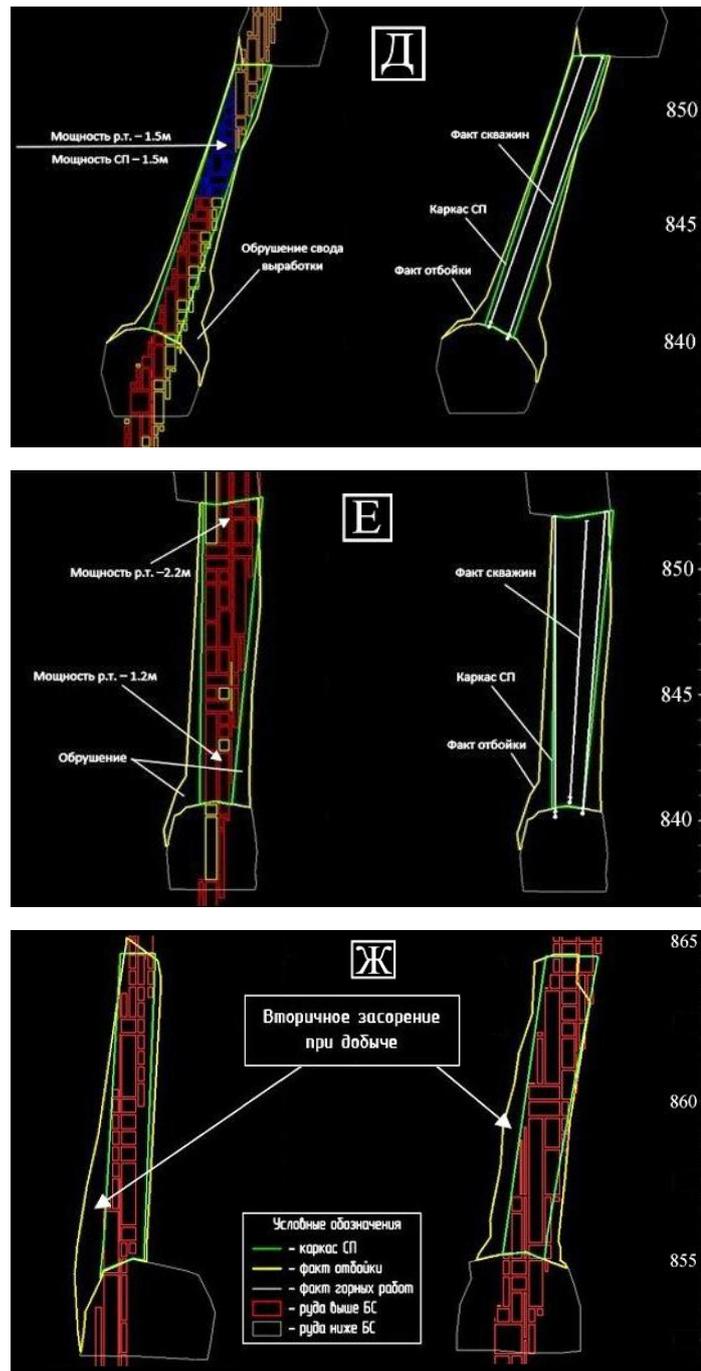
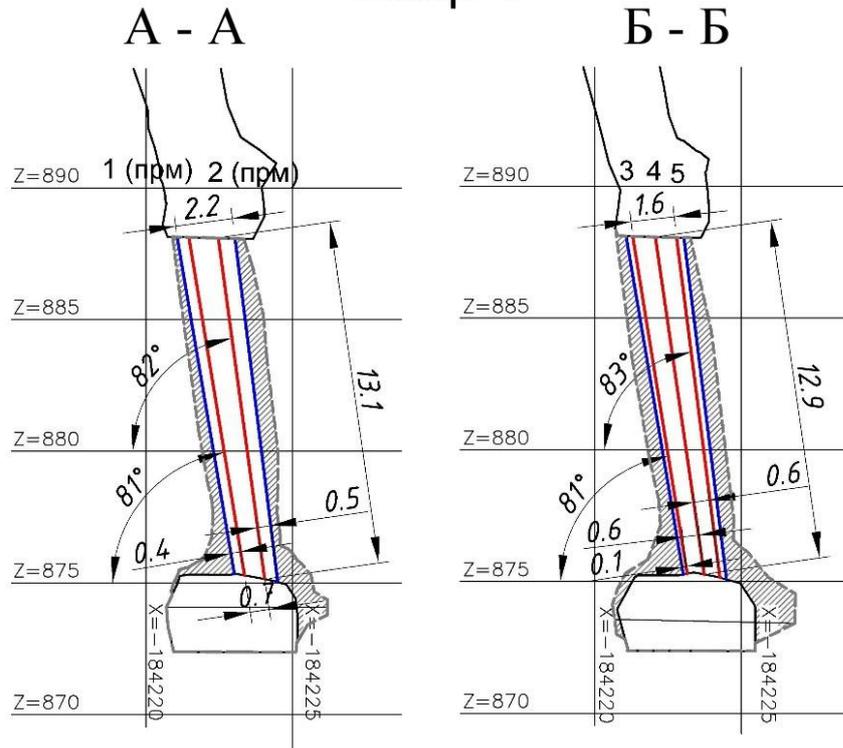


Рисунок 2.11 (продолжение) – Разрезы выемочных единиц с указанием содержания, засорения и мощностей р.т.

На рисунках 2.11, 2.12 приведена фактическая геометрия выработанных пространств с выделением контура скважин, контура «каркаса» отбиваемого блока и фактического контура полости, образовавшейся при производстве БВР.

Веер 4



Веер 15

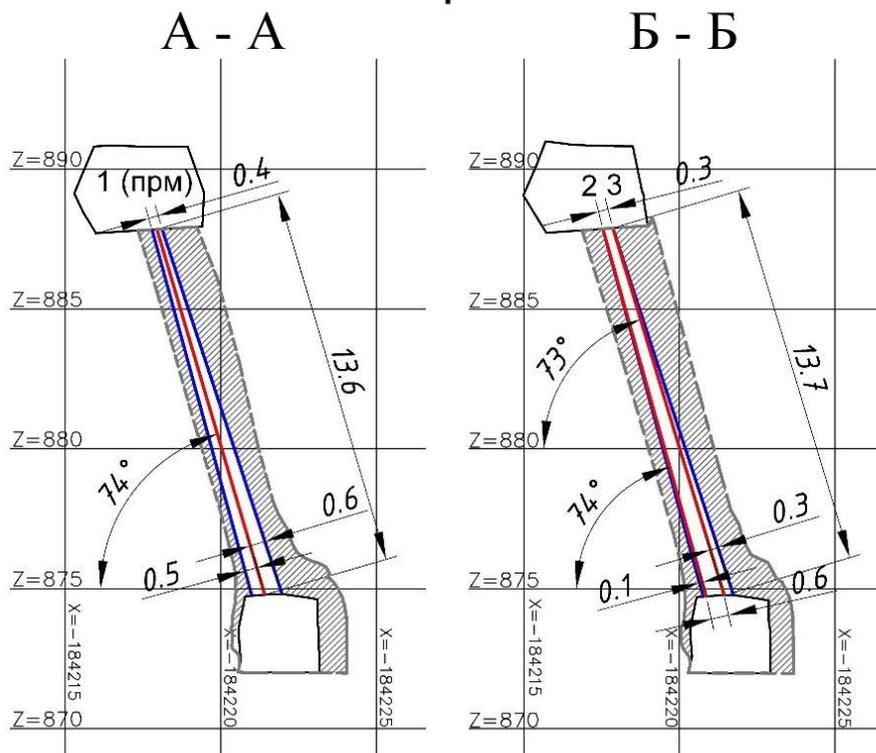


Рисунок 2.12 – Результат отбойки вееров скважин для различной мощности рудной жилы (А-А – промежуточный веер, Б-Б – основной веер): красным цветом показано расположение скважин, синим - контур рудного тела.

Веер 23

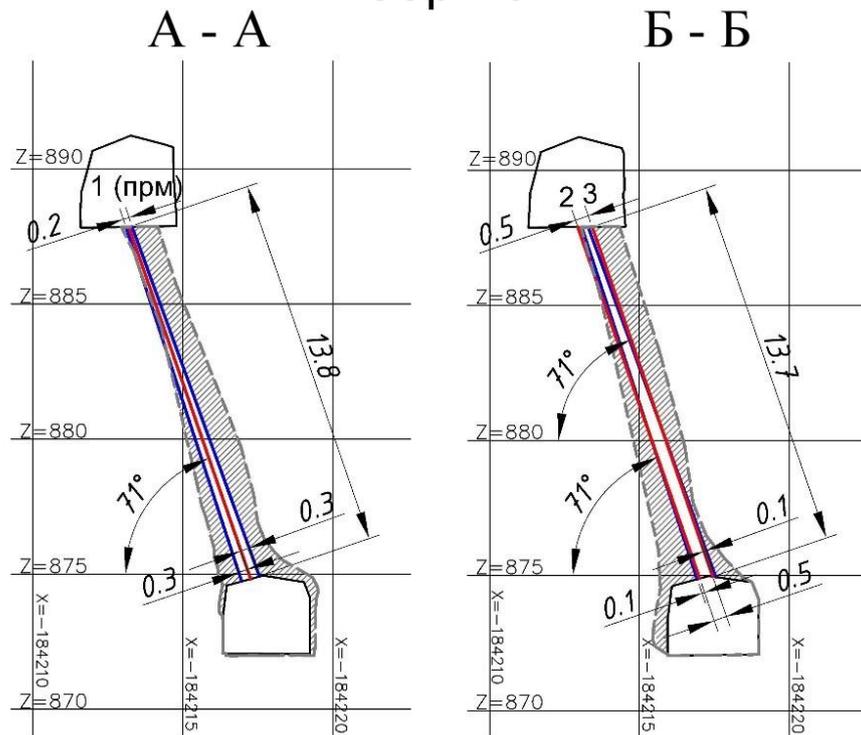


Рисунок 2.12 (продолжение) – Результат отбойки вееров скважин для различной мощности рудной жилы (А-А – промежуточный веер, Б-Б – основной веер): красным цветом показано расположение скважин, синим - контур рудного тела.

Как видно из представленного материала среднее отклонение фактического и проектного контуров составляет от единиц сантиметров на уровне забоя отбойных скважин до 90 см на контуре буровой выработки с образованием заколов по всей ее высоте в бортах выработки.

Обобщение анализа представленного материала позволило построить зависимости для расчета разубоживания руды от изменения угла залегания жилы в пределах отбиваемого веера (при его длине 14 м) для различных мощностей жилы (от 0,5 м до 3,0 м), представленную на рисунке 2.13 и зависимость для расчета объема засоряющих пород в зависимости от длины пролета выработанного пространства для различных мощностей жилы, представленную на рисунке 2.14.

Необходимо отметить, что угол наклона жилы в пределах длины скважины (14 м) изменяется в основном на 3-7°. В единичных случаях изменение угла наклона жилы в пределах скважины превышает 15°.

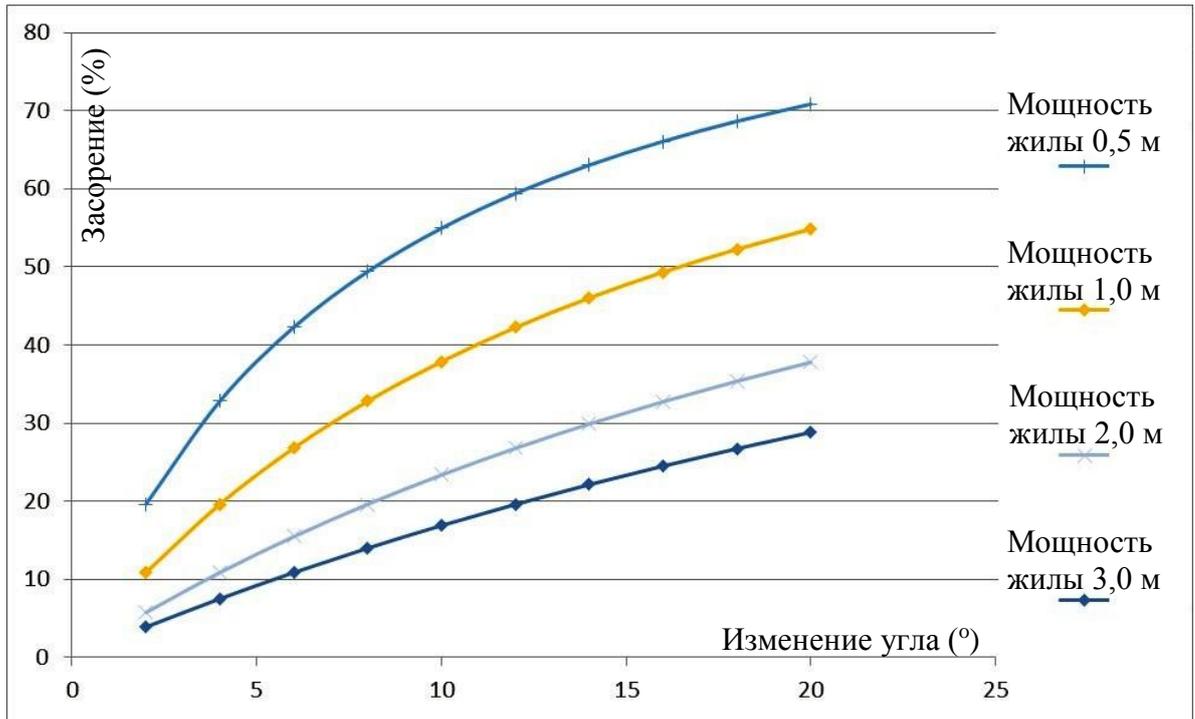


Рисунок 2.13 – Зависимость засорения руды (%) от изменения угла (°) залегания жилы в пределах взрываемого веера (при длине веера 14 м)

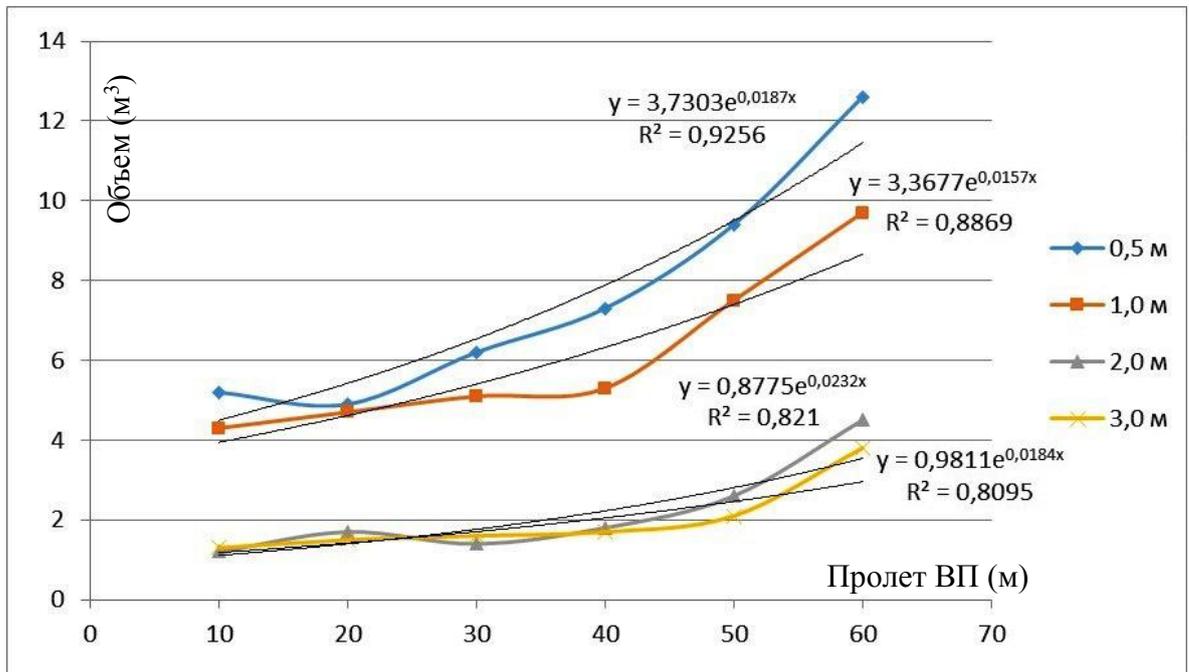


Рисунок 2.14 – Зависимость объема засоряющих пород от пролета ВП для различной мощности жилы (при длине скважин 14 м)

При этом засорение руды по этому фактору обычно не превышает 10-20 %, а основной причиной засорения руды является значительная присечка боковых пород (см. рисунок 2.11, 2.12), которая обусловлена напряженным

состоянием массива и совместным влиянием этого фактора с сейсмическим эффектом от производства БВР. Именно эти факторы учитываются в зависимостях, представленных на рисунке 2.14.

Для инженерных расчетов величины засорения руды от пролета выработанного пространства была разработана следующая зависимость:

$$V_{\text{пород}} = (A-m) \cdot \exp(0.02 \cdot L_{\text{ВП}}), \text{ м}^3 \quad (2.2)$$

где A – коэффициент (равен 4,2 при мощности жилы до 1,2 м; равен $(m+1)$ при мощности жилы более 2 м); m – мощность жилы, м; $L_{\text{ВП}}$ – пролет ВП, м

Необходимо отметить, что при незначительных мощностях рудных жил (менее 1,2 м) обязательная технологическая присечка боковых пород составляет разницу между минимальной вынимаемой мощностью (1,2 м) и мощностью рудной жилы.

Основным направлением улучшения технологических показателей очистной выемки тонких жил с невыдержанными характеристиками залегания является переход от технологии скважинной подэтажной отбойки к технологии слоевой отбойки (шпуровой или скважинной).

Для снижения потерь в целиках необходимо разработать технологию выемки межэтажных и межблоковых целиков, которая позволит безопасно отработать указанные целики. Наиболее целесообразным является использование технологи замораживаемой закладки, что позволит создать устойчивые слои искусственной кровли над межэтажным целиком и отработать рассматриваемый целик под защитой такого сооружения.

Закладочные породные массивы (даже в уплотненном состоянии) фактически представляют собой сыпучую среду и работа под такими выработанными пространствами без оставления целика в потолочине (создания искусственной потолочины) запрещены. Хотя «по факту» в зависимости от климатических условий в камере такие породы могут быть не только достаточно уплотненными, но и смерзшимися и обладать достаточной прочностью для пребывания в устойчивом состоянии довольно длительное время (до нескольких месяцев). Однако прогнозировать прочностные свойства

таких пород очень сложно, поэтому в принципе, не возможно ставить вопрос о ведении БВР под такими заложенными выработанными пространствами без реализации ряда мероприятий, обеспечивающих гарантированное достижение заданных прочностных свойств материала закладки и приведение потолочины в устойчивое состояние на технологически заданный период времени. Наиболее дешевым, но при этом и достаточно надежным способом создания таких потолочин в рассматриваемых условиях, является смерзающаяся закладка выработанного пространства. Все другие способы возведения искусственных сооружений (сцементированная закладка, возведение литых полос из различных материалов и др.) являются практически не осуществимыми, поскольку требуют создания больших технологических комплексов по приготовлению закладочных смесей и обеспечению положительной температуры в горных выработках, в которых ведется закладка, что практически приведет к растеплению выработок и необходимости их крепления и т.д. Возможно создание дополнительной сети выработок для вентиляции с положительной температурой воздушной струи (и подачи воды) в определенные временные диапазоны в определенные выработки, но это практически означает необходимость построения (проходки и поддержания) двух независимых вентиляционных сетей, что практически не приемлемо. А дефицит энергетических мощностей в таких регионах (расстояние между вахтовыми поселками больше ста километров) практически сводит к нулю целесообразность внедрения технологий, обеспечивающих вентиляцию подземных выработок с положительной температурой воздушной струи.

Специфика работы рассматриваемых предприятий также отличается незначительными размерами шахтных полей и сравнительно малыми сроками их отработки. Увеличение глубины горных работ происходит со скоростью 30-50 м в год и поскольку глубина промерзания пород составляет не более 300 м, то запасы руды в зоне вечной мерзлоты отрабатываются в течение 10-12 лет, поэтому разрабатываемые технологии должны быть достаточно гибкими и не

требовать значительного времени для их реализации и подтверждения на практике.

2.4 Выводы по главе 2

Анализ условий эксплуатации рудников ценных руд криолитозоны и параметров технологических схем их разработки показал, что к основным недостаткам используемых технологий можно отнести следующее:

- использование технологий, предусматривающих оставление охранных целиков (межблочных и межэтажных), и соответствующие потери ценных руд в охранных целиках (5-8 % в пределах блока, и 7-10 % в пределах этажа);

- значительные сложности в доизвлечении целиков без реализации во время отработки выемочных камер целого комплекса мероприятий, позволяющих доизвлекать такие запасы;

- наличие значительных эксплуатационных потерь руды (до 10-20 % по отдельным веерам, и до 10 % в среднем по блоку), обусловленных сложным залеганием рудных жил и необходимостью присечки значительного объема пустых пород (до 300 % от объема извлекаемой руды) в рамках заданной высоты подэтажа (15-20 м) для полного извлечения запасов ценных руд;

- высокое разубоживание руды при скважинной подэтажной отбойке – до 80 % в объеме некоторых отбиваемых вееров или до 60-70 % в среднем по камере – при наличии эксплуатационных потерь (до 10 %) и объемах присечки боковых пород до 300 % от объема отбиваемой руды;

- значительные сложности в планировании направлений бурения добычных скважин, связанные с недостаточной точностью исходной геологической информации в пределах подэтажа по его высоте из-за значительных градиентов изменения мощности и угла залегания рудных жил как по падению, так и по простиранию.

К основным направлениям совершенствования технологий отработки крутопадающих жил мощностью до 3 м можно отнести решение следующих задач:

- переход к слоевой выемке руды на базе шпуровой отбойки, что позволит снизить эксплуатационные потери ценных руд и разубоживание горной массы;

- разработка технологических схем, позволяющих создавать искусственные потолочины и межблоковые целики из замораживаемых закладочных массивов, возведение которых позволит отрабатывать (доизвлекать) межэтажные целики и не оставлять межблоковые целики;

- необходимость проведения комплекса аналитических и практических исследований по определению рациональных составов закладочных замораживаемых смесей, позволяющих обеспечить гарантированное достижение заданных прочностных и теплоизоляционных свойств, в рамках технологически заданных временных диапазонов.

Решению этих задач посвящены следующие разделы настоящей работы.

ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЗАМОРАЖИВАЕМОЙ ЗАКЛАДКИ

3.1 Основные свойства льда и льдокомполитов, определяющие параметры замораживаемых закладочных массивов

Надежность и заданные (расчетные) периоды эксплуатации любых инженерных сооружений в основном предопределены физико-механическими свойствами материалов конструкций и напряженным состоянием составляющих их элементов. В связи с этим, следует принимать во внимание изменение этих свойств от различных факторов (времени, температуры, вида нагружения и т.д.). Специфика создания закладочного массива из льда и льдокомполитов, «работающих» только в условиях отрицательных температур, требует тщательного аналитического рассмотрения их физико-механических свойств, а также характера деформирования с учетом различных факторов (состава, времени, температуры и т.д.).

Замораживаемая льдокомполитная закладка представляет собой многокомпонентную систему, свойства которой определяются физическими свойствами воды, льда, породы, включенных добавок и температуры окружающей среды (пород, воздуха и т.д.). В связи с этим, в данном разделе приведены основные характеристики физических свойств льда, мерзлых пород, воды и воздуха.

Лёд – кристаллическое тело, свойства которого определяются состоянием его пространственной решетки. Гексагональная решетка льда образована атомами кислорода, каждый из которых находится в центре тетраэдра и на его вершинах. Кристаллическая структура льда Ih представлена на рисунке 3.1. Для пространственной решетки льда характерна очень слабая водородная связь, определяющая взаимодействие его молекул, а, следовательно, и прочность. В естественных условиях редко встречаются

крупные монокристаллы льда, поэтому обычный лед стоит рассматривать как поликристаллическое тело, с достаточно малыми размерами кристаллитов (по сравнению с размерами образцов). Выделяют структуру льда: мелкозернистая (диаметр зерен менее 1 мм), среднезернистая (диаметр зерен от 1 до 5 мм) и крупнозернистая (диаметр зерен более 5 мм) [108].

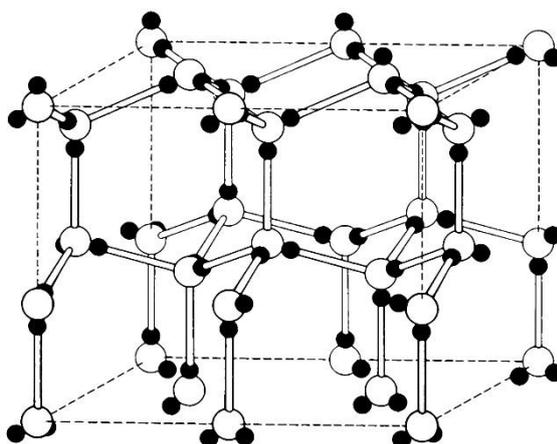


Рисунок 3.1 - Кристаллическая структура льда I_h: чёрным цветом обозначены атомы водорода, белым – кислорода [172]

Подвижность атомов водорода в пространственной решетке происходит до температуры примерно $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чистый лёд имеет температуру плавления $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, повышение давления на 1 кг/см^2 уменьшает температуру плавления на $0,0075^{\circ}$. Плотность чистого льда равна $0,916\text{ кг/см}^3$, которая может снизиться за счет пористости (пустот, занятых воздухом). Коэффициент объемного сжатия – 10^{-5} на 1 атм, то есть лёд практически не сжимаем, коэффициент Пуассона составляет $0,32\div 0,45$. Удельный объем чистого льда при нормальных условиях составляет $1,0908\text{ см}^3/\text{кг}$. Плотность воды при тех же условиях равна $0,999863\text{ кг/см}^3$. Следовательно, при замерзании вода увеличивается в объеме на 9 %. В зависимости от скорости приложения нагрузки и времени ее действия лед ведет себя как хрупкое, упругое или вязкопластичное тело. Релаксация льда заключается в убывании силы его сопротивления при постоянстве деформации [149].

Приведём некоторые справочные данные для пресноводного льда [92]: коэффициенты теплопроводности и температуропроводности пресного льда, лежат в пределах $(5,3\div 4,1)\times 103$ (кал·см⁻¹·с⁻¹·Град⁻¹) и $(11,6\div 16,3)\times 103$ (см²·с⁻¹) соответственно, в зависимости от температуры (от -2 до -30 °С) и пористости (от 0 до 10 %) [71]. Усреднённое значение коэффициента Пуассона (плотностью 0,87-0,92 кг/см³) составляет 0,34÷0,42; модуль Юнга равен 85 000÷90 000 кгс/см² (таблица 3.1, 3.2).

Таблица 3.1 - Прочностные характеристики пресноводного льда [92]

| Температура, °С | Прочность на сжатие (МПа) | Прочность на растяжение (МПа) | Прочность на изгиб (МПа) | Прочность на срез (МПа) |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0÷-5 | 1,57÷2,94 | — | 0,98÷1,57 | 0,29÷0,59 |
| 0÷-10 | — | 0,88÷1,18 | — | — |
| -5÷-10 | 2,94÷3,53 | — | 1,56÷1,86 | — |
| -5÷-15 | — | — | — | 0,78÷1,18 |
| -10÷-15 | 3,53÷3,83 | — | — | — |
| -10÷-20 | — | 1,18÷1,47 | 1,86÷2,06 | — |
| -15÷-30 | — | — | — | 0,88÷1,28 |
| -20÷-30 | — | — | 2,06÷2,16 | — |
| < -15 | 3,83÷4,71 | — | — | — |
| < -20 | — | 1,37÷1,77 | — | — |

Таблица 3.2 - Прочность (на отрыв) смерзания (кгс·см⁻²) пресноводного льда с различными материалами [92]

| Материал | Температура льда, °С | | |
|----------------|----------------------|-----------|------|
| | 0 ÷ -5 | -10 ÷ -15 | -20 |
| Медь | 21 | — | — |
| Железо | 0,14-20 | — | — |
| Стекло | 19 | — | — |
| Бетон гладкий | 8-16 | — | — |
| Дерево гладкое | 5,2-6,2 | 7-13 | 7-22 |
| Полиэтилен | — | 1,3 | — |
| Фторопласт | — | 0,1 | — |

На рисунке 3.2 показана адгезионная прочность пресноводного льда с другими материалами (по данным различных авторов). Значение адгезии (смерзания) льда существенно зависит от направления (сдвиг или отрыв) и скорости приложения усилия. Как правило, величина адгезии на отрыв ниже

значений на сдвиг, при этом нет прямой пропорциональности между ними [131].

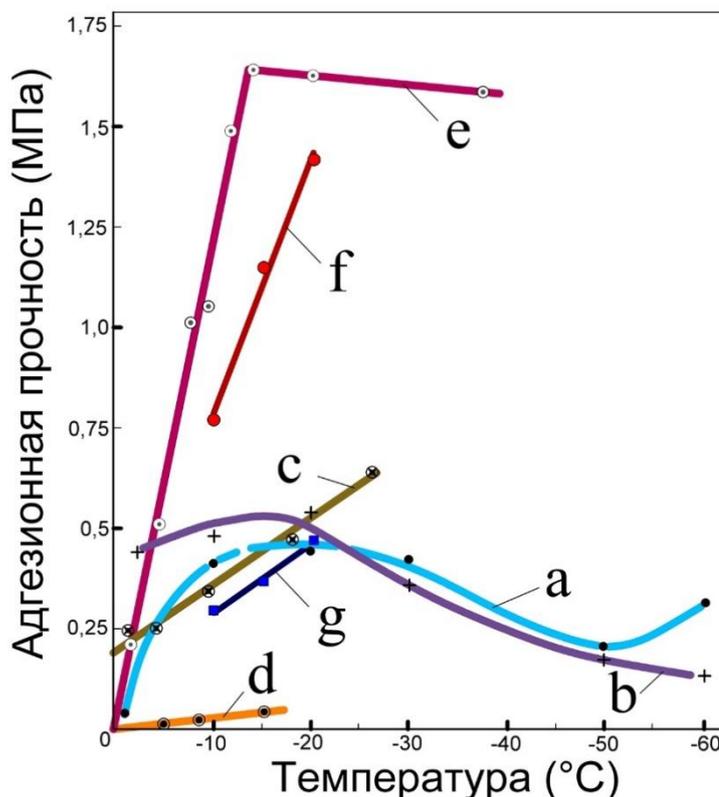


Рисунок 3.2 - Влияние температуры на адгезионную прочность льда с различными материалами:
 сталь (а), стекло (б) при сдвиге [182]; полистирол при отрыве (в) и сдвиге (д) [178]; сталь (е) при сдвиге [178]; сталь (ж) и полиуретан (з) при сдвиге [174]

Лед, как и все твердые тела, под нагрузкой деформируется, причем в нем происходят как упругие, так и пластические деформации. Механические свойства льда (даже в случае простейшего – одноосного напряженного состояния) зависят от ряда таких факторов, как: уровня напряжений, скорости нагружения, времени действия и характера нагрузок (кратковременная, длительная, ударная, взрывная и др.), температуры льда, его строения, размера и структуры (строения) образца, агрессивности окружающей среды, поверхностных (контактных) условий, которые обуславливают протекание процесса деформации образца и его разрушения (хрупкого, вязкого, пластического).

Лед – тело с явно выраженными свойствами пластичности. При длительном действии постоянных нагрузок пластические деформации льда

можно рассматривать как вязкое течение, зависящее от температуры и действующего напряжения (рисунок 3.3). При кратковременных нагрузках (временном сопротивлении сжатию) предел пластичности в среднем составляет ~3 МПа [148]. Этот показатель определяется как величина максимального напряжения (сопротивления) в испытываемом образце льда перед разрушением при быстром нагружении [21].

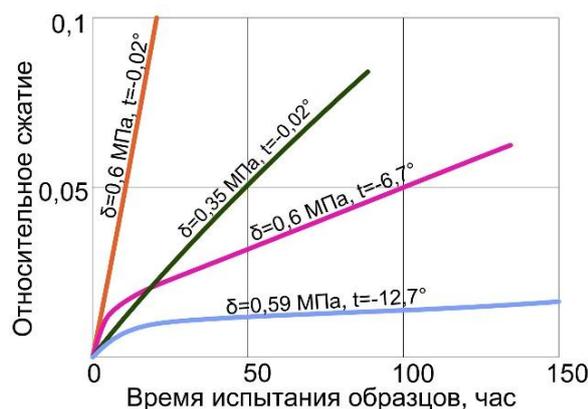


Рисунок 3.3 - Кривые деформации образцов поликристаллического льда при сжатии (σ - величина напряжения на сжатие, t -температура образцов) [173]

При испытаниях вслед за кратковременной упругой деформацией образца льда начинается пластическая деформация (ползучесть). Затем устанавливается постоянная скорость деформации, зависящая от давления и температуры. На следующей стадии деформации постепенно ускоряются, что приводит к разрушению образца.

Сравнение данных различных исследователей, полученных в лабораторных и шахтных условиях показывает, что прочность льда примерно одинакова и зависит от температуры и условий намораживания [105, 121].

Ряд видных исследователей: С.С. Вялов, Н.К. Пекарская, Н.А. Цытович, С.Е. Гречищев и др. определили, что реологические процессы у льда продолжаются значительно больше времени, чем у мерзлых пород массивной текстуры, поэтому прочность льда снижается значительно медленнее, чем прочность мерзлых пород в равных условиях (т.е. предел длительного сопротивления льда сжатию) [7, 24, 25, 51].

Следует отметить, что сопротивление льда варьирует в широких пределах, которые определяются его структурой, размерами образцов, ориентировкой кристаллов относительно направления сжатия, температурой и другими факторами. Вместе с тем, отмечается большой разброс значений предела прочности даже при испытании одинаковых по своей структуре образцов в аналогичных условиях [20, 180].

Известно, что при ориентировке давления вдоль оси кристаллов (R||, т.е. перпендикулярно к поверхности замерзания) предел прочности при сжатии всегда больше, чем при перпендикулярном направлении (R⊥) [60].

При увеличении размеров образцов наблюдается снижение их прочности при сжатии и одновременно с увеличением отношения длины образца к его ширине наблюдается понижение предела прочности [147]. При этом наиболее интенсивное изменение направления графиков происходит при площади поперечного сечения образца до $\sim 400 \text{ см}^2$, далее график приобретает вид прямой, слегка наклоненной вниз к оси абсцисс. Это объясняется тем, что вероятность возникновения дефектов во льду пропорциональна его объему [45].

Для одноосного напряженного состояния скорость деформации, при которой происходит переход из пластичного в хрупкое состояние находится в диапазоне между 10^{-7} и 10^{-6} с^{-1} при $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ [28].

При внедрении технологий с ледяной закладкой предварительно определялась прочность искусственно намороженного льда на одноосное сжатие как в лабораторных, так и в полевых условиях. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.3. Сравнительный анализ результатов показывает, что пределы прочности льда, которые получены в процессе лабораторных и натуральных испытаний, практически одинаковы [81].

