МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Лялин Никита Алексеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ И РАЗУБОЖИВАНИЯ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО ПРИ ОСВОЕНИИ ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОГО МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Специальность 2.8.3
«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент,
Абрамян Г.О.

Москва – 2024

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. На фоне постепенного истощения мировой минерально-сырьевой базы, выработки легкодоступных и богатых месторождений и вовлечения в отработку бедных и сложноструктурных месторождений, проблема полноты и качества извлекаемых запасов становится все более актуальной. При освоении подобных месторождений, минимизация уровня потерь и разубоживания руды становится одним из ключевых требований к процессу добычи полезных ископаемых.

В первую очередь это связано с вовлечением в отработку маломощных и низкорентабельных месторождений, где высокие значения разубоживания напрямую влияют на эффективность и стоимость обогащения 1 тонны руды, формируя значительную долю в себестоимости готовой продукции. Помимо экономического ущерба, высокое разубоживание негативно влияет на производительность выемочной единицы и наносит существенный ущерб окружающей среде, так как требуется выделение больших площадей под отвалы и хвостохранилища.

К наиболее распространенным месторождениям со схожей морфологией рудных тел относятся гипотермальные месторождения коренного золота, схожими проблемами обладают вольфрамовые, урановые, баритовые и золоторудные месторождения иного типа минерализации, сходных по категории сложности морфологии. Поэтому разработка метода минимизации потерь и разубоживания полезного ископаемого при освоении жильных месторождений сложного морфологического строения является актуальной научной задачей.

Объект исследования – потери и разубоживание полезного ископаемого в зависимости от свойств, форм и условий залегания рудных тел сложного морфологического строения.

Идея работы – использование результатов сопроводительной разведки на месторождениях со сложным морфологическим строением рудных тел,

основанной на определении анизотропии, параметров зон неопределенности и моделировании рудного тела, для более точного определения морфологии рудного тела и определения рациональных параметров выемочных камер, позволяющих минимизировать потери и разубоживание полезного ископаемого.

Цель работы – разработка метода минимизации потерь и разубоживания на жильных месторождениях со сложным морфологическим строением.

Задачи исследования:

1. провести анализ и оценку существующих методов минимизации потерь и разубоживания;
2. определить рациональные параметры сетей скважин сопроводительной разведки при разработке маломощных жильных месторождений;
3. определить морфологию рудного тела и характер зон контактной неопределенности и оценить их влияние на качественные и количественные показатели извлекаемой руды;
4. провести расчет и обоснование рациональных параметров выемочных камер и забоя, при которых минимизирован процент вторичного разубоживания;
5. определить мощности прирезки вмещающих пород в контур выемочной камеры и забой, и ее влияние на качество рудной массы;
6. провести опробование разработанного метода уменьшения потерь и разубоживания полезного ископаемого при экспериментальной отработке эксплуатационного блока.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что для обеспечения достоверности разведки жильного рудного тела при организации сетей скважин сопроводительной разведки необходимо использовать дифференцированный подход, определяя раздельно размеры, форму и ориентацию ячеек сетей для основной части рудного тела и для зон контактной неопределенности на

границе «руда-порода» на основе анализа ошибки геометризации и горного риска.

2. Разработаны формулы расчета абсолютных величин объемов потерь полезного ископаемого и разубоживающих пород в контуре выемочной камеры при отработке жильных месторождений сложного морфологического строения, учитывающие изменчивость контура контакта «руда-порода», геометрические параметры выемочной камеры, мощность рудного тела, величину прирезки породы на боках камеры и максимально допустимые горизонтальные напряжения, что позволяет установить диапазоны изменения величин потерь и разубоживания.
3. Определена связь характера и параметров зоны контактной неопределенности «руда-порода» с качественными и количественными показателями добываемой руды, учет которой при отработке сложноструктурного рудного тела с высокой анизотропией его морфологии позволил снизить фактическую величину потерь и разубоживания на 1–2% и 5–10% соответственно.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается:

- использованием комплекса общепризнанных методов исследования свойств, форм и условий залегания сложноструктурных рудных тел;
- применением современных горно-геологических информационных систем и систем компьютерной алгебры при расчетах рациональных параметров сетей сопроводительной разведки и значений потерь и разубоживания;
- удовлетворительной сходимостью расчетных и фактических показателей потерь и объемов руды в выемочном контуре.

Научная новизна исследования:

1. Предложен дифференцированный подход к определению параметров сети скважин сопроводительной разведки, позволяющий минимизировать значения потерь и разубоживания полезного

ископаемого с учетом баланса между затратами на разведку и ущербом от ошибки геометризации.

2. Установлены параметры выемочной единицы, оказывающие наиболее существенное влияние на количественные и качественные показатели извлекаемого сырья, разработан метод, позволяющий минимизировать потери и разубоживание полезного ископаемого за счет уменьшения прирезки вмещающей породы в контур выемочной камеры;
3. Определены требования к параметрам сети скважин сопроводительной разведки, обеспечивающие максимальное схождение расчетных и фактических величин и разубоживания полезного ископаемого.

Научная ценность исследования заключается в определении оптимального подхода к организации сетей скважин сопроводительной разведки, учитывающий форму, свойства (горно-геологические, физико-механические) и условия залегания рудных тел, позволяющий установить и обосновать параметры выемочных камер и минимизировать потери и разубоживание полезного ископаемого при освоении сложноструктурных жильных месторождений.

Практическая значимость исследования состоит в разработке метода уменьшения потерь и разубоживания полезного ископаемого на месторождениях со сложным морфологическим и геологическим строением, значительно увеличивающим достоверность расчетов технологических показателей при проектировании и оперативном планировании горных работ.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Международном научном симпозиуме «Неделя Горняка» в 2021-2024 годах и на десятой Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, 2019 г.).

Реализация работы. Разработанный метод по минимизации потерь и разубоживания полезного ископаемого внедрен и успешно апробирован на предприятиях, разрабатывающих маломощные жильные месторождения

сложного морфологического строения, что подтверждается соответствующей справкой.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 102 наименований, изложена на 139 страницах текста и содержит 52 рисунка и 15 таблиц.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 научных статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

Благодарности. Автор выражает благодарность кафедре «Геологии и маркшейдерского дела» Горного института НИТУ «МИСиС», научному руководителю доценту Г. О. Абрамяну и техническим специалистам ООО «Атомредметзолото», Kinross Gold Corporation и ООО «Таймыргормаш» за помощь и консультации при написании работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** проведен анализ результатов исследований по способам минимизации потерь и разубоживания полезных ископаемых при разработке сложноструктурных месторождений полезных ископаемых. В ней приводятся примеры применяемых в России и зарубежных странах методик, способов расчета и контроля показателей потерь и разубоживания полезного ископаемого, оценивается их эффективность и основные недостатки. Помимо производственных практик и стандартов, анализировались исследования, описывающие золоторудные, урановые, вольфрамовые и баритовые жильные месторождения с высокой анизотропией мощности рудных тел и изменчивостью свойств оруденения, относящихся к 3 и 4 группам сложности по морфологическому строению.

