

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук**

На правах рукописи



РЫЖОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ
ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ МОЩНОСТЕЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ
И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ
ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ
ЭТАПАХ РАЗВИТИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

**Специальность
25.00.21 – «Теоретические основы проектирования горнотехнических
систем»**

**Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель
профессор, доктор технических наук
Рыльникова Марина Владимировна**

Москва-2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. АНАЛИЗ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ РЕЖИМА РАЗВИТИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ.....	10
1.1. Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений республики Саха (Якутия)	10
1.2. Нормативно-правовые требования к обоснованию производственной мощности горнодобывающего предприятия и выбору режима развития горных работ	18
1.3. Принципы обоснования производственной мощности карьера и режима развития горных работ	20
1.4. Научно-методические подходы к обоснованию производственной мощности карьера по руде, вскрыше и горной массе на различных этапах горных работ	31
1.5. Цель, задачи и методы исследования	43
2. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	48
2.1. Основные характеристики соотношения производительности комплексов добычи и переработки руд при открытом способе добычи и факторы ее определяющие	48
2.2. Закономерности изменения технико-экономических и финансовых показателей горнодобывающего предприятия в ходе развития горных работ при различном режиме.....	52
2.3. Выбор критерия оптимизации режима развития горных работ и соотношения производственной мощности карьера и перерабатывающего производства.....	54
2.4. Оценка распределения содержания ценных компонентов в руде месторождения	70
2.5. Построение производственно-финансовой модели функционирования золотодобывающего предприятия при различных режимах развития горных работ в карьере	72
Выводы по 2 главе.....	75
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА СООТНОШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДОБЫЧНОГО И	

ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ЗОЛОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ	77
3.1. Исследование зависимости однородности распределения золота в руде месторождения на структуру производственной мощности золотодобывающего предприятия	77
3.2. Установление влияния закономерностей распределения ценных компонентов в массиве месторождения на структуру производственной мощности золотодобывающего предприятия.....	89
3.3. Исследование процессов переработки руд месторождения Рябиновое.	103
3.4. Влияние глубины разработки на структуру производственной мощности.....	111
3.5. Алгоритм выбора рационального соотношения производительности комплексов добычи и переработки руд в ходе развития работ в карьере .	116
Выводы по 3 главе.....	127
4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ ЗОЛОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ .	131
4.1. Обоснование оптимальной мощности участка «Надежда» Нижнеякокитского рудного поля.....	131
4.2. Обоснование режима развития горных работ на месторождения Рябиновое	139
4.3. Оценка экономической эффективности применения рекомендуемого метода оптимизации режима горных работ.....	149
Выводы по 4 главе.....	152
Заключение	155
Список использованной литературы.....	158

Введение

Одной из главных целей, лежащих в основе функционирования любого предприятия, является извлечение максимально возможной прибыли от производственной деятельности. Отрасль добычи полезных ископаемых в рамках данного тезиса также не является исключением. Перед запуском любого проекта по извлечению полезных ископаемых из недр горнодобывающее предприятие стремится определить оптимальную стратегию действий, последовательность операций, производительность и продолжительность всего процесса добычи и переработки руды – календарный график разработки месторождения.

Отрасль горной добычи во всем мире характеризуется свойством цикличности, которая обусловлена наличием временных интервалов между инвестированием перспективных проектов разработки месторождений и ростом предложений на рынке. По оценке одной из ведущих международных консалтинговых корпораций PricewaterhouseCoopers (PwC) спрос на продукцию горнодобывающих предприятий в ближайшие несколько лет должен сохранить незначительный рост, вслед за ростом мирового ВВП, увеличение которого по прогнозам, должно оставаться на уровне 4% в год [20].

Согласно данным ежегодной отчетности ведущих горнодобывающих компаний мира, наблюдается закономерная тенденция к снижению удельной себестоимости операционных затрат. Кроме того, в отчетностях передовых компаний регулярно отображаются результаты деятельности предприятий по оптимизации затрат, повышению эффективности процессов добычи и переработки руды, снижению простоев, а также принятию новых решений, осуществление которых приводит к росту денежных потоков. В связи с этим оптимизация процессов разработки месторождений является неотъемлемой составляющей функционирования горнодобывающих предприятий и носит непрерывный характер. Однако часто выявляется несовершенство существующих методов проектирования, которые не позволяют в полной мере реализовать возможности развития производительности карьера по полезным ископаемым и вскрыше, то есть установить их оптимальные значения на любой момент с учетом глубины разработки и времени. Это особенно важно при отработке круто-

падающих залежей сложного строения. Без решения этого вопроса невозможно определить максимальную мощность карьера по горной массе и сроки ее поддержания, а значит, нельзя выбрать масштабы предприятия на различных этапах развития горных работ. Поэтому совершенствование существующих и разработка новых принципов и методов проектирования карьеров, позволяющих обосновать рациональное соотношение производительности золотодобывающего карьера и перерабатывающих производств на различных этапах развития горных работ, является актуальной задачей горной науки и производства.

Целью работы является повышение эффективности и полноты освоения золоторудного месторождения на основе разработки методики оптимизации соотношения изменяющихся производственных мощностей горнодобывающих и перерабатывающих производств в едином горно-обогательном комплексе золотодобывающего предприятия.

Идея работы: достижение рациональной производительности мощностей горнодобывающих и перерабатывающих производств на различных этапах развития горных работ в едином горно-обогательном комплексе золотодобывающего предприятия обеспечивается на основе разработанной математической модели оптимизации соотношения производительности в циклах открытой добычи и переработки руд методами чанового и кучного выщелачивания, промежуточного складирования рудной массы во временных складах с варьированием бортового и среднего содержания золота в руде и перерабатываемой рудной массе.