Известно, что упругие свойства тела отображаются четырьмя характеристиками [120]: модулем продольной упругости (модулем Юнга) E (МПа), модулем сдвига G (МПа), модулем объемного деформирования K

(МПа) и коэффициентом поперечной деформации (коэффициентом Пуассона) ν , связанными между собой зависимостью:

$$G = E/2 (1 + \nu) = K (1 - 2 \nu)/2(1 + \nu) \quad (3.1)$$

Таблица 3.3 - Прочность послойно намороженного льда, полученная в процессе лабораторных и натуральных испытаний [75]

| Температура льда, °С | Метод испытания | | | | | |
|----------------------|--------------------------|----------------------|---|------------------------|----------------------|---|
| | лабораторный | | | Натурный | | |
| | размер ребра образца, см | количество испытаний | средний предел прочности, кгс/см ² | размер ребра блока, см | количество испытаний | средний предел прочности, кгс/см ² |
| -8 ÷ -9,2 | 20 | 7 | 44,3 | 24 | 16 | 44,6 |
| | 20 | 7 | 47,6 | 48 | 16 | 47,1 |

По данным многочисленных исследований можно принять следующие показатели упругих постоянных для льда, представленные в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Показатели упругих постоянных для льда

| Показатели упругих постоянных для льда | Обозначение | Значение |
|---|-------------|---------------|
| Статический модуль продольной упругости | E | 4000 МПа |
| Модуль сдвига | G | 1500 МПа |
| Динамический модуль | E | 9000 МПа |
| Динамический модуль | G | 3000÷3500 МПа |
| Коэффициент Пуассона | ν | 0,35÷0,4 |

При расчетах динамических нагрузок (взрывы, сейсмические нагрузки и т.д.) необходимо принимать динамические модули упругости.

Анализ многочисленных экспериментальных данных показывает, что при скоростях нагружения от 0,5 до 5,0 МПа/мин и скоростях деформации от 2 до 20 см/мин прочность льда снижается соответственно в 3,6 и 2,1 раза.

Обобщение результатов испытаний льда, проведенных различными исследователями, позволяют принять значения прочностных характеристик в следующих диапазонах: прочность на сжатие при температурах от 0 °С и до -35 °С от 1,0 до 7,5 МПа; прочность на растяжение (разрыв) в тех же температурных интервалах от 0,5 до 2,0 МПа.

При построении уравнения состояния любого реального тела исходят из двух основных зависимостей: деформации от времени при постоянном напряжении и напряжения от времени при постоянной деформации. В первом случае рассматривается явление ползучести материала, а во втором – явление релаксации.

Под действием длительной нагрузки лед может изменять свою форму без заметных признаков разрушения, проявляя свойство текучести. Однако в других условиях (низкие температуры, динамический характер нагрузок) разрушение льда является типично хрупким. Таким образом, поведение поликристаллического льда под нагрузкой зависит от следующих, тесно связанных между собою процессов: деформаций (упругих и пластических) кристаллов (их перемещения или разрушения) с одновременным протеканием процессов рекристаллизации (своеобразного восстановления структуры льда) с восстановлением свойств элемента массива (или образца) в границах уже изменившейся геометрии [16]. При температурах, близких к 0 °С в природных условиях очень большую роль (а зачастую решающую роль) играет неоднородность массивов горных пород в естественных условиях и прогнозировать «поведение» техногенных конструкций с требуемой надежностью при таких температурах практически не возможно.

Мёрзлые породы. Обоснование параметров и совершенствование эффективных технологических схем подземной разработки месторождений всегда базировалось на знании и использовании физико-механических свойств мёрзлых пород, характера и особенностей их деформирования и разрушения.

Известно, что зависимость прочности (при сжатии) мерзлых крупнообломочных пород от степени их льдонасыщенности проявляется по-разному в случаях быстрого ($t_{пр} \leq 1 \div 2$ ч) и длительного нагружения. При быстром нагружении наибольшей прочностью характеризуется самая льдонасыщенная порода, по мере уменьшения весовой влажности и степени заполнения пор льдом ее прочность существенно снижается (таблица 3.5) [142, 143]. С увеличением влажности прочность мерзлых пород возрастает до тех

пор, пока влажность не превысит максимальную влагоемкость (рисунок 3.4) [6]. При длительном нагружении для таких пород характерна оптимальная льдонасыщенность (меньшая полной), соответствующая наибольшей прочности. Резкое снижение прочности крупнообломочных пород наблюдается при степени заполнения пор льдом менее 40 %, а на границе 20 % льдонасыщения порода переходит в сыпучее состояние [142].

Таблица 3.5 - Прочность при сжатии мерзлых крупнообломочных пород от весовой влажности и степени их льдонасыщенности [142]

| Время | W=12,59 % (G=92,2 %) | | W=5 % (G=42,4 %) | | W=3,1 % (G=26,5 %) | |
|--------|----------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | $\sigma_{пр}$, МПа | σ_p , МПа | $\sigma_{пр}$, МПа | σ_p , МПа | $\sigma_{пр}$, МПа | σ_p , МПа |
| 10 мин | 3,60 | 4,05 | 3,16 | 3,35 | 1,49 | 1,53 |
| 15 мин | 3,36 | 3,83 | 3,00 | 3,21 | 1,47 | 1,51 |
| 30 мин | 3,06 | 3,57 | 2,79 | 2,96 | 1,43 | 1,48 |
| 1 ч | 2,92 | 3,32 | 2,70 | 2,77 | 1,38 | 1,44 |
| 2 ч | 2,81 | 3,08 | 2,64 | 2,71 | 1,35 | 1,39 |
| 5 ч | 2,66 | 2,76 | 2,56 | 2,63 | 1,29 | — |
| 10 ч | 2,46 | 2,65 | 2,45 | — | 1,26 | — |
| 20 ч | 2,33 | 2,52 | 2,39 | — | 1,23 | — |
| 100 ч | 2,17 | — | 2,28 | — | 1,19 | — |
| >100ч | 1,81 | — | 2,07 | — | 1,10 | — |

Примечание: $\sigma_{пр}$ – напряжение, вызвавшее переход деформирования породы из стадии установившейся ползучести в стадию прогрессирующей ползучести за указанный промежуток времени; σ_p – напряжение, вызвавшее полное разрушение образца за указанный промежуток времени; x – значения $\sigma_{пр}$ рассчитанные по формуле; W – весовая влажность породы; G – весовая льдистость (льдонасыщенность)

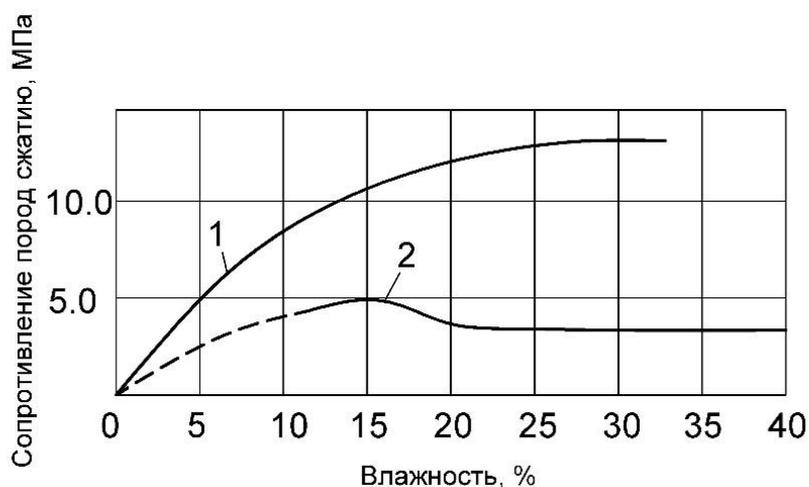


Рисунок 3.4- График зависимости сопротивления мерзлых пород сжатию от общей влажности: 1 — песок, 2 — глина

Во многом аналогичное явление наблюдалось в опытах А.Ф. Курильчика и Г.З. Перльштейна при разрушении мерзлых песчаных и гравийных пород [67].

Сопротивление мерзлых пород нагрузкам определяется прочностью внутренних связей между отдельными частицами в агрегатах мерзлых пород, и прочностью связей между самими агрегатами (сцепление или адгезия льда с частицами).

Пределы прочности при сжатии замороженного грунта и льда в зависимости от температуры получены отечественными исследователями и указаны в таблице 3.6 [19].

Таблица 3.6 - Пределы прочности при сжатии грунтов, насыщенных водой

| Грунты, насыщенные водой | Пределы прочности при сжатии (в кгс/см ²) | | | | |
|--------------------------|---|--------------|---------------|---------------|---------------|
| | -1 до -5 °С | -5 до -10 °С | -10 до -15 °С | -15 до -20 °С | -20 до -25 °С |
| Песок | 25—85 | 85—127 | 127—144 | 144—152 | 152—180 |
| Супесь | 20—65 | 65—88 | 88—105 | 105—122 | 122—140 |
| Глинистый | 15—45 | 45—60 | 60—75 | 75—95 | 95—100 |
| Пылеватоилистый | 10—15 | 15—35 | 35—45 | 45—65 | 65—70 |
| Лёд | — | — | 13—18 | 18—20 | 20—30 |

Для чистого кварцевого песка, насыщенного водой и замороженного, временное сопротивление сжатию в зависимости от температуры меняется в пределах, указанных в таблице 3.7 [13].

Таблица 3.7 - Временное сопротивление сжатию чистого кварцевого песка, насыщенного водой при разной температуре

| Температура льда, °С | 0 | -5 | -10 | -15 | -20 | -25 |
|-------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Временное сопротивление сжатию, МПа | 1,96 | 6,86 | 11,28 | 14,71 | 17,65 | 19,61 |

Предел механической текучести $\sigma_{сж}$ не является величиной постоянной, а зависит от скорости приложения нагрузки, возрастая с ее увеличением (рисунок 3.5). По графику можно установить и предельно-длительное сопротивление сжатию мерзлых грунтов (экстраполируя кривые $\sigma=f(v)$ до пересечения с осью σ) (см. рисунок 3.5). Зависимость временного сопротивления сжатию мерзлых грунтов от величины отрицательной

температуры выражена очень резко. Для иллюстрации выше сказанного приведены кривые для трёх мерзлых грунтов: 1 – песка; 2 – супеси и 3 – глины (рисунок 3.6). Данные, полученные зарубежными исследователями, указывают на аналогичные зависимости (рисунок 3.7).

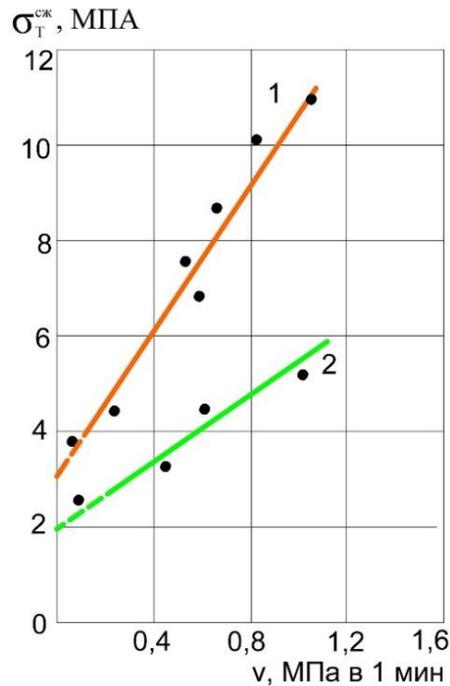


Рисунок 3.5 - Зависимость предела текучести ($\sigma_T^{\text{сж}}$) мёрзлых грунтов при сжатии от скорости (v) приложения нагрузки: 1 — мёрзлый песок ($T=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W_c=17\%$); 2 - мерзлая глина ($T=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $W_c=32\%$), где T - температура, W_c - влажность грунта [158]

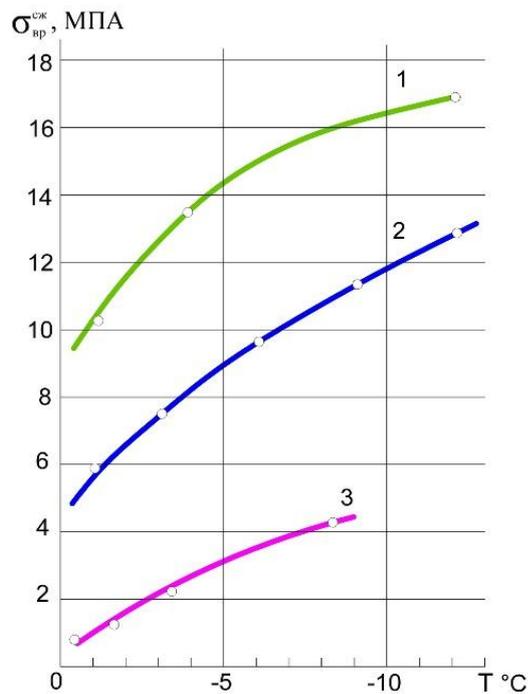


Рисунок 3.6 - Зависимость временного сопротивления сжатию мёрзлых грунтов ($\sigma_{\text{вр}}^{\text{сж}}$) от величины отрицательной температуры ($T\text{ }^{\circ}\text{C}$): 1 — песок; 2 — супесь; 3 — глина [158]

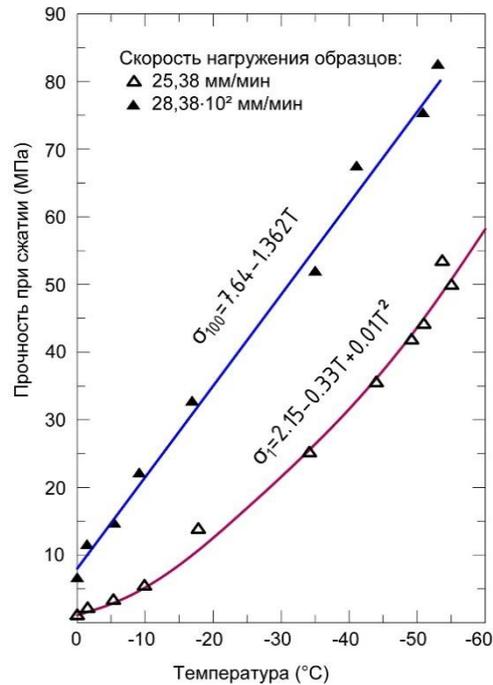


Рисунок 3.7 - Прочность замороженного грунта в зависимости от температуры [175]

Прочность мёрзлого грунта определяется его температурой и содержанием льда (влаги). Выполняя роль связующего материала и намного уступая в прочности породе или гравию, именно лёд определяет прочность мёрзлого грунта. При уменьшении содержания льда (менее 20 % сухой массы), прочность мёрзлого грунта снижается. Такой материал с очень низким содержанием льда называют сухозамороженным, и наличие его в подземных выработках может вызвать серьезные проблемы, связанные с их устойчивостью.

Влияние скорости деформирования на сопротивление замороженного грунта аналогично, как и для льда – при малых скоростях деформирования микродефекты материала (трещины, полости и др.) в результате сдвиговых процессов и вторичной кристаллизации могут залечиваться (закрываются), что приводит к увеличению прочности материала. При большей скорости деформации процессы вторичной кристаллизации не успевают протекать и предел механической текучести при одноосном сжатии уменьшается [60]. В виду того, что лёд является связующим для всех видов замораживающей

закладки, скорость ее деформирования также будет оказывать существенное влияние на предел механической текучести, снижаясь при увеличении скорости. Для выбора материала при создании теплоизоляционного закладочного слоя требуется знание основного параметра, характеризующего его способность проводить тепло, а именно коэффициента теплопроводности. В таблицах 3.8 и 3.9 приведены свойства основных материалов, которые могут использоваться при устройстве замораживаемой закладки.

Таблица 3.8 - Величины коэффициента теплопроводности основных материалов для создания замораживаемой закладки (для температуры материалов 0 °С) [155]

| Материал | Объёмный вес (γ) в сухом состоянии, кг/м ³ | Коэффициент теплопроводности (λ), ккал/м·ч·°С | Удельная теплоёмкость (c), ккал/кг·°С | Коэффициент температуропроводности ($\alpha \cdot 10^3$), м ² /ч |
|-------------------------------|--|---|---|---|
| Вата минеральная | 150,0 | 0,06 | 0,18 | 2,23 |
| Картон плотный | 1000,0 | 0,2 | 0,35 | 0,57 |
| Мрамор, гранит, базальт | 2800,0 | 3,0 | 0,22 | 4,87 |
| Песчаники и кварциты | 2400,0 | 1,75 | 0,22 | 3,32 |
| Засыпки теплоизоляционные | | | | |
| Шлак топливный | 1000,0 | 0,25 | 0,18 | 1,39 |
| -//- | 700,0 | 0,19 | 0,18 | 1,51 |
| Шлак доменный гранулированный | 500,0 | 0,14 | 0,18 | 1,56 |
| Опилки древесные | 250,0 | 0,08 | 0,6 | 0,53 |
| Сухой песок (в засыпке) | 1600,0 | 0,5 | 0,2 | 1,56 |
| Полимеры | | | | |
| Пенопласт ПХВ-1 | 125,0 | 0,05 | 0,3 | 1,33 |
| Пенопласт ПС | 70,0 | 0,04 | 0,35 | 1,63 |
| Пенополистирол | 30,0 | 0,04 | 0,35 | 3,81 |
| Стекло | | | | |
| Стекло оконное | 2500,0 | 0,7 | 0,2 | 1,4 |
| Вата стеклянная | 100,0 | 0,05 | 0,2 | 2,5 |
| Газостекло или пеностекло | 400,0 | 0,12 | 0,2 | 1,5 |
| -//- | 200,0 | 0,1 | 0,2 | 2,5 |
| Снег, лёд и вода | | | | |
| Лед | 900,0 | 2 | 0,5 | 4,45 |
| Снег свежеснежавший: | 200,0 | 0,09 | 0,5 | 0,9 |
| уплотненный | 350,0 | 0,3 | 0,5 | 1,72 |
| в начале таяния | 500,0 | 0,55 | 0,5 | 2,2 |
| Вода | 1000,0 | 0,47 | 1,0 | 0,47 |

Таблица 3.9 - Теплопроводность и объёмный вес некоторых строительных и изоляционных материалов [15]

| Наименование материалов | Коэффициент теплопроводности (λ), ккал/м·час·°С | Объёмный вес (γ) (кг/м ³) |
|--------------------------|---|--|
| Торфяные плиты | 0,06-0,07 | 350-400 |
| Стружки | 0,08-0,1 | 300 |
| Опилки ¹ | 0,08-0,1 | 250-300 |
| Солома ² | 0,1-0,13 | - |
| Дерево | 0,15-0,33 | 600 и выше |
| Сухой строительный мусор | 0,25 | - |
| Земля сухая | 0,25 | 1100 |
| Шлак | 0,16-0,25 | 700-1000 |
| Сухой песок | 0,75 | 1600 |
| Кирпичная кладка | 0,7 | 1700 |
| Грунт | 1,0-2,0 | 1800-1900 |
| Гравий | 1,0-2,0 | 1800-1900 |

Примечание: 1 - По данным НИИЖТ при влажности опилок $W=40\%$, $\lambda=0,17$ ккал/м·час·°С; при $W=60\%$ $\lambda=0,22$ ккал/м·час·°С. 2 - Данные для соломы при повышенной влажности: $W=40\%$, $\lambda=0,225$ ккал/м·час·°С; $W=66\%$, $\lambda=0,290$ ккал/м·час·°С

3.2 Свойства и состав наполнителей для льдокомполитов, применяемых для создания замораживаемой закладки

Известно, что естественный лед имеет сравнительно низкую прочность и его способность к разрушению быстро возрастает при температурах, близких к нулю. В связи с этим, исследования ученых и инженеров были сосредоточены на выявление методов упрочнения льда в результате его армирования или добавки инертных материалов (древесной массы, стекловолокна и пр.) – создания льдокомполитных материалов.

Льдокомполит представляет собой композиционный материал с матрицей из льда. В разное время в качестве наполнителя для льдокомполитов исследовался большой спектр добавок от бумажной пульпы до высокомолекулярных соединений. Использование того или иного наполнителя зависит от конкретных экономических и эксплуатационных параметров создаваемого (эксплуатируемого) сооружения.

На основании проделанного информационно-патентного поиска и проведенных экспериментальных работ рассмотрены наиболее перспективные решения по увеличению прочности и армированию льда, а также эффективные методы управления его физико-механическими свойствами. С этой целью приведен обзор и анализ методов с указанием их достоинств и недостатков. В виду того, что большая часть этих льдокомпозитных материалов разрабатывалась для нужд инженерной геокриологии, потребовались некоторые технические уточнения для их применения на месторождениях криолитозоны. На сегодняшний день для замораживаемой закладки отсутствуют рекомендации по выбору наполнителей (за исключением породы), методов расчёта и технологии производства работ.

Необходимо отметить, что понятия «армирование» и «усиление» материалов имеют в данной работе различные значения. «Усиление» (материалов или конструкций) является более общим понятием и может быть достигнуто разными способами (изменением свойств материалов, увеличением площади несущего сечения и т.п.). Армирование является одним из способов усиления конструкций определенными элементами (арматурой) из другого, более прочного материала (например, усиление льда геосинтетикой и т.п.). На рисунке 3.8 приведена классификация способов усиления льда, которая заимствована с соответствующими изменениями [165]. Необходимо отметить, что использование древесины (досок, щитов и т.д.) или армирование геосинтетикой является довольно дорогостоящим (в дорожном строительстве) и не позволяет получить существенного увеличения несущей способности. Из проанализированного опыта строительства различных инженерных сооружений в криолитозоне [18, 22, 29, 54, 146] для замораживаемой закладки наиболее приемлемым является вмораживание в слой льда армирующих материалов. Так при послойном промораживании (необходима определенная продолжительность заморозки при создании слоя льда заданной толщины) прочность пористого льда на сжатие значительно

увеличивается. Использование термосифонов с воздухом в качестве теплоносителя обеспечивает повышение такой прочности в среднем до 7,8 МПа [63].



Рисунок 3.8 - Классификация способов усиления льда

Добавление в воду 5 % (по массе) крахмала позволяет увеличить прочность льда в 2,7 раза (при $t = -2$ °C) и 2,8 раза (при $t = -20$ °C) [2, 58]. При добавлении поливинилового спирта (ПВС) и глицерина (ПВС от 8 мас. % до 12 мас. % и глицерина от 0 % до 0,5 %) упрочнение льда составляет 1,6÷8,1 раз (при температуре -2 °C и -20 °C). При этом при содержании ПВС менее 8 мас. % и глицерина менее 0,05 мас. % повышение прочности льда не наблюдалось. Увеличение содержания ПВС (более 12 мас. %) приводит к увеличению вязкости состава, а глицерина (выше 0,5 мас. %) приводит к снижению температуры кристаллизации [2]. При содержании ПВС около 10 % (без глицерина) относительное упрочнение достигало 9,7 раза (при -60 °C) [4]. Эффективным армирующим материалом для льда считаются стеклянные волокна. Льдокомпози́ты на основе стеклоплатна ХПС при его 4 %-ном объемном содержании дают относительную прочность при сжатии 2,1 раза (при $t = -5$ °C) и 2,4 раза (при $t = -20$ °C) [18]. Доктор Кингери путем армирования

льда фиброгласом (вид стекловолокна) добился его упрочнения более чем в 10 раз [179]. Однако данный способ дорогой и трудоемкий.

Древесная целлюлоза (Пайкерит). Испытания замороженной древесной целлюлозы, проводились в Монреале (для Montreal Engineering Company Limited) летом 1943 года в рамках исследования свойств льда (при создании пайкерита) [186]. Древесину измельчали путем шлифования о поверхность каменного круга в проточной воде, которая предотвращала сжигание древесного волокна, и уносила тонкоизмельченный материал. Полученное волокно, содержанием $1 \div 2$ %, формуют в тонкие листы, по такому же принципу, как бумагу. Уменьшают содержание воды до 50 %, которое при хранении за счет дополнительного испарения доходило до 40 %. Добавление большего количества воды вместе с перемешиванием, с помощью пульпо- или бетоносмесителя, приводило к однородной суспензии древесного волокна с любым желаемым содержанием целлюлозы.

Таким образом, рекомендуемое содержание целлюлозы $4 \div 8$ %. По своим свойствам целлюлоза при такой концентрации приближается к свойствам портландцемента, используемого в строительных работах, для которого существует оборудование для смешивания, транспортировки и укладки. В качестве стандартной скорости нагрузки была принята скорость 2,54 мм в минуту. В некоторых случаях скорость повышалась до 25,4 мм.

Испытания на сжатие были проведены на 10 см кубических образцах. Два испытания с нагрузкой, приложенной параллельно поверхности заморозки (вдоль оси намораживания) и два с нагрузкой, приложенной перпендикулярно поверхности (слоям) заморозки. Как и в случае замороженной воды или не армированного льда, прочность на сжатие по нормали к поверхности (\perp) была больше, чем параллельно (II) к поверхности.

В таблице 3.10 приведены все испытания на сжатие целлюлозных кубов (гранью) 10 см, а также несколько испытаний речного льда и льда из водопроводной воды. В таблице 3.11 дополнительно приведены испытания на сжатие замороженных целлюлозных цилиндров.

Таблица 3.10 - Прочность на сжатие замороженных целлюлозных образцов кубической формы (10*10 см)

| Скорость нагружения, мм/мин | Температура | | | |
|---------------------------------|----------------------|------|-----------|-------|
| | -9,44 °С | | -17,78 °С | |
| | Направление нагрузки | | | |
| | П | ⊥ | П | ⊥ |
| Прочность на сжатие (МПа) | | | | |
| 1 % пульпы | | | | |
| 2,54 | 5,72 | 7,17 | 6,69 | 8,89 |
| 2 % пульпы | | | | |
| 2,54 | 6,69 | 6,64 | 7,58 | 9,51 |
| 4 % пульпы | | | | |
| 25,4 | 8,11 | 9,86 | 12,41 | 16,62 |
| 2,54 | 6,55 | 8,00 | 8,52 | 10,20 |
| 6 % пульпы | | | | |
| 2,54 | 6,96 | 8,24 | 9,1 | 11,86 |
| 7 % пульпы | | | | |
| 2,54 | 7,37 | 8,89 | 9,45 | 11,03 |
| 8 % пульпы | | | | |
| 2,54 | 7,27 | 8,21 | 9,89 | 11,10 |
| 10,5 % пульпы | | | | |
| 2,54 | - | - | 10,58 | 11,27 |
| 14 % пульпы | | | | |
| 2,54 | 7,52 | 7,61 | 10,36 | 10,71 |
| Речной лед | | | | |
| 2,54 | 5,27 | 6,24 | 7,27 | 8,24 |
| Замороженная водопроводная вода | | | | |
| 2,54 | 5,45 | 4,76 | 7,86 | 4,96 |

Таблица 3.11 - Прочность на сжатие замороженных целлюлозных образцов цилиндрической формы 0,084 м в диаметре и 0,17 м высотой (скорость нагружения 2,54 мм/мин)

| Содержание пульпы, % | Температура (°С) | | | | |
|----------------------|---------------------------|-----------|--------|-------|--------|
| | Замораживания | -9,44 | -17,78 | -9,44 | -17,78 |
| | | Испытаний | -9,44 | -9,44 | -17,78 |
| 4 | Прочность на сжатие (МПа) | 7,65 | 7,79 | 10,20 | 9,72 |
| 6 | | 7,79 | 7,89 | 10,51 | 9,72 |
| 8 | | 7,07 | 7,83 | 10,31 | 9,86 |

Результаты испытаний прочности на сжатие при длительном нагружении приведены в таблицах 3.12 и 3.13 [189]. В таблице 3.11 представлены данные по образцам, содержащим целлюлозу 4, 6 и 8 %, испытанные при температуре от -17,78 °С до -9,44 °С, нагрузка прикладывалась параллельно и перпендикулярно к замороженной

поверхности в пределах от 0,69 до 2,76 МПа. Результаты испытаний для предела ползучести приведены в процентах в год, или мм/мм в год.

Таблица 3.12 - Ползучесть при сжатии

| Температура -9,44 °С | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Содержание пульпы, % | Направление нагрузки | Напряжение, МПа | | | |
| | | 0,69 | 1,38 | 2,07 | 2,76 |
| | | Ползучесть, % в год | | | |
| 4 | П | 0,85 | 12,98 | 250,0 | - |
| | ⊥ | 1,09 | 10,10 | 140,0 | - |
| 6 | П | 1,49 | 6,15 | 21,44 | - |
| | ⊥ | 1,10 | 3,73 | 4,58 | - |
| 8 | П | 1,46 | 9,85 | - | - |
| | ⊥ | 0,66 | 9,90 | 15,35 | - |
| Речной лёд | П | 20,80 (при напряжении 0,34 МПа) | | 63,5 (при напряжении 0,51 МПа) | |
| | ⊥ | 2,62 (при напряжении 0,34 МПа) | | 5,25 (при напряжении 0,51 МПа) | |
| Температура -17,78 °С | | | | | |
| 4 | П | 1,38 | - | 12,9 | 139,0 |
| | ⊥ | 1,10 | - | - | - |
| 6 | П | 0,83 | 3,26 | 9,10 | 32,4 |
| | ⊥ | 0,85 | 2,19 | 6,43 | 11,77 |
| 8 | П | 1,46 | - | 16,9 | - |
| | ⊥ | 0,74 | - | 2,57 | - |
| Речной лёд | П | 24,90 (при напряжении 0,34 МПа) | | 116,0 (при напряжении 0,51 МПа) | |
| | ⊥ | 2,92 (при напряжении 0,34 МПа) | | 5,57 (при напряжении 0,51 МПа) | |

Таблица 3.13 - Снижение скорости ползучести (пластического течения) с течением времени

| Содержание пульпы, % | Температура, °С | Направление нагрузки | Напряжение, МПа | Ползучесть первые 200 часов, % в год | Ползучесть при дальнейшем воздействии (после 200 часов), % в год | |
|-------------------------|-----------------|-------------------------|--------------------|---|--|-------------------------|
| 4 | -9,44 | П | 1,38 | 11,45 | 6,04 (300 - 700 часов) | 3,40 (700 - 1500 часов) |
| 6 | -9,44 | П | 1,38 | 1,40 | 0,49 (470 - 670) | 0,39 (700 - 1500) |
| | -9,44 | П | 1,38 | 5,46 | 2,62 (250 - 450) | 0,75 (700 - 1300) |
| | -9,44 | ⊥ | 1,38 | 3,08 | 1,49 (250 - 450) | 0,46 (700 - 1300) |
| | -17,78 | П | 0,69 | 1,40 | 0,39 (470 - 670) | 0,12 (700 - 1500) |

Продолжение таблицы 3.13

| | | | | | | |
|---|--------|----|------|------|------------------|-------------------|
| 6 | -17,78 | II | 1,38 | 3,32 | 0,87 (300 - 700) | 0,55 (600 - 1500) |
| | -17,78 | II | 1,38 | 3,19 | 2,05 (250 - 450) | 0,76 (700 - 1300) |
| | -17,78 | ⊥ | 1,38 | 2,19 | 1,27 (250 - 450) | - |
| 8 | -17,78 | ⊥ | 2,07 | 3,72 | 2,80 (200-400) | 1,18 (590 - 790) |

Следует отметить, что наибольшее течение происходило при нагрузках, приложенных параллельно поверхности замораживания (перпендикулярно оптической оси), а наибольшие скорости были при $t=-17,78$ °С для обоих направлений нагрузки. Для речного льда начальная нагрузка составила 0,34 МПа, а конечная 0,51 МПа.

В 1943 г. английские ученые выяснили, что добавка древесного волокна также повышает прочность льда в несколько раз. Такой материал был назван пайкеритом (или пайкритом, англ. rykrete) [116, 117]. В таблице 3.14 приведены данные (по М.Ф. Перутцу) о механических свойствах пайкерита [184].

Таблица 3.14 - Прочность льда с добавками из древесного волокна (пайкерита)

| Вид испытания | Содержание древесного волокна, (%) | Температура, °С | Предел прочности, (МПа) |
|---------------|------------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Сжатие | 0 | -15 | 4,28 |
| | 14 | -15 | 7,58 |
| Растяжение | 0 | -15 | 1,14 |
| | 14 | -15 | 4,83 |

Современные опыты сравнения пайкерита, состоящего из опилок, и «нового пайкерита» (New Rykrete) на основе газетной макулатуры были проведены китайскими исследователями, которые установили, что пайкерит «из газет» оказался значительно прочнее (прочность на сжатие больше на 75 %, на изгиб на 65 %) [113, 114].

Древесное и хлопковое волокна, стекловолокно, стеклоткань (жгутовая и нетканая), дереволёд (древесно-стружечная масса, хворост или опилки), мипора и пенопласт. Начиная с 60-х годов в лаборатории льда

ААНИИ ведутся исследования упрочнения льда. Упрочненный лед с добавлением древесного волокна, названный ледопласт (аналог пайкерита), получали размалыванием древесины, преимущественно хвойных пород, на специальных машинах – дефибрерах. Необходимое соотношение между древесным волокном и водой устанавливалось по весу сухой массы волокна на литр воды. Испытания на сжатие производились на 50-тонном прессе. Средние значения временного сопротивления на сжатие при содержании древесного волокна от 3 до 10 % составляют около 10 МПа, т.е. примерно в 3 раза выше, чем у чистого льда [20]. Свойства ледопласта в значительной степени зависят и от технологии его приготовления и от условий намораживания [100]. Результаты испытаний древесного и хлопкового волокна, стеклоткани, опилок, рубленого жгута на сжатие, проведенные при температуре около -10°C , показаны в таблице 3.15 и таблице 3.16 [30, 55].

Таблица 3.15 - Данные испытаний на сжатие образцов (размер: 10x10x10 см) льда с добавками

| Добавки, вносимые в лед | Количество испытанных образцов | Содержание добавок, % | Температура, $^{\circ}\text{C}$ | | Предел прочности на сжатие, МПа | | Коэффициент Усиления | |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|----------|----------------------|----------|
| | | | Намораживания | Испытания | I слоям | II слоям | I слоям | II слоям |
| Опилки $\varnothing < 3$ мм | 12 | 3,0÷7,5 | -13 | -6 | 6,6÷8,4 | 3,9÷7,6 | 2 | 1,9 |
| Опилки $\varnothing > 3$ мм | 3 | 5,5 | -13 | -6 | 5,9 | 7,9 | 1,5 | 2,0 |
| Нетканая стеклоткань | 1 | 0,7 | -12 | -8 | 7,9 | 3,5 | 2,5 | 1,0 |
| Рубленый жгут | 2 | 0,7 | -12 | -7 | 7,4 | 3,4 | 2,5 | 1,0 |
| Хлопковое волокно | 8 | 1,5 | -22 | -7 | 8,2 | 6,8 | 2,1 | 1,7 |
| | | 3,0 | -12 | -9 | 8,1 | 7,5 | 2,1 | 1,9 |
| | | 4,0 | -12 | -9 | 9,0 | 7,3 | 2,3 | 1,8 |
| | | 4,0 | -22 | -6 | 9,8 | 8,8 | 2,5 | 2,2 |
| Древесное волокно | 8 | 3,0 | -12 | -8 | 10,2 | 10,4 | 2,6 | 2,6 |
| | | 4,0 | -12 | -10 | 9,8 | 9,6 | 2,5 | 2,4 |
| | | 5,0 | -12 | -9 | 10,2 | 10,5 | 2,6 | 2,7 |
| | | 5,0 | -27 | -10 | 10,2 | 10,1 | 2,6 | 2,6 |
| | | 11,0 | -9 | -6 | 9,6 | 9,2 | 2,4 | 2,4 |

Таблица 3.16 - Данные испытаний на сжатие древольда с добавками

| Состав | | Сопротивление, МПа | |
|-----------------|---------------------------------|--------------------|--------|
| | | сжатию | изгибу |
| Лед с добавкой: | древесно-стружечной массы (7 %) | 3,82 | 1,37 |
| | опилок (7 %) | 4,46 | 1,28 |
| Лед без добавок | | 1,75 | 0,69 |

Применение добавок из мипоры и пенопласта не привело к упрочнению льда, а наоборот снизило предел прочности льда в 1,5-3 раза, поэтому льдокомпозиаты на основе этих материалов можно использовать только в качестве теплоизоляторов.