Проблема минимизации потерь и разубоживания полезного ископаемого, выявление закономерностей и совокупного влияния различных горно-геологических и горнотехнических факторов на эти показатели, а также получаемый при этом экономический эффект, изучается рядом ученых из России, Австралии, США, Канады и Европы. В частности, этой проблеме посвящены работы Г.Г. Ломоносова, а также ряда известных ученых: Г.О. Абрамяна, М. И. Агошкова, Я. М. Адигамова, А. С. Астахова, Б. Н. Байкова, С. А. Батугина, В. Г. Боргера, В. А. Викентьева, Т. А. Гатова, Г. И. Герасименко, В. Н. Гусева, В. И. Гончарова, Н. В. Дронова, М. М. Константинова, А. В. Костина, Г. М. Малахова, А. Ф. Назарчика, Б. К. Оводенко, М. Д. Онищенко, В.Н. Попова, В. Пояркова, Е. П. Прокопьева, С. Я. Рачковского, В. П. Рыжова, В. В. Руденко, Г. В. Секисова, А. Симакова, С. М. Ткача, А. М. Фрейдина, Н. А. Хрущова, Е. Д. Черного, М. А. Яковлева, М. А. и многие другие.

Среди зарубежных исследователей значительный вклад в изучение проблемы внесли зарубежные ученые: M. Scoble, M. Monjezi, S. Lek, J. G. Henning, G. Lu, J. Wang, L. M. Clark, R. Pakalnis, E. Hoek, P. B. Hills, H. Hefni, H. Luo, H. M. Ahmed, J. A. Vallejos, L. Diaz, A. Delentas, A. Benardos, P. Nomikos, D. Elmo, G. Tao, E. Engmann, D. Thornton, A. L. Yennamani, S. K. Baffoe, B. L. Bowden, W. Jung и другие.

В настоящее время наиболее распространенной и используемой в научной среде и горнодобывающей отрасли за рубежом является разработанная L. M. Clark концепция эквивалентного линейного вскрытия (ELOS), позволяющая количественно оценить разубоживание полезного ископаемого. В последствии Кларк ввел концепцию ELOS в метод графа устойчивости и предложил метод эмпирических графов ELOS.

Методология по определения разубоживания согласно концепции Кларка (L. M. Clark) представлена в виде блок-схемы (рис. 1):

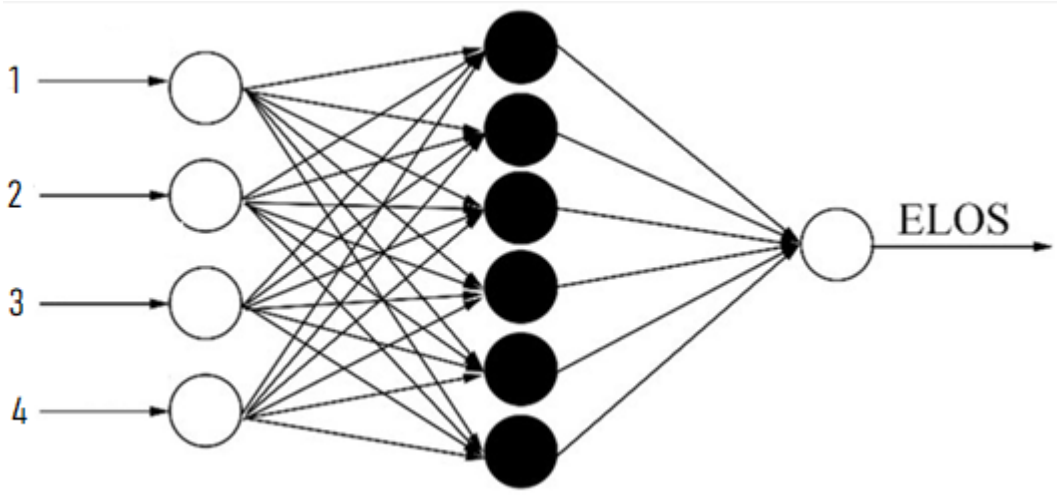

Рисунок 1 – Разработанная L. M. Clark концепция определения показателей потерь и разубоживания: 1 - фактор устойчивости горных пород; 2 – гидравлический радиус забоя; 3 – среднее отклонение буровзрывных скважин от проектного; 3 – фактор измельчения ВГМ

Метод эмпирического анализа ELOS (L. M. Clark), удобен для расчета внеплановых значений потерь и разубоживания руды, но, по мнению автора, имеет ряд недостатков:

1. При построении эмпирического графика ELOS учитываются только значения устойчивости вмещающих пород и гидравлический радиус забоя. При этом игнорируются другие факторы, влияющие на неплановое разубоживание руды, что вносит ошибки в результаты расчета;
2. Использование метода сильно ограничено, если в пределах месторождения наблюдается сильная изменчивость устойчивости вмещающих пород;
3. При сложной морфологии рудного тела, особенно при выходе рудного тела за пределы контура выемочной единицы, применение метода демонстрирует низкую сходимость расчетных и фактических значений потерь и разубоживания;
4. В большинстве случаев применение графика дает только нечеткий диапазон ELOS, а не точное значение. Эти недостатки требуют создания

более надежной модели для прогнозирования незапланированного разубоживания руды с учетом дополнительных факторов.

Рассматривая работы отечественных авторов, можно выделить обширный перечень методов и методик, применяемых при специфических условиях, например расчет потерь и разубоживания при отработке слепых рудных тел. Однако, данные методы не нашли широкого распространения в производственной и научной среде ввиду своей специфики и чрезмерно узкой специализации.

Результаты проведенного анализа показали, что на данный момент отсутствует общепризнанный метод минимизации потерь и разубоживания при разработке сложноструктурных жильных и жилообразных месторождений. Ввиду этого, разработка метода снижения потерь и разубоживания при разработке таких месторождений является не только актуальной научной задачей, но и производственной проблемой.

Обоснование первого научного положения

Определение методики проведения геологоразведочных работ, выбор рациональных и оптимальных с технико-экономической точки зрения параметров разведочных сетей на месторождениях 3-й и 4-й групп по сложности морфологического строения зависят главным образом от морфологического строения рудных тел, их размеров, мощности, выдержанности и условий залегания.