Ледяной бетон, пермакрит. Ледяным бетоном называется замороженная плотная смесь из песка, гравия (или щебня) и воды. Ледяной раствор – материал состоящий из замороженной плотной смеси песка и воды, применяющийся в случае отсутствия гравия или щебня.

Пермакрит (permacrete) – это строительный материал, который применяется на территории распространения многолетней мерзлоты, состоящий из различных смесей мелкоизмельченной породы, песка, глины, каменной муки, воды и снега, замороженных вместе. Таким образом, пермакрит является разновидностью ледобетона.

В начале 1930-х годов научными сотрудниками Института сооружений В.И. Сорокером и Б.Г. Скрамтаевым было впервые предложено создание ледяного бетона. Временное сопротивление сжатию кубиков из ледобетона представлено в таблице 3.17 [132, 133].

Таблица 3.17 - Временное сопротивление сжатию кубиков из ледобетона (размер: 20x20x20 см)

| | | | | | |
|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|--|----------|
| С сухим песком, МПа | С мерзлым песком, Мпа | С сухим щебнем, МПа | С мерзлым щебнем, МПа | Ледяной бетон (мерзлый песок, гравий, вода), МПа | Лед, МПа |
| 14,4 | 12,9 | 17,0 | 10,1 | 12,9÷15,5 | 0,8 |

В 60-ые годы Свинцов Г.К. предложил создание пермакрита (материала аналогичного льдопородной закладке) по наиболее плотной компоновке,

которая позволяет получить материал прочностью около 30 МПа (при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Данная технология заключалась в следующем: берут два материала, один из которых (мелкий) заполняет поры более крупного, далее смешиваются в разных пропорциях. Для полученной смеси определяют пористость на всех стадиях. После того, как установят самую плотную пропорцию, добавляют третий материал, способный проникать в поры второго материала. Экспериментальный состав представлен в таблице 3.18. Пермакрит разрабатывался для строительства подземных объектов (в частности резервуаров дизельного топлива) на американской авиабазе Туле (Гренландия) [187, 188].

Таблица 3.18 - Экспериментальная смесь из трех ингредиентов (объемные соотношения для получения плотной смеси)

| Состав | Размер, мм | Минимальная пористость, % | Коэффициент объема |
|-----------------|------------------|---------------------------|--------------------|
| Гравий | $7,14\pm 1,48$ | 40 | 100 |
| Песок | $0,65\pm 0,12$ | 38 | 40 |
| Пылеватый песок | $0,076\pm 0,014$ | 48 | 15 |
| Вода | - | - | 13 |

Для создания льдокомполитов, отвечающих определенных физическим и механическим свойствам, необходимо придерживаться следующих правил:

1) Модуль упругости армирующего волокна должен быть больше, чем у основного материала, так как только в этом случае будет достигнуто увеличение прочности, упрочнение пропорционально объему фракции армирующего материала. Кроме того, упрочнение примерно пропорционально отношению модулей упругости. В частности, этим объясняется большая эффективность использования в качестве наполнителя стекловолокна по сравнению с древесными волокнами [130].

2) Прочность армирующего волокна должна быть больше, чем у вещества матрицы, а максимальная деформация при разрушении волокна превышать деформацию матрицы.

3) Прочность армированного несколькими материалами льда возрастает линейно по мере увеличения объема, содержащегося в нем наполнителя.

4) Наибольшая прочность конгломерата может быть получена при использовании в качестве наполнителя стекловолокна, поскольку из всех прочих материалов нельзя получить столь высокие концентрации наполнителя во льду.

5) При прочих равных условиях (обработка, размещение и др.) наиболее дешевым материалом для армирования является папье-маше (пульпа) из газетной бумаги. Упрочнение льда с помощью древесного волокна дороже в 2 раза, асбеста – в 4 раза и тянутого стекловолокна – в 8 раз. На данный момент стоимость выполнения работ трудно оценить из-за недостатка практического опыта [58].

6) Химический состав воды: растворенные в воде газы и повышенная минерализация уменьшают скорость намораживания, так как при замерзании минерализованной воды растворенные бикарбонаты кальция и магния переходят в нерастворимые карбонаты с выделением углекислоты. Послойное намораживание идет успешно при морозе от -10°C с ветром [64].

7) Упрочненный лед является дешевым и доступным материалом, который может быть применен в замораживаемой закладке.

8) Наиболее эффективным и экономически целесообразным является метод приготовления упрочненного льда путем разведения в замораживаемой воде массы древесного волокна (5-7 %) [100].

9) Предел прочности ледопласта при сжатии равен около 9,81 МПа, т. е. в 3-4 раза больше, чем пресного льда.

10) Модуль упругости образцов ледопласта, испытанных динамическим методом, значительно меньше модуля чистого пресного льда и равен $6370 \div 8340$ МПа. С увеличением содержания древесной массы модуль упругости уменьшается.

11) Деформация ледопласта в упруго-пластической области значительно меньше, чем чистого пресного льда. Коэффициенты деформации ледопласта при кратковременном действии нагрузок ниже модуля упругости «мгновенных» напряжений, но различия значений этих коэффициентов и

модуля упругости у ледопласта значительно меньше, чем у чистого льда. При действии нагрузки в течение 1 сек коэффициенты деформации ледопласта составляют $5,4 \div 7,4$ МПа.

12) Ползучесть ледопласта под влиянием длительно действующих напряжений в несколько раз меньше, чем у чистого поликристаллического льда, и уменьшается с понижением температуры. Коэффициент внутреннего трения у ледопласта с содержанием 7 % бумажной массы при температуре -5 °С составляет около $0,8 \times 10^{15}$ Па·с [100].

13) На поверхности элементов образуется (за счет испарения солнечной радиации и т. д.) плотный слой древесного волокна, который служит хорошей тепловой изоляцией.

14) Соединительные швы, образуемые смерзанием частей элементов ледопласта, являются равнопрочными [55].

15) Предел прочности льда на сжатие повышается при введении следующих добавок: древесного и хлопкового волокон и опилок. В опытах не было установлено зависимости между процентным содержанием добавок во льду и его прочностью. Прочность льда для указанных добавок повышалась следующим образом:

а) при содержании во льду $3 \div 11$ % древесного волокна предел прочности увеличивается в 2,6 раза, что соответствует 10,4 МПа;

б) при содержании во льду $1,5 \div 4$ % хлопкового волокна предел прочности увеличивается в 2,5 раза, что соответствует 9,8 МПа;

в) при содержании во льду $3 \div 7,5$ % древесных опилок предел прочности увеличивается в 2 раза, что соответствует 8,4 МПа.

16) Объемный вес льда с добавкой хлопкового и древесного волокон лежит в пределах $0,94 \div 0,96$ т/м³. Уменьшение объемного веса льда введением добавок из мипоры и пенопласта оказалось нерациональным, поскольку уменьшение объемного веса льда на 20 % приводило к уменьшению его прочности в 2-3 раза.

17) Лед с добавками хлопкового и древесного волокон приобретает пластические свойства и в отличие от чистого льда разрушается как пластический материал. Так, при испытании на изгиб разрушение начинается с появления трещины в растянутой зоне, однако образец полностью не разрушается. При испытании на сжатие происходит деформирование образца по высоте, но без разрушения. Лед с добавками древесного и хлопкового волокон допускает обработку режущими инструментами. Для получения ледопласта наиболее перспективно применение добавки в виде древесного волокна. Хлопковое волокно улучшает свойства льда аналогично древесному волокну, но оно более, чем в 100 раз дороже его.

18) Из добавок, применяемых для повышения механической прочности льда, наиболее перспективными являются древесное волокно и стекловолокно [55, 56].

19) При использовании строительных отходов необходимо исключить попадание в них органических соединений, чтобы исключить процессы гниения и выделения газов.

20) Физико-технические свойства представленных льдокомпозиций удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу закладки, а в некоторых отношениях и превосходят их при условии обеспечения в заложенных выработках определенного температурного режима. На последнее обстоятельство следует обратить самое серьезное внимание, так как температурный режим является основой, от соблюдения которого зависит не только прочность замораживаемой закладки, но и решение вопроса в целом о возможности ее использования в тех или иных природных условиях.

Приведенные вышеперечисленные опыты были сделаны с различными отклонениями, что предопределило многообразие полученных данных. В связи с этим, требовалось провести ряд подтверждающих и уточняющих опытов. С этой целью были проведены лабораторные исследования, направленные на изучение повышения механической прочности льда путем введения инертных материалов – твердых добавок, в лаборатории физико-

механических свойств и разрушения горных пород (Научный центр геомеханики и проблем горного производства Горного университета).

3.3 Исследование механических свойств различных материалов и обоснование состава замораживаемой закладочной смеси

Как уже было отмечено ранее, замораживаемая закладка, подобно бетону, является композитным материалом, имеет аналогичный армированному бетону состав заполнителя, но в роли связующего (матрицы) вместо цемента выступает вода. Существенным отличием льдопородной закладки от твердеющих смесей на цементной основе, является возможность работать на поверхности замороженной закладки уже через 2 – 3 часа (при принудительном промораживании).

В виду наибольшей изученности, а также значительного сходства (при создании и армировании) твердеющих и замораживаемых закладочных смесей, рассмотрим факторы, влияющие на их прочностные и качественные показатели. По аналогии с цементными вяжущими, лёд можно упрочнить с помощью арматуры (металлические стержни, проволока или сетка), стальных волокон (фибры), геосинтетических материалов и др.

«Перечислим условия, необходимые для получения качественной закладочной смеси. Во-первых, твердение всех компонентов смеси в однородный монолитный материал. Во-вторых, необходимо учитывать разнородность и соотношение компонентов, входящих в состав промороженной закладочной смеси, что в свою очередь приводит к значительной разнице в теплопроводности, времени кристаллизации и физико-механических свойствах, но даёт возможность создания разнопрочных закладочных массивов в зависимости от геотехнологического назначения. В-третьих, надо выбрать такой наполнитель, чтобы получить прочный, плотный замороженный материал с наименьшей пористостью».

«Повышения прочности закладочного материала, можно добиться, если предварительно в закладываемую выработку подавать связующее, обладающее меньшей плотностью, чем закладываемые породы, затем по поверхности связующего равномерно разместить дробленые породы на одном уровне с поверхностью связующего, а заполнение связующего повторять после замерзания каждого слоя до полной закладки выработки. В качестве связующего можно использовать водно-ледяную, водно-песчаную или водно-песчано-ледяную смесь, при этом размер ледяных включений не должен быть больше наименьшего размера куска заполнителя».

«Основными заполнителями для закладки служат песок, пустая порода (или щебень), реже гравий. Заполнители, как правило, делятся на две группы: мелкие и крупные. Мелкие заполнители состоят из натурального или искусственного песка (произведённого дроблением породы) с размерами частиц вплоть до 5 мм; крупные заполнители - заполнители, где большая часть частиц более 5 мм и размером до 150 мм».

«Следует принимать во внимание важные свойства заполнителя, которые влияют на качество замораживаемой закладки: максимальный размер, гранулометрический состав, форма, масштабный эффект, уплотнение, влага, прочность, температура, пористость, количество крупного и мелкого заполнителя в смеси».

«**Максимальный размер.** Величина самого большого заполнителя, который можно использовать, зависит от имеющегося в распоряжении предприятия материала, размеров и формы пространства, которое необходимо заполнить закладкой, расстояния и расположения арматуры в ней, а также от ограничений применяемого оборудования (насосов и доставочной техники, диаметра шланга или ковша и т.д.), поэтому в основном выбирают самый крупный доступный экономичный заполнитель, отвечающий этим требованиям» [109].

«**Гранулометрический состав заполнителя.** Заполнители состоят из частиц различных размеров. Для получения однородного закладочного слоя,

количество заполнителя и гранулометрический состав частиц должны быть одинаковыми от слоя к слою. Непрерывный гранулометрический состав заполнителя (или плавный гранулометрический состав) является желательным для эффективного создания как смерзшейся, так и твердеющей закладки (рисунок 3.9, 1а). Кроме того, дополнительным уплотнением можно повысить качество и экономичность. С другой стороны, небольшие изменения в грансоставе приводят к увеличению объема связующего, необходимого для заполнения пустот при пропуске некоторых фракций (см. рисунок 3.9, 1б) или равномерном распределении одного вида (см. рисунок 3.9, в)» [109].

«Очень важно, чтобы смесь укладывалась до начала кристаллизации, в противном случае это приведёт к нарушению структуры и снижению прочности закладочного массива».

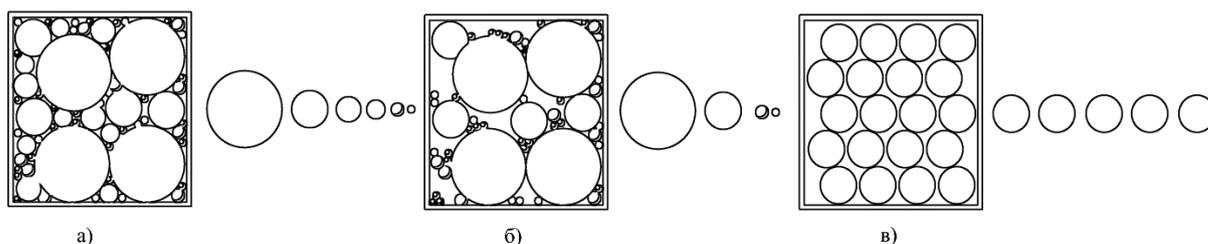


Рисунок 3.9 - Различный гранулометрический состав заполнителей:

а) хорошо подобранный, после уплотнения (пустоты <10%); б) с пропуском некоторых фракций (пустоты ~30%); в) равномерный одного вида (пустоты ~30%)

«**Форма заполнителя.** Предел прочности образцов льдопородного материала на одноосное сжатие снижается в 1,5 раза, при увеличении с 10 % до 40 % количества частиц пластинчатой и игловатой формы. В виду этого при формировании льдопородной закладки необходимо минимизировать содержание таких частиц, включив в закладочный комплекс бункер-питатель, грохот, дробилку» [156].

«**Масштабный эффект.** Доказано, что кратковременная прочность льдопородных образцов в условиях одноосного сжатия уменьшается с 4,27 до 2,36 МПа, асимптотически приближаясь к 2 МПа, при увеличении стороны ребра с 100 до 200 мм. При длительных испытаниях прочность кубика

супесчаного гравия с галькой размерами 200x200x200 мм практически соответствует прочности образца неограниченно большого размера» [85, 164].

«Уплотнение и влага. Уплотнение материала (увеличение числа и общей поверхности контактов между частицами материала) приводит к увеличению сил смерзания не менее, чем на 10 %, что в свою очередь приводит к увеличению общей прочности замороженного материала [163]. Это достигается, в частности за счёт того, что одновременно с возрастанием плотности значительно растут силы сцепления и заклинивания частиц. При достаточно плотной упаковке слоя, через точки их контакта передаются преимущественно силы сжатия, в отличие от рыхлой упаковки, когда возможны взаимные перемещения частиц, в местах их контакта дополнительно возникают силы трения. Уплотнение можно осуществлять динамическим воздействием (виброуплотнением) или при помощи укатки катком, присоединенным к погрузочно-доставочной машине».

«Сила смерзания отдельных замороженных частиц между собой зависит от влажности и повышается линейно. Количество воды, необходимое для льдопородной закладки, лежит в пределах от 15 до 30 % от общего объема закладочной смеси. Качество воды также является важным свойством при создании замораживаемой закладки, чтобы исключить воздействие химических веществ на свойства льда, необходимо проводить предварительные испытания, следовательно, отбирать пробы воды с месторождений на химический анализ».

«Прочность. Прочностные свойства мерзлых крупнообломочных пород, из которых состоит льдопородная закладка, существенно зависят от состава дисперсного заполнителя (улучшает прочность песок, уменьшает глина) и его количества, максимальная прочность достигается при содержании 25÷50 %».

«На основании лабораторных данных, полученных ВНИМИ (Розенбаум М.А. и др.) в период с 2005-2008 гг. и исследований автора (2017-2018 гг.), установлены параметры прочностных характеристик в зависимости

от основных факторов, влияющих на прочность мерзлых пород. Установлено влияние температуры, влажности, а также ледяных прослоев и включений на прочность горных пород.

Для определения влияния замораживания на прочность коренных пород были выбраны различные типы пород с прочностью от 20 до 200 МПа. Породы, имеющие сравнительно небольшую прочность на сжатие (песчаник слабый, глина и аргиллит), а также пористые (8÷12 %) и трещиноватые породы при замораживании увеличивали свою прочность на 16÷42 %. Прочность остальных пород (диабаз, песчаник крепкий, известняк, мрамор) при замораживании уменьшалась на 17÷37 %» [109].

«Точно такие же породы были подвергнуты испытаниям для определения влияния повышения температуры и влажности на прочность мерзлой породы. Влажность образцов изменялась от воздушно-сухого состояния до полного влагонасыщения. Испытания показали, что в диапазоне от 0 до 9 % для рассматриваемых пород влажность не оказала существенного влияния на их прочность. Повышение прочности горных пород происходит при уменьшении температуры от -2°C до -6°C , дальнейшее понижение температуры практически не приводит к изменению прочности.

Важным параметром, влияющим на прочность пород является наличие в них ледяных прослоек. Лёд в породе и на контактах приводит к снижению прочности при испытаниях на сжатие. Наличие ледяных прослоев уменьшало прочность образцов горных пород в зависимости от их толщины в 1,5÷8,5 раз. При толщине прослоя 0,05 от высоты образца прочность уменьшалась на 25÷50 %, при толщине прослоя 0,5 высоты образца уменьшение составляло 65÷72 % от замороженного образца без ледяного прослоя. Стоит отметить, что полученные данные справедливы только для пологого расположения ледяных прослоев (от 0 до 9°). С увеличением угла наклона прослоя от 10° до 35° прочность образца уменьшается, при углах наклона от 35° до 60° прочность образца принимает постоянное наименьшее значение, равное силе сцепления льда с материалом образца. Прочность на сжатие при вертикальном

расположении примерно равна значениям при пологом наклоне прослоя, с разницей 1÷5 %. По пространственному расположению – максимальная прочность у образцов с прослоями, расположенными посередине высоты или на торцевых поверхностях, при расположении прослоя между серединой образца и его торцами прочность снижается на 7÷35 %».

«**Температура.** Чем ниже температура, тем выше прочность на сжатие. В замораживающей закладке связывающим компонентом является лёд, поэтому важно знать, как изменяется его прочность в зависимости от температуры (рисунок 3.10). Для льдопородной закладки наибольшая прочность достигается при температуре порядка -20 °С».

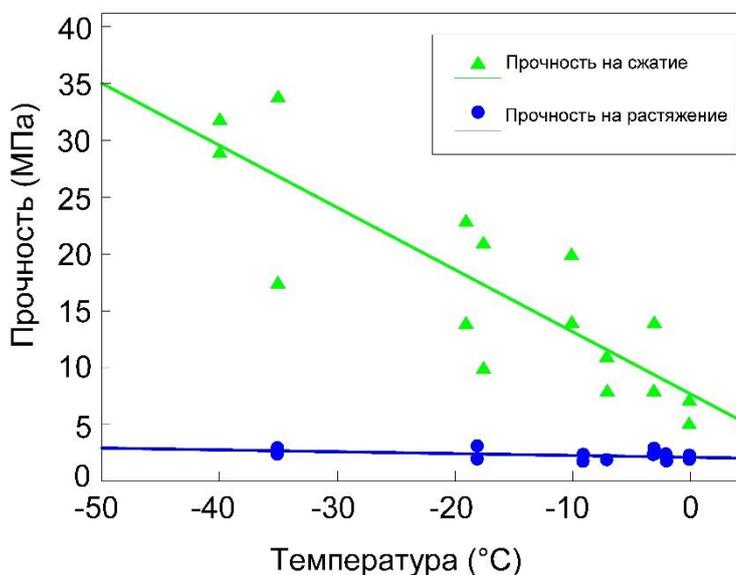


Рисунок 3.10 - Зависимость прочности пресноводного льда от температуры [185]

«**Пористость.** Угловатость зёрен, ухудшение сортировки, улучшение плотности укладки приводят к уменьшению пористости. В то же время, пористость практически не зависит от размера зерен. Пористость имеет важное значение при выборе крупного и мелкого заполнителя.

Количество крупного и мелкого заполнителя в смеси. В 60-ые годы Свинцов Г.К. предложил для льдокомпозиата (аналогичного льдопородной закладке) расчет наиболее плотной компоновки, которая позволяет получить материал прочностью около 30 МПа (при температуре -5 °С)» [187].

«Первый крупный материал – гравий крупностью 9,5 мм, скругленный, объемной плотностью 1420 кг/м³, пористостью 40 %. Компонент смешивания - песок крупностью 1,3 мм, скругленный, объемной плотностью 1400 кг/м³, пористостью 42,3 %. Наилучший вариант компоновки (состав I), т.е. с наименьшей пористостью, получился при упаковке 60 % гравия и 40 % песка по объёму, общая пористость смеси 17,1 %. Полученный состав I, используют для дальнейшего смешивания с песком крупностью 100±25 мкм с 40 % пористостью. Предпочтительный вариант получился при упаковке 85 % смеси I и 15 % песка крупностью 100±25 мкм. Пропорция берётся по объёму от первоначального объёма смеси I». «Полученная смесь II имеет пористость 8,2 %". Смешивают смесь II, добавляя тонкодисперсную пыль (пористостью 47 %) в количестве 7 %, также от первоначального объёма смеси I. Дальнейшего смешивания не проводилось, поэтому полученная смесь III считается самой плотной и низкопористой (4,7 %), доступной для данных материалов. Кроме того, не следует использовать в составе смеси большое количество частиц менее 1 мкм, т.к. они служат причиной появления значительного количества незамерзшей воды, даже при продолжительном замораживании».

«Проверку соотношения компонентов можно провести простым способом – с помощью BASEGRAIN, программы на основе MATLAB, для автоматического обнаружения объектов. Проверка осуществляется следующим образом – в программу на анализ отправляется фотография каждого слоя, выполненная в высоком качестве, желательно до начала кристаллизации. Фотография обрабатывается программой, данные сверяют и в случае необходимости вносят корректировки в состав следующего слоя. Определение фактической прочности закладки в массиве можно проводить по образцам керн, штыфтным пробам, или экспресс-методом».

«Таким образом, в данном разделе даны общие рекомендации для выбора наиболее эффективных составов замораживаемых смесей, применимых для большинства месторождений криолитозоны. Достаточно

высокая сходимость результатов аналитического расчёта, анализ лабораторных исследований промышленных испытаний свидетельствуют о правильности полученных данных. Однако в виду значительных отличий в горно-геологических и горно-технических условиях, для каждого конкретного месторождения требуется разработка отдельных рекомендаций, которые необходимо уточнять и корректировать в процессе эксплуатации».

В соответствии с уровнем надежности обычно различают следующие методы механических испытаний горных пород:

- прецизионные, характеризующиеся надежностью свыше 95-97 % и применяемые в качестве эталонных для сопоставительной поверки методов широкого применения, для определения их погрешностей и установления поправок,

- нормальные, обеспечивающие надежность 80-90 % и рассчитанные на массовое производственное применение;

- упрощенные с высокой степенью доступности и с надежностью около 75-85 %, достаточной для приближенных инженерных решений горнотехнических задач;

- грубые, обеспечивающие надежность получаемых оценок свойств пород порядка 60-75 % и применяемые для примерных прикидок и ориентировочных суждений о свойствах пород и горнотехнических условиях их залегания.

Горные породы, как и замораживаемая закладка, характеризуются меньшей сопротивляемостью растяжению, чем сжатию. Вследствие малой сопротивляемости отрыву разрушение породного массива нередко обусловлено именно растяжением. Прочность пород при растяжении играет существенную роль для оценки устойчивости подземных горных выработок. При оценке хрупко-пластических свойств закладочного материала сравнивают пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении: большая величина соотношения этих показателей свидетельствует о преобладании хрупких свойств породы над пластическими [109].

Под пределом прочности при растяжении σ_p понимают величину главного напряжения (в кгс/см² или МПа) одноосно и однородно растягиваемого материала, при котором достигается его разрушение – разрыв.

Для определения предела прочности при растяжении количество образцов составляет 8-10 штук, и оно может быть уменьшено при достаточных размерах образцов и использовании остатков для повторных испытаний.

Из большого количества разнообразных механических свойств, характеризующих горные породы, определяют только те показатели, от которых существенно зависит характер и интенсивность горнотехнологического процесса, его проектирование и выполнение.

В настоящее время прочность горных пород при сжатии изучена в большей мере, чем другие свойства. Предел прочности при одноосном сжатии (крепость) пород является, кроме того, важным и употребительным показателем, определяющим выбор системы разработки, технологии горных работ и применяемого для них горного оборудования, а также устойчивость горных выработок и выбор параметров крепи. Определение крепости при сжатии предусматривается (с разной степенью точности и детальности) для всех этапов изучения и зон опробования пород на механические свойства [145].

За основу прочностных и деформационных свойств льдопородной закладки (целиков, воспринимающих сжимающие напряжения) принята ее прочность на осевое сжатие, поэтому другие характеристики (растяжение, изгиб, модуль деформаций и др.) могут быть определены по эмпирическим формулам (отдельно для каждого конкретного случая).

Определение прочностных и деформационных свойств пород при одноосном кратковременном сжатии проводили на универсальной электромеханической испытательной машине Insight 200, с интегрированной в нее климатической камерой модели MTS 651.06T-03. Кроме того, для длительного охлаждения использовалась климатическая камера Binder Серии KBF (рисунок 3.11, 3.12).



Рисунок 3.11 - Общий вид электромеханической испытательной машины Insight 200 кН с климатической камерой



Рисунок 3.12 - Климатическая камера Binder (а) и процесс выдержки в ней образцов (б)

Лабораторные исследования проводились в соответствии с требованиями Международного Общества механики горных пород (IRSM) и ГОСТами Российской Федерации. Испытания вели с постоянной скоростью нагружения (2 мм/мин) до достижения нагрузки, составляющей ~50 % от предельной, затем производилась разгрузка, после чего вновь нагружали до достижения предела прочности. Часть опытов (для прочных материалов) проводили при больших нагрузках.

Размеры готового образца составляли 100x100x100 мм, либо 200x200x200 мм, при необходимости, поверхность, которая не отвечала

требуемым размерам, шлифовалась. При послойном намораживании, предварительно подготовленный армирующий материал, укладывался в заранее подготовленный объём воды. После замораживания первого слоя на него сверху высыпали нужное количества материала для второго слоя, затем поливали водой и продолжали намораживание, операцию повторяли до полного заполнения.

Для экспериментов использовались двухместные формы в виде куба с длиной ребра 100 мм (2ФК-100) в соответствии с ГОСТ 22685-89 «Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия» (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Двухместная форма для изготовления образцов в виде куба

Предел прочности горных пород при одноосном сжатии σ_c определяли в соответствии с ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии».

При определении предела прочности при одноосном сжатии кубические образцы непрерывно подвергали нагрузке со скоростью 0,5-1,0 МПа/сек до разрушения на сервогидравлической испытательной системе MTS 816 (MTS, США), рассчитанном на нагрузку до 1500 кН.

Предел прочности при одноосном сжатии σ_c вычисляли по формуле:

$$\sigma_c = \frac{P_{\text{разр}}}{S_0}, \text{ МПа} \quad (3.2)$$

где $P_{\text{разр}}$ – разрушающая образец сила, кН; S_0 – площадь поперечного сечения образца, см².

Задачей работы являлось отыскание инертных материалов – твердых добавок, позволяющих повысить механические свойства льда, а также уменьшить его объемный вес. В качестве добавок применялись размельченные резинокордовые изделия, пенопласт, древесные опилки, битое стекло и фибра (рисунок 3.14, а-д).



а



б



в



г



д

Рисунок 3.14 – Используемые инертные материалы- твердые добавки для приготовления смеси: а – размельченные резинокордовые изделия, б - пенопласт, в - древесные опилки, г - битое стекло, д - фибра

Добавки вносились в форму в виде заранее приготовленной смеси или раздельно перед каждым поливом. Распределение добавок по объему образца производилось равномерно, готовые образцы показаны на рисунке 3.15.

Следует отметить, что одним из важных компонентом приготовления смеси является вода, обеспечение которой в суровых условиях Севера часто сопровождается сложностями. Однако на рассматриваемых месторождениях (Арылах и Лунное) при организации работ по закладке льдом выработанного пространства можно использовать воду из карьера «Арылах» и подземные воды рудника VII р.з., анализ химического состава которых отличается достаточным разнообразием (таблица 3.19).



Рисунок 3.15 – Образцы кубической формы, подготовленные для испытания на сжатие (лёд с 4 % стружки, 8 % опилок, 30 % резинокордовой крошки)

По ионному составу воды сульфатные, а катионный состав - натриево-магниевый-кальциевый. Согласно данным, приведенным в таблице 3.19, минерализация подземных вод составляет более 1 г/дм^3 , в то время как карьерные воды по составу соответствуют пресной (минерализация – менее $0,6 \text{ г/дм}^3$).

В подземных и карьерных водах фиксируются высокие содержания сульфатов – от 395 до 755 мг/дм^3 .

Исследования показали, что подземные и карьерные воды характеризуются как нейтральные, величина рН варьирует в пределах 6-7. Для химического состава грунтовых вод характерно присутствие органической компоненты, зафиксированной по значению перманганатной окисляемости и бихроматной окисляемости (ХПК), последний из которых достигает $19 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ в подземных водах. Согласно требованиям к качеству питьевой воды (СанПин 2.1.4.1074-01), характеризующей предельные концентрации основных неорганических веществ, величина перманганатной окисляемости находится в указанной норме и не превышает $5,0 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$.

Результаты химического анализа отобранных проб воды свидетельствуют о наличии, в основном, трудноокисляемой органики, неотъемлемой частью которой являются белки различного генезиса, что

выявлено в результате различия между двумя показателями: ХПК и перманганатной окисляемостью. В результате лабораторных исследований установлено, что содержание иона аммония достигало 0,84-1,4 мг/дм³. Необходимо подчеркнуть, что аммоний отрицательно гидратирующий ион, который способствует возрастанию подвижности поровой воды в грунтовой толще.

Таблица 3.19 - Химический состав карьерных и рудничных вод, отобранных на территории месторождения Лунное

| Показатели | Результаты исследований | | НД на методы исследований |
|-----------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------|
| | Воды карьера Арылах | Подземные воды рудника (месторождение Лунное, VII р.з.) | |
| Магний | 42 мг/дм ³ | 49 мг/дм ³ | ФР.1.31.2011.10615 |
| Калий | 7,9 мг/дм ³ | 3,1 мг/дм ³ | ФР.1.31.2011.10615 |
| Кальций | 67 мг/дм ³ | 219 мг/дм ³ | ФР.1.31.2011.10615 |
| Натрий | 31 мг/дм ³ | 17 мг/дм ³ | ФР.1.31.2011.10615 |
| Хлорид-ион | < 10 мг/ дм ³ | < 10 мг/дм ³ | РД 52.24.407-2006 |
| Аммоний-ион | 0,84 мг/дм ³ | 1,4 мг/дм ³ | ГОСТ 33045 |
| Сульфат-ион | 395 мг/дм ³ | 755 мг/дм ³ | ФР. 1.31.2007.03797 |
| Гидрокарбонат-ион | <6,1 мг/дм ³ | <6,1 мг/дм ³ | ГОСТ 31957 |
| Алюминий | 0,85 мг/дм ³ | 1,4 мг/дм ³ | ПНД Ф 14.1:2:4.166-2000 |
| Железо общее | 0,13 мг/дм ³ | 3,2 мг/дм ³ | ФР.1.31.2013.16027 |
| ХПК | 9,6 мгО ₂ /дм ³ | 19 мгО ₂ /дм ³ | ГОСТ 31859 |
| Перманганатная окисляемость | 1,6 мгО ₂ /дм ³ | 3,3 мгО ₂ /дм ³ | ФР.1.31.2013.13900 |
| Кремний (силикаты по Si) | 0,82 мг/дм ³ | 1,3 мг/дм ³ | ФР.1.31.2009.06212 |
| рН | 7,0 | 6,5 | |

Данный химический состав грунтовых вод является отражением ландшафтно-климатических условий территории, а также различных процессов, протекающих в подземных и карьерных водах. Таким образом, воды карьера «Арылах» и подземные воды имеют невысокую минерализацию и низкие значения органических соединений, что свидетельствует о пригодности данной воды для замораживания.

Исходные инертные материалы (см. рисунок 3.14) были выбраны для лабораторных исследований исходя из доступности данного сырья в условиях

криолитозоны. Например, стоимость стеклобоя составляет около 1500 руб/т (по цене на январь 2018 года), а средняя стоимость на древесную пыль и мелкие опилки в 2015 году составляет около 2000–2500 рублей за тонну [115]. По оценкам исследователей в Российской Федерации ежегодно образуется порядка 35,5 млн. м³ древесных отходов [81].

Известно, что на сегодняшний день в РФ ежегодный объем стеклобоя, поставляемого на полигоны твердых бытовых отходов, достигает 2÷6 млн.т. Стоит отметить, что стеклобой промышленной и бытовой отрасли производства отличается высокими прочностными характеристиками и доступностью для вторичного использования. Однако, как показывает анализ многочисленных исследований, практически не используется в составе композитных материалов [106].

Фракции стеклобоя >5 мм используются в льдокомпозитах в качестве крупного заполнителя, фракции <5 мм – в качестве мелкого заполнителя (аналог песка). Результаты опытов приведены в таблице 3.20, где σ - прочность при сжатии, ρ - плотность не замороженного состава, k - коэффициент усиления. Первая цифра в составе – это обозначение дроблённого стекла (стеклобой) от 5 до 30 % по массе, размер гранулы >5 мм, вторая цифра – это обозначение мелкодисперсного порошкообразного стекла (диаметром 0.1÷1 мм) в диапазоне от 1 до 5 % по массе, и, соответственно, третья цифра – это количество песка в диапазоне от 1 до 7 % (см. таблица 3.20).

Эмпирическая формула для определения прочности при сжатии стеклобоя с мелкодисперсным порошкообразным стеклом (в пределах 5 %) и стеклобоя с песком (в пределах 7 %), при полученной достоверности аппроксимации $R^2=0,84$ (рисунок 3.16):

$$\sigma_{сж} = 0,0078\rho - 2,75\sigma_0, \text{ МПа} \quad (3.3)$$

где σ_0 – прочность льда без добавок для конкретных условий (в данном случае 2,1 МПа); ρ - плотность не замороженного состава ρ , кг/м³

Таблица 3.20 - Прочность при сжатии² льдокомпозитов на основе стеклобоя

| Состав, % | σ , МПа | ρ , кг/м ³ | k |
|-------------|----------------|----------------------------|-----|
| 0-0-0 (лёд) | 2,1 | 1000 | - |
| 5-0-0 | 2,2 | 1068 | 1 |
| 10-0-0 | 3,3 | 1176 | 1,6 |
| 20-0-0 | 3,2 | 1252 | 1,5 |
| 30-0-0 | 4,5 | 1328 | 2,1 |
| 5-1-0 | 2,2 | 1081 | 1 |
| 10-1-0 | 2,6 | 1169 | 1,2 |
| 20-1-0 | 4,3 | 1245 | 2 |
| 30-1-0 | 4,6 | 1341 | 2,2 |
| 5-2-0 | 2,6 | 1065 | 1,2 |
| 10-2-0 | 3,2 | 1163 | 1 |
| 20-2-0 | 3,5 | 1239 | 1,7 |
| 30-2-0 | 5,0 | 1315 | 2,4 |
| 5-3-0 | 2,8 | 1088 | 1,3 |
| 10-3-0 | 3,4 | 1156 | 1,6 |
| 20-3-0 | 4,1 | 1232 | 2 |
| 30-3-0 | 4,9 | 1308 | 2,3 |
| 5-4-0 | 2,9 | 1091 | 1,4 |
| 10-4-0 | 3,3 | 1149 | 1,6 |
| 20-4-0 | 3,5 | 1225 | 1,7 |
| 30-4-0 | 4,7 | 1301 | 2,2 |
| 5-5-0 | 2,9 | 1074 | 1,4 |
| 10-5-0 | 2,9 | 1142 | 1,4 |
| 20-5-0 | 3,5 | 1218 | 1,7 |
| 30-5-0 | 4,8 | 1394 | 2,3 |
| 5-0-1 | 2,3 | 1053 | 1,1 |
| 10-0-1 | 3,9 | 1176 | 1,9 |
| 20-0-1 | 4,2 | 1257 | 2 |
| 30-0-1 | 4,1 | 1333 | 2 |
| 5-0-2 | 2,4 | 1088 | 1,1 |
| 10-0-2 | 3,3 | 1186 | 1,6 |
| 20-0-2 | 4,3 | 1262 | 2 |
| 30-0-2 | 4,8 | 1338 | 2,3 |
| 5-0-3 | 3,0 | 1094 | 1,4 |
| 10-0-3 | 3,8 | 1192 | 1,8 |
| 20-0-3 | 3,9 | 1268 | 1,9 |
| 30-0-3 | 5,4 | 1344 | 2,6 |
| 5-0-5 | 2,8 | 1099 | 1,3 |
| 10-0-5 | 3,6 | 1197 | 1,7 |
| 20-0-5 | 4,2 | 1273 | 2 |
| 30-0-5 | 4,0 | 1349 | 1,9 |
| 5-0-7 | 3,2 | 1117 | 1,5 |
| 10-0-7 | 3,3 | 1205 | 1,6 |
| 20-0-7 | 3,7 | 1281 | 1,8 |
| 30-0-7 | 4,9 | 1357 | 2,3 |

² Определена для кубических образцов 10x10x10 см. Скорость нагружения 60 мм/мин. Температура замораживания образцов -20 °С (сутки), температура проведения экспериментов 0 °С.

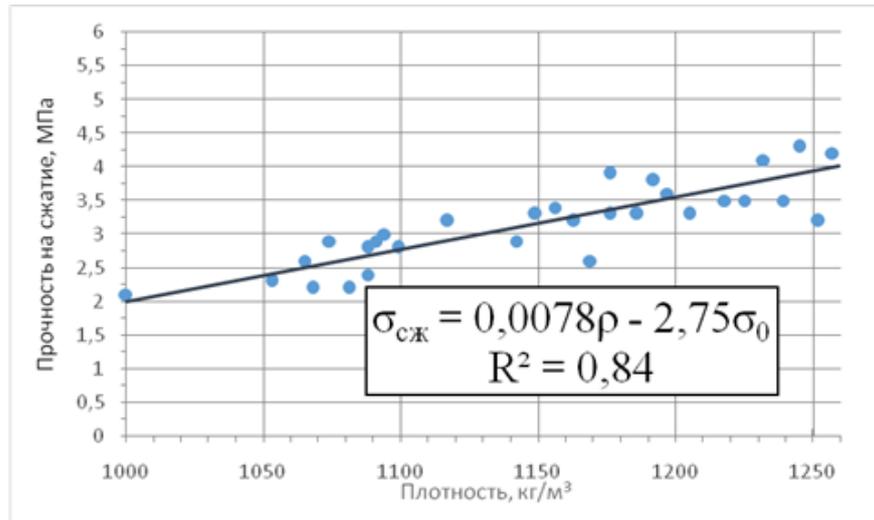


Рисунок 3.16 – Прочность на сжатие замороженного стеклобоя с добавками

На автодорогах Магаданской области (рисунок 3.17), а также на многих горных предприятиях, в том числе и на ГОК «Лунное», где проводились открытые горные работы и продолжительное время ведутся подземные, существует проблема утилизации резинокордовых материалов (таких как, отработанные шины и др.) в связи с невозможностью их переработки *in situ* и большими расходами по сбору и транспортировке к месту утилизации. В основном, отработанные покрышки занимают дополнительные территории и складываются на поверхности.



Рисунок 3.17 - А- отработанные шины легкового транспорта, недалеко от п. Омсукчан, Б - отработанные шины грузового транспорта рядом с трассой Атка – Омсукчан

В единичных случаях их складывают совместно с вмещающими породами, либо с хвостами обогащения фабрик в отвалы или сжигают, что в свою очередь сопровождается выбросом в атмосферу и почву большого количества вредных и токсичных веществ. В связи с этим, возникает вопрос об утилизации отработанных покрышек от различного шахтного оборудования и автомобильного транспорта. Таким образом, на сегодняшний день рециклинг резинокордовых материалов становится очень актуальным. Одним из способов утилизации резинокордовых изделий может являться использование этих отходов при возведении закладки выработанного пространства с предварительным измельчением и последующим добавлением извлеченной резинокордовой крошки как частичного (или полного) заполнителя в закладку.

Состав резины непосредственно определяет значения температуры, при которой она является хрупкой. В среднем такая температура около $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такая температура крайне редка даже для Арктики, но и при её достижении резина, входящая в состав закладки, будет иметь значительно большую температуру, поэтому резина пригодна для использования её в замораживаемой закладке. В то же время отрицательная температура является положительным фактором для такой закладки. На основании экономических расчетов, в зимний период (среднемесячная температура меньше $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) «изготовление резинокордовой крошки намного практичнее, что обусловлено снижением энергозатрат на разрушение полимерного материала в предварительную стадию охлаждения. В свою очередь, энергозатраты представлены суммой механических энергий, которые затрачиваются на эластические и пластические деформации тела, на внутреннее трение в полимерном теле, образуемое деформационными и релаксационными свойствами, на преодоление дополнительных связей, затрудняющих разрушение полимерного тела в процессе молекулярной ориентации цепей макромолекул в результате деформации».

«Уменьшение температуры вызывает снижение адгезии одного полимера к другому, что упрощает процесс разделения измельченного вулканизата и текстильного волокна. В случае металлокорда также возникает релаксация связей между резиной и металлическим кордом в результате разности коэффициентов термического расширения, что предопределяет растрескивание и частичное отделение резины от металлокорда» [122].

В подтверждение вышесказанному были проведены экспериментальные исследования, целью которых являлось формирование замораживаемой закладки с использованием резинокордовой крошки и дальнейшее испытание полученных образцов на предел прочности при одноосном сжатии.

Результаты исследований прочности на сжатие замороженной смеси песка и резинокордовой крошки представлены в таблице 3.21.

По графику, на рисунке 3.18 видно, что увеличение прочности на сжатие при понижении температуры носит экспоненциальный характер.

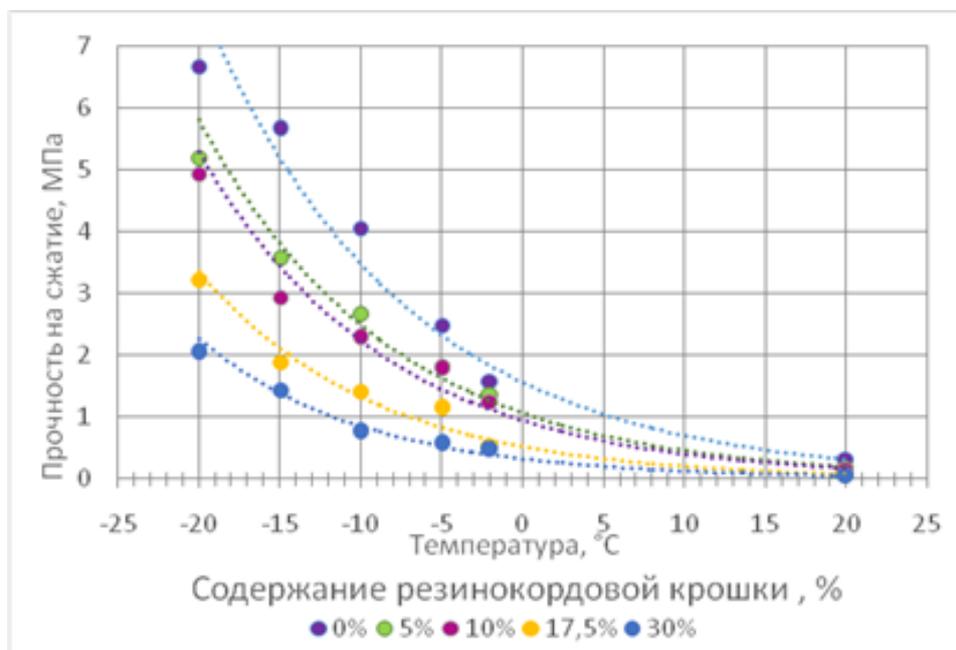


Рисунок 3.18 – Прочность на сжатие замороженной смеси песка и резинокордовой крошки

Кроме того, опыты показали, что введение резиновой крошки значительно уменьшает прочность по сравнению с замороженной смесью песка и воды. Главное преимущество использования такого льдокомпозиата – возможность утилизации резинокордовых отходов и значительно меньшая

скорость таяния (при положительной температуре) по сравнению с чистым льдом.

Таблица 3.21 - Прочность на сжатие замороженной смеси песка и резинокордовой крошки

| Т, °С | Прочность на сжатие, МПа | Плотность не замороженного состава, кг/см ³ |
|--------------------------------------|--------------------------|--|
| С = 0 % (88 % песок, 12 % воды) | | |
| +20 | 0,3 | 1850 |
| -2 | 1,6 | 1850 |
| -5 | 2,5 | 1850 |
| | 4,0 | 1850 |
| -15 | 5,6 | 1850 |
| -20 | 6,6 | 1850 |
| С = 5 % (83 % песок, 12 % воды) | | |
| +20 | 0,2 | 1815 |
| -2 | 1,4 | 1815 |
| -5 | 1,8 | 1815 |
| -10 | 2,7 | 1815 |
| -15 | 3,6 | 1815 |
| -20 | 5,2 | 1815 |
| С = 10 % (78 % песок, 12 % воды) | | |
| +20 | 0,2 | 1750 |
| -2 | 1,3 | 1750 |
| -5 | 1,8 | 1750 |
| -10 | 2,3 | 1750 |
| -15 | 2,9 | 1750 |
| -20 | 4,9 | 1750 |
| С = 17,5 % (70,5 % песок, 12 % воды) | | |
| +20 | 0,1 | 1660 |
| -2 | 0,5 | 1660 |
| -5 | 1,1 | 1660 |
| -10 | 1,4 | 1660 |
| -15 | 1,9 | 1660 |
| -20 | 3,2 | 1660 |
| С = 30 % (58 % песок, 12 % воды) | | |
| +20 | 0,1 | 1430 |
| -2 | 0,5 | 1430 |
| -5 | 0,6 | 1430 |
| -10 | 0,8 | 1430 |
| -15 | 1,4 | 1430 |
| -20 | 2,0 | 1430 |

Примечание: Резинокордовый материал при положительной температуре (+20 °С) стал менее прочен, скорость нагружения образцов была значительно уменьшена и принята $\omega=1$ мм/мин. Перед испытаниями образцы 24 часа находились в холодильной камере при $T=-20$ °С. Сами испытания проводились при температуре от +20 до -20 °С. Размер образцов 10x10x10см. (С - Содержание резинокордовой крошки в % от массы всей незамороженной смеси, Т – температура, при которой испытывался образец).

Образцы льдокомпозита на основе металлической фибры, при скорости нагружения $\omega=3$ мм/мин, имели прочность при сжатии от 2,5 до 4,4 МПа (при 14,5 % наполнителя по весу), от 2,2 до 3,6 (при 8 % наполнителя), от 1,7 до 2,8 (при наполнителе от 1 до 4 %) (рисунок 3.19). Прочность чистого льда для серии этих опытов равна 1,8 МПа. Перед испытаниями образцы 24 часа находились в холодильной камере при $T=-20$ °С.

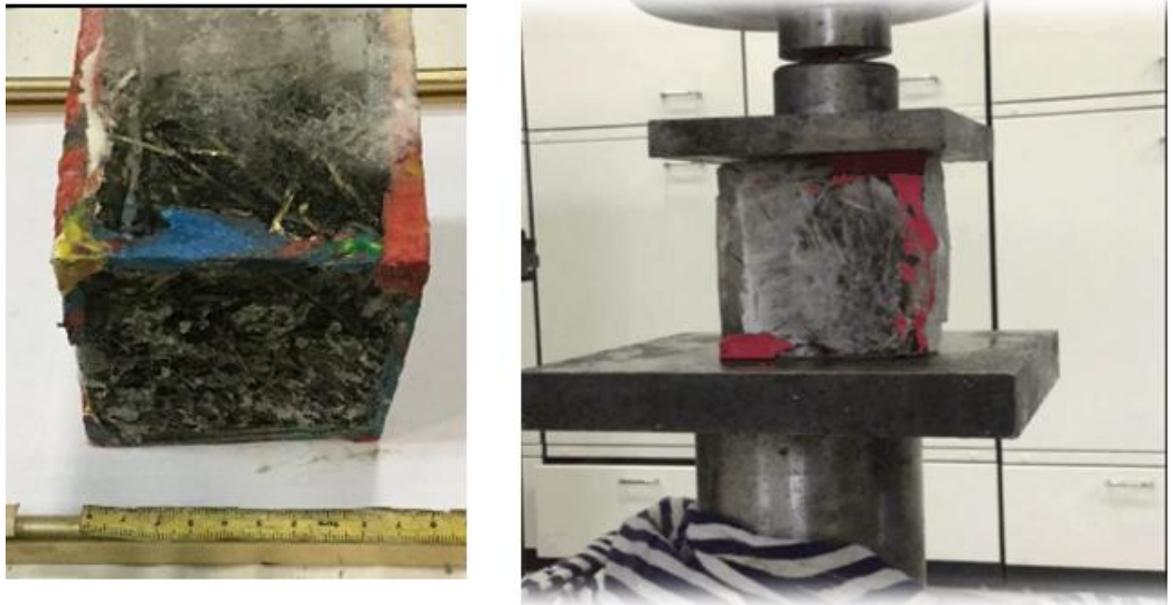


Рисунок 3.19 – Образцы льдокомпозита на основе металлической фибры, подготовленные для испытания на сжатие

Согласно проведенным нами лабораторным исследованиям, прочность на одноосное сжатие деревольда (льдокомпозита с добавками опилок) составляла от 3,5 до 7,1 МПа при температуре от -5 °С до -20 °С, что аналогично экспериментальным данным, полученным ранее и указанным в таблицах 3.15, 3.16 (таблица 3.22).

Таблица 3.22 - Прочность на сжатие льдокомпозита на основе опилок

| Температура, °С | Содержание опилок, % | | | | |
|--------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 4 | 8 | 12 | 14 |
| | Прочность на сжатие, МПа | | | | |
| -5 | 1,7 | 3,5 | 5,0 | 5,3 | 5,6 |
| -10 | 1,9 | 4,7 | 5,6 | 5,8 | 6,4 |
| -20 | 2,2 | 5,1 | 5,9 | 6,4 | 7,1 |

Лабораторные исследования показали, что введение пенопласта значительно снижает прочность льда (<1 МПа), в связи с чем рассматривается использование этого материала только в качестве теплоизолятора.

Приведенные выше льдокомпозиции рассматриваются как дополнение к основному замораживающему материалу – льдопородной закладке, которая по сравнению с ледяной закладкой имеет преимущество по скорости намораживания и прочностным характеристикам. Из всех рассмотренных льдокомпозиционных материалов льдопородная закладка является наиболее изученным. Ниже приведём основные данные, полученные исследователями за 40 лет.

Закладочная смесь, включающая дробленую породу и воду (от 21,26 до 49,76 % по объёму), при температуре от -15 до -53 °С имела прочность на сжатие от 1 до 2,4 МПа [62]. Другой состав: дробленая мерзлая порода и вода, дополнительно дроблённый лёд и глинистый шлам, имел среднюю прочность 3,5 МПа при температуре от -7 до -16 °С [1]. Недостатком такого состава является низкая прочность образовавшегося льдокомпозиции за счёт использования в качестве заполнителя 20÷25 % льда.

В дальнейшем был предложен состав, дополнительно содержащий водный раствор поверхностно-активного вещества, а в качестве дополнительного заполнителя песок при следующем соотношении компонентов (массовый %): дробленые мерзлые породы: 59,4÷64,4; песок: 24,8÷30,0; остальное – водный раствор поверхностно-активного вещества. При этом в качестве водного раствора поверхностно-активного вещества использовали водный раствор смачивателя ДБ в следующем соотношении (массовый %: смачиватель ДБ): 0,42÷2,6; остальное – вода. Увеличение среднего предела прочности закладки на одноосное сжатие с 2,66 (для образцов с компонентами: дробленая порода, песок) до 3,07 МПа (с введением смачивающей добавки ДБ) [3].

Степень уплотнения материала после закладки его в выработанное пространство различна. Наименьшее уплотнение дают песок и гравий (до 3,5 %), больше уплотняются под действием горного давления гранулированные шлаки, хвосты обогатительных фабрик и закладка из горных пород (до 16 %) [11].

Заслуживают внимания лабораторные исследования, проведённые ВНИИ-1 в 80-ые годы 20 века, в результате которых определен оптимальный состав компонентов (%): дробленая порода – 46÷52, песок – 23÷27, вода – 6÷23 [61]. Предел прочности намороженных образцов на одноосное сжатие (при температуре -5 °С) составляет 3÷4,5 МПа. Кроме того, ВНИИ-1 были предложены 4 варианта составов закладочных смесей, которые можно назвать универсальными для условий Севера [126]. Составы разработанных закладочных смесей, их прочностные характеристики и оптимальные расходы компонентов на 1 м³ закладочного материала приведены в таблице 3.23.

Таблица 3.23 - Составы закладочных смесей, разработанные ВНИИ-1

| Номер смеси | Компоненты | Расход компонентов, кг | Прочность замороженного массива при t=-5°С, МПа |
|-------------|---|--|---|
| 1 | Дробленая порода Вода | 1700—1800 150—170 | 2,0—2,5 |
| 2 | Дробленая порода Песок Вода | 1300—1400 400—500 140—220 | 4,0—6,0 |
| 3 | Дробленая порода Песок Дробленный лед Вода | 1100—1300 300—400 1400—1500 170—210 | 3,0—4,0 |
| 4 | Дробленая порода Шлак Вода | 900—1000 500—600 150—220 | 2,0—3,5 |

Для получения монолитного закладочного массива с необходимыми прочностными свойствами за заданный период времени необходимо знать соотношения массы и объемов воды и породы (при различных значениях температур подсыпаемых пород).

В таблице 3.24 представлены значения необходимого соотношения массы, объемов воды и породы для обеспечения замораживания массива при различных значениях температур подсыпаемых пород [78].

Таблица 3.24 - Соотношения массы ($M_{п}$), объема пород ($V_{п}$) и воды ($M_{в}, V_{в}$), необходимые для замораживания воды при различной температуре пород $T_{по}$:

| $T_{по}, ^\circ\text{C}$ | $M_{п}$ | $V_{п}$ |
|--------------------------|------------|------------|
| -15 | 33 $M_{в}$ | 16 $V_{в}$ |
| -20 | 23 $M_{в}$ | 11 $V_{в}$ |
| -25 | 17 $M_{в}$ | 9 $V_{в}$ |
| -30 | 14 $M_{в}$ | 7 $V_{в}$ |

Для определения времени замораживания льдопородного закладочного массива получена следующая формула [78]:

$$t = \frac{v * \rho_{л} * F^2}{2 * \lambda_{л} (T_{кр} - T_{пов.л})}, \text{ час} \quad (3.4)$$

где $\rho_{л}$ — плотность льда, кг/м^3 ;

$\lambda_{л}$ — коэффициент теплопроводности льда: $\lambda_{л} = 2,30 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$;

v - скрытая теплота кристаллизации воды: $v = 80 \text{ ккал/кг}$;

$T_{кр}$ — температура кристаллизации воды, $^\circ\text{C}$, $T_{кр} = 0^\circ\text{C}$;

$T_{пов.л}$ — температура льда на поверхности контакта с водой, $^\circ\text{C}$;

F — толщина образовавшегося слоя льда за время t , м.

Время замораживания закладочного массива для подземных условий можно сократить в 2-3 раза (при обеспечении необходимой производительности предприятия) путем изменения следующих параметров: охлаждения рудничного воздуха до $t = -15^\circ\text{C}$; доведения скорости движения воздуха до $4 \div 5 \text{ м/с}$; толщины замораживаемого слоя за один приём не более $0,2 \text{ м}$; охлаждения воды перед заливкой в камеру до $0,5 \div 1^\circ\text{C}$. Температура дробленых пород должна быть не выше -20°C при следующем гранулометрическом составе: крупные куски (до 400 мм) – $54,5\%$ по массе или объему, мелкие куски (менее 40 мм) – $45,5\%$. При соблюдении этих

условий замораживание льдопородного массива произойдет за 14÷16 дней вместо 30÷45.

С целью уточнения данных по использованию различных составов для получения льдопородной закладки был проведен ряд опытов, в результате которых установлены составы компонентов, представленные в таблице 3.25.

Таблица 3.25 - Содержание компонентов в образцах (порода, песок, лёд) без учёта воды

| Компоненты | Состав 1 | | Состав 2 | | Состав 3 | | Состав 4 | |
|------------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Порода | 85 | 2050 | 75 | 1940 | 80 | 2030 | 80 | 1910 |
| Песок | 10 | | 15 | | 18 | | - | |
| Лёд | 5 | | 10 | | 2 | | 20 | |

Примечание: 1 - содержание компонента по весу, %; 2 - плотность для всего не замороженного состава, кг/м³

Гранулометрический состав дробленой породы (основной заполнитель) в образцах выбран с учетом естественного состава пустых пород в отвалах от вскрышных и проходческих работ рудника, с учётом возможного дробления и просеивания. Состав испытанной породы в намораживаемых образцах по фракциям, определялся последовательным рассевом на ситах с заданным диаметром отверстий и последующим взвешиванием. Для 1 и 2 состава с размером образцов 10х10х10 см: - 5 мм – 15 %; 5÷10 мм – 77,5 %; 10÷20 мм – 7,5 %. Для образцов размером 20х20х20 см: -10 мм –15 %; 10÷20 мм – 77,5 %; 20÷40 – 7,5 %. Для 3 и 4 состава (размер): 1÷10 мм – 15 %; 10÷20 мм – 77,5 %; 20÷30 – 7,5 %. Крупность песка 0,1÷2,5 мм. Температура воды составляла +1÷+5 °С. На рисунке 3.20 представлены образцы, созданные по составу 1 и 3.

Обобщая полученные данные можно отметить, что средние результаты прочности на сжатие составляли: состав 1: 2,0÷5,3 МПа; состав 2: 2,1÷6,1 МПа; состав 3: 3,2÷5,0 МПа; состав 4: 1,8÷4,3 МПа. Полученные значения для чистого льда хорошо согласуются с результатами, полученными ранее другими исследователями.



Рисунок 3.20 -Примеры образцов льдопородной закладки (10x10x10см):
А - созданный по составу 1; Б - по составу 3.

3.4 Выводы по главе 3

Прочность льда изменяется в пределах от 1,5-3 МПа (при температуре до -5°C) до 3-4 МПа (при температуре от -5 до -15°C). Лед является пластическим материалов. Чем ниже температура льда, тем более ярко выражены свойство ползучести (пластического деформирования). Деформация образца возрастает в 2-4 раза при снижении температуры с -6 до -12°C при действующих напряжениях (0,2 от разрушающих = 0,6 МПа).

Прочность льдонасыщенных пород зависит от их влагонасыщения и при быстром нагружении прочность прямо пропорциональна влажности, а при медленном нагружении существует оптимальная влажность, при превышении которой прочность снижается. Для песчаных пород прочность при заданной влажности в 2-3 раза выше, чем для глиносодержащих. Максимальная прочность достигается при влажности 15 % для глин и 30 % для влагонасыщенного песка. Прочность замороженного песка от 5 до 10 раз выше прочности льда. Чем выше скорость нагружения, тем больше предел текучести – при увеличении скорости в три раза с 0,4 до 1,2 МПа в мин предел текучести повышается с 3 МПа до 6 МПа для глинистых водонасыщенных пород. Для теплоизоляции закладки практически аналогичными материалами являются

вата (стеклянная, минеральная), пенопласт и снег, далее идут опилки, стружка, солома, дерево, сухая земля и т.д.

Прочность льда при послойном намораживании или использовании термосифинов возрастает в 2-4 раза. При добавлении ПВС и глицерина упрочнение составляет от 1,6 до 8,1 раза (при t от -2 до -20°C).

При добавлении целлюлозы (4-8 %) ползучесть снижается в десятки раз. При этом для образцов с целлюлозой при испытаниях параллельно и перпендикулярно плоскости намораживания ползучесть увеличивается в два раза. А для речного льда она увеличивается (для параллельной ориентации) в 10-20 раз в зависимости от давления. При этом ползучесть «затухает» в два раза с первых 200 часов до диапазона 300-700 часов и затем еще в два раза с 700 до 1500 часов.

Добавление (до 7 %) в лед опилок (древесного волокна) практически идентично добавкам стеклоткани, рубленого жгута, хлопка и позволяет увеличить предел прочности ориентировочно в два раза.

На прочность замораживаемой закладки оказывают влияние такие факторы, как: прочностные свойства и гранулометрический состав крупного заполнителя (порода, щебень), наличие и состав мелкого заполнителя (песок, глина, пыль и т.д.), а также количество и условия кристаллизации воды.

Проведенные испытания льдокомпозитных материалов различных составов показали, что:

- введение в замораживаемый состав стеклобоя (крупностью более 5 мм) позволяет увеличить прочность образца (по сравнению со льдом) в 1,5-2,3 раза (в зависимости от содержания стеклобоя – от 10 до 30 %);

- введение в замораживаемый состав мелкодисперсного стекла практически идентично введению песка (наряду со стеклобоем) увеличивает прочность незначительно (до 5-10 %);

- введение в состав замораживаемой смеси (песок и вода) резинокордовой крошки (в количестве от 5 до 30 %) снижает прочность смеси

до 300 %, однако такой состав обладает достаточной прочностью (около 2 МПа) и существенно меньшей теплопроводностью;

- введение в лед металлической фибры (от 1 до 15 % по весу) увеличивает прочность образцов (по сравнению с чистым льдом) от 1,7 до 4,4 раза – то есть прочность образцов (при наличии 14,4 % металлической фибры) сопоставима с льдопородным или льдопесочным композитом.

Проведенные исследования позволили установить зависимости физико-механических параметров различных материалов, в которых в качестве связующего используется замороженная вода, от их вещественного и гранулометрического состава. Как показали результаты испытаний замороженных образцов наиболее высокими прочностными свойствами обладает льдопородная закладка, в которой представлены крупная (10-15 см) и мелкая фракция пород (2-3 мм возможно использование песка) в пропорции 60 % на 40 % смоченные 180 литрами воды на 1 тонну смеси.

Испытания различных композитных замороженных материалов показали, что использование древесных отходов, битого стекла и металлической фибры увеличивают прочность льдокомпозита на 10-20 %.

Применение льдокомпозитов с добавками пенопласта и резинокордовой крошки значительно снижают прочностные свойства льдокомпозитов (в сопоставлении с чистым льдом или льдопородными образцами), однако полученная прочность достаточна для использования рассматриваемых льдокомпозитов в качестве теплоизоляционных слоев, по которым будет передвигаться используемая на горном предприятии техника (ПДМ, буровые станки и т.д.).

Необходимо отметить, что полученные результаты могут быть использованы при проектировании геометрических параметров льдопородной закладки и позволяют обоснованно подойти к расчету устойчивости искусственных целиков и потолочин в заданных горно-технических и горно-геологических условиях.

Полученные результаты подтвердили целесообразность внедрения технологий комбинированной закладки выработанных пространств льдопородной закладкой непосредственно над извлекаемыми межэтажными потолочинами на высоту до нескольких извлекаемых мощностей жилы. Мощность замораживаемого слоя определяется на базе геомеханических оценок напряженно-деформированного состояния ответственных элементов горного массива и закладки [110, 111]. Замороженная закладка может быть покрыта теплоизоляционными слоями, и необходимость таких работ определяется условиями в конкретной рассматриваемой камере (температура воздуха в камере и температура вмещающих пород), и дальнейшая закладка может вестись в виде обычной засыпки и укатки слоев.

Полученные в данной главе зависимости использовались в дальнейшем для разработки технологий создания льдопородных массивов и обоснования параметров технологических схем безцеликовой выемки крутопадающих рудных жил мощностью до 3 м.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕННЫХ РУД ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ С ЛЕДЯНОЙ И ЛЬДОПОРОДНОЙ ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

4.1 Разработка технологических схем отработки ценных рудных жил на месторождении Лунное и обоснование параметров технологий отбойки руды и параметров льдопородной закладки

Как было отмечено во 2-ой главе повышение извлечения высокоценных руд из жил малой и средней мощности и снижение их разубоживания в условиях месторождений криолитозоны наиболее целесообразно осуществлять на базе внедрения систем разработки горизонтальными слоями с закладкой (частичной закладкой) выработанного пространства. Данная система разработки широко используется при отработке месторождений по всему миру благодаря своей универсальности: применима для практически любых геоморфологических типов рудных тел, возможность контроля разубоживания и высокое извлечение запасов руды из недр. Закладка выработанного пространства снижает смещение горных пород и просадку грунта на поверхности. Типовая система разработки горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства представлена на рисунке 4.1. Послойную выемку руды ведут снизу вверх зачастую с применением самоходной техники на пневматическом ходу с закладкой выработанного пространства. Эта схема характеризуется меньшей производительностью, чем системы разработки подэтажными штреками (которая и используется на рассматриваемом месторождении) и ортами с закладкой, но имеет лучшие показатели по параметрам потерь и разубоживания руды.

Данная система разработки предусматривает отработку рудных тел и ведется горизонтальными слоями с закладкой, начиная с нижнего слоя; каждый отработанный слой закладывают, при этом поверхность закладки

служит «почвой» очистной выработки для перемещения рабочих и оборудования, занятых на очистных работах, а затем заложённая почва этажа при отработке межэтажного целика, служит искусственной кровлей очистной выработки.

Рациональная область применения данной системы – высокоценные руды, средняя и низкая устойчивость руды и вмещающих пород, сложная морфология рудных тел. При отработке жил длина очистного блока составляет от 20 м до 100 м при значительной изменчивости параметров залегания рудных тел, как по падению, так и по простиранию.

Требования к устойчивости кровли при разработке горизонтальными слоями более жесткие, чем при камерных системах, так как горнорабочие работают непосредственно в очистном пространстве, поэтому не допускается обрушение кровли. Параметры очистного блока, его длина и высота при системе разработки горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства лимитируются длиной доставки руды погрузочно-доставочными машинами, возможностями машины для оборки заколов руды и пород, а также устойчивостью обнажения горных пород.

Опытным путём на месторождении определено, что самоходные погрузочно-доставочные машины ST-7D целесообразно использовать при длине доставки руды до 50 м. Машины для оборки заколов руды и породы (используемые на предприятии) допускают высоту слоя до 5 м. С учётом опыта работы рудников при разработке месторождений Якутии со сходными горно-геологическими условиями отставание закладки от забоя не рекомендуется превышать 20 м.

Во 2-ой главе было отмечено, что отработка рудной жилы на месторождении Лунное ведётся с подэтажной отбойкой. В настоящее время на руднике в породах лежачего бока проходится наклонный автосъезд с частичным использованием существующего. На флангах очистного блока проходятся блоковые вентиляционно-ходовые восстающие. Вдоль рудного тела проходится полевой этажный доставочный штрек. К подэтажам от

наклонного автосъезда через каждые 12-15 м по вертикали, примыкают заезды, с которых проходят подэтажные буровые штреки. Высота подэтажа составляет 9-15 м. Отбойка ведется скважинами на всю высоту подэтажа. После отгрузки руды выработанное пространство закладывается пустой породой с вышележащего бурового штрека. При этом высокое разубоживание руды и ее неполное извлечение были обусловлены малой мощностью жилы, невыдержанностью ее залегания и наличием существенных объемов вывалов за проектным контуром отбиваемого блока. Уменьшение длины выемочного блока позволяет снизить отрицательные проявления горного давления в камере (уменьшить объем вывалов), но при этом возрастает количество междуканальных целиков и соответственно потери в этих целиках. Кроме этого, отработку межэтажных целиков возможно производить только в случае создания над ними устойчивой потолочины из твердеющего материала (ледяной или льдопородной закладки). Типовая схема представлена на рисунке 4.1.

Исходя из представленных требований необходимо разработать систему разработки, позволяющую удовлетворить следующим требованиям:

- отработка жилы слоями высотой от 2 до 10 м, с обязательной закладкой нижнего слоя (или нескольких слоев) замораживаемой закладкой;
- выработанное пространство над искусственной потолочиной может закладываться или оставаться «открытым», в зависимости от технологических условий и требований по сдвигению подработанных пород;
- разрабатываемая система разработки должна «базироваться» на действующей на руднике сети выработок;
- максимально возможное использование механизации, применяемой на предприятии (использование буровой и погрузочно-доставочной техники рассматриваемого предприятия).