Наиболее важным и сложным вопросом, особенно на стадии сопроводительной разведки, является выбор необходимой плотности разведочной сети для разведки отдельных рудных тел и определении их свойств и параметров, таких как истинная мощность, угол падения, наличие структурных нарушений и т.д. От правильного выбора плотности разведочной сети зависят экономические и трудовые затраты, сроки выполнения работ, а также достоверность полученных данных. В то же время каждое из разведуемых стержневых (то есть основной свиты или системы рудных тел,

разрабатываемой на месторождении) жильных рудных тел характеризуется только ему присущей изменчивостью свойств оруденения, определяющей необходимую плотность разведочных выработок.

Для определения рациональной плотности разведочный сети рассматривалось три способа:

1. Разрежение разведочной сети;
2. Сгущение разведочной сети;
3. Аналитический метод.

Доказано, что наилучшие результаты дает второй способ, когда на характерном для месторождения участке или рудном теле сгущается разведочная сеть (в 2—4 раза) как по простиранию рудных тел, так и по падению. Исходя из проведенного анализа, был принят метод последовательного сгущения разведочной сети. Последовательное сгущение сети необходимо осуществлять от наибольшего шага самой разреженной сети (в конкретном случае это сеть с 40 х 20) до наиболее сгущенного 5 х 5 по А. Милютину (рис. 2).

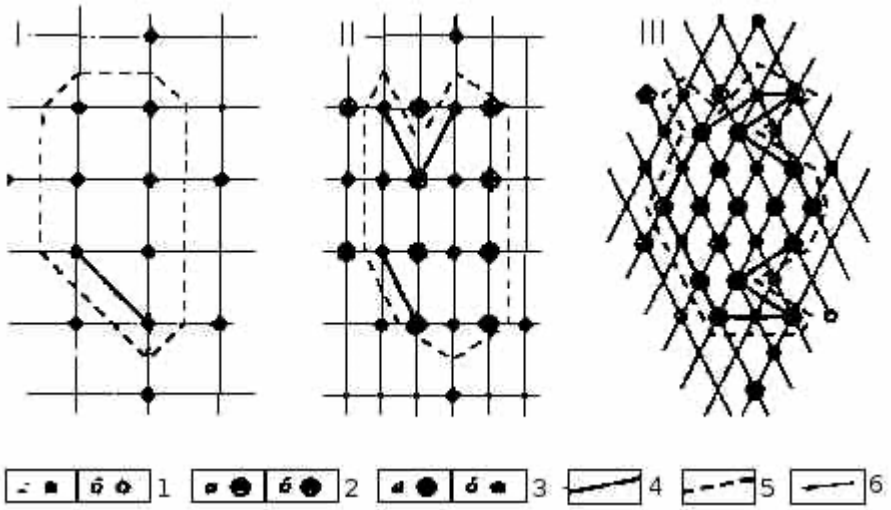

Рисунок 2 – Последовательное сгущение разведочной сети (по А. Милютину):
I – изначальная (фактически принятая) прямоугольная разведочная сеть;
II – прямоугольная сеть, полученная сгущением (сокращения в два раза расстояния между скважинами по линии вкрест простирания); III – ромбическая сеть, образовавшаяся в результате финального сгущения посредством проведения дополнительных скважин в центре ячеек прямоугольной сети II; 1–3 – разведочные скважины кернового бурения (1 – изначальной разведочной сети (а – рудные, б – безрудные); 2 – детальной разведки; 3 – сопроводительной разведки; 4, 5 – линии контуров рудного тела (4 – внутреннего контура, 5 – внешнего); 6 – линии геологоразведочной сети скважин

Обобщая проведенное исследование, установлены следующие критерии, которым должна соответствовать сеть скважин сопроводительной разведки при разведке маломощных сложноструктурных рудных тел сложного морфологического строения:

1. Сеть должна быть анизотропной;
2. Рациональная форма ячейки сети – ромбическая, разреженная в направлении наиболее выдержанного геологоразведочного показателя и сгущенная в направлении наименее выдержанного;
3. Рациональное расстояние между скважинами и разведочными линиями должно определяться путем сгущения имеющейся сети с последующей отработкой экспериментального блока;
4. Параметры разведочной сети должны быть сбалансированы относительно как получаемой геологоразведочной информации, так и затратами на организацию этих сетей.

При обосновании выбранных параметров сети скважин сопроводительной разведки также необходимо учитывать ошибку геометризации рудного тела, как меру достоверности расчетного определения его параметров. Ошибка геометризации определялась путем построения модели рудного тела в контуре выемки по данным, полученным с применением сетей различной конфигурации, начиная от сети 40х20, закачивания сетью 5х5. Очевидно, что модель рудного тела, построенная по данным бурения по сети 5х5 наиболее точная, но также наиболее трудоемкая. Поэтому, для разведки рудного тела предложен трехэтапных процесс проведения сопроводительной геологоразведки:

Первый этап сопроводительного разведочного бурения проводится бурение подземных скважин из горноподготовительных и горнокапитальных выработок по сети 15 х 10 м. Результаты работ используются в том числе и для определения наиболее выдержанной по морфологии и мощности часть рудного тела

Второй этап выполняется бурением горизонтальных шпуров и скважин глубиной до 15 - 40 м из эксплуатационно-разведочного штрека, пройденного на рабочем слое в границах блока по простиранию наиболее выдержанного рудного тела или его части по границам зоны контактной неопределенности по сети 7 - 5 х 5 м. По результатам сопроводительных разведочных работ второго этапа отмечается выявление значительного количества маломощных и малых по простиранию рудных тел, пропущенных при проведении детальной и первого этапа эксплуатационной разведок, которые в дальнейшем включаются в эксплуатацию.

Третий этап заключается в бурении коротких (до 2 м) контурных шпуров в борта очистных камер. Результаты работ отражают полноту выемки запасов и используются при подсчетах потерь и разубоживания, погашении и списании отработанных запасов.

Разведочные скважины исследовались стандартным для рудных месторождений комплексом методов, включающим в себя пьезометод, электрокаротаж (КС), метод радиопросвечивания (там, где это возможно), радиоактивный каротаж (ГК, ГГК, ГГК-С), кавернометрию, инклинометрию. Основной комплекс выполнялся в поисковом масштабе глубин 1:200, детализационные исследования в пределах рудных жил в масштабе 1:50. Всего исследовано 2486 рудопересечений единичной мощностью от 0,05 м до 5,74 м.