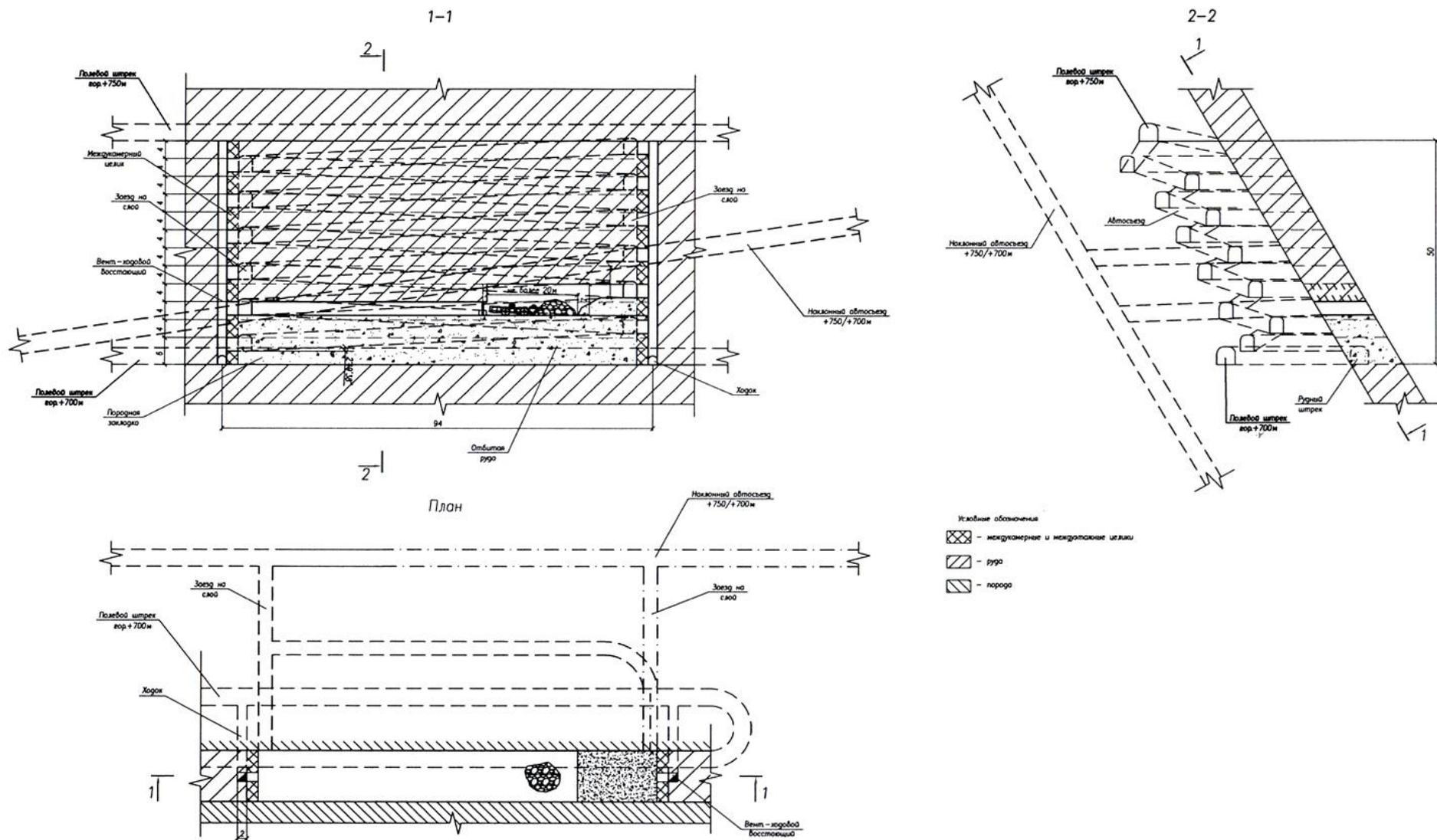


Рисунок 4.1 – Типовая технологическая схема системы разработки горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства

В разрабатываемой технологической схеме основным параметром является высота отбиваемого слоя, которая обычно выбирается исходя из возможности применяемого самоходного оборудования, устойчивости руд и вмещающих пород. По опыту отработки рудника высота отбиваемого слоя не должна превышать 10 м, а отставание закладочных работ от забоя не должно превышать 20 м.

Нарезные работы заключаются в проходке разрезного штрека. Очистная выемка начинается с разбуривания слоя, в том числе и отрезного восстающего с разрезного штрека буровой установкой Simba H-1257. Заряжание рядов (вееров) скважин ведется с помощью зарядной установки «Ульба». Вначале взрывными работами образуют отрезной восстающий, после чего ведут выемку отбиваемого слоя руды торцевым забоем, в отступающем порядке, от одного фланга очистного блока (отрезного восстающего/щели) к другому.

Отбитая руда погрузочно-доставочной машиной ST-7D вывозится по наклонному автосъезду в специальную камеру, где перегружается в автосамосвал МТ-2000 и транспортируется к устью штольни №1. Выработанное пространство, вслед за выемкой засыпается породой с помощью погрузочно-доставочной машины ST-7D с отставанием от забоя не более 20 м и с оставлением пространства высотой 3 м для выемки последующего слоя. Технология возведения льдопородной закладки рассматривается ниже. В качестве материала для закладки предусматривается использовать вскрышные породы отвала и пустые породы из камеры.

Проходка подготовительных и нарезных горных выработок при подготовке блока производится буровзрывным способом. Откатка отбитой горной массы осуществляется, по необходимости, в закладку соседних блоков, либо через штольню Южная в отвал на поверхности.

Очистные работы в блоке состоят из комплекса работ по бурению, взрыванию, погрузке и доставке отбитой руды. Отработка блока производится восходящими слоями. Шпуры для отбойки руды и шпуры для отбойки породы в закладку (закладочные шпуры) бурят одновременно. Шпуры для отбойки руды бурятся по контуру рудного тела, избегая прирезки пустых пород лежащего и

висячего боков, не допуская разубоживания отбиваемой руды, на всю высоту отбиваемого слоя. Шпуры для отбойки породы бурятся за контуром рудного тела на всю высоту отбиваемого слоя. Первыми заряжаются и взрываются шпуры отбуренные по руде. Заряжание и взрывание шпуров отбуренных по породе производится после отгрузки руды и проведения мероприятий по подготовке к закладке очистного пространства. Бурение шпуров производится буровой установкой Sandvik DD-210. Взрывные работы по отбойке руды в блоке производятся в направлении от фланга к флангу. Проветривание блока производится за счет обще-шахтной депрессии. Погрузка руды и откатка руды из блока производится ПДМ Sandvik LH-204. Перед началом работ по отгрузке руды производится приведение выработки в безопасное состояние, путем оборки заколов на бортах и кровле выработки. При отгрузке руды из блока необходимо контролировать плоскость контакта руды с закладкой, не допуская потерь руды на поверхности закладки и подмешивания закладки к добываемой руде.

Необходимо отметить, что в разработанной системе разработки закладочный массив выполняет две основные функции: является кровлей очистной камеры при выемке межэтажного целика (нижний слой определенной высоты в камере) и является закладкой, выполняющей функцию управления горным давлением (вся закладка, кроме нижнего слоя). Соответственно нижний слой должен быть заложен льдопородной закладкой, а остальные слои могут быть заложены просто пустыми породами без их «сцементирования» водой.

После полной отгрузки руды из очистного пространства производится подготовка к закладочным работам. Выработка приводится в безопасное состояние. Участковым маркшейдером производится промер глубин шпуров, отбуренных по вмещающим породам. При обнаружении дефектов шпуры перебуриваются. На борту выработки краской наносится линия почвы слоевого штрека последующего слоя. После этого производится заряжание шпуров, отбуренных во вмещающих породах. Заряжание производится с помощью пневматического зарядчика ЗП-2. В качестве ВВ применяют игданит, инициирующим ВВ служит аммонит 6ЖВ. Закладка производится буровзрывным

способом путем подрыва вмещающих пород. Если объема пустых пород недостаточно для заполнения очистного пространства до нужной отметки, то недостающий объем доставляют самоходной техникой из проходческих забоев или отвала. После взрывных работ производится формирование закладочного слоя, путем планировки отбитой горной массы. В заполняемом очистном пространстве порода складывается и выравнивается. Для планировки используется ПДМ Sandvik LH-204. Следует учесть, что при передвижении ПДМ по закладочному слою происходит укатывание поверхности и уплотнение закладываемых пород. Дополнительное уплотнение закладки при помощи специальной техники не предусмотрено. По окончании работ поверхность закладки должна представлять собой относительно ровную уплотненную поверхность.

После заполнения отбитого слоя закладочным материалом следует замаркировать поверхность с помощью реперов, обустроенных в бока очистного пространства для правильной ориентации уровня поверхности, разделяющей руду и пустые породы закладки. По вынесенным реперам на почву выработки уложить рельсы вдоль бортов, для снижения засорения руды пустыми породами. Последующие слои отрабатываются аналогично. Закладка последнего слоя производится из бурового штрека 886 м.

Эксплуатация и ремонт применяемых на руднике самоходных горно-шахтных машин с ДВС осуществляется в соответствии с РТПП 03-03-08 «Эксплуатация самоходного оборудования». В соответствии с принятой технологией отработки запасов, на подземных горных работах используется современная самоходная буровая и погрузочно-доставочная техника фирмы «Sandvik». Для производства работ проектом предусматривается использование следующих горных машин и оборудования.

При проходке горных выработок используется следующее оборудование: самоходная буровая установка (СБУ) с дизельным двигателем Sandvik DD-210, погрузочно-доставочная машина (ПДМ) с дизельным двигателем Sandvik LH-204; ПДМ с дизельным двигателем ST-7D. При производстве очистных и закладочных работ используется следующее оборудование: СБУ с дизельным двигателем

Sandvik DL-210; СБУ с дизельным двигателем Sandvik DD-210; ПДМ с дизельным двигателем Sandvik LH-204; ПДМ с дизельным двигателем ST-7D. Для оборки заколов используется навесной заколооборник, устанавливаемый на ковш ПДМ Sandvik LH-204.

Согласно пункту 155 ФНиП «свежий воздух, подаваемый в подземные горные выработки, должен иметь температуру не ниже +2 °С». Необходимо учитывать, что месторождение находится в зоне вечномёрзлых пород и все главные вскрывающие выработки (автосъезды, штольни, вентиляционные восстающие) находятся в данных породах. Устойчивость пород и соответственно выработок во многом зависит от сохранности многолетнемерзлого состояния вмещающих пород. При подаче в выработки подогретого воздуха цементирующий породы лед растает, что может привести к снижению устойчивости пород и к дополнительным нагрузкам на крепь выработок, поэтому согласно пункту 229 ФНиП «температура подаваемого в шахту воздуха должна определяться проектной документацией и обеспечивать защиту горных пород от растепления» [102].

Учитывая опыт работы горнодобывающих предприятий, разрабатывающих месторождения Крайнего Севера (рудники Каральвеем, Купол, Дуэт, Бадран, Сарылах, штольневые горизонты Нежданинского рудника и др.) рекомендуется использовать для подогрева воздуха тепловую энергию породного массива. Сущность предложения сводится к тому, что зимой при движении по выработкам переохлажденный воздух в результате обмена с окружающими породами подогревается до температуры, близкой к температуре вмещающих пород, происходит дополнительное промораживание пород. В теплый период времени наоборот за счет промороженных пород воздух охлаждается до температуры вмещающих пород.

4.2 Внедрение разработанной технологической схемы отработки ценных рудных жил на месторождении Лунное и анализ технико-экономических результатов использования разработанной технологии

В Российской Федерации залегает около 7 % разведанных мировых запасов серебра, при этом значимая их часть находится в восточных регионах страны, а в пределах криолитозоны залегает около 60 %. Одиннадцать наиболее значимых месторождений (из них пять – золотосеребряных) разведаны в Магаданской области. Суммарные их запасы составляют 11,7 тыс. т (около 10 % запасов серебра РФ) при среднем содержании металла в руде до 1222 г/т.

Внедрение результатов исследований проведено на одном из рудников Дукатского хаба – руднике АО "Полиметалл" (Polymetal International plc), отрабатывающем месторождение Лунное (Приложение А). Данное предприятие, отрабатывающее рудник Дукат (638,1 г/т Ag), и еще три подземных рудника на месторождениях Лунное (432,4 г/т Ag), Арылахское (является спутником месторождения Лунное) и Гольцовое (находится на завершающей стадии разработки) в совокупности производит около половины Российского серебра – в 2015 г. было добыто 1142 т серебра. «Обеспеченность указанных предприятий запасами серебра составляет 12÷16 лет [38].

Золотосеребряное месторождение Лунное расположено на границе Омсукчанского и Среднеканского районов Магаданской области Российской Федерации, в 721 км (по автомобильной дороге) северо-восточнее областного центра г. Магадана, в 132 км от районного центра пос. Омсукчан и 105 км от пос. Дукат (рисунок 4.2)».

«В районе месторождения многолетняя мерзлота распространяется на глубину до 300 м от земной поверхности. В соответствии с климатическим районированием Северо-Востока Азии климат района резко континентальный с продолжительной (7,5 месяцев), очень морозной зимой, коротким и прохладным летом (июнь, июль, август) с частыми туманами. Для характеристики

климатических условий использованы материалы многолетних наблюдений (1961-2009 гг.) на снеголавинной станции «Омсукчан», представленные в таблице 4.1».



Рисунок 4.2 - Обзорная карта основных месторождений Дукатского хаба [112]

Таблица 4.1 - Климатические характеристики пос. Омсукчан

| Месяц | | | | | | | | | | | | Год |
|--|-------|-------|-------|-----|------|------|------|-----|-------|-------|-------|-------|
| I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | |
| Средняя температура воздуха для месторождения Лунное, (°C) | | | | | | | | | | | | |
| -33,9 | -31,0 | -23,6 | -12,0 | 1,4 | 10,9 | 13,6 | 10,5 | 3,2 | -10,4 | -25,8 | -33,0 | -10,8 |
| Средняя скорость ветра, (м/сек): | | | | | | | | | | | | |
| 2,3 | 2,6 | 2,3 | 2,5 | 2,9 | 3,0 | 2,7 | 2,5 | 2,3 | 2,1 | 1,9 | 1,9 | 2,4 |

«Месторождение Лунное характеризуется сплошным развитием ММП. На территории месторождения мерзлотные условия различные. Площади низкогорья характеризуются мощностью толщи ММП до 300 м, а температура у подошвы яруса годовых теплооборотов составляет $-4\div 5$ °C. Величина геотермической ступени достигает $45\div 80$ м/град. Площади днищ долин водотоков характеризуются прерывистой мощностью многолетнемерзлых пород и достигают 100 м.

На 2018 год очистные работы ведутся на VII, IX рудных зонах, подготовительные и геологоразведочные работы ведутся на V рудной зоне. Все добычные работы на месторождении ведутся подземным способом».

«Внедрение результатов исследований проводилось на VII рудной зоне рудника, отрабатывающего рассматриваемое месторождение Лунное.

Цели проведения промышленного эксперимента по изменению системы отработки:

- определение технической возможности и экономической целесообразности применения системы горизонтальными слоями, в том числе с замораживаемой закладкой выработанного пространства с селективной отбойкой руды в условиях VII р.з. месторождения Лунное;

- уменьшение показателей потерь и засорения руды по отношению к существующей подэтажно-камерной системе разработки;

- возможность последующей отработки подэтажного целика (при существующей системе целик оставляли в качестве потерь);

- определение элементов системы разработки для конкретного месторождения и горно-геологических условий;

- определение параметров БВР для улучшения качественных показателей добытой руды».

«Рассмотрим наиболее подробно рудную зону VII, месторождения Лунное. Отработка месторождений осуществляется преимущественно камерной системой разработки с подэтажной отбойкой руды глубокими скважинами. При этом ширина междуэтажных целиков (потолочины) – не менее 3 м, для подкарьерных запасов месторождения Арылах не менее 5 м (зачастую значительно больше); ширина междукammerных целиков – 5 м. Учитывая высокое содержание полезного компонента в оставляемых целиках, они также подлежат отработке. В целиках при отработке руд малой и средней мощности камерными системами разработки остается от 20 до 40 % запасов месторождения». Наиболее целесообразно, с точки зрения геомеханики, выемку целиков вести вслед за отработкой блоков, так как увеличение пролета выработанного пространства с течением времени приведёт к накоплению значительного повышенного напряжения, что в конечном итоге затруднит последующую их выемку.

«Выпуск руды от погашенных целиков зачастую ведут под обрушенными породами. Этот способ приводит к достаточно высокому разубоживанию руды. Как уже было показано ранее в разделе 2.1, наименьших потерь и разубоживания руды при отработке целиков (как подкарьерных, так междуэтажных и междукамерных) можно добиться использованием твердеющей закладки. Дополнительные сложности возникают при применении цементных смесей в условиях многолетней мерзлоты. Гидратация и набор прочности стандартных цементных вяжущих материалов при отрицательной температуре останавливается. Перспективной технологией, позволяющей рационально осваивать месторождения драгоценных металлов в криолитозоне, является замораживаемая закладка».

При выборе участка для производства опытно-промышленных работ были приняты следующие основные критерии:

- обособленность участка ОПР от основного направления очистных работ;
- близкое расположение к штольне (поверхности) и как следствие возможность подавать холодный воздух с поверхности практически без изменения его температуры (для реализации промораживания горной массы и создания замораживаемой закладки, под которой в дальнейшем будет отработан подэтажный целик);
- возможность использования имеющегося горно-шахтного оборудования без снижения основных плановых показателей рудника;
- возможность продолжения горных работ, в том числе другими системами разработки, на участке ОПР вне зависимости от полученных результатов.

В результате оценки возможных вариантов был выбран блок ЗС1-2 в расширенных границах камеры №2 подэтажа +872 - +886 м.

Камера №2 проходит по родонит сульфид-кварцевой жиле с вмещающими метасоматически изменёнными уплотнёнными алевролитами, с наличием слабого нитевидного прожилкования.

Расположение участка приведено на рисунке 4.3, а расчет объемов закладки рассматриваемой камеры приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Основные показатели по закладочным работам

| Наименование | Значение |
|--|----------|
| Общий объём закладки, м ³ | 2627 |
| Объём товарной руды, м ³ | 1042 |
| Закладка с подрыва вмещающих пород, м ³ | 962 |
| Коэффициент разрыхления с учетом уплотнения | 1,45 |
| Закладка с подрыва вмещающих пород с учетом коэф. разрыхл., м ³ | 1395 |
| Закладки с проходческих забоев, м ³ | 1232 |

«Рудная зона VII расположена в верховьях ручья Лев. Арылах в 3,5 км к северо-западу от зоны IX. Камера №2 пройдена по рудному телу 2, представленному сульфид-родонит кварцевой жилой, мощностью 0,9÷2,5 м. Вмещающие породы представлены сильнотрещиноватыми метасоматически изменёнными уплотнёнными алевролитами, а руды сложены светло-серым сливным скрытокристаллическим кварцем с частыми вкрапленниками сульфидов. Угол падения рудного тела 80-90 град. Руды и вмещающие породы среднеустойчивые. Наличие многолетней мерзлоты и заполнение трещин льдом увеличивает сцепление пород в массиве и повышает устойчивость обнажений пород при сохранении минусовой температуры. Крепость по шкале проф. Протодяконова руды 16-18, пород 9-11. Объёмный вес руды 2,7 т/м³».

В случае если бы отработка осуществлялась системой с поэтажным обрушением, то потери в межэтажном целике составили бы порядка 1200 тонн (фактическая длина 75 м; высота 5,5÷9,2 м).

«В период с 2015-2017 гг. на VII рудоносной прошли опытно-промышленные работы по применению слоевой системы отработки, в том числе с применением замораживаемой закладки (камера № 2, гор. +872-886 м, блок ЗС2-1)» (см. рисунок 4.3).

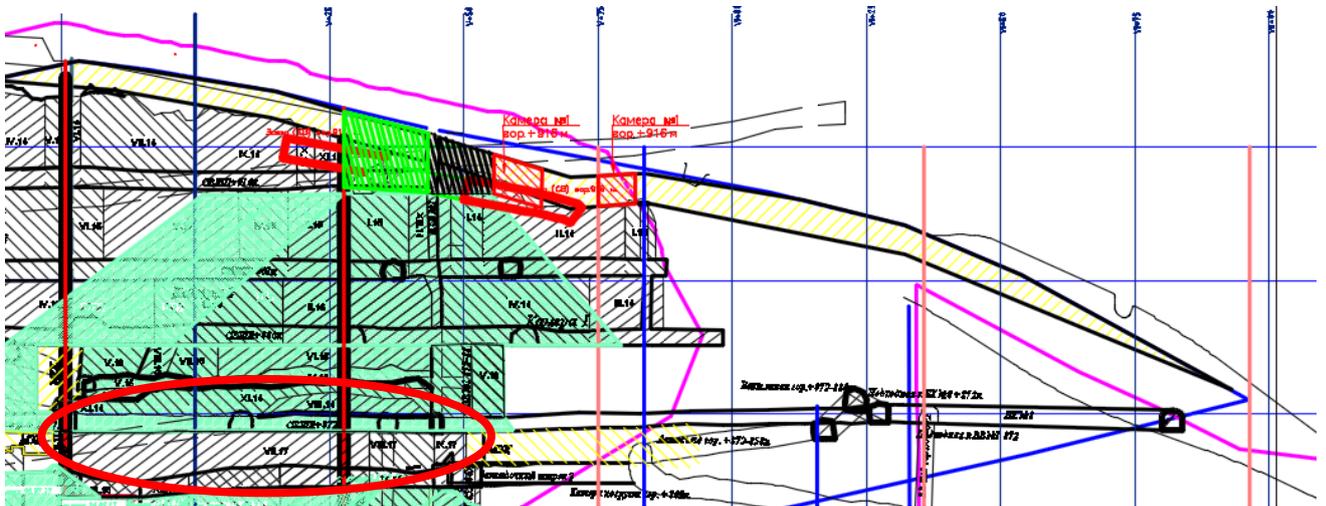
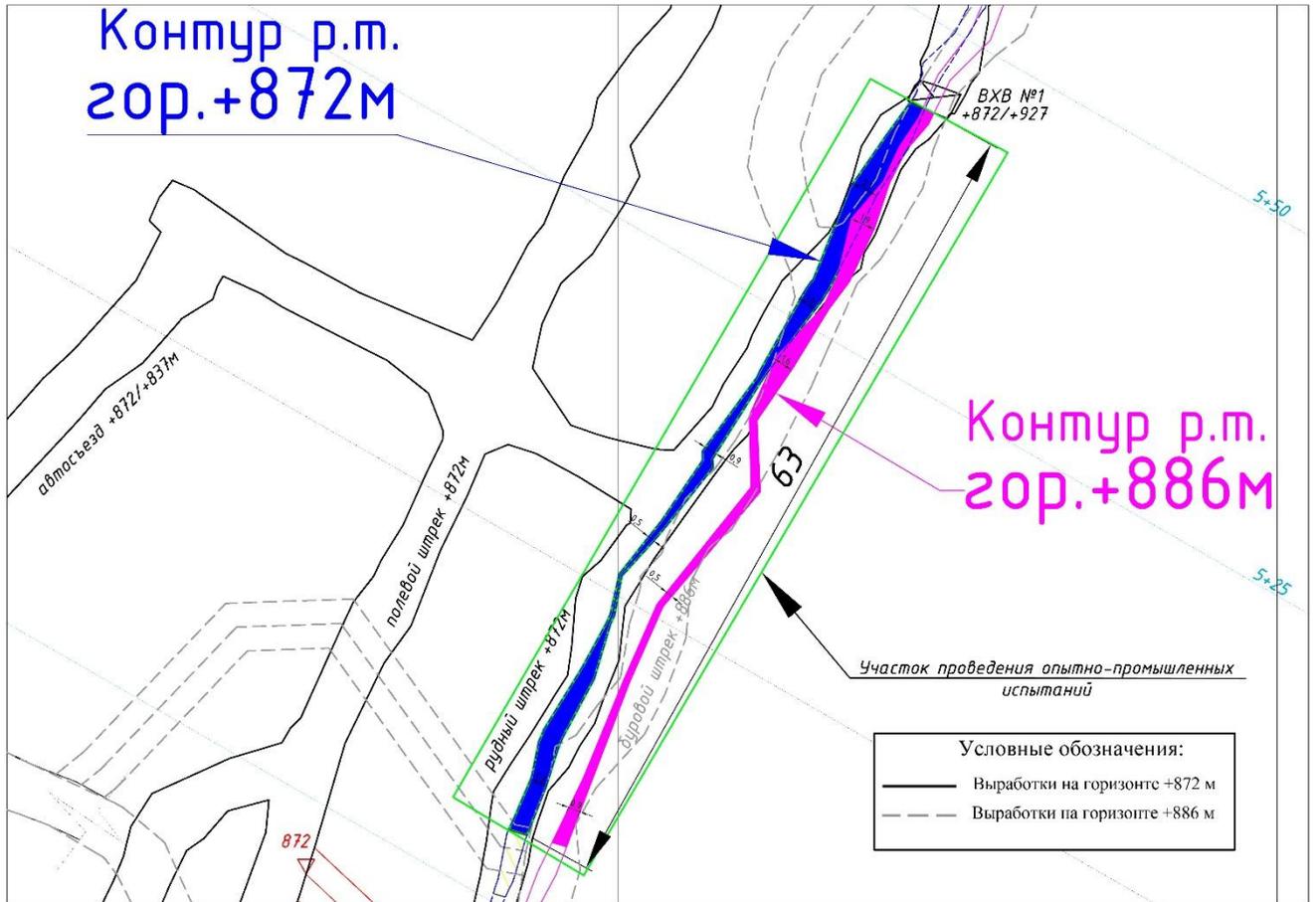


Рисунок 4.3 – Расположение камеры опытного участка: вверху в плане (гор.+872 и 886м), внизу в продольном разрезе

Для подготовки блока к эксплуатации используются уже существующие выработки и был пройден комплекс следующих горных выработок. Закладочный штрек гор. +884-878 м. сечением в свету $10,5\text{ м}^2$ – предназначен для заезда добычного и вспомогательного самоходного оборудования, а также другой горной техники на слои № 3, 4 подачи свежей струи на блок, перемещения людей,

прокладки инженерных сетей и организации запасного выхода из блока. Проходится по пустым породам в лежащем боку рудного тела.

Рудный штрек (нарезная выработка) гор.+872 м, сечением в свету 10,5 м², основное назначение – откатка горной массы при отработке слоя №1, заезд на слой №2, подача свежей струи на блок, перемещение людей и вспомогательных механизмов, прокладка инженерных сетей и организация запасного выхода из горизонта. Орт-заезд гор.+872 м сечением в свету 10,5 м², основное назначение – откатка горной массы при отработке слоя № 1, 2 подача свежей струи на блок, перемещение людей и вспомогательных механизмов. Проходится по пустым породам.

Основные параметры системы разработки горизонтальными слоями с закладкой для VII р.з.: бурение – восходящее, h=2,5 м, шпуры – Ø 51мм; отбойка: по руде секциями по 2,5÷4,5 м, по породе секциями по 2,5÷4,5 м; закладка: разравнивание отбитой породы на слое, замораживаемая закладка; транспортирование закладочного материала ПДМ ST-7D из проходческих забоев; параметры блока: длина 63 м, высота 14 м, средняя мощность рудного тела в границах блока 1 м; угол падения рудного тела 80-860; геологические запасы – 2279 т.

Очистные работы начинают с бурения шпуров первого слоя по руде на горизонте откатки из рудного штрека гор.+872 м. Перед производством бурения участковым геологом на кровле выработки краской наносится контур рудного тела. Применяемое оборудование: буровая установка Sandvik DL-210-5, ПДМ Sandvik ST-7D.

Расстояние между веерами при слоевой выемке: 2,5 м – на 67 % больше, чем при подэтажной отбойке (1,5м). За раз взрывают 3 ряда по 2 шпура (6 шпуров на высоту 2,5 м); после уборки руды заряжают и взрывают 6 шпуров по породе (при подэтажной системе 3 скважины через 1,5м). Технологическая схема выемки руды представлена на рисунках 4.4 и 4.5.

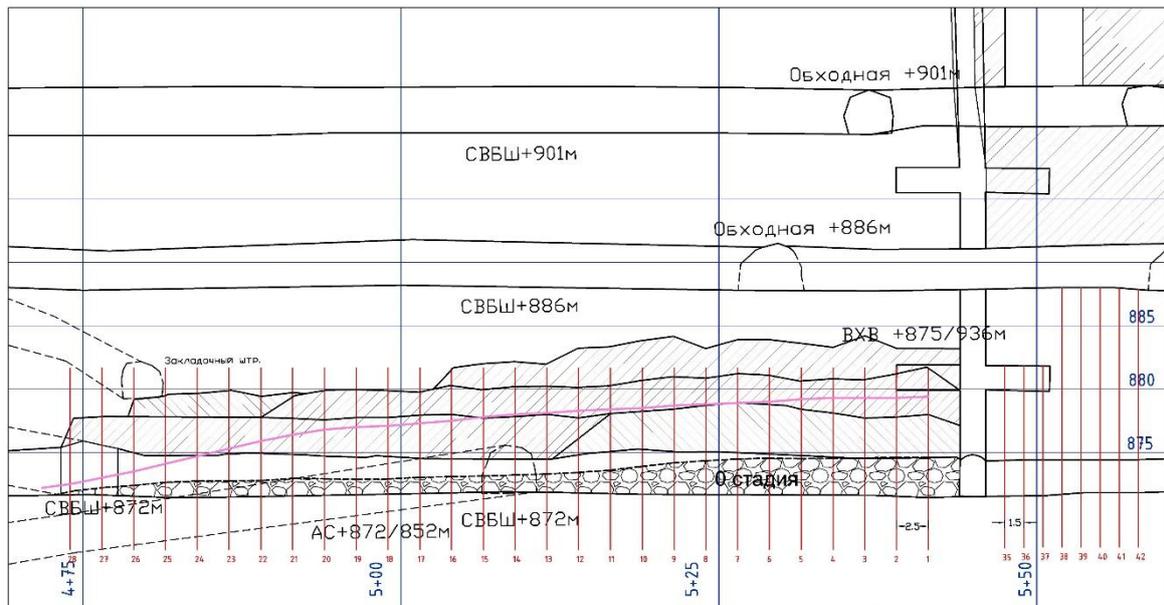


Рисунок 4.4 - Технологическая схема выемки руды

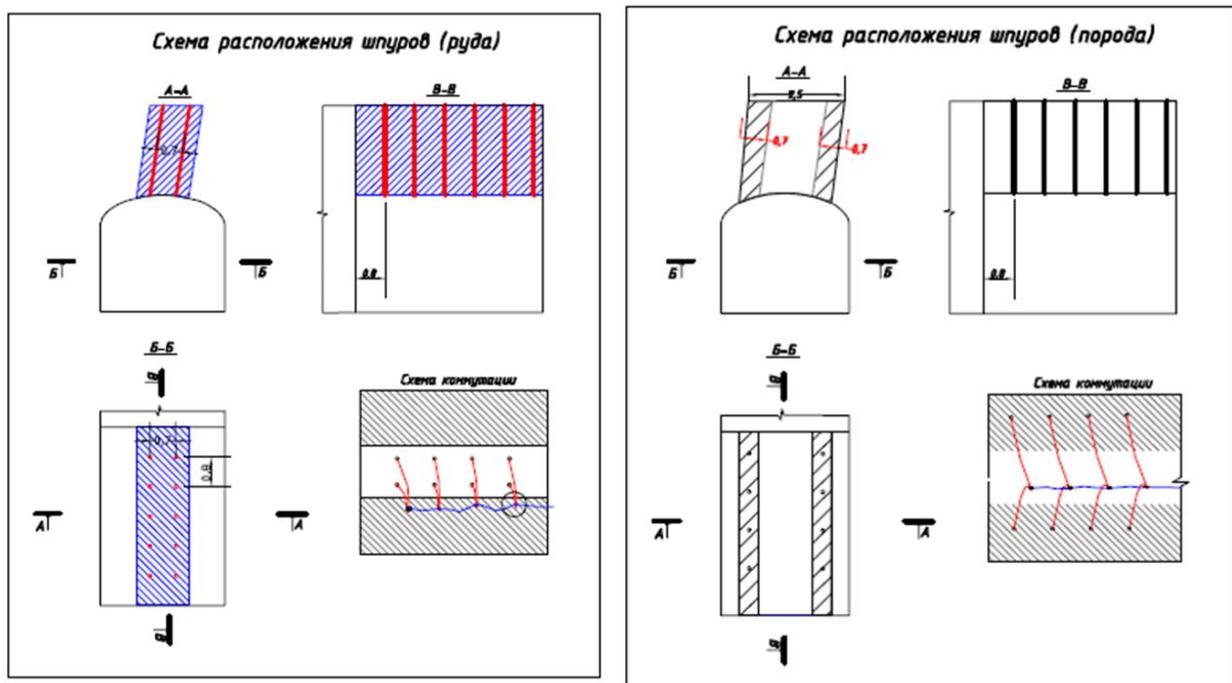


Рисунок 4.5 – Элементы разработанной технологической схемы (паспорт БВР)

На рисунке 4.6 представлены результаты сканирования забоя после отбойки (указан порядковый номер отпала) каждого слоя с нанесением начального (до отпала) контура рудной жилы. Отбойка 1-го слоя - гор.875,5-877,5м, отбойка 2-го слоя - гор.877,5-880м. Результаты сканирования забоя использовались для

планирования оптимального расположения шпуров для следующего отпада и анализа геометрии и объемов присечки боковых пород.