Дополнительно проводились работы для выяснения возможности для криогенных пород определять физико-механические и упруго-деформационные свойства по результатам волнового акустического каротажа.

Запись каротажных диаграмм проводилась с шагом 2 см и скоростью подъема кабеля при регистрации диаграмм в межрудном интервале 20 м/час. В пределах зон значительно оруденения скорость для методов КС, ГК, ГГК снижалась до 10 м/час, регистрация диаграммы ГГКС выполнялась при скорости 10 м/ час.

Итогом являлось построение геолого-геофизического паспорта скважины, пример которого изображен на рисунке 3.

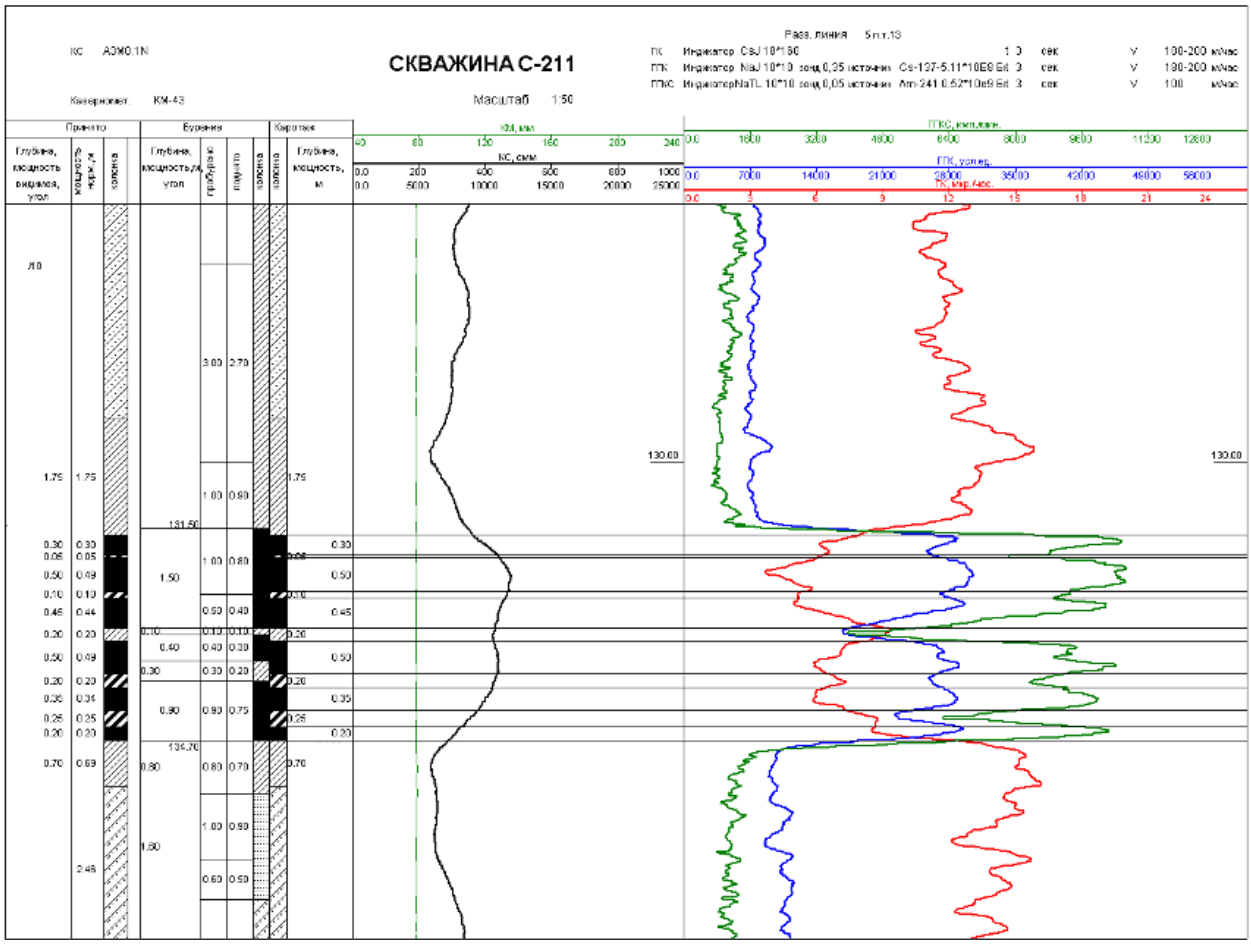

Рисунок 3 – Геолого-геофизический паспорт скважины С-211

Проведя разведку рудного тела по дифференцированной сети скважин сопроводительной разведки, с высокой долей достоверности определяется характер зоны контактной неопределенности. Установлено, что геологические контакты носят извилистый характер, осложнены многочисленными апофизами в местах сочленения тектонических нарушений различной направленности. По падению и простиранию рудных тел наблюдается чередование участков повышенной мощности (рудных столбов) с пережимами мощностью менее 1,0 м. Характерным также является наличие пережимов, выклиниваний, разделений рудных тел. В плане рудные тела сближаются на расстояния 3–10 м, пересекаются и сочленяются друг с другом, смещаются тектоническими трещинами, образуя залежи сложного внутреннего строения и разнообразной формы, но со стабильно извилистым характером контактов «руда-порода». Оперируя результатами разведки, разделив рудное тело на две

части – «внутреннюю» – наиболее выдержанную, отработка которой сопутствует наименьшему разубоживанию, но и наибольшими потерями; и «приконтактную», отработка которой совокупно с «внутренней» частью, позволит достичь минимум потерь, но приведет к высоким значениям разубоживания. Следовательно, для полноты отработки запасов в «приконтактной» части, необходимо рассчитать такие значения потерь и разубоживания, при которых эта отработка будет наиболее эффективна.

Обоснование второго и третьего научных положений

Для определения влияния характера зоны контактной неопределенности использовался подход на основании исследования С. А. Вохмина. Согласно исследованию, рациональность отработки запасов приконтурной зоне должна доказываться, исходя из экономической целесообразности. Для этого представим извилистый контакт и границу выемочной камеры (штрих-пунктирные линии 1-9 на рисунке 4). Рассчитанные по подходу С. А. Вохмина контуры положения выемочной камеры приведены на рис. 4, каждому из них (1-9) соответствует определенная величина и соотношение потерь и разубоживания, на основании которой был определен горный риск и рассчитано эталонное соотношение, при котором экономическая эффективность отработки максимальна.

Наибольшую сложность вызывает практическое определение рационального и устойчивого контура границ выемочной камеры, для чего необходимо определить площади потерь руды, оставляемой за контуром выемки и площадь участков прирезки вмещающих пород (рис. 5) в контур выемочной камеры в зависимости от его положения при каждом из рассматриваемом вариантах.

Далее, определив горный риск и потенциальную прибыль, получаемую при отработке камеры с каждым из вариантов положения ее границ относительно зоны контактной неопределенности, на основании разработанных С. А. Вохминым формул, численно опишем рациональное

соотношение потерь и разубоживания, характеризующее рациональный контур выемочной камеры. Варианты расположения контура выемочной камеры в границе зоны контактной неопределенности изображены на рисунке 4.

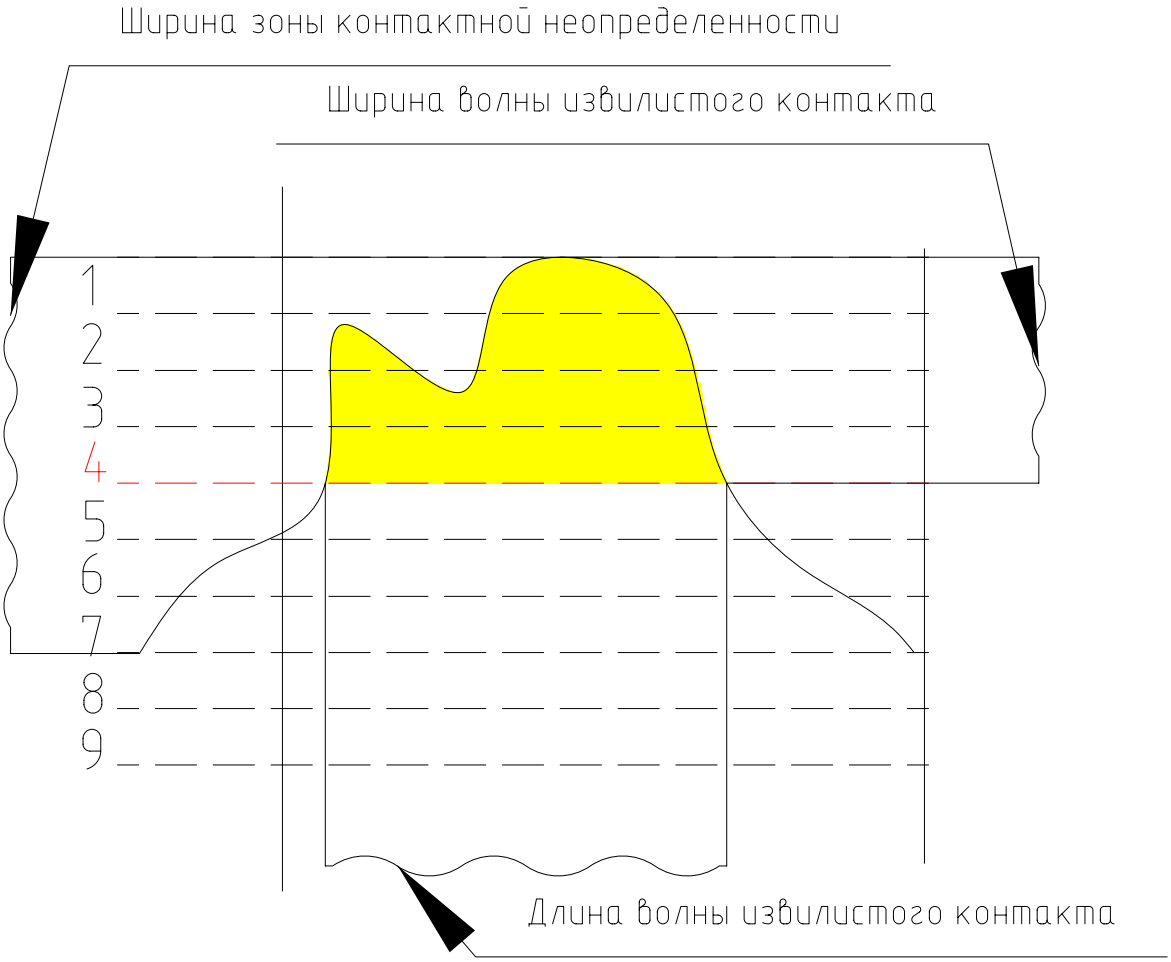

Рисунок 4– Положение контура выемочной камеры в пределах зоны контактной. Красная штрих-пунктирная линия – расчетный контур выемочной камеры Черные штрих-пунктирные линии – вероятные контуры выемочной камеры

Определив экономически эффективное соотношение площадей потерь и разубоживания, выведем формулы расчет численного значения потерь и разубоживания руды:

$$S_{\text{потерь}} = \frac{\left(\mu K * \frac{t}{2}\right) * (x_1 * L) + \frac{t}{4\pi} * sinx_1 * \frac{2\pi}{L}}{t * L} * M_{\text{общ}},$$

$$S_{\text{разуб}} = \frac{x_2\left(\mu K * \frac{t}{2}\right) + \frac{t}{4\pi} * sinx_2 * \frac{2\pi}{L}}{t * L} * M_{\text{общ}},$$

где x_1, x_2 - точки пересечения кривой контакта с границей выработки (рисунок 3);

L – амплитуда контакта, м;

t – ширина зоны контактной неопределенности, м;

μK – эффективное соотношение площадей потерь и разубоживания;

$M_{общ}$ – совокупная длина распространения участков потерь по проекциям камеры, м.