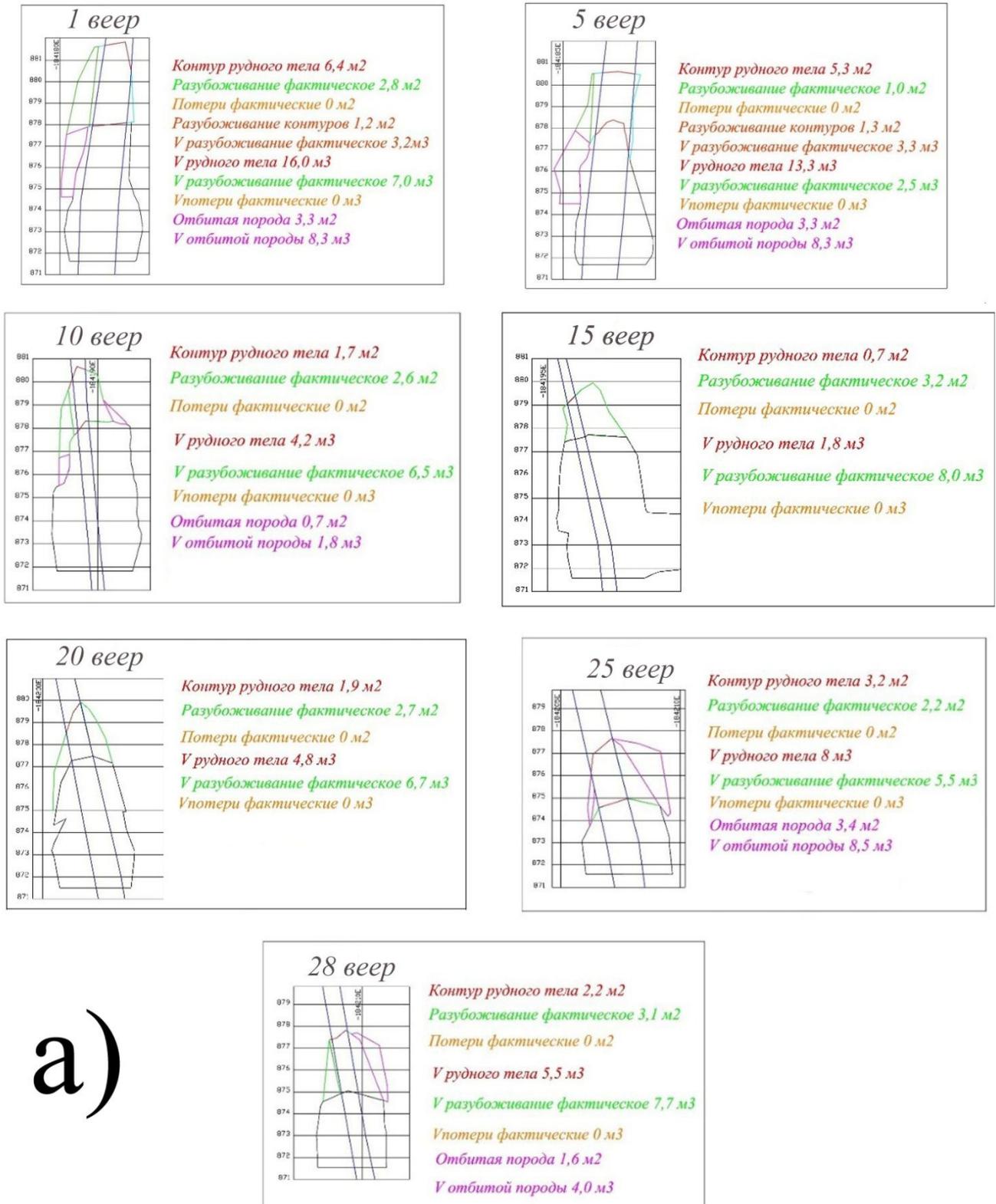


Рисунок 4.6 - Результаты сканирования забоя после отбойки. Синим цветом указан контур руды выше 125гр.: а) первый и второй слой; б) четвертый (крайний слой)

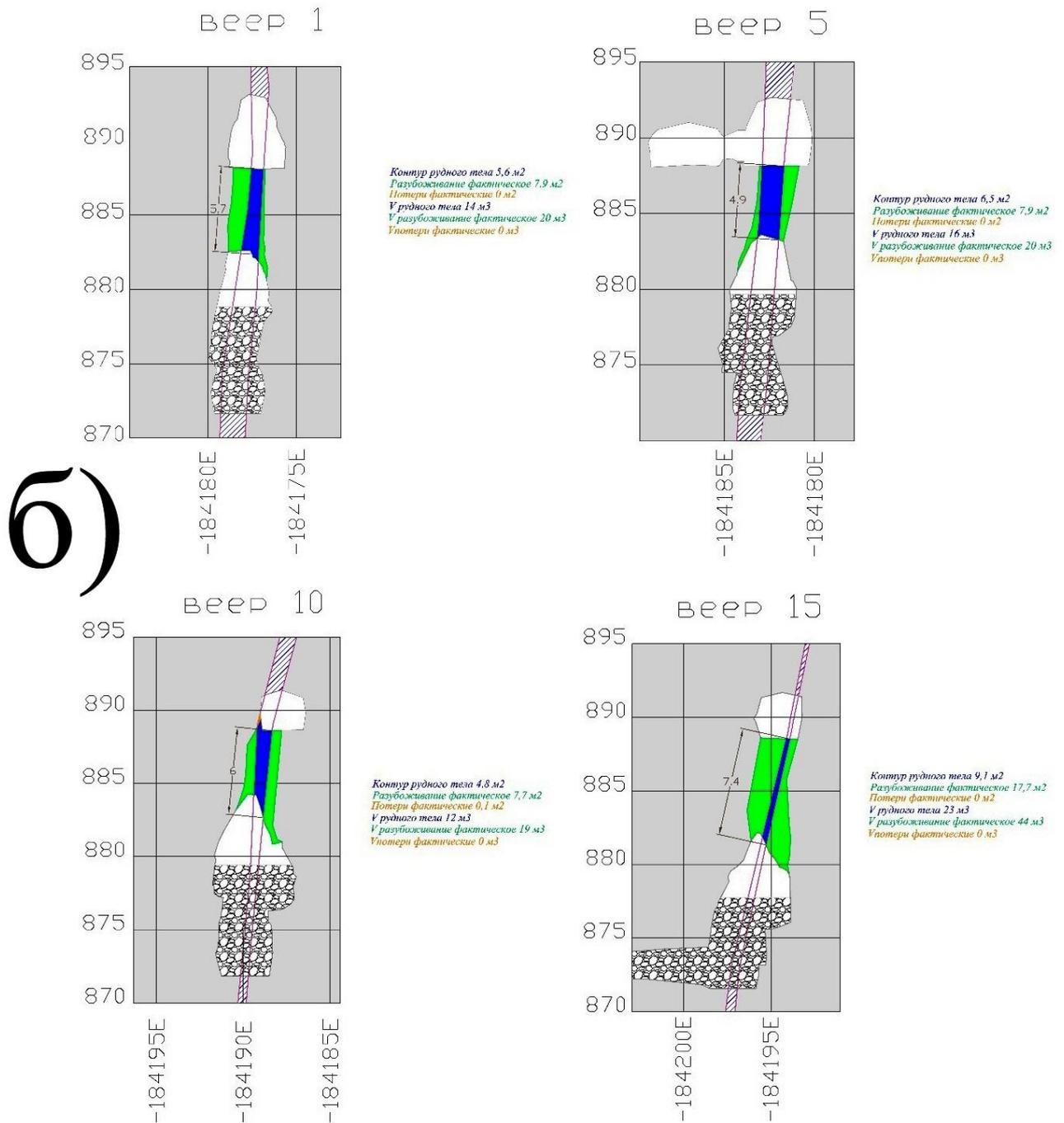


Рисунок 4.6 (продолжение) - Результаты сканирования забоя после отбойки. Синим цветом указан контур руды выше 125гр.: а) первый и второй слой; б) четвертый (крайний слой)

Обобщение указанных результатов по определению характерной геометрии и объемов присечки боковых пород позволили определить средние объемы присечки боковых пород (а, следовательно, разубоживания руды) и средние объемы потерь полезного ископаемого. Обобщение анализируемых параметров представлено в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Фактические параметры вееров скважин (камера №2 гор. +872 - +886 м)

| № веера | Угол наклона рудного тела, град | % изменения между min и max углом, % | Абсолютное изменение между max и min углом, град | Мощность жилы, м | % изменения между min и max мощностью, % | Абсолютное изменение между max и min мощностью, м | Разубоживание, % | Потери, % |
|---------|---------------------------------|--------------------------------------|--|------------------|--|---|------------------|-----------|
| 1 | 93÷98 | 5,38 | 5 | 2,2÷2,3 | 4,55 | 0,1 | 14,3 | 0 |
| 2 | 95÷98 | 3,16 | 3 | 2,4÷2,6 | 8,33 | 0,2 | 15,8 | 0 |
| 3 | 94÷98 | 4,26 | 4 | 1,9÷2,8 | 47,37 | 0,9 | 36,4 | 0 |
| 4 | 90÷97 | 7,78 | 7 | 2÷2,8 | 40,00 | 0,8 | 23,8 | 0 |
| 5 | 90÷95 | 5,56 | 5 | 2÷2,2 | 10,00 | 0,2 | 26,3 | 0 |
| 6 | 93÷94 | 1,08 | 1 | 1,7÷2,4 | 41,18 | 0,7 | 58,7 | 0 |
| 7 | 93÷96 | 3,23 | 3 | 1,5÷2,7 | 80,00 | 1,2 | 20,8 | 0 |
| 8 | 92÷96 | 4,35 | 4 | 1,1÷1,4 | 27,27 | 0,3 | 33,3 | 0 |
| 9 | 92÷97 | 5,43 | 5 | 0,8÷1,6 | 100,00 | 0,8 | 42,1 | 0 |
| 10 | 83÷87 | 4,82 | 4 | 0,6÷1,3 | 116,67 | 0,7 | 50,0 | 0 |
| 11 | 83÷85 | 2,41 | 2 | 0,8÷1,3 | 62,50 | 0,5 | 42,1 | 0 |
| 12 | 73÷83 | 13,70 | 10 | 1,1÷2,4 | 118,18 | 1,3 | 42,1 | 0 |
| 13 | 74÷80 | 8,11 | 6 | 0,9÷2,5 | 177,78 | 1,6 | 36,4 | 0 |
| 14 | 77÷78 | 1,30 | 1 | 0,7÷1,3 | 85,71 | 0,6 | 33,9 | 0 |
| 15 | 77÷78 | 1,30 | 1 | 0,3÷0,6 | 100,00 | 0,3 | 46,7 | 0 |
| 16 | 73÷77 | 5,48 | 4 | 0,5÷1,0 | 100,00 | 0,5 | 40,8 | 0 |
| 17 | 73÷79 | 8,22 | 6 | 0,4÷1,5 | 275,00 | 1,1 | 43,2 | 0 |
| 18 | 74÷79 | 6,76 | 5 | 0,4÷1,1 | 175,00 | 0,7 | 46,8 | 0 |
| 19 | 77÷80 | 3,90 | 3 | 0,5÷0,8 | 60,00 | 0,3 | 39,1 | 0 |
| 20 | 77÷79 | 2,60 | 2 | 0,5÷1,1 | 120,00 | 0,6 | 38,9 | 0 |
| 21 | 73÷80 | 9,59 | 7 | 0,5÷1,3 | 160,00 | 0,8 | 37,5 | 0,6 |
| 22 | 73÷80 | 9,59 | 7 | 0,9÷1,5 | 66,67 | 0,6 | 46,8 | 0,5 |
| 23 | 75÷82 | 9,33 | 7 | 0,9÷1,5 | 66,67 | 0,6 | 53,8 | 0,5 |
| 24 | 75÷78 | 4,00 | 3 | 0,9÷1,3 | 44,44 | 0,4 | 42,6 | 0,6 |
| 25 | 75÷78 | 4,00 | 3 | 1,1÷1,3 | 18,18 | 0,2 | 44,0 | 0 |
| 26 | 78÷78 | 0,00 | 0 | 1,3÷1,4 | 7,69 | 0,1 | 40,7 | 0,7 |
| 27 | 79÷79 | 0,00 | 0 | 1,1÷1,3 | 18,18 | 0,2 | 33,3 | 0 |
| 28 | 78÷80 | 2,56 | 2 | 0,8÷1,2 | 50,00 | 0,4 | 33,3 | 0 |

Как видно из представленного материала изменение мощности влияет на разубоживание руды, в то время как изменение угла наклона практически не влияет на разубоживание руды поскольку длина скважин уменьшена с 14 до 3 м. Однако при изменении мощности на 100 % (с 0,6 до 1,3 – веера 10, 11, 12, 13) разубоживание составляет от 35 до 50 % (что является значительным разбросом). В тоже время при изменении мощности на 66 % (веер 23 – с 0,9 до 1,5 м)

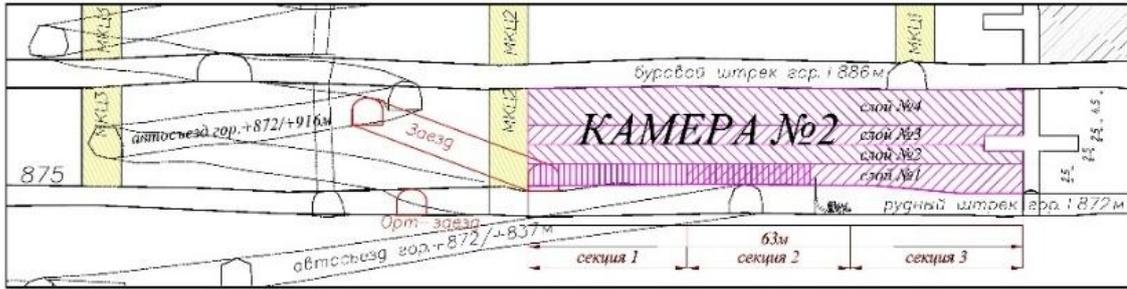
разубоживание составляет более 50 %. Приведенный материал свидетельствует о том, что при анализе представленного материала определяющее значение имеет не относительное, а абсолютное изменение мощности (также и угла залегания).

Во всех случаях извлечение составляло практически 100 % и потери не превышали 1 %, что свидетельствует о том, что параметры заложения скважин (каркас блока) спроектированы правильно.

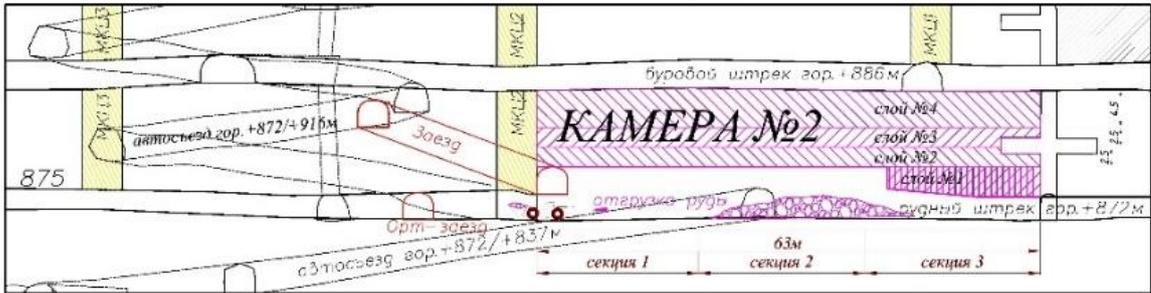
«Основной целью опытно-промышленных работ стало определение технической возможности и экономической целесообразности использования замораживаемой закладки, что позволило в дальнейшем отработать нижележащий междуэтажный целик (потолочину) при наименьших потерях и разубоживании». Можно выделить следующие основные требования к технологии закладки, которые были приняты к рассмотрению: обеспечение заданной прочности льдопородного массива (1,5 МПа); возможность использования пустой породы из камеры; возможность движения буровой и доставочной техники по закладочному массиву; время проморозки каждого слоя должно быть меньше технологического отрезка времени между взрыванием зарядов. Возможно и полное разнесение во времени процессов добычи полезного ископаемого и закладки выработанного пространства. Однако при таком варианте производства работ отбойку пустой породы необходимо будет производить сразу по всей длине камеры, после чего проводить оборку заколов в кровле и боках выработки и только после этого приступать к планировке почвы и промораживанию. Основным недостатком такой схемы организации работ является практическая невозможность контроля мощности и фракционного состава слоя, поскольку сразу проводится отбойка значительного объема руды распределенного по всей длине камеры.

Принципиальная схема возведения замораживаемого закладочного массива представлена на рисунке 4.7. При поочередной отбойке полезного ископаемого и пустой породы есть возможность совмещать процессы по бурению, погрузке и откатке полезного ископаемого с процессами по погрузке, отсыпке, планированию и промораживанию закладочного массива, поскольку они ведутся в одной камере, но на расстоянии 15-20 м друг от друга.

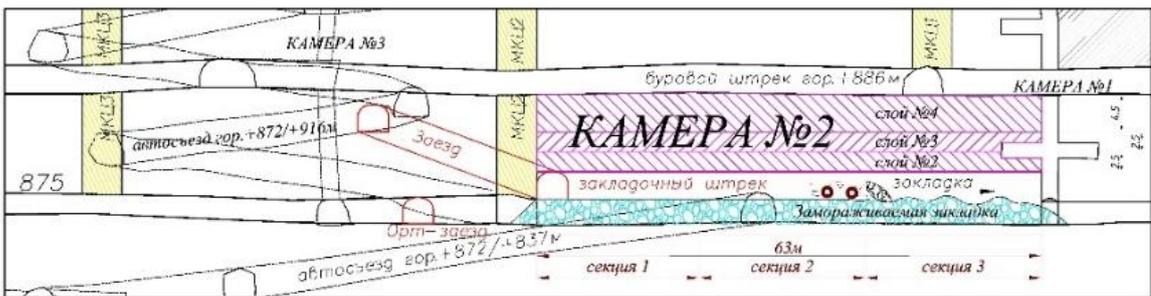
1 этап: бурение



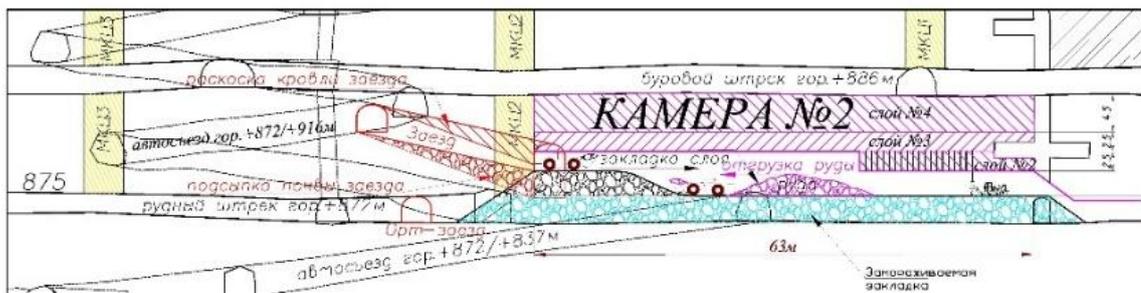
2 этап: отбойка руды



3 этап: закладка



закладка слоя №2



закладка последнего слоя

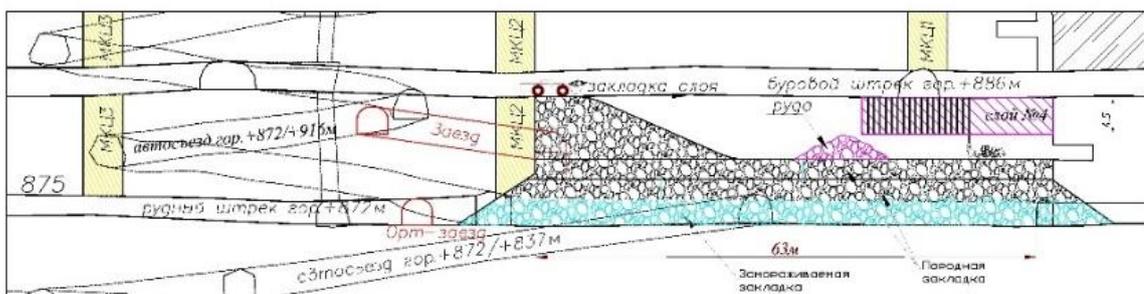


Рисунок 4.7 - Система разработки горизонтальными слоями с закладкой выработанного пространства с селективной отбойкой руды [112]

Мощность слоя закладки составляла порядка 20-40 см (при длине заходки по намораживанию до 10 м). Слой такой мощности промерзал от 30 мин до 3 часов в зависимости от температуры пород засыпки и температуры воздуха (и его скорости) в камере. При температуре в камере менее 15 градусов (и такой же температуре пород и песка в засыпке) промораживание происходило в течение 10-20 мин даже при мощности слоя до 50-60 см. Проливка водой осуществлялась только после полного формирования слоя и его уплотнения. Температура воды составляла 2-5 градусов. В процессе исследований на базе анализа опыта возведения закладочных массивов с использованием замораживаемой закладки были разработаны, запатентованы [97, 98] и модернизированы следующие наиболее рациональные для рассматриваемых условий схемы формирования закладочного массива:

«1. Укладывается слой породной закладки с гранулометрическим составом ≤ 70 мм. Упрочняется катком ДУ-26. Затем производят отсыпку мелочи, снова упрочняют прицепным катком. Последний слой отсыпают породной закладкой с фракцией 70 мм, упрочняют катком, отсыпают и уплотняют песок, а затем проливают холодной водой».

2. Этот способ заключается в укладке погрузочно-доставочной машиной прослой из щебня, его уплотнения катком, отсыпку и уплотнение песка и так далее до образования закладочного слоя на всю мощность. Прослой проливают охлажденной водой таким образом, чтобы образовалась льдопородная закладка на всю мощность слоя.

«3. Данный способ идентичен предыдущему, с той только разницей, что последний слой формируется из песка, на который укладываются теплоизолирующие вещества, а затем новый слой песка. Мелкие фракции теплоизолятора заполняют свободное пространство между отдельностями и препятствуют дальнейшему распространению воды, что позволяет формировать упрочненный слой в заданном объеме.

Применение конкретного способа зависит от горно-геологической специфики и применяемого оборудования, и выбирается индивидуально для каждого месторождения».

4.3 Анализ особенностей выемки руды и разработка рекомендаций по организации работ по созданию льдопородного закладочного массива на месторождении Арылах

«Золотосеребряное месторождение «Арылах» расположено на территории Среднеканского района Магаданской области, в 30 км от действующего горно-обогатительного комплекса на месторождении Лунное, промышленная площадка которого связана с пос. Омсукчан автодорогой круглогодичного действия. Территория месторождения также относится к зоне сплошного распространения ММП, мощность которых составляет более 250 м под возвышенностями рельефа и 120 м – в долинах.

Отработка подкарьерных запасов Арылахского месторождения сопряжена с решением проблемы обильного водопритока из карьера № 1 гор. 700 м (около $200\div 300$ м³/сут). Вода в карьер поступает только за счет атмосферных осадков и складывается из притока талых (май-июнь), дождевых (июнь-сентябрь) и ливневых вод. Водоприток во время весеннего снеготаяния: 1118 м³/сут, в тёплый период года: дождевые осадки – 248,5 м³/сут, ливневые воды – 6715 м³/сут. [129]. Для предотвращения значительного водопритока в подземные выработки требуется постоянная откачка воды насосом Д-250-125, работающим со средней производительностью 70 м³/час (рисунок 4.8). Применение замораживаемой закладки будет способствовать снижению потерь и разубоживания руды при отработке подкарьерных запасов, исключит возможность проникновения поверхностных вод на нижележащие горизонты и в дальнейшем предохранит месторождения от сдвижения горных пород.

Свойства пород, необходимые для использования в льдопородной закладке, представлены в таблице 4.4. Песок и песчано-гравийную смесь для закладки

получали из ручьёв Луна, Левый Булур и Левый Арылах. Кроме того, можно использовать пески ручьёв Скальный, Кальцитовый, Болотный и Тихий».



Рисунок 4.8 - Откачка воды из карьера №1 гор. 700 м [112]

«Замораживаемую закладку следует применять при возможности использования природного криоресурса (вмещающие породы имеют отрицательную температуру, наружный воздух имеет стабильно отрицательную температуру, необходимую для кристаллизации льда в закладке более 100 дней в году). Для горизонтов, где отсутствует возможность выполнить эти условия, должна применяться обычная технология, исключая применение замораживаемой закладки, в исключительных случаях возможно применение искусственного замораживания». «Наиболее целесообразно применять замораживаемую закладку при отработке целиков и подкарьерных запасов, при

этом доставку руды из очистного пространства осуществлять ПДМ с дистанционным управлением (имеющемся на предприятии)».

Таблица 4.4 - Физико-механических свойства пород [112]

| Горная порода | Средняя плотность, кг/м ³ | Предел прочности при сжатии $\left(\frac{\text{от-до}}{\text{среднее}}\right)$, МПа | Предел прочности при растяжении $\left(\frac{\text{от-до}}{\text{среднее}}\right)$, МПа | Среднее значение модуля Юнга, $\times 10^4$ МПа | Среднее значение коэф. Пуассона, д.ед. |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|--|
| Месторождение Арылах | | | | | |
| Алевролит | 2580 | $\left(\frac{10,4 - 136,7}{48,9}\right)$ | $\left(\frac{1,3 - 13,9}{4,3}\right)$ | 3,6 | 0,16 |
| Невадит | 2430 | $\left(\frac{11,1 - 133,4}{55,8}\right)$ | $\left(\frac{2,1 - 9,4}{4,8}\right)$ | 3,7 | 0,16 |
| Трахибазальт | 2600 | $\left(\frac{8,8 - 79,4}{38,7}\right)$ | $\left(\frac{1,1 - 8,9}{3,4}\right)_1$ | 3,3 | 0,16 |
| Месторождение Лунное, VII рудная зона | | | | | |
| Габро-диарит | 2730 | $\left(\frac{10,5 - 136,7}{58,2}\right)$ | $\left(\frac{1,0 - 9,0}{5,4}\right)$ | 5,9 | 0,16 |

«При добавлении в дробленую породу песка уменьшается объем пустот в смеси и повышается её плотность, снижается коэффициент фильтрации, соответственно, повышается её водоудерживающая способность. Так, при введении в дробленую породу (со средним гранулометрическим составом – 25 мм) песка в количестве 17,5 % (по объёму), суммарная площадь поверхности компонентов в смеси увеличивается примерно в 6 раз. При этом, не только повышается водосодержание смеси, но и значительно увеличивается активная поверхность охлажденных твердых компонентов в закладке, при взаимодействии с которой ускоряется процесс кристаллизации заливаемой воды. Прочность в зависимости от слоя и количества замороженной воды 2,5÷6,0 МПа».

«При добавлении в дробленую породу песка и дробленого льда повышается плотность смеси, одновременно увеличивается число мелких пор, что повышает водоудерживающую способность закладочного материала. Добавление

компонентов осуществлялось по запатентованному способу [98]». При порционном заливе воды в дробленую породу с примесью дробленого льда и песка, охлажденных до умеренных отрицательных температур (от -10 до -15 °С), общий объем образовавшегося льда от всего объема примерно составил 25 %, а к объёму заливаемой воды образование льда составило до 65÷80 %. «Прочность образцов на одноосное сжатие достигла 4,2 МПа при среднем значении 3,5 МПа. В качестве теплоизолирующего слоя можно использовать песок с органическими соединениями (например, древесными опилками) или резинокордовой крошкой (отработанных покрышек)».

«Применение системы разработки горизонтальными слоями с льдопородной закладкой, по сравнению с ранее применявшейся подэтажной отбойкой руды, позволило снизить потери в 2 раза (с 8 % до 4 %), разубоживание в 1,5 раза (с 56 % до 37 %)».

«Перспективным решением представляется применение замораживаемой закладки на месторождении Арылах. Решения по отработке подкарьерного целика, созданием намораживаемой потолочины были приняты в виде рекомендаций». Экспериментальные работы планируется проводить зимой 2019-2020 гг.

В настоящее время основными способами ускорения ледообразования, а, следовательно, и замораживания закладки являются снижение теплоизоляции льда (очистка поверхности от снега), дополнительное намораживание путем полива водой и армирование льда различными способами [83].

Существует два основных способа ускоренного намораживания:

- применение вентилятора (охлаждение верхнего слоя),
- использование охлаждающих устройств – термосифонов (для охлаждения нижних слоёв).

Наиболее перспективным представляется первый способ, предложенный сотрудниками Института проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, ОАО «ТрансДорПроект» (рисунок 4.9) [96].



Рисунок 4.9 - Процесс обдува ледяной поверхности [29]

Для карьеров месторождения «Арылах» потребовалось усовершенствовать данную схему намораживания (рисунок 4.10). Первый этап: произвести зачистку поверхности льда от снега (см. рисунок 4.10, 1). Второй этап: размещение воздухонепроницаемой пленки (см. рисунок 4.10, 4) (которая может быть изготовлена сшиванием имеющегося на предприятии синтетического материала) над поверхностью замораживаемой закладки (см. рисунок 4.10, 5). Третий этап: подача атмосферного воздуха отрицательной температуры с помощью вентилятора (см. рисунок 4.10, 3), что приводит к охлаждению пространства между замораживаемой массой и пленкой (см. рисунок 4.10, 2). Необходимо отметить, что интенсификация теплообмена на поверхности льда и наполнителя, достигается повышением скорости потока воздуха, обеспечивая их ускоренное охлаждение. После замораживания закладочного слоя, пленка и вентилятор убираются, отсыпается новый слой, процесс замораживания повторяют. Цикл повторяют до получения защитной подушки нужной высоты. При намораживании верхних (крайних) слоёв, для которых характерно увеличение площади замораживаемой поверхности, возможно использование сразу двух вентиляторов.

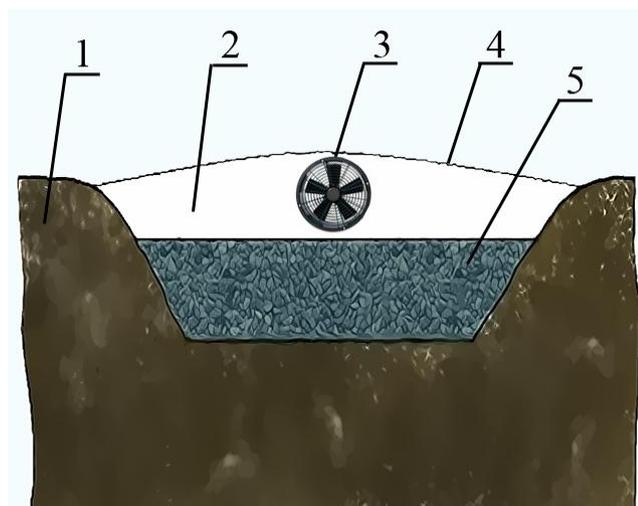


Рисунок 4.10 - Схема продувания пространства между поверхностью, очищенной от снега замораживаемой массы и воздухонепроницаемой пленкой, холодным атмосферным воздухом (поперечный разрез)

Другим вариантом создания герметичного пространства является использование тентовой конструкции ангарного типа, в которой также размещают вентилятор (рисунок 4.11). Преимуществом данного способа является сборка, разборка и перевозка конструкции на новое место, которые осуществляются легко, быстро, без существенных затрат на повторное возведение. Кроме того, тент выдерживает низкие температуры воздуха до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ при скорости ветра $20\div 25\text{ м/с}$ и защищает от снега. На предприятиях АО «Полиметалл» имеется опыт сборки таких конструкций, в частности при создании спортивных помещений.



Рисунок 4.11 - Тентовая конструкция для закрытия намораживаемого слоя

На рисунке 4.12 представлена принципиальная схема и механизация ведения закладочных работ на поверхности.

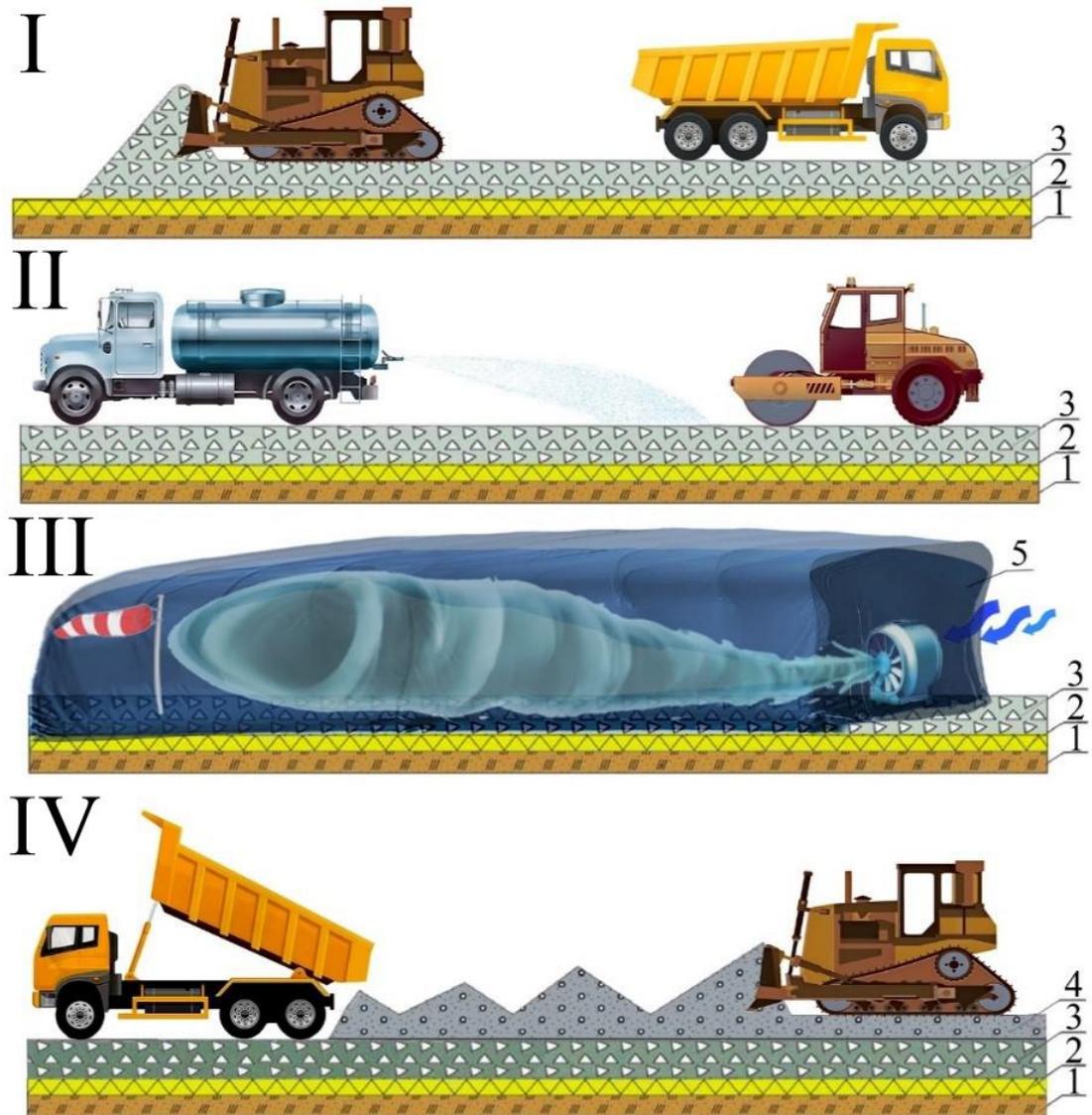


Рисунок 4.12 - Возведение закладочного массива на поверхности: I-IV последовательность действий; 1 – вмещающие породы; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – замораживаемая закладка; 4 - мерзлые породы, песок, куски льда для создания нового слоя; 5- тентовая конструкция или воздухонепроницаемая пленка

Перед началом закладочных работ встаёт вопрос о количестве воды, которое необходимо оставить в карьере, перед его заполнением. Вода в карьере при отрицательной температуре подвергается замораживанию, со скоростью образования ледяного покрова аналогично льду на малоподвижном водоёме (озеро, водохранилище, пруд). При ограниченном перемешивании, охлаждение водных масс всё же происходит, и охлажденные до $+4$ °С поверхностные слои как более тяжелые опускаются в придонные области, откуда поднимаются более теплые и более легкие массы воды. Тепловая конвекция происходит до тех пор, пока вся масса воды не будет иметь температуру $+4$ °С. Затем конвективный обмен

прекращается и происходит дальнейшее понижение температуры воды, особенно на поверхности водоема. Как только температура на поверхности достигнет 0 °С, начинаются процессы кристаллизации, приводящие к появлению устойчивого ледяного покрова. Затем при низких температурах воздуха за несколько суток образуется первичный ледяной покров, изолирующий воду и атмосферный воздух. Для приближённого представления о темпах роста льда заданной толщины, при неизвестных значениях начальной толщины льда и скорости воздуха, можно воспользоваться таблицей 4.5. После образования начальных форм льда происходит формирование ровного молодого льда, толщина которого составляет 10÷30 см. При продолжительном выхолаживании толщина продолжает увеличиваться за счёт образования нового льда на его нижней поверхности. Важным моментом является замедление скорости нарастания по мере утолщения льда, в следствии его малой теплопроводности (от 2,2 до 2,76 Вт/(м·°С) при температуре 0 и -50 °С соответственно). Эту зависимость можно наблюдать в таблице 4.6, где видно, что при толщине льда 0,5 м и температуре -30 °С за сутки произойдёт прирост льда всего 3 см. Известно, что за одну зиму в условиях арктических водоёмов наибольшая толщина, до которой может намерзнуть лёд составляет 2 м. В связи с этим, не рационально полностью заполнять затопленный карьер закладочным материалом на всю требуемую высоту (т.е. в один слой), так как процесс кристаллизации в этом массиве не будет завершён, а закладка не приобретет нормативную прочность.

Таблица 4.5 - Скорость образования льда (без учёта начальной толщины) [183]

| Толщина льда (см) | Температура (°С) | | | |
|----------------------|------------------|---------|---------|---------|
| | -10 | -20 | -30 | -40 |
| 2,5 | 2,0 ч | 1,0 ч | 0,7 ч | 0,5 ч |
| 15,2 | 45,6 ч | 23,4 ч | 15,6 ч | 11,7 ч |
| 25,4 | 122,4 ч | 62,4 ч | 40,8 ч | 28,8 ч |
| 30,5 | 175,2 ч | 86,4 ч | 57,6 ч | 43,2 ч |
| 61,0 | 686,4 ч | 343,2 ч | 228,0 ч | 170,4 ч |
| 91,4 | 1526,4 ч | 763,2 ч | 508,8 ч | 381,6 ч |

Таблица 4.6 - Приrost льда за сутки [92]

| H ₀ | T (°C) | | | | | |
|----------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -5 | -10 | -15 | -20 | -25 | -30 |
| 0 | 8 | 11 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 5 | 4 | 8 | 10 | 12 | 14 | 15 |
| 10 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 12 |
| 15 | 2 | 4 | 6 | 7 | 8 | 10 |
| 25 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 50 | 0,5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |

Примечание: H₀ — начальная толщина льда, см;

Известно, что весной на северных и сибирских водоёмах, как на карьерах «Арылах», заполненных водой, вскрытие зачастую вызывается механическим воздействием паводка, взламывающего ледяной покров. В этом случае, степень снижения прочности льда можно принять равной 10÷40 %.

Следовательно, одной из главных задач при создании закладки является возведение замороженного массива с высокой скоростью промораживания, что соответственно может быть достигнуто следующими мероприятиями: предварительная проморозка закладываемого пространства, послойное возведение закладочного массива с принудительным обдувом холодным воздухом, введение колотого льда в закладочную смесь, правильный выбор толщины единичного слоя и количества используемой воды.

Согласно расчетам, на юге Восточной Сибири за зиму послойным намораживанием можно наморозить 15÷20 м льда, на севере 60÷65 м.

Кроме того, важное значение при образовании замораживаемого слоя имеет скорость ветра (рисунок 4.13).

Диаграмма не учитывает начальную толщину льда и наличие/отсутствие снежного покрова. Согласно проведенным нами экспериментам на исследуемом месторождении в карьере «Арылах» при замораживании воды (при температуре +4 °C) в спокойном состоянии (без ветра) при температуре воздуха, равной -20÷-25 °C, удалось заморозить слой воды в 5 мм в течение одного часа (рисунок 4.14). Однако в очистном пространстве темп несколько отличается, так как подача воздуха происходит с постоянной скоростью, имеется возможность лёгкого распыления воды, отсутствие снега, а также замкнутое пространство из ММП,

накапливающих холод и др. В подобных условиях в зависимости от температуры за сутки образуется слой льда от 6 до 18 см.

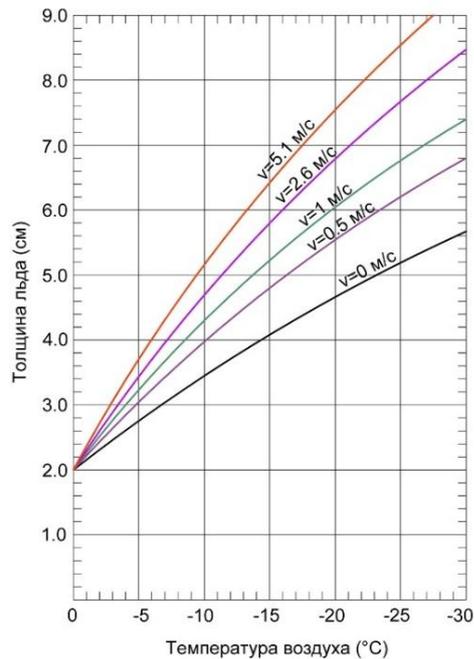


Рисунок 4.13 - Влияние скорости ветра и температуры на толщину льда (при времени замораживания 14 часов) [171]



Рисунок 4.14 – Намораживание льда в карьере «Арылах»

Приведенные результаты полученных экспериментов согласуются с данными других исследований. На шахте 38 карьера 1 Полярнинского ГОКа зимой 1974-1975 гг. средняя скорость намораживания льда в целиках составила $8 \div 9$ см в

сутки при температуре атмосферного воздуха от $-8\div-32$ °С, на шахте 58 участка «Рывеем» прииска «Ленинградский» эта скорость достигала $8\div 12$ см/сут при температуре воздуха от $-15\div-40$ °С [124, 125].

Опыты для определения оптимального слоя льда при создании ледяной закладки были проведены П.А. Леоновым при температуре воздуха от -9 °С до -14 °С, а воды равной $+6$ °С. Результаты показали, что замерзание происходит быстрее при уменьшении слоя воды. Наибольшая скорость замерзания воды наблюдается при толщине слоя воды в $0,5$ мм. Скорость вентилятора не известна, но примерно равна ветру на открытом воздухе. Для приготовления льда в промышленном масштабе замерзание слоя воды в $0,5$ мм составило 3 минуты, а в час $1,0$ см. Таким образом, согласно лабораторным опытам слой льда мощностью 20 см можно наморозить за сутки при 20 часах работы и температуре воздуха в -10 °С [71].

Основную роль в процессе послойного намораживания льда с принудительным отводом тепла (нагнетание холодного воздуха) играет конвективный теплообмен между воздушным потоком и активной водно-ледяной поверхностью, на долю которого приходится $75\div 80$ % выделяющегося тепла.

Установлено, что основным условием интенсификации послойного намораживания льда в шахте является повышение вышеназванного теплообмена. Так, например, увеличение скорости намораживания льда от $0,51$ до $0,71$ см/ч предопределено возрастанием скорости движения воздушного потока от 1 до 2 м/с при температуре воздуха -40 °С (таблица 4.7) [125].

Таблица 4.7 - Зависимость интенсивности намораживания льда (см/сутки) от скорости и температуры воздушного потока

| Температура атмосферного воздуха, °С | Скорость воздушного потока, м/с | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------|-------|
| | 1 | 1,5 | 2 |
| -20 | 6,48 | 7,92 | 9,84 |
| -30 | 9,36 | 11,28 | 13,68 |
| -40 | 12,24 | 14,88 | 17,04 |
| -50 | 15,12 | 17,52 | 19,92 |

4.4 Выводы по главе 4

Выполненные исследования позволили разработать новую бесцеликовую технологическую схему отработки запасов крутопадающей тонких жил ценных руд на базе внедрения мелкошпуровой слоевой селективной отбойки руды и пустых пород с возведением закладочного массива из замораживаемой льдопородной закладки. Внедрение такой схемы позволяет повысить извлечение полезного ископаемого за счет более детального уточнения параметров залегания рудной жилы и исключения оставления межэтажных целиков, а также снизить разубоживание руды из-за снижения сейсмического эффекта от БВР (за счет перехода от скважинной к мелкошпуровой отбойке) и внедрения более эффективных паспортов шпуровой отбойки на очистных работах.

Обобщение результатов комплекса проведенных исследований позволило адаптировать разработанную технологию к условиям рудника, обрабатывающего золотосеребряное месторождение Лунное.

Внедрение разработанной технологической схемы отработки показало ее достаточную эффективность. Результаты испытания подтвердили техническую возможность и экономическую целесообразность использования замораживаемой закладки в условиях месторождения, что позволило в дальнейшем отработать нижележащий междуэтажный целик (потолочину) при наименьших потерях и разубоживании.

Проведение испытания подтвердило возможность возведения льдопородной закладки по запатентованной технологии с использованием имеющегося на руднике оборудования с обеспечением следующих параметров: заданной прочности возводимого замораживаемого закладочного массива (более 1,5 МПа); возможность использования пустой породы из камеры; возможность эксплуатации буровой и доставочной техники на почве закладочного массива; время необходимой проморозки каждого слоя было меньше технологического отрезка времени между взрыванием зарядов.

«Применение системы разработки горизонтальными слоями с льдопородной закладкой, по сравнению с ранее применявшейся подэтажной отбойкой руды, позволило снизить потери в 2 раза (с 8 % до 4 %), разубоживание в 1,5 раза (с 56 % до 37 %)».

«Перспективным решением представляется применение замораживаемой закладки на месторождении Арылах. Решения по отработке подкарьерного целика созданием намораживаемой потолочины были приняты в виде рекомендаций. Экспериментальные работы планируется проводить зимой 2019-2020 гг».

ГЛАВА 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, А ТАКЖЕ УСЛОВИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЦЕННЫХ РУД ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ СИСТЕМАМИ С ЗАМОРАЖИВАЕМОЙ ЗАКЛАДКОЙ

5.1 Оценка экологического эффекта от внедрения разработанной геотехнологии с льдопородной закладкой на месторождении Лунное

В настоящее время криолитозона относится к территориям, на которых наблюдается активная деятельности человека. Кроме того, состояние и динамика экологических проблем Арктики предопределена существенным образом присутствием мерзлоты.

Основной особенностью МП выступает яркая замедленность или полное регулирование массообменных процессов. Как уже было указано в разделе 3.1, лед имеет уникальные свойства, которые определяются его молекулярным и кристаллическим строением. Соответственно, лед, входящий в состав геосистем криосферы, предопределяет их механическую и термодинамическую неустойчивость [138].

Отсутствие экологической составляющей, а также широкого распространения промышленности в Российской Арктике является следствием техногенных нарушений природных комплексов.

Необходимо подчеркнуть, что Всемирный фонд охраны дикой природы разработал требования, в соответствии с которыми геохимические отходы промышленного производства должны быть безопасны для животного мира, главным образом, это угрожает биотическому разнообразию арктических регионов, на территории которых распространена мерзлота, блокирующая работу естественных процессов самоочищения и переноса опасных веществ подземными водами [144, 157]. Результатом данного воздействия является аккумуляция опасных веществ на поверхности мерзлоты или их продвижение с потоком

надмерзлотных вод, что в дальнейшем приводит к скоплению в водоемах промежуточного или конечного стока [57, 177].

Следует отметить, что применение новой технологии будет способствовать снижению активного воздействия техногенных факторов, которые являются неотъемлемой частью данного производства (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Прямой экологический эффект в результате внедрения предлагаемой геотехнологии с замораживаемой закладкой

Проведенная серия теоретических, экспериментальных и промышленных испытаний на исследуемых месторождениях: Лунное и Арылах доказали, что использование технологии замораживаемой закладки способствует утилизации не менее 95 % отвальных пород и до 10 % объема хвостов обогащения (по крайней мере, их песковую фракцию), которые входят в состав льдопородной закладки. Применение способа замораживаемой закладки снижает потребность в лесоматериалах, позволяет утилизировать пыль и др. (таблица 5.1) [26, 27].

Таким образом, экологические требования к технологическим решениям активно реализуются с использованием замораживаемой закладки.

Таблица 5.1 - Сводная таблица сокращения площади нарушения земной поверхности при использовании замораживаемой закладки

| Виды экологического эффекта | Удельное снижение поражения поверхности, м ² /т добычи | Экологический эффект в виде снижения площади уничтожения естественной биоты при создании инфраструктуры поверхностного комплекса предприятий при различном объеме годовой добычи, км ² /год | | |
|--|---|--|-----------------------------|-----------------------------|
| | | 1 * 10 ⁵ , т/год | 2 * 10 ⁵ , т/год | 5 * 10 ⁵ , т/год |
| Снижение объема твердых отходов | 0,19 | 0,19 | 0,384 | 0,48 |
| Увеличение производительности труда на действующем руднике | 0,18 | 0,18 | 0,346 | 0,91 |
| Снижение расхода лесоматериалов (непрямой эффект) | 0,23 | 0,23 | 0,46 | 1,15 |
| Утилизация технологической пыли в подземном пространстве | 0,006 | 0,006 | 0,012 | 0,03 |
| Применение вахтового метода разработки | 0,91 | 0,91 | 1,82 | 4,56 |

5.2 Оценка параметров безопасности ведения горных работ при внедрении замораживаемой закладки на месторождениях Лунное и Арылах

При проходке горных выработок и последующей эксплуатации минеральных ресурсов требуется интенсивное проветривание. В холодных регионах сезонные колебания в температуре подаваемого воздуха вызывают изменения в первоначальном температурном поле вентиляционной выработки за счёт тепло- и массообмена между подаваемым воздухом и породным массивом. Это особенно характерно для летнего периода, когда температура подаваемого в шахту воздуха намного выше точки замерзания воды, что вызывает таяние льда. Эти тепловые воздействия оказывают основное влияние на климатические условия в подземных выработках и их устойчивость [152].

Природа и интенсивность теплообмена между подаваемым воздухом и стенками подземных выработок представляют собой ряд независимых переменных включая в себя теплофизические свойства многолетней мерзлоты и воздуха,

скорости и распределения воздушной струи, размера формы и поперечного сечения вентиляционных выработок, количества льда, температуры подаваемого воздуха и времени. Так как, главной составляющей теплового баланса в шахте является теплообмен между подаваемым воздухом и окружающей породной массой представляется чрезвычайно важным выполнить точную оценку теплового режима в руднике. Анализ теплового режима в руднике позволяет осуществлять инженерное проектирование систем проветривания для обеспечения контроля микроклимата. В большинстве случаев неконтролируемый тепловой режим в арктических условиях не даст возможность поддержания допустимых минимальных температур на рабочем месте.

Поступление подогретого воздуха по стволам шахты ведёт к ряду осложнений. Они могут быть предотвращены или значительно сокращены путём снижения (увеличения) температуры воздушной струи, подаваемой в шахту, пока она не станет равной или очень близкой к температуре мёрзлого грунта.

При анализе температур воздуха в летний и зимний период, видно, что, поступая по выработке подаваемый воздух подогревается или охлаждается, и между подаваемым воздухом и породной массой наступает тепловое равновесие. В условиях теплового равновесия направление подаваемого воздуха можно, по возможности, менять многократно, за счёт чего снижается объём всасываемого воздуха до тех пор, пока не будет достигнут максимально желаемый уровень содержания загрязнения в воздухе. Изменение направления движения воздушной струи, как правило не имеет неблагоприятного воздействия на стабильность и тепловой режим рудника.

Контроль за изменением направления движения воздушной струи (рециркуляцией) может осуществляться либо переключением задвижек в центробежных вентиляторах, либо путём подачи переменного количества воздуха. Однако регулирование режима подачи воздуха является более сложным чем вариант с подачей фиксированного количества воздуха, и, если система проветривания должна быть эффективной, типы вентиляторов и места их установки являются решающим фактором.

Ещё один подход, который может быть использован при управлении рудничным тепловым режимом заключается в использовании выработок, аккумулирующих тепло. Этот подход основан на том, что вентиляционный воздух, циркулирующий по выработкам понижает температуру воздуха, поступающего с поверхности в течение летних месяцев (рисунок 5.2, А) или повышает температуру воздуха в течение зимних месяцев (см. рисунок 5.2, Б) до температуры многолетней мерзлоты вследствие теплообмена между породной массой и вентиляционным воздухом. При таком подходе, может быть использована способность породной массы понижать температуру, чтобы противодействовать воздействию сезонных колебаний температуры воздуха [166, 166].

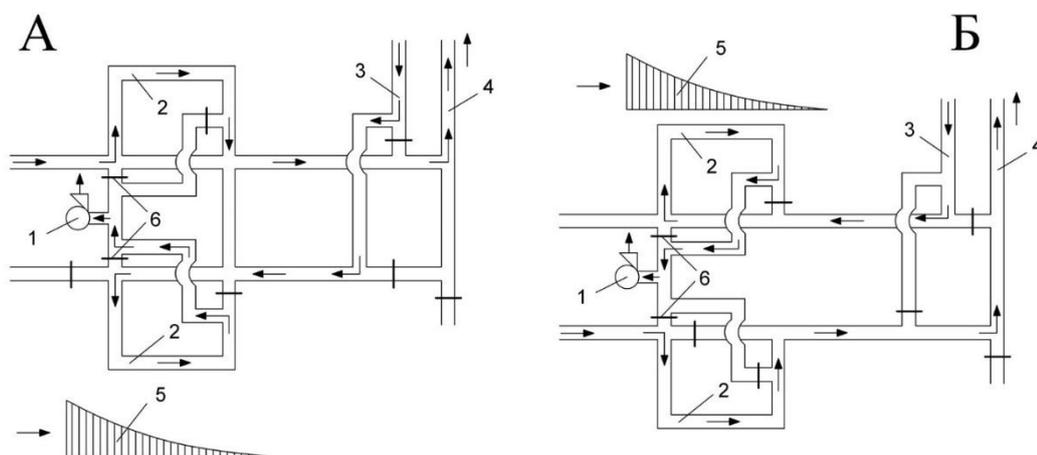


Рисунок 5.2 - Схема вентиляции со штреками, аккумулирующими: А- полезное (положительное) тепло; Б - ненужное (отрицательное) тепло; 1 - главный вентилятор; 2 – аккумулирующие тепло выработки; 3 - основная выработка для подачи воздуха; 4 - основная выводящая воздух выработка; 5 - температурный режим массива горных пород (А) и температурный режим вентиляционного воздуха (Б); 6 - автоматическая вентиляционная дверь

Такое управление температурой может быть достигнуто с помощью периодического изменения направление движения воздуха в специальные выработки и с помощью устройства дверей (перемычек). Направление струи отработанного воздуха остается неизменным в системе проветривания. Главный недостаток системы – увеличение сопротивления движению воздуха со временем из-за увеличения количества горных выработок.

Если охлаждение вентиляционного воздуха является невыполнимым и экономически невозможным, тогда за счёт дополнительного охлаждения ММП

можно значительно увеличить прочность пород кровли. Использование термосифонов для теплообмена оказалось очень полезным для повышения прочности мёрзлого грунта на Аляске, в Канаде и России. В течение зимнего сезона в Арктике с помощью термосифонов можно удалить большое количество тепла из почвы и направить его в атмосферу. Летом, когда температура воздуха и окружающей среды выше, чем породная масса, то устройство не используется.

Проблемы, связанные с вопросами рудничной вентиляции и повышения безопасности работ в условиях Арктики, решаются за счёт поддержания грунта в мёрзлом состоянии и за счёт управления тепловым режимом в рудниках на приемлемом уровне.

Таким образом, первоочередные правила охраны труда при намораживании закладки (в случае необходимости могут быть дополнены), выглядят следующим образом:

1. Рабочие, осуществляющие работы, связанные с намораживанием льда должны быть обеспечены средствами доставки, соответствующими СИЗ и спецодеждой (в том числе резиновой обувью) согласно существующим Методическим рекомендациям [77], а также получить специальные термоса.

2. Место работ должно быть обеспечено помещением для обогрева с приспособлением для просушки мокрой спецодежды.

3. В помещении должна быть стандартная аптечка для оказания неотложной помощи при несчастных случаях (в том числе обморожениях).

4. Работы, связанные с передвижением по льду/замораживаемой закладке, должны быть отнесены к особым, требующим снабжения рабочих специальной обувью с ледоступами (ледоходами) и теплой одеждой.

5. При первичном намораживании льда в затопленном карьере обязательно должны проводиться наблюдения за толщиной и трещинами льда, чтобы избежать падения под лёд.

Анализ экологических особенностей криолитозоны, сырьевой базы, технологических и технических решений разработки отечественных и зарубежных месторождений в криолитозоне, показал острую необходимость создания

экономически эффективной экотехнологии добычи полезных ископаемых, обеспечивающей сохранение неустойчивых экосистем криолитозоны.

Обобщение результатов проведённых исследований позволило выявить следующие преимущества внедрения замораживаемой закладки в условиях криолитозоны, представленные в виде блок-схемы на рисунке 5.3.

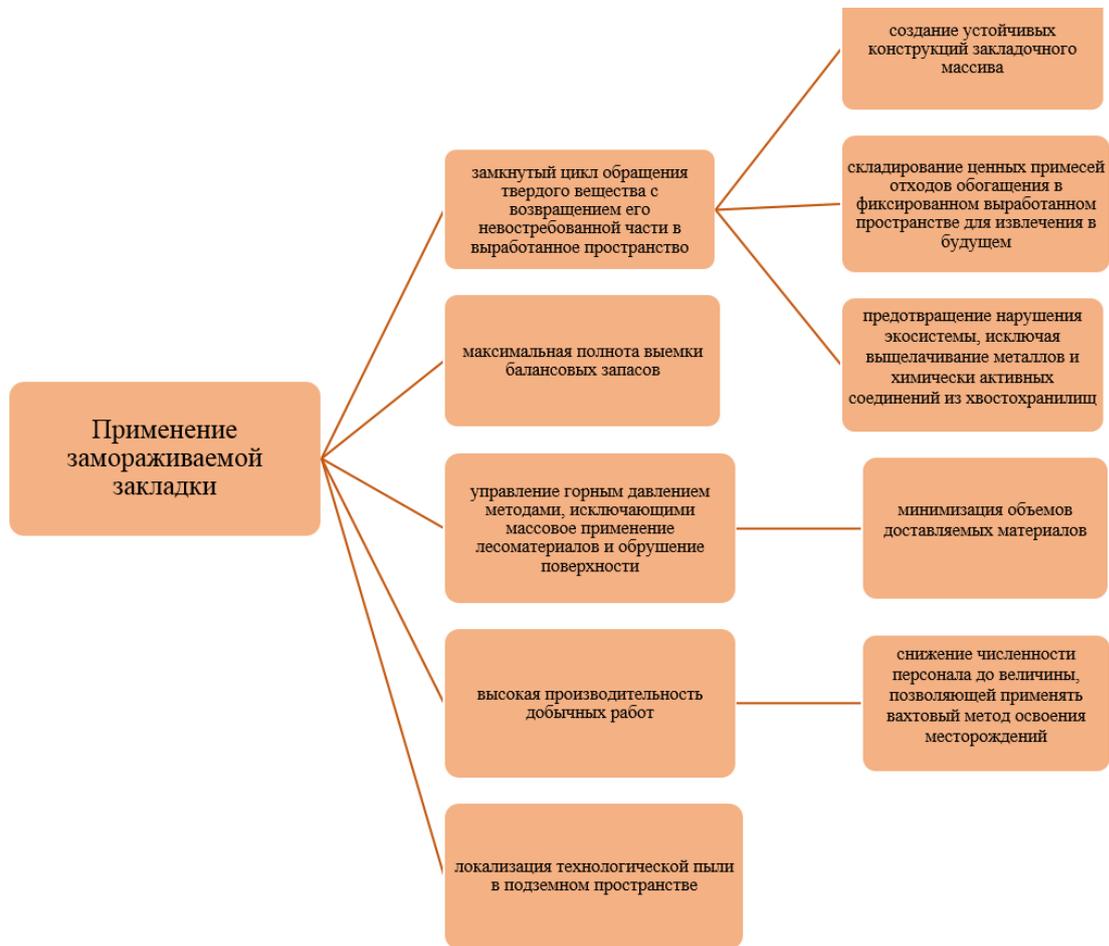


Рисунок 5.3 – Основные преимущества применения замораживаемой закладки

В заключение данной главы приводятся данные об экономической оценке предлагаемой технологии.

5.3 Оценка экономической эффективности внедрения разработанной технологической схемы на месторождении Арылах

Основные параметры технологии и основные технико-экономические параметры по результатам промышленных испытаний разработанной технологии приведены в главе 4.2. Рассмотрим экономический эффект от применения замораживаемой закладки на месторождении Арылах. Данные показатели рассчитаны как средние величины по всему выемочному блоку без деления на слои, подэтажи и т.д.

Таблица 5.2 - Расчетные технико-экономические показатели при отработке подкарьерных запасов применительно к Арылахскому месторождению

| Наименование показателей | Формула расчета | Значение |
|--|--------------------------------------|----------|
| Б - Балансовые запасы, тыс. т | | |
| с - Содержание ПИ в балансовых запасах, % | | |
| в - Содержание ПИ в разубоженных породах, % | | |
| п - Коэффициент потерь, % | | |
| Количество вмещающих пород, тыс. т | В | 2 |
| Количество потерянной руды, тыс. т | П | 0,3 |
| Д - Количество добытой горной массы, тыс. т | | |
| а - Содержание ПИ в горной массе, % | | |
| Процент разубоживания, % | $P = B/D$ | 17,1 |
| Коэффициент извлечения запасов из недр | $K_{и} = D \cdot a / (B \cdot c)$ | 0,98 |
| Валовая ценность 1 т балансовых запасов (C_0 – оптовая цена, \$) | $C_б = 0,01 \cdot c \cdot C_0$ | 120 |
| И - Коэффициент извлечения ПИ на ОФ, % | | |
| Извлекаемая ценность, отнесенная к 1т погашенных балансовых запасов, \$ | $C_{и} = C_б \cdot и \cdot K_{и}$ | 94,1 |
| $C_{д+т}$ - Себестоимость добычи 1 т товарной руды с учетом транспорта, \$ | | |
| Спер - Себестоимость переработки, \$ | | |
| Суммарная себестоимость, \$ | $C_{тов} = C_{д+т} + C_{пер}$ | 55 |
| Суммарная себестоимость 1 т товарной руды на 1 т погашенных балансовых запасов, \$ | $C = (D \cdot B) / C_{тов}$ | 64,35 |
| Прибыль (+), убытки (-) на 1 т погашенных балансовых запасов, усл.руб | $P_p = C_{и} - C$ | 29,7 |
| Выпуск продукции в расчетном году, тыс. т. | $P_{р год}$ | 10 |
| Годовая экономическая эффективность, млн. \$ | $\Xi = (P_{р.год} \cdot P_p) / 1000$ | 0,36 |

Условные обозначения: ПИ – полезное ископаемое; ОФ – обогатительная фабрика

Как видно из представленного материала суммарный экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 360 000 \$ США.

5.4 Выводы по главе 5

Проведенные исследования и внедрение разработанной технологической схемы в условиях месторождения Лунное показали ее достаточную эффективность и подтвердили следующие положительные и отрицательные результаты:

- сократить объём техногенных новообразований (отвалы, хвостохранилища) на земной поверхности;

- уменьшить площади полного разрушения естественной биоты при размещении твердых отходов;

- снизить количество техногенной пыли, поступающей в экосистемы территории предприятия;

- проблемы, связанные с вопросами рудничной вентиляции и повышения безопасности работ в условиях рудника, решаются за счёт поддержания грунта в мёрзлом состоянии и за счёт управления тепловым режимом в рудниках на заданном уровне;

- суммарный экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 360 000 \$ США.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи создания эффективной ресурсосберегающей схемы отработки ценных руд крутопадающих жильных месторождений с закладкой выработанного пространства в условиях криолитозоны позволяющей более чем в два раза повысить извлечение руды (с 92 до 96 %) при одновременном снижении ее разубоживания на 19 % (с 57 % до 36 %) и улучшении экологической ситуации в регионах отработки ценных рудных жил за счет уменьшения площади отвалов.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований:

1. Анализ направлений совершенствования технологических схем отработки ценных крутопадающих рудных жил с закладкой выработанного пространства показал, что наиболее целесообразно внедрять модернизацию используемых на конкретном месторождении технологий на базе использования послойного намораживания закладочного массива с заданными параметрами (мощность, несущая способность, используемые материалы, гранулометрический состав, теплоизоляционная способность и др.) при совмещении данных работ с иными операциями технологического цикла, что позволяет обеспечить высокую нагрузку на очистные блоки и обеспечить их отработку в течение заданного периода времени (не превышающего периода устойчиво низких отрицательных температур рассматриваемого региона).

2. Повышение эффективности показателей рассматриваемых технологических схем наиболее существенно можно достичь при исключении межэтажных целиков путем внедрения льдопородной закладки с заданными свойствами и переходе на слоевую отбойку (и закладку) руды вместо подэтажной выемки (закладки).

3. Замораживаемую закладку следует применять при возможности использования природного криоресурса (вмещающие породы имеют отрицательную температуру, наружный воздух имеет стабильно отрицательную

температуру необходимую для кристаллизации льда в закладке более 100 дней в году). Для горизонтов где отсутствует возможность выполнить эти условия должна применяться обычная технология исключая применение замораживаемой закладки, в исключительных случаях возможно применение искусственного замораживания. Наиболее целесообразно применять замораживаемую закладку при отработке целиков и подкарьерных запасов, при этом доставку руды из очистного пространства осуществлять ПДМ с дистанционным управлением.

4. При добавлении в дробленую породу песка уменьшается объем пустот в смеси и повышается её плотность, снижается коэффициент фильтрации, соответственно, повышается её водоудерживающая способность. Так, при введении в дробленую породу (со средним гранулометрическим составом - 25 мм) песка в количестве 17,5 % (по объёму), суммарная площадь поверхности компонентов в смеси увеличивается примерно в 6 раз. При этом не только повышается водосодержание смеси, но и значительно увеличивается активная поверхность охлажденных твердых компонентов в закладке, при взаимодействии с которой ускоряется процесс кристаллизации заливаемой воды. Прочность в зависимости от слоя и количества замороженной воды 2,5-6 МПа.

5. При добавлении в дробленую породу песка и дробленого льда повышается плотность смеси, одновременно увеличивается число мелких пор, что повышает водоудерживающую способность закладочного материала. Добавление компонентов осуществлялось по запатентованному способу. При порционном заливе воды в дробленую породу с примесью дробленого льда и песка, охлажденных до умеренных отрицательных температур (от -10 до -15 °С), общий объем образовавшегося льда от всего объёма примерно составил 25 %, а к объёму заливаемой воды образование льда составило до 65-80 %. Прочность образцов на одноосное сжатие достигла 4,2 МПа при среднем значении 3,5 МПа. В качестве теплоизолирующего слоя можно использовать песок с органическими соединениями (например, древесными опилками) или резинокордовой крошкой (отработанных покрышек).

6. Весьма перспективным решением представляется применение замораживаемой закладки на месторождении Арылах. Решения по отработке подкарьерного целика, созданием намораживаемой потолочины были приняты в виде рекомендаций, экспериментальные работы планируется проводить зимой 2019/2020 года.

7. Разработанная технологическая схема была рекомендована к внедрению, внедрена и получено положительное заключение о результатах внедрения: «применение системы разработки горизонтальными слоями с льдопородной закладкой, по сравнению с ранее применявшейся подэтажной отбойкой руды, позволило снизить потери в 2 раза (с 8 % до 4 %), разубоживание в 1,5 раза (с 56% до 37 %).

8. Разработанная в процессе выполненных исследований технологическая схема отработки ценных крутопадающих жил с закладкой выработанного пространства защищена 2 патентами на изобретения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство №1116184 СССР, Е 21 F 15/00, С 04 В 31/20, Состав закладочной смеси / Попов Н.И., Жук В.Г., Мамаев Ю.А. [и др.]; заявл. 24.12.1982, опубл. 30.09.1984; бюл. №36.
2. Авторское свидетельство №1242505 СССР, С09 К 3/24, Состав искусственного льда / Н. К. Васильев, А. В. Панюшкин, С. М. Алейников; заявл. 16.01.1985, опубл. 07.07.1986, бюл. № 25.
3. Авторское свидетельство №1620656 СССР, Е 21 F 15/00, Состав закладочной смеси / Попов Н.И.; заявл. 17.01.1989, опубл. 15.01.1991; бюл. №2.
4. Авторское свидетельство №1649218 СССР, F 25 С 1/00, С 09 К 3/24, Способ получения искусственного льда / С. В. Рогожин, В. Г. Чеверёв, Е. С. Вайнерман [и др.]; заявл. 23.05.1989; опубл. 15.05.1991, бюл. № 18.
5. Айнбиндер, И. И. К вопросу классификации технологий и составов закладки [Текст] / И. И. Айнбиндер, И. Н. Савич, О. И. Савич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №1. – С.186-195.
6. Антипанов, Н. А. Сооружение искусственных целиков при разработке полезных ископаемых в условиях вечной мерзлоты [Текст] / Н. А. Антипанов, Ю. Ф. Гузеев // Колыма. – 1962. – №12. – С.3-7.
7. Арктика: зона мира и сотрудничества / А. В. Загорский. – М.: ИМЭМО РАН, 2011. – 195 с. – Текст : непосредственный.
8. Архипов, Г. И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Обзор состояния и возможности развития / Г. И. Архипов. – М.: Горная книга, 2011. – 830 с. – Текст : непосредственный.
9. Бадмаев, Р. С. Технология подземной разработки (вечномерзлых) россыпей с минимальными потерями в недрах [Текст] / Р. С. Бадмаев, Ю. Я. Горлов, А. Н. Душкин // Колыма. – 1980. – № 2. – С. 4-7.
10. Бакакин, В. П. Лед в качестве материала для закладки выработанного пространства / В. П. Бакакин. – М.: АН СССР, 1955. – 79 с. – Текст : непосредственный.

11. Бакакин, В. П. Опыт использования льда для закладки горных выработок [Текст] / В. П. Бакакин // Колыма. – 1955. – №12. – С. 24-28.
12. Барковский, А. Н. Экономический потенциал Российской Арктики в области природных ресурсов и перевозок по СМП [Текст] / А. Н. Барковский, С. С. Алабян, О. В. Морозенкова // Российский внешнеэкономический вестник. – 2014. – № 12. – С. 44.
13. Блинский, А. И. Использование льда в качестве закладочного материала при разработке мощных угольных и рудных пластов [Текст] / А. И. Блинский // Колыма. – 1955. – №4. – С.10-13.
14. Блинский, А. И. Подземная разработка угольных и рудных месторождений в области вечной мерзлоты способом закладки льдом выработанных пространств / А. И. Блинский // Мерзлотоведение: в 2 томах. – М., 1946. – Т.1. – Вып. 2. – 126 с. – Текст : непосредственный.
15. Бобков, В. А. Практическое руководство по заготовке и хранению естественного льда / В. А. Бобков, А. М. Манукян. – М.-Л., 1939. – 88 с. – Текст : непосредственный.
16. Богородский, В. В. Разрушение льда. Методы, технические средства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило, О. А. Недошивин. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 232 с. – Текст : непосредственный.
17. Бронников, Д. М. Отчет о результатах командировки в Швецию на Международный симпозиум по разработке месторождений полезных ископаемых с закладкой / Д. М. Бронников – М.: ИПКОН АН СССР, 1983. – 27 с. – Текст : непосредственный.
18. Васильев, Н. К. Упрочнение льда для ледяных переправ [Текст] / Н. К. Васильев // Автомобильные дороги. – 1988. – №11. – С.20-21.
19. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей. – М.: Минтрансстрой, 1978. – 67 с. – Текст : непосредственный.
20. Войтковский, К. Ф. Механические свойства льда / К. Ф. Войтковский. – М.: Акад. наук СССР, 1960. – 98 с. – Текст : непосредственный.

21. Войтковский, К. Ф. Расчет сооружений из льда и снега / К. Ф. Войтковский. – М.: АН СССР, 1954. – 136 с. – Текст: непосредственный.
22. Войтковский, К. Ф. Сооружения из льда. Основы геокриологии. Часть 5. Инженерная геокриология / К. Ф. Войтковский, Э. Д. Ершов. – 1999. – С. 446-459. – Текст : непосредственный.
23. Волков, А. Металлы арктической зоны [Текст] / А. Волков, А. Галямов, К. Мурашов // Металлы Евразии. – 2015. – № 1. – С. 60.
24. Вялов, С. С. Подземные льды и сильно льдистые грунты как основания сооружений / С. С. Вялов, В. В. Докучаев, Д. Р. Шейнкман – Л.: Стройиздат, 1976. – 165 с. – Текст : непосредственный.
25. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с. – Текст : непосредственный.
26. Галченко, Ю. П. Геоэкологические особенности освоения минеральных ресурсов в криолитозоне [Текст] / Ю. П. Галченко, Г. В. Сабянин // Экологические системы и приборы. – Москва, 2006. – № 6. – С. 22-27.
27. Галченко, Ю. П. Экологическая и экономическая эффективность применения льдопородной закладки при подземной разработке месторождений в криолитозоне [Текст] / Ю. П. Галченко, Г. В. Сабянин, Ю. В. Михайлов // Экологические системы и приборы. – Москва, 2005. – № 5. – С. 28-31.
28. Геотехнические вопросы освоения Севера / О. Б. Андерсленд, Д. М. Андерсон: пер. с англ. – М.: Недра, 1983. – 508 с. – Текст : непосредственный.
29. Герасимов, А. И. Усиление несущей способности ледовых переправ и болотистых дорог. – Текст : электронный / А. И. Герасимов // Нефтегазовое дело. – 2009. – №1. – URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Gerasimov/Gerasimov_1.pdf. – Дата публикации: 01.08.2018
30. Гляциологический словарь / В. М. Котляков, В. Р. Алексеев, Н. В. Волков и др. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 119 с. – Текст : непосредственный.
31. Горная энциклопедия: в трех томах. Том 3. Кенган-Орт. – М.: Советская энциклопедия, 1987. – 592 с. – Текст : непосредственный.