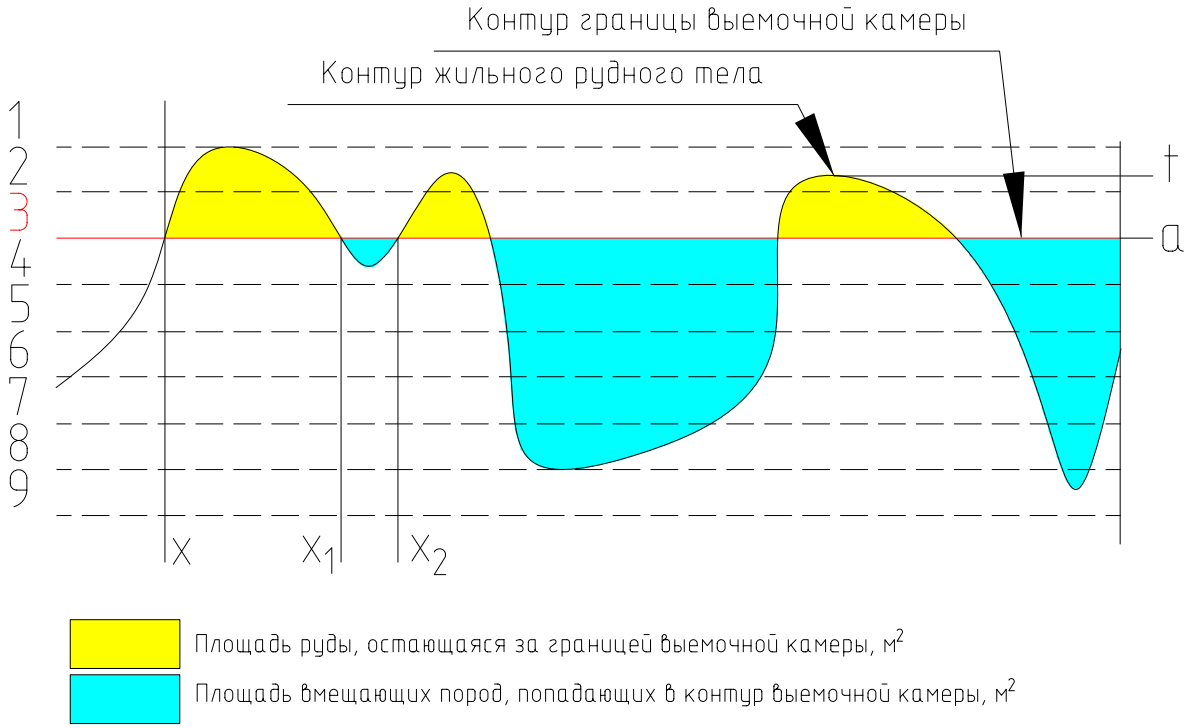

Рисунок 5 – Иллюстрация извилистого характера контактов «руда-порода». Точки X, X_1, X_2 обозначают точки пересечения границы контакта с границей выемочной камеры, t – ширина зоны контактной неопределенности, a – положение контура выемочной камеры

Объем теряемой руды и объем разубоживания в данном случае можно представить в следующем виде:

$$V_{\text{потерь}} = S_{\text{потерь}} * \mu K,$$

$$V_{\text{разуб}} = S_{\text{разуб}} * (1 - \mu K).$$

Горный риск для каждого из возможных вариантов положения выемочной камеры определяется исходя из технико-экономической оценки целесообразно добычи запасов и представлен на рисунке 6.

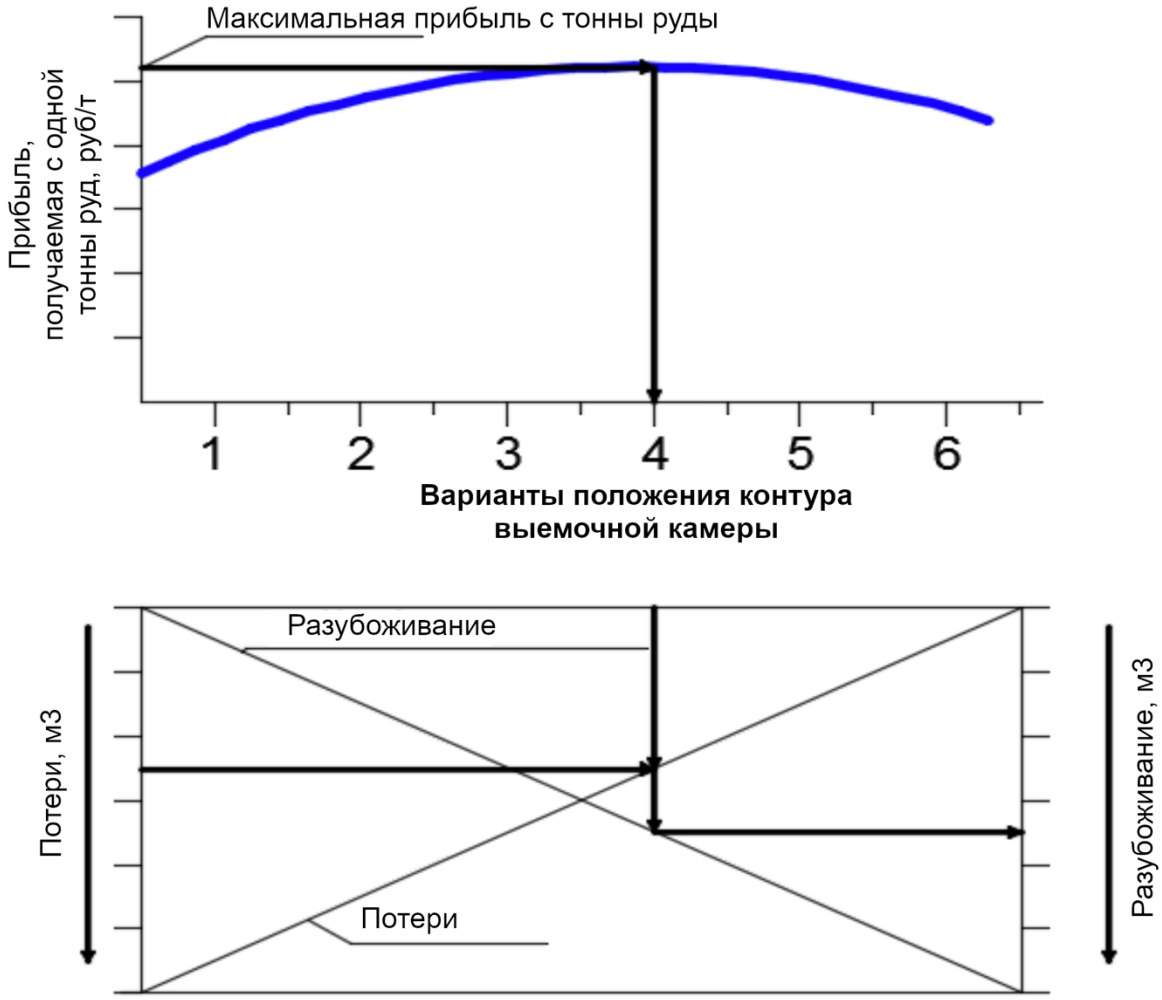

Рисунок 6 – Уровни потерь и разубоживания для экономически эффективного положения выемочной камеры (по С. А. Вохмину)

Таким образом, проанализировав количественно-качественные показатели отработки приконтурной части рудного тела в зависимости от границ расположения выемочной камеры и характера зоны контактной неопределенности (амплитуды контакта, ширины контакта, точек пересечения геологического контакта с очистным пространством выемочной камеры), доказывается, что площади и объем участков потерь и разубоживания различаются в каждом из вариантов, тем самым влияя на эффективность горных работ.