32. Горное дело: Терминологический словарь (4-е изд., перераб. и доп.) / Г. Д. Лидин, Л. Д. Воронина, Д. Р. Каплунов и др. – М.: Недра, 1990. – 320 с. – Текст : непосредственный.
33. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2001 гг. / П. В. Садовник, А. И. Варламов, С. Е. Донской. – М.: Центр «Минерал» ФГУНПП «Аэрогеология», 2002. – 320 с. – Текст : непосредственный.
34. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2005 гг. / П. В. Садовник, А. И. Варламов, С. Е. Донской. – М.: Центр «Минерал» ФГУНПП «Аэрогеология», 2006. – 320 с. – Текст : непосредственный.
35. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2006 гг. / П. В. Садовник, А. И. Варламов, С. Е. Донской. – М.: Центр «Минерал» ФГУНПП «Аэрогеология», 2007. – 352 с. – Текст : непосредственный.
36. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2008 гг. / П. В. Садовник, А. И. Варламов, С. Е. Донской. – М.: Центр «Минерал» ФГУНПП «Аэрогеология», 2009. – 400 с. – Текст : непосредственный.
37. Гринев, В. Г. Решение проблем разработки рудных месторождений Севера / В. Г. Гринев, А. Е. Слепцов. – Новосибирск: Наука, 1992. – 204 с. – Текст : непосредственный.
38. Добыча драгоценных металлов. – Текст : электронный // Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – URL: www.standard.gost.ru/wps/wcm/connect/d62e9c0043db1df6919bd567c7308a4d/Файл_27.1.pdf?MOD=AJPERES (дата обращения: 01.08.2018).
39. Додин, Д. А. Стратегия освоения и изучения минерально-сырьевых ресурсов российской Арктики и субарктики в условиях перехода к устойчивому

развитию [Текст] / Д. А. Додин, В. Д. Каминский, К. К. Золоев, В. А. Коротеев // Литосфера. – 2010. – № 6. – С. 3–24.

40. Донцул, Н. Ф. Прогноз предельных зон вечномёрзлых пород кровли, поддерживаемой ледяными ленточными целиками кровли [Текст] / Н. Ф. Донцул, В. М. Ушаков // Колыма. – 1988. – № 2. – С. 24-26.

41. Достовалов, Б. Н. Общее мерзлотоведение / Б. Н. Достовалов, В. А. Кудрявцев. – М.: МГУ, 1967. – 404 с. – Текст : непосредственный.

42. Душкин, А. Н. Предпосылки создания камерно-целиковых систем для подземной разработки многолетнемёрзлых россыпей в сложных горно-геологических условиях [Текст] / А. Н. Душкин, А. Ф. Душкин, И. И. Ковлеков // Колыма. – 1988. – № 9. – С. 22-24.

43. Дядькин, Ю. Д. Исследование процесса замораживания закладки камер для выемки рудных целиков под защитой временных опор [Текст] / Ю. Д. Дядькин, Ю. И. Паненков, К. С. Симонов // Физические процессы горного производства. «Межвузовский сборник». – Л., 1976. – Вып. 3. – С. 58-67.

44. Дядькин, Ю. Д. Отработка междукамерного целика с предварительным замораживанием закладки [Текст] / Ю. Д. Дядькин, Ю. И. Паненков, К. С. Симонов и др. // Горный журнал. – Москва, 1977. – №8. – С. 32-34.

45. Ельчанинов, Е. А. Несущая способность искусственных ледяных целиков при подземной разработке вечномёрзлых россыпей [Текст] / Е. А. Ельчанинов, В. Б. Мельников // Колыма. – 1981. – № 9. – С. 3-5.

46. Емельянов, В. И. Основы разработки месторождений полезных ископаемых в экосистемах криолитозоны: учебное пособие / В. И. Емельянов, Ю. В. Михайлов, В. Ф. Носков ; МГОУ, 2005. – Москва. – 278 с. – Текст : непосредственный.

47. Ершов, Э. Д. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Э. Д. Ершов. – М.: Недра, 1988. – 357 с. – Текст : непосредственный.

48. Ершов, Э. Д. Криолитогенез / Э. Д. Ершов. – М.: Недра, 1982. – 211 с. – Текст : непосредственный.

49. Ершов, Э. Д. Общая геокриология: учебник / Э. Д. Ершов. – М.: МГУ, 2002. – 682 с. – Текст : непосредственный.
50. Зильберборд, А. Ф. Опыт разработки мощного угольного пласта на Крайнем Севере [Текст] / А. Ф. Зильберборд // Колыма. – 1957. – №2. – С. 26-30.
51. Иванов, В. И. О несущей способности искусственных ледяных целиков при подземной разработке россыпей Северо-Востока [Текст] / В. И. Иванов // Колыма. – 1980. – № 2. – С.7-11.
52. Иванов, В. И. Определение несущей способности искусственных ледяных целиков [Текст] / В. И. Иванов // Колыма. – 1977. – № 5. – С.6-9.
53. Именитов, В. Р. Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений / В. Р. Именитов. – М.: Недра, 1978. – 528 с. – Текст : непосредственный.
54. Инструкция по устройству ледовых переправ. – М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1970. – 138 с. – Текст : непосредственный.
55. Каган, Г. Л. Исследование прочностных свойств нового льдоволокнистого материала [Текст] / Г. Л. Каган, И. С. Песчанский, З. И. Швайштейн // Труды координационного совета по гидротехнике. – М.: Энергия, 1965. – Вып. 23. – С. 23-33.
56. Каган, Г. Л. Повышение механической прочности льда введением добавок [Текст] / Г. Л. Каган // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – М.-Л.: Энергия, 1964. – Вып. 10. – С. 49-54.
57. Киселев, В. В. Экогеотехнологический способ подземной отработки техногенных россыпных месторождений криолитозоны [Текст] / В. В. Киселев, Ю. А. Хохолов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 3. – С. 29-33.
58. Кобл, Р. П. Искусственное упрочнение (армирование) льда / Р. П. Кобл, У. Д. Кингери // Лед и снег: перевод с англ. – М.: Мир, 1966. – 107 с. - Текст : непосредственный.

59. Конышев, В. Н. Арктика в международной политике: сотрудничество или соперничество? [Текст] / В. Н. Конышев, А. А. Сергунин. – М.: РИСИ, 2011. – С. 12-15.
60. Коржавин, К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения / К. Н. Коржавин. – Новосибирск: СО АН СССР, 1962. – 203 с. – Текст : непосредственный.
61. Красных, С. Н. Опытнo-промышленные испытания намораживаемой породной закладки выработанного пространства [Текст] / С. Н. Красных // Цветная металлургия. – 1985. – №7. – С. 13-15.
62. Кривошеев, И. С. О возможности применения льдопородной закладки при разработке крутопадающих рудных тел в условиях вечной мерзлоты [Текст] / И. С. Кривошеев, В. Г. Жук, В. Л. Погребной // Колыма. – 1977. – № 5. – С. 12-15.
63. Криофобность и криофобные ледостойкие материалы: / Отв. ред. В. А. Игошин // Тезисы докладов. – Якутск: Якут. научный центр СО АН СССР, 1989. – 33 с. – Текст : непосредственный.
64. Крылов, М. М. Заготовка льда зимним замораживанием [Текст] / М. М. Крылов // Холодильное дело. – 1931. – № 9-10. – С. 30.
65. Кудрявцев, В. А. Сезонное промерзание и протаивание горных пород / В. А. Кудрявцев // Общее мерзлотоведение. – М.: МГУ, 1978. – С. 189-229. – Текст : непосредственный.
66. Кузьмин, Е. В. Основы горного дела: учебник для ВУЗов / Е. В. Кузьмин, М. М. Хайрутдинов, Д. К. Зенько. – Москва, 2007. – 472 с. – Текст : непосредственный.
67. Курильчик, А. Ф. Изучение прочности мерзлых пород при быстром сдвиге [Текст] / А. Ф. Курильчик, Г. З. Перльштейн // Колыма. – 1976. – №9. – С. 23-33.
68. Лаженцев, В. Н. Проблемы топливно-энергетического и минерально-сырьевого секторов хозяйства Севера [Текст] / В. Н. Лаженцев // Вестник российской академии наук. – 2007. – Том 77. – № 7. – С. 598-607.

69. Ларичкин, Ф. Д. Проблемы изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Арктического региона [Текст] / Ф. Д. Ларичкин, А. М. Фадеев, А. Е. Череповицын // Арктика: экология и экономика. – 2012. – № 1 (5). – С. 8-15.
70. Лексин, В. Н. Государственное управление развитием Арктической зоны Российской Федерации: задачи, проблемы, решения / В. Н. Лексин, Б. Н. Порфирьев. – М.: Научный консультант, 2016. – 26 с. – Текст : непосредственный.
71. Леонов, П. А. Ледяная закладка (Новый вид закладки для разработки мощных каменноугольных пластов Сибири) [Текст] / П. А. Леонов // За уголь Востока. – 1931. – №15. – С.10-15.
72. Лешков, В. Г. Разработка россыпных месторождений: учебник для вузов / В.Г. Лешков. – М.: Горная книга: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – 906 с. – Текст : непосредственный.
73. Ломоносов, Г. Г. Горная квалиметрия: учебное пособие для вузов, 2-е изд., стер. / Г. Г. Ломоносов ; Горная книга МГГУ, 2007 – Москва. – 2007. – 201 с. – Текст : непосредственный.
74. Марков, В. С. О возможности использования льдопородных опор из гравийно-галечных материалов для управления кровлей на россыпных шахтах Севера [Текст] / В. С. Марков // Проблемы использования льда и снега в народном хозяйстве. – Иркутск, 1986. – С. 52-56.
75. Мачнев, Ф. Ф. Вопросы управления кровлей и некоторые рекомендации по применению искусственных ледяных целиков на россыпных шахтах Северо-Востока [Текст] / Ф. Ф. Мачнев // Колыма. – 1979. – № 4. – С. 6-9.
76. Мельников, Н. Н. Горное дело в Арктике / Н. Н. Мельников, С. П. Решетняк // Горное дело в Арктике: труды 8-го Международного симпозиума «Горное дело в Арктике», Апатиты – СПб.: Иван Федоров, 2005. – 304 с. – Текст : непосредственный.
77. МР 2.2.7.2129-06. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время года на открытой территории или в неотопливаемых помещениях. – Москва, 2006. – С.104. – Текст : непосредственный.

78. Михайлов, Ю. В. Использование льдопородной закладки при разработке месторождений в зоне вечной мерзлоты [Текст] / Ю. В. Михайлов, В. В. Бовенко // Цветная металлургия. – 1988. – №6. – С. 21-23.

79. Михайлов, Ю. В. Ценные руды: Технология и механизация подземной разработки месторождений / Ю. В. Михайлов, Ю. Д. Красников. – М.: Академия, 2008. – 251 с. – Текст : непосредственный.

80. Михайлов, Ю. В. Эффективность применения льдопородной закладки при отработке многолетнемерзлых месторождений [Текст] / Ю. В. Михайлов, С. В. Горный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – №7. – С. 40-42.

81. Мохирев, А. П. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования / А. П. Мохирев, Ю. А. Безруких, С. О. Медведев – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 36, №2, Ч.2 – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (дата обращения: 10.02.2018).

82. Мусин, А. Ч. Разработка пологопадающих рудных месторождений с открытым очистным пространством применительно к условиям Джекказгана [Текст] / А. Ч. Мусин. – Алма-Ата: АН КазССР, 1959. – С. 91-94.

83. Наплавные мосты, паромные и ледяные переправы / В. И. Телов. – Москва: Транспорт, 1978. – 341 с. – Текст : непосредственный.

84. Некрасов, И. А. Региональное распространение многолетнемерзлых пород [Текст] / И. А. Некрасов // Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1984. – С.46-58.

85. Необутов, Г. П. Влияние масштабного фактора на прочность льдопородного материала [Текст] / Г. П. Необутов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 2. – С. 22-27.

86. Необутов, Г. П. Методические аспекты рационального освоения месторождений криолитозоны с использованием льдопородной закладки [Текст] / Г. П. Необутов, Д. Н. Петров // Наука и образование. – 2002. – № 4. – С. 5-7.

87. Необутов, Г. П. Оценка изменения тенденций развития технологии разработки жильных месторождений криолитозоны [Текст] / Г. П. Необутов, Д. Н. Петров, Е. В. Никулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Отдельный выпуск Дальний Восток-1. – С.19-22.

88. Необутов, Г. П. Разработка рудных месторождений с использованием замораживаемой закладки в условиях многолетней мерзлоты / Г. П. Необутов, В. Г. Гринев. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1997. – 103 с. – Текст : непосредственный.

89. Новопашин, М. Д. Свойства геоматериалов в условиях криолитозоны и их влияние на технологию ведения горных работ и устойчивость выработок [Текст] / М. Д. Новопашин, А. С. Курилко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – Отдельный выпуск № 4. Дальний Восток-1. – С. 28-29.

90. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации: указ Президента Российской Федерации. – Текст: электронный // Президент России: официальный сайт. – URL: <http://kremlin.ru/media/acts/files/0001201405050030.pdf> (дата обращения: 10.02.2018).

91. Об объявлении территорией Союза ССР земель и островов, расположенных в Северном Ледовитом океане. – Текст : электронный // Постановление Президиума Центрального Исполнительного Комитета СССР от 15 апреля 1926 года. – URL: http://www.libussr.ru/doc_ussr/ussr_2885.htm (дата обращения: 10.02.2018).

92. Океанографические таблицы. – Текст, изображения. 4-е издание. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 478 с.

93. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. – Текст : электронный // Совет безопасности РФ: официальный сайт. – URL: [https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2018/05/14/Основы государственной политики в Арктике.pdf](https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2018/05/14/Основы%20государственной%20политики%20в%20Арктике.pdf) (дата обращения: 01.08.2018)

94. Павлов, А. А. Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при разработке россыпей / А. А. Павлов, Б. А. Оловин. – Новосибирск: Наука, 1974. – 184 с. – Текст : непосредственный.

95. Паненков, Ю. И. Упрочнение закладки методом замораживания при выемке целиков между заложеными камерами / Ю. И. Паненков, К. С. Симонов // Проблемы горной теплофизики. – Л., 1974. – 97 с. – Текст : непосредственный.

96. Патент №2350711 Российская Федерация МПК E01D15/14, Способ создания ледяной переправы / Н. Ф. Вербух, А. И. Герасимов, А. С. Кондаков [и др.]; заявл. 10.08.2006; опубл. 27.03.2009, бюл. № 9. Институт проблем нефти и газа СО РАН, ОАО «Транс-ДорПроект». – № 2006129067/03.

97. Патент №2570698 Российская Федерация МПК E 21 F 15/08, Способ возведения закладочного массива при разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты / С. П. Мозер, О. В. Ковалев, В. В. Райс, К. В. Созонов; заявл. 18.11.2014; опубл. 10.12.2015, бюл. № 34. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – № 2014146323/03. – 7 с.

98. Патент №2602565 Российская Федерация МПК E 21 F 15/08, Способ возведения закладочного массива / О. В. Ковалев, А. Ф. Галкин, В. В. Райс; заявл. 16.11.2015; опубл. 20.11.2016, бюл. № 32. Санкт-Петербургский Горный университет. – № 2015149099/03. – 5 с.

99. Перспективы развития технологии добычи ценных руд в условиях криолитозоны: материал технической информации [Текст] / В. И. Емельянов, Г. А. Катков, Ю. В. Михайлов, В. Ф. Носков // Горный журнал. – 2003. – №11. – С. 66-69.

100. Песчанский, И. С. Механические свойства упрочненного льда [Текст] / И. С. Песчанский, З. И. Швайштейн, Г. Л. Каган, Ю. Л. Назинцев // Проблемы Арктики и Антарктики. – 1964. – №16. – С. 45-53.

101. Петров Д. Н. Анализ и обобщение опыта применения смерзающихся закладочных опор при разработке месторождений криолитозоны [Текст] // Исследования по инженерно-физическим проблемам Севера. – Якутск. – 2003. – С.90-95.

102. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых от 11 декабря 2013 года № 599 (ред. от 21.11.2018). – Текст : электронный // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор): официальный сайт. – URL: http://www.gosnadzor.ru/industrial/mining/acts/gornorud_object/pr599/ (дата обращения: 27.12.2019).

103. Природные ресурсы Арктики. Справка. – Текст: электронный // Природные ресурсы Арктики. Справка - РИА Новости. – URL: <https://ria.ru/20100415/220120223.html> (дата обращения: 27.12.2019).

104. Пронин, Э. М. Методика и некоторые результаты эксперимента по замораживанию закладки в условиях многолетней мерзлоты [Текст] / Э. М. Пронин, Р. Алибеков // Физические процессы горного производства. – Л.: ЛГИ, 1988. – С. 88-91.

105. Птухин, Ф. И. Исследование механических свойств намороженного строительного льда [Текст] / Ф. И. Птухин // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Гос. производственный комитет по энергетике и электрификации СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева, 1965. – № 23. – С. 45-58.

106. Пузанов, С. И. Особенности использования материалов на основе стеклобоя как заполнителей портландцементного бетона [Текст] / С. И. Пузанов // Строительные материалы. – 2007. – №7 (июль). – С. 2-5.

107. Разработка вечномерзлых россыпных и рудных месторождений полезных ископаемых: сборник статей [Текст] / глав. ред. В. И. Емельянов. – Магадан: ВНИИ-1, 1980. – С. 122-127.

108. Райс, В. В. Анализ прочностных свойств льда (тезисы) [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: Тезисы докладов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – С. 47-48.

109. Райс, В. В. Исследование материалов и выбор оптимального состава закладочной смеси [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв // Естественные и технические науки. – Москва, 2018 – №8. – Вып.122.– С. 60-65.

110. Райс, В. В. Особенности создания геомеханической трехмерной модели месторождения криолитозоны [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв, А. А. Санковский // Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва, 2017. – С. 205-211.

111. Райс, В. В. Особенности создания геомеханической трехмерной модели месторождения криолитозоны (тезисы) [Текст] / В. В. Райс, А. А. Санковский // Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке: Тезисы докладов. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2016. – С.106.

112. Райс, В. В. Опыт разработки рудных месторождений Магаданской области с использованием замораживаемой закладки [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв // Естественные и технические науки. – Москва, 2018 – №8. – Вып.122.– С. 66-72.

113. Райс, В. В. Пайкерит в качестве закладочного материала (тезисы) [Текст] / В. В. Райс // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование: Тезисы докладов. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. – С.36.

114. Райс, В. В. Пайкерит в качестве закладочного материала для рудников, расположенных в криолитозоне (тезисы) [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв // Полезные ископаемые России и их освоение: Тезисы докладов. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. – С.17.

115. Райс, В. В. Пайкерит в качестве строительного и закладочного материала [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв // Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование-1. Материалы Международной научно-практической конференции. Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва, 2015. – Отдельный выпуск № 60-1. – С. 202-211.

116. Райс, В. В. Пайкерит – льдокомпозит Второй мировой войны [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв, М. Н. Андреев // Лёд и Снег. – Москва, 2016. – №1. – Вып.56. – С. 119-127.

117. Райс, В. В. Пайкерит – строительный и закладочный материал для арктических территорий (тезисы) [Текст] / В. В. Райс, О. В. Ковалёв // Труды XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск, 2017. – Том 2. – С. 590-591.

118. Рекомендации по совершенствованию камерных систем разработки россыпных месторождений Северо-Востока СССР (на примере некоторых месторождений Заполярья). – Якутск: Якутского филиала СО АН СССР, 1976. – 57 с. – Текст : непосредственный.

119. Романовский, Н. Н. Основы криогенеза литосферы: Учебное пособие / Н. Н. Романовский; МГУ. – М.:,1993. – 336 с. – Текст : непосредственный.

120. Руппенейт, К. В. Введение в механику горных пород / К. В. Руппенейт, Ю. М. Либерман. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 384 с. – Текст : непосредственный.

121. Савинов, А. М. Прочность строительного льда при различной температуре [Текст] / А. М. Савинов // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – Гос. производственный комитет по энергетике и электрификации СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева, 1965. – № 23. – С. 72-78.

122. Савич, И. Н. Формирование закладочных массивов и утилизация резинокордовых отходов [Текст] / И. Н. Савич, М. В. Тишков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – С. 146-152.

123. Сальманов, Р. Н. О целесообразности применения искусственных ледяных целиков при подземной разработке вечномерзлых россыпей [Текст] / Р. Н. Сальманов, Ф. Ф. Мачнев // Колыма. – 1977. – №11. – С.7-10.

124. Сальманов, Р. Н. Опыт отработки шахт Полярнинского ГОКа с применением искусственных ледяных целиков [Текст] / Р. Н. Сальманов, Ф. Ф. Мачнев // Колыма. – 1978. – №1. – С.13-16.

125. Сальманов, Р. Н. Промышленная проверка способа отработки шахты с использованием льдозаполненных рассечек в качестве междукамерных целиков [Текст] / Р. Н. Сальманов, Ф. Ф. Мачнев, В. И. Иванов // Колыма. – 1978. – №11. – С. 3-5.
126. Сальманов, Р. Н. Разработка месторождений с применением замораживаемого закладочного материала [Текст] / Р. Н. Сальманов, С. Н. Красных // Колыма. – 1987. – № 3. – С. 19-20.
127. Сальманов, Р. Н. Технология возведения искусственных ледяных целиков в россыпных шахтах Северо-Востока [Текст] / Р. Н. Сальманов, Ф. Ф. Мачнев // Колыма. – 1977. – №12. – С. 8-10.
128. Сафонов, Ю. Г. Состояние и рациональные направления освоения рудных ресурсов российской Арктики [Текст] / Ю. Г. Сафонов // Геология и геофизика. – 2010. – № 1. – Т.51. - С. 142-152.
129. Сёма, Е. В. Информационная записка о мерзлотно-гидрогеологической ситуации на Арылахском золотосеребряном месторождении по состоянию на 10.06.2018 года. – Текст: электронный
130. Симаков, В. П. Обоснование конструктивных параметров лесовозных автомобильных дорог для условий Западной Сибири: специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Симаков Владимир Павлович. – Химки: ЦНИИМЭ, 1984. – 21 с. – Текст : непосредственный.
131. Синтез и химические превращения полимеров / Б. И. Тихомиров и др.. – Л., 1977. – Вып. 1. – 102 с. – Текст : непосредственный.
132. Скрамтаев, Б. Г. Ледяной бетон [Текст] / Б. Г. Скрамтаев, А. Пангксен // Техника и вооружение. – 1940. – №12. – С. 17-18.
133. Скрамтаев, Б. Г. Теория прочности бетона. Новые виды бетонов [Текст] / Б. Г. Скрамтаев. – М.: ОНТИ НКТП, 1934. – С. 49-50.
134. Смирнова, О. О. Некоторые вопросы государственной политики России в Арктической зоне [Текст] / О. О. Смирнова, В. Ю. Добромыслова // ЭКО. Всероссийский экономический журнал. – 2010. – №12. – С. 76–78.

135. Совершенствование методов разработки месторождений полезных ископаемых Севера: сборник научных трудов [Текст] / глав. ред. В. Н. Скуба – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1986. – С. 38-47.

136. Совершенствование подземной разработки талых и мерзлых россыпей / В. А. Шерстов, А. И. Сигаев, Н. М. Кивилева, Я. М. Хор. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1989. – 105 с. – Текст : непосредственный.

137. Совершенствование технологии подземной разработки россыпных и рудных месторождений Севера : сборник научных трудов / глав. ред. Ф. М. Киржнер. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. – 116 с. – Текст : непосредственный.

138. Соломатин, В. И. Геоэкология и принципы эволюции геосистем Арктики [Текст] / В. И. Соломатин // Криосфера земли. – 2008. – Том XII. – № 1. – С. 41-50.

139. Степин, А. А. Состояние и пути совершенствования технологии подземных горных работ в условиях вечной мерзлоты [Текст] / А. А. Степин, Ю. В. Михайлов // ЦНИИцветмет экономики и информации. – Москва, 1987. – Вып. 2. – С. 18-25.

140. Строилов, М. Отрицательные стороны ледяной закладки [Текст] / М. Строилов // За уголь востока. – 1931. – №22. – С. 34-35.

141. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с. – Текст : непосредственный.

142. Тайбашев, В. Н. Влияние степени льдонасыщенности и времени воздействия нагрузки на прочность мерзлых крупнообломочных пород [Текст] / В. Н. Тайбашев, В. Д. Жильцов, З. М. Гридюхин, А. С. Архипов // Колыма. – 1979. – № 10. – С. 6-8.

143. Тайбашев, В. Н. Физико-механические свойства мерзлых крупнообломочных пород / В. Н. Тайбашев // Труды ВНИИ-1. – Магадан, 1973. – Т. XXXIII. – 160 с. – Текст : непосредственный.

144. Трубецкой, К. Н. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества / К. Н. Трубецкой, Ю. П. Галченко, Л. И. Бурцев. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 261 с. – Текст : непосредственный.

145. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1989. – 488 с. – Текст : непосредственный.
146. Тушинский, Г. К. Инженерная гляциология / Г. К. Тушинский. – М.: Издательство Московского университета, 1971. – 208 с. – Текст : непосредственный.
147. Уикс, У. Ф. Разрушение озерного и морского льда [Текст] / У. Ф. Уикс, А. Ассур. – М.: Мир, 1976. – Т. 7, ч. I. – С. 512-623.
148. Ушаков, В. М. О выборе рациональной технологии льдозакладки [Текст] / В. М. Ушаков, М. И. Клименко // Колыма. – 1971. – №12. – С. 9-12.
149. Ушаков, В. М. О технико-экономической оценке льдозакладки [Текст] / В. М. Ушаков // Колыма. – 1970. – № 1. – С. 4-5.
150. Ушаков, В. М. Совершенствование льдозакладки [Текст] / В. М. Ушаков // Колыма. – 1979. – №8. – С.3-7
151. Ушаков, В. М. Эффективность применения ледяной крепи [Текст] / В. М. Ушаков, О. Д. Зайцев, О. Ф. Исаков // Колыма. – 1982. – № 2. – С. 6-8.
152. Ушаков, К. З. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело (2-е изд., стер.) // К.З. Ушаков. – М.: горный университет, 2008. – 155 с. – Текст : непосредственный.
153. Фангель, Х. Закладка выработанного пространства льдом [Текст] / под ред. С. Гранхольма // Разработка месторождений с закладкой. – М.: Мир, 1987. – С. 486-504.
154. Федосеев, С. В. Стратегический потенциал базовых отраслей промышленности / С. В. Федосеев // Кольский научный центр РАН. – Апатиты, 2003. – 268 с. – Текст : непосредственный.
155. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с. – Текст : непосредственный.
156. Характер влияния формы частиц заполнителя на прочность льдопородной закладки [Текст] / Д. Н. Петров, А. Н. Петров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 382-383.

157. Цыганков, А. В. Безопасность освоения месторождений полезных ископаемых в криолитозоне / А. В. Цыганков. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. – 108 с. – Текст : непосредственный.
158. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 156 с. – Текст : непосредственный.
159. Шевяков, Л. Д. Экономичен ли способ ледяной закладки? [Текст] / Л. Д. Шевяков // За уголь востока. – 1931. – №22. – С. 32-33.
160. Шерстов, В. А. Влияние нерегулируемого теплового режима на условия эксплуатации россыпных шахт Севера [Текст] / В. А. Шерстов, Ю. А. Хохолов, И. М. Ушницкий, В. К. Елшин, В. В. Киселев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2007. – Отдельный выпуск № 3. – С.136-137
161. Шерстов, В. А. Подземная разработка россыпных месторождений в условиях многолетней мерзлоты / ВИНТИ. – Москва, 1994. – Т.61. – 90 с. – Текст : непосредственный.
162. Шерстов, В. А. Совершенствование подземной разработки талых и мерзлых россыпей / В. А. Шерстов, А. И. Сигаев, Н. М. Кивилева, Я. М. Хор. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1989. – 162 с. – Текст : непосредственный.
163. Экспериментальные исследования прочности смёрзшихся сыпучих горных пород [Текст] / А. С. Курилко, М. В. Каймонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 12. – С. 69-71
164. Экспериментальные исследования свойств закладочных материалов из промораживаемых водопородных смесей [Текст] / Д. Н. Петров, Г. П. Необутов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 1(5). – С. 1280-1282.
165. Якименко, О. В. Классификация способов увеличения несущей способности ледовых автозимников [Текст] / О. В. Якименко, Е. А. Вагнер // Межвузовский сборник трудов молодых учёных, аспирантов и студентов. – Омск: СибАДИ, 2010. – С. 237-241.

166. Archibald, J. F. Frozen Fill for Underground support / J. F. Archibald, J. H. Nantel // CIM Bulletin. – 1986. – V. 79, n. 885. – P. 45-49.
167. Bandopadhyay, S. Ice-Cemented Backfill for Underground Support in Arctic Mines / S. Bandopadhyay, V. Izaxon // Proceedings of the SME Annual Meeting. – Denver, SME Preprint, 2004. – n. 04-23. – P. 45.
168. Black R. Permafrost as a natural phenomenon / R. Black. Washington, D.C.: Technical Assistant to Chief of Naval Operations for Polar Projects (OP-03A3), 1956 – 97p.
169. Brown, J. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions / J. Brown, O. J. Ferrians, J. A. Heginbottom, E. S. Melnikov // Circum-Pacific Map Series. – 1997. – 63p.
170. Davis, C. H. Progress with thin seam mechanization / C. H. Davis, J. H. Paterson // Mining Engineer. – 1965. – V. 61, n. 5. – P. 54-58.
171. Elliott, B. An analysis of environmental factors affecting ice growth / B. Elliott. – Washington, D.C.: U.S. Navy Hydrographic Office, 1954. – 24p.
172. Fletcher, N. H. The Chemical Physics of Ice / N. H. Fletcher. – Cambridge: University Press, 1970. – 271p.
173. Glen, J. W. The creep of polycrystalline ice / J. W. Glen. – DOI: 10.1098/rspa.1955.0066 // Proceedings of Royal Society of London, ser. A., 1955. – V. 228, n.1175. – P. 519-538
174. Gouni, R. A. New technique to study temperature effects on ice adhesion strength for wind turbine materials / R. A. Gouni // MS thesis, Department of Materials Science & Engineering, Case Western Reserve University. – Cleveland, 2011. – 86p.
175. Haynes, F. D. Effect of temperature on the strength of frozen silt / F. D. Haynes, J. A. Karalius. – Hanover: Dept. of Defense, Dept. of the Army, Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1977. – 10p.
176. Hoggarth, D. D. Precious Metals in Martin Frobisher's 'Black Ores' from Frobisher Bay, Northwest Territories / D. D. Hoggarth, J. Loop // Canadian Mineralogist. – 1986. – V.24. – P. 433-442.

177. Ives, J. D. Arctic and alpine environments / J. D. Ives, R. G. Barry. – London: Methuen, 1974 – 43–67p.
178. Jellinek, H. H. G. Adhesive properties of ice / H. H. G. Jellinek. – DOI: 10.1016/0095-8522(59)90051-0 // Journal of Colloid Science. – 1959. – V.14, I. 3. – P. 268-280.
179. Kingery, W. D. Applied glaciology - the utilization of ice and snow in arctic operations / W. D. Kingery. – DOI: 10.3189/S0022143000023704 // Glaciology. – 1960. – V. 3, n.27. – P. 577-588.
180. Kuehn, G. A. The Compressive Strength of Ice Cubes of Different Sizes / G. A. Kuehn, E. M. Schulson, D. E. Jones, J. Zhang. – DOI: 10.1115/1.2920104 // J. Offshore Mech. Arct. Eng. – 1993. – V. 115, n.2. – P. 142-148.
181. Langerfeld, A. Mining and surface support / A. Langerfeld. – US №1207569A, 05.12.1916.
182. Makkonen, L. Ice Adhesion - Theory, Measurements and Countermeasures / L. Makkonen. – DOI: 10.1163/016942411X574583 // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2012. – V. 26, n. 4-5. – P. 413-445.
183. Navy, U. S. Civil Engineer Corps cold-weather engineering, chapters I to V / U. S. Navy // Navdocks. – Washington, 1948. – 17p.
184. Perutz, M. F. A Description of the Iceberg Aircraft Carrier and the Bearing of the Mechanical Properties of Frozen Wood Pulp upon Some Problems of Glacier Flow / M. F. Perutz. – DOI: 10.3189/S0022143000007796 // Journal of Glaciology. – 1948. – V.1, n.3. – P. 95-102.
185. Petrovic, J. J. Review Mechanical properties of ice and snow / J. J. Petrovic. – DOI: 10.1023/A:1021134128038 // Journal of materials science. – 2003. – V.38. – P. 1-6.
186. Rays, V. V. Pykrete as backfill material / V. V. Rays // Scientific Reports on Resource Issues. – Freiberg, 2015. – V.1. – P. 175-177.
187. Swinzow, G. K. Certain aspects of engineering geology in permafrost / G.K Swinzow. – DOI: 10.1016/0013-7952(69)90011-8 // Engineering Geology. – 1969. – V. 3, n. 3. – P. 177-215.

188. Swinzow, G. K., Preliminary Investigations of Permacrete / G. K. Swinzow // CRREL Tech. Rept. – U.S. Army, 1965. –n. 127. – P. 20-37.

189. Williams, G. M. Physical Properties of Frozen Wood Pulp / G. M. Williams. – DOI: 10.4224/20338006 // National Research Council Canada, Internal Report of the Division of Building Research. – Ottawa, 1972. – V. 398. –78p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о применении результатов диссертационного исследования



АКТ

О применении результатов диссертационного исследования Виктора Владимировича Райса на тему: «Определение параметров технологии с замораживаемой закладкой выработанного пространства при отработке ценных руд жильных месторождений в криолитозоне», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы инженера отдела горного планирования В.В. Райса были использованы на ГОК «Лунное» (АО «Серебро Магадана») и послужили основой при выполнении опытно-промышленных работ (ОПР) при отработке VII рудной зоны месторождения «Лунное». Важным результатом ОПР стало повышение эффективности добычи руды за счёт использования системы горизонтальными слоями (в том числе с применением смерзшихся пород), по сравнению со средними показателями извлечения руды из камер блока ЗС1-2, ранее применявшейся на руднике подэтажной отбойкой руды. Льдопородная закладка применялась для заполнения нижнего слоя блока с целью последующей отработки межблочного целика. Применение системы разработки горизонтальными слоями с льдопородной закладкой позволило снизить потери в 2 раза (с 8% до 4%), разубоживание в 1,5 раза (с 56% до 37%).

Результаты исследований, отраженные в диссертационной работе В.В. Райса, позволяют рекомендовать к применению систему горизонтальными слоями с льдопородной закладкой выработанного пространства для дальнейшей отработки маломощных рудных тел, расположенных в многолетнемерзлых вмещающих породах на VII рудной зоне месторождения «Лунное».

Предложенные В.В. Райсом решения по отработке подкарьерного целика месторождения Арылах были приняты в виде рекомендаций при среднесрочном планировании горных работ. В результате проведенных экспериментально-аналитических исследований разработаны технологические параметры отработки подкарьерных запасов месторождения с помощью замораживаемой закладки. Использование полученных в диссертации зависимостей позволит с достаточной точностью определить прочность замороженного закладочного массива, количество требуемого для его создания материала и времени. Предложенные в составе закладки теплоизоляционные материалы позволят снизить риск досрочного растепления и увеличить время, в течение которого можно отработать подкарьерные запасы. Кроме улучшения показателей извлечения руды, экономическая эффективность выражена в первоочередной отработке подкарьерных запасов месторождения Арылах, что составляет более 25 тыс. тонн золотосеребряной руды, весной 2019 года, вместо ранее запланированной отработки на 2021-2023 гг.

И.о. начальника производственно-технического отдела
ГОК «Лунное»

 Кулагина И.Р.