Дополнительно проведенное визуальное обследование отработанных выемочных камер выявило значительные участки вывалов и отслаивания вмещающих пород висячего бока и с бортов, тем самым формируя вторичное

разубоживание. Площадь и мощность обнаруженных вывалов и отслаиваний не взаимосвязаны (коэффициент корреляции составил 0,35), а сами вывалы зависят от прочностных свойств массива и приурочены к зонам разломам и системам трещин (рис. 7). Характерной особенностью вывалов является их преимущественная локализация на кровле выемочных камер.

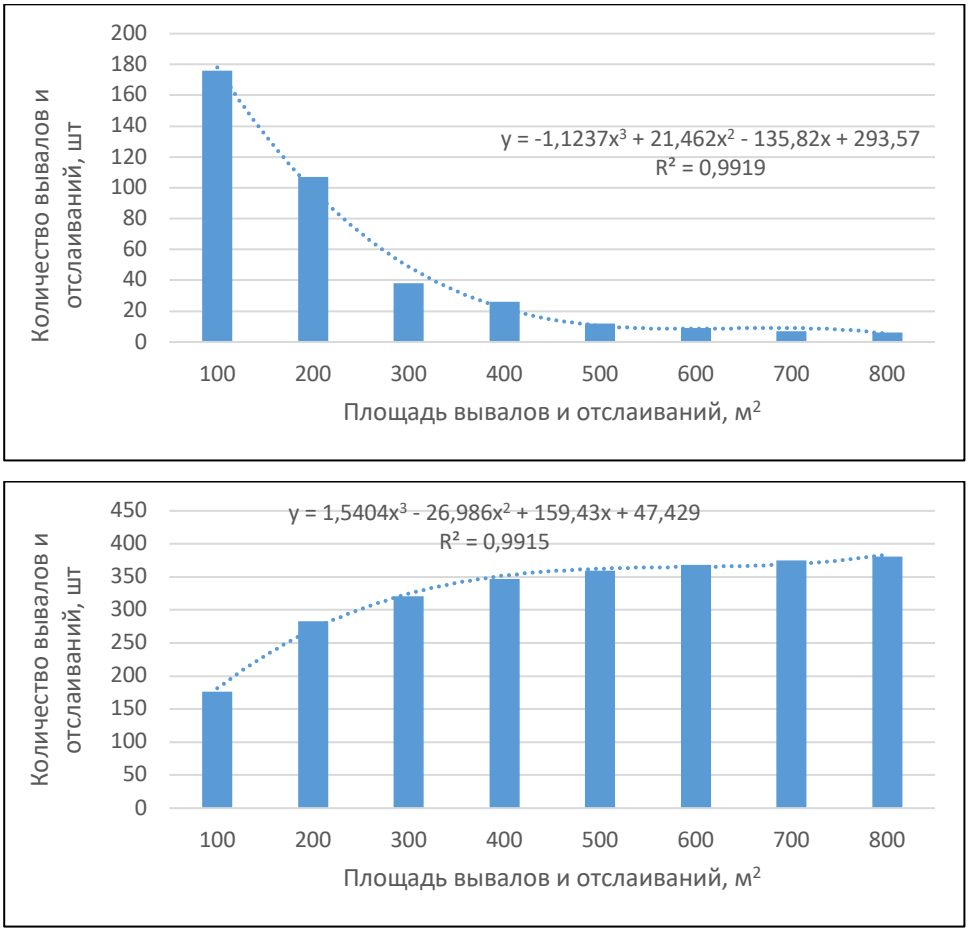

Рисунок 7 – Распределение количества вывалов и отслаиваний в зависимости от их площади (а); кумулятивная кривая (б)

Согласно проведенным натурным исследованиям и анализу предыдущих исследований по данной проблеме, сформированы основные причины формирования потерь и разубоживания.

Согласно проведенным исследованиям, потери формируются из:

– зон не отбитой руды на границах выемочной камеры и удаленных от границ камеры минерализованных участков;

– не отбитой руды на участках зон контактной неопределенности при сложном характере контактов;

– отбитой руды, оставляемой на почве выемочной камеры и участках выпуска, формирующую предохранительную подушку с целью безопасного производства горных работ и защиты от горных ударов при высоком напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива;

– ошибочной классификации руды как вмещающей породы вследствие сложного морфологического строения рудного тела и недостатка геологоразведочной информации.

Аналогично потерям, разубоживание формируется за счет следующих факторов:

– из-за участков с породными прослойками между рудных тел;

– прирезки пустой породы на участках зон контактной неопределенности при сложном – «извилистом» (синусоидальном) – характере контактов «руда-порода»;

– вывала и отслоения вмещающей породы в контур выемочной камеры преимущественно с кровли выработанного пространства;

– формирование вывалов зависит преимущественно от состава слагающих горный массив пород, проявлением горного давления и природной трещиноватости массива.

Следует отметить, что предложенный подход по организации сетей сопроводительной разведки повысил достоверность определения морфологии и мощности рудных тел, количество и мощность выявляемых породных прослоек между ними, на основании чего вносятся корректировки в положение выемочной камеры в массиве и ее параметры.

Так устойчивость и вторичное разубоживание при отработке выемочных камер зависит от прочностных свойств массива и локализации разломов и систем трещин, требуется определить такие параметры выемочных камер, при которых влияние вторичного разубоживание минимально. Для этого необходимо произвести исследования физико-механических свойств породного массива и провести анализ систем трещин.

Физико-механические свойства пород определялись при лабораторных испытаниях, прочностные свойства пород, слагающих массив определялись на основании критерия Хука-Брауна. Также, в процессе работы были определены рейтинговые показатели пород в массиве, такие как GSI – Geological Strength Index – индекс геологической прочности, критерий, позволяющий численно выразить устойчивость и прочность массива в зависимости от слагающих пород и геологических нарушений; RQD – Rock Quality Designation – индекс качества породы, разработанный Диром (Deer D. U.) в 1963 году и получивший широкое распространение в научной среде; FF – показатель частоты трещин на метр, разработанный S. D. Priest & J. A. Hudson в 1976 г.

В ходе оценки результатам кернового бурения, было установоено, что зависимость между показателями RQD и FF для конкретного случая выражается по формуле:

$$RQD = 100 * e^{-0{,}1*FF} * (0{,}1 * FF + 1).$$

Из этой формулы можно выделить два предела достоверности, которые следует использовать для определения и оценки показателя RQD в зависимости от развитости трещин FF. Значения, отклоняющиеся от области достоверности более чем на 10%, следует рассматривать как сомнительные и подвергать повторной проверке. Нижний (_lower) и верхний (_upper) пределы достоверности рассчитываются по формулам:

$$RQD_{lower} = 60 * e^{-0{,}1*FF} * (0{,}1 * FF + 1).$$

$$RQD_{upper} = 130 * e^{-0{,}1*FF} * (0{,}1 * FF + 1)$$

Следующим шагом для формирования литологической таблицы с рейтинговыми показателями прочностных свойств массива является определение НДС массива на горизонте ведения работ. Для определения НДС принят метод гидравлического разрыва пласта, как наиболее достоверный из натурных измерений.

Итоговые напряжения, действующие в горном массиве на экспериментальном добычном участке на горизонте +420 (±22,7 м)

определялись по данным скважины MG_360_HYDR_1 и MG_360_HYDR_2. Рассчитаны следующие значения вертикального напряжения $\sigma_z = 13{,}43 \pm 1{,}7$ МПа, минимальные горизонтальные напряжения $\sigma_{H_{min}} = 9{,}7 \pm 0{,}6$ МПа, максимальные горизонтальные напряжения $\sigma_{H_{max}} = 10{,}9 \pm 2{,}1$ МПа.

Проведя все испытания, получаем исчерпывающие данные, позволяющие определить такие параметры выемочных камер, при которых влияние вторично разубоживание минимально. Кроме этого, используя данные по литологическому строению, прочностных свойствах массива и положению систем трещин, разломов и иных дизъюнктивных нарушений, возможно уменьшить ширину забоя и выемочной камеры, тем самым снизив разубоживание из-за уменьшения прирезки породы внутрь камеры.

Определим параметры выемочных камер на основании модифицированного метода Мэтьюза (K. E. Mathews), при котором рассчитывается показатель устойчивости N, характеризующий способность горного массива оставаться в устойчивом состоянии при данном НДС, а также определить ориентацию очистного пространства на основании анализа систем трещин и произведем расчет гидравлического радиуса забоя. На основании показателя устойчивости N и гидравлического радиуса забоя, графические определим параметры выемочных камер, при которых массив стабилен или нуждается в укреплении. Результат расчета представлен ниже в таблице.

Далее на основании моделирования НДС массива в призабойном пространстве по методу конечных элементов определим рациональные параметры ширины забоя. Проведя моделирование различных конфигураций забоя, наименьшие параметры забоя при условии сохранения возможности работы горной техники составили 2,65 м (2,25 м + 0,4 м прирезки), высота 3,2 м.

Последовательно достоверно установив истинную морфологию рудного тела и определив прочностные свойства и НДС массива, становится возможным подобрать такие параметры выемочный камер, при которых

излишняя прирезка в очистное пространство минимальна, тем самым снизив фактические показатели разубоживания на 5-10%. Показатели потерь, по итогу отработки, удалось снизить на 1-2% за счет обнаружения не установленных на первом этапе эксплуатационной и детальной разведок зон промышленного оруденения и маломощных рудных тел, что в совокупности значительно улучшается показатели работы и рентабельность предприятия.

Таблица – Расчет гидравлического радиуса для выемочной камеры (HR)

Параметры камеры	Длина (м)									
Высота (м)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
12	2,72	3,33	3,75	4,05	4,29	4,47	4,61	4,74	4,84	4,93
24	3,53	4,62	5,45	6,12	6,67	7,12	7,50	7,83	8,11	8,35
36	3,91	5,29	6,43	7,38	8,18	8,87	9,47	10,00	10,47	10,88
48	4,14	5,71	7,06	8,22	9,23	10,12	10,91	11,61	12,24	12,82
60	4,29	6,00	7,50	8,82	10,00	11,05	12,00	12,86	13,64	14,35
72	4,39	6,21	7,83	9,28	10,59	11,78	12,86	13,85	14,75	15,59

	Массив стабилен без торкретирования и укрепления
	Требуется торкретирование набрызг-бетоном в зонах повышенной трещиноватости
	Требуется торкретирование и укрепление тросовыми анкерами и арматурной сетью
	Вышеуказанные меры с дополнительным полимерным заполнением зон дробления
	Требуется капитальное укрепление. Отработке сопутствуют высокие П и Р

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований приведено решение актуальной научной задачи минимизации потерь и разубоживания при разработке жильных месторождений со сложным морфологическим строением, имеющей важное значение для повышения эффективности добычи рудных полезных ископаемых подземным способом.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Произведен обзор и анализ наиболее распространенных методов и методик снижения потерь и разубоживания при разработке сложноструктурных маломощных месторождений.
2. На основании дифференцированного подхода по организации сетей скважин сопроводительной геологоразведки и анализа ошибки геометризации определена рациональная конфигурация сети скважин сопроводительной разведки при разработке жильных месторождений со сложным морфологическим строением.
3. Установлено, что учет параметров зон контактной неопределенности при моделировании рудного тела с синусоидальными контактами «руда-порода» позволяет произвести наиболее точный расчет плановых показателей потерь и разубоживания в камере.
4. В зависимости от состава слагающих горный массив пород, их прочностных свойств и максимально допустимых горизонтальных и вертикальных напряжений установлены рациональные параметры выемочной камеры и забоя, что позволяет минимизировать или исключить эффект вторичного разубоживания.
5. Для верификации метода была проведена отработка экспериментального эксплуатационного блока. Сгущение сетей скважин сопроводительной разведки позволило обнаружить зоны промышленной минерализации, с высокой долей достоверности установить морфологию и мощность

рудного тела на всей протяженности эксплуатационного блока, тем самым позволив расположить выемочные камеры таким образом, при котором достигаются наилучшие качественно-количественные показатели и повышается безопасность ведения горных работ.

6. Разработанный метод по минимизации потерь и разубоживания полезного ископаемого внедрен и успешно апробирован на предприятиях, разрабатывающих маломощные жильные месторождения сложного морфологического строения, что подтверждается соответствующей справкой.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Лялин Н. А., Абрамян Г. О. Моделирование маломощных жильных рудных тел сложного морфологического строения с использованием последовательного гауссовского моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № S5. С. 3–17.
2. Лялин Н. А., Беспалова Ю. А. Оценка потерь и разубоживания руды при комбинированной системе разработки подземным способом месторождений со сложным морфологическим строением. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № S3-2. С.3-12;
3. Лялин Н. А. Оценка потерь и разубоживания при разработке маломощных жильных залежей с применением систем с магазинированием руды // Маркшейдерский вестник. 2023. №1 (149). С. 33–39