Для достижения установленной цели были сформированы и впоследствии реализованы следующие **задачи**:

- анализ современного состояния и перспектив развития методов проектирования горнодобывающих предприятий с открытым способом разработки месторождений твердых полезных ископаемых;
- определение основных критериев и параметров, влияющих на выбор плана развития горных работ и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых;

- разработка производственно-финансовых моделей функционирования горнотехнических систем при освоении месторождений золотоносных руд открытым способом;
- обоснование стратегии освоения золоторудных месторождений Нижнеяко-китского рудного поля и Рябинового с максимальной экономической эффективностью.

Предметом исследования являются параметры горнотехнической системы открытой разработки коренных месторождений золота: производственная мощность и режим развития горных работ.

Объектом исследования являются горнотехнические системы золотодобычи на месторождениях Республики Саха (Якутия).

Научная новизна заключается в разработке нового подхода к проектированию устойчивого развития горнотехнических систем, основанного на определении в горном проекте диапазона динамично изменяющихся в ходе развития горных работ на месторождении базовых показателей: производственной мощности комплексов добычи, временного складирования и переработки руд и техногенного сырья, уровня кондиций на добываемые и перерабатываемые руды, бортового содержания ценных компонентов, варьирование которых в разработанной финансово-производственной модели функционирования горнотехнической системы позволяет выбрать оптимальный вариант.

Практическая значимость результатов состоит в реализации предложенного метода оптимизации соотношения производительности горнодобывающих и перерабатывающих производств, календарного графика развития горных работ и режима разработки золоторудных месторождений Нижнеяко-китского рудного поля и Рябинового. Результаты исследования могут также найти практическое применение на стадии стратегического планирования разработки иных месторождений твердых полезных ископаемых, не склонных к изменению технологических свойств руд при хранении.

Методологическая основа исследований: комплексный подход, включающий сбор, обобщение и анализ результатов научных исследований и практического опыта в области решения задач оптимизации объемов производства и построения календарного графика разработки месторождений от-

крытым способом, математическое моделирование, производственный эксперимент, математическую обработку результатов в сравнении показателями практики горных работ. В качестве основных методов исследований использовались: экономико-математический подход к построению производственно-финансовых моделей функционирования горнотехнической системы, статистическая обработка результатов, научное обобщение, технико-экономические расчеты с практическим подтверждением результатов при разработке золоторудных месторождений Нижнеякокитского рудного поля и Рябинового Алданского района Республики Саха (Якутия).

Защищаемые научно-практические положения:

1. В условиях ограничения перерабатывающих руду мощностей оптимизация соотношения производительности комплексов добычи и переработки золотоносных руд методами чанового и кучного выщелачивания со складированием бедных руд во временных складах должна производиться с учетом распределения содержания ценных компонентов в массиве по площади и глубине распространения запасов с дифференциацией в динамике разработки месторождения уровней кондиций на добываемые и перерабатываемые руды.

2. При выдержанном в массиве месторождения содержании золота в рудах, близком к среднему, объём добычи руды должен соответствовать производительности перерабатывающего производства. Если среднеквадратическое отклонение содержания золота от среднего значения превышает 0,04 г/т, следует оптимизировать соотношение объемов добычи и переработки руд с учетом распределения их качества в массиве с переработкой более богатых руд методами выщелачивания и временным размещением добытой рудной массы с низким содержанием ценных компонентов на специальных складах на поверхности для переработки в будущие периоды.

3. В случае уменьшения среднего содержания золота в руде по глубине в массиве месторождения, на начальном этапе его разработки производительность перерабатывающего комплекса должна соответствовать объему переработки рудной массы. Если содержание ценных компонентов в руде месторождения с глубиной растет, следует в планах развития горных работ на начальном этапе освоения месторождения предусмотреть повышенные темпы

понижения горных работ со складированием резервов бедных руд на поверхности в штабелях кучного выщелачивания или на временных рудных складах.

4. При предельной глубине карьера менее 200 м, соответствующей залеганию запасов месторождений Нижнеякобитского рудного поля и Рябинового, глубина карьера не оказывает значимого влияния на выбор производственной мощности горнодобывающего предприятия. Уменьшение производительности карьера на нижних горизонтах при сокращении фронта развития горных работ компенсируется подготовленными к переработке рудами в сформированных на поверхности техногенных образованиях.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций обеспечена применением современных методов анализа и моделирования, использованием апробированных методов и положений теории открытой геотехнологии, а также привлечением проектных и фактических материалов по предприятиям золоторудной промышленности, практическим подтверждением результатов при разработке золоторудных месторождений Нижнеякобитского рудного поля и Рябинового Алданского района Республики Саха (Якутия).

Апробация результатов. Основные идеи и принципы диссертационной работы докладывались на Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле», проводимой ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) (г. Москва, 2-5 апреля 2019 г.); практическом семинаре Центральной комиссии по разработке месторождений твердых полезных ископаемых (ЦКР-ТПИ Роснедр) «Проектирование разработки месторождений твердых полезных ископаемых с использованием наилучших доступных технологий – основа рационального и комплексного освоения недр» (г. Москва, 9-11 апреля 2019 г.); семинаре ЦКР-ТПИ Роснедр «Нормативно-методическое обеспечение проектирования разработки месторождений твердых полезных ископаемых в свете требований ЦКР-ТПИ Роснедр к проектной документации» (г. Москва, 29-31 октября 2019 г.); 4-й конференции Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, 16-20 ноября 2020 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Поли-

металлы. XXI век» (г. Пласт, 01-03 декабря 2020 г.); информационно-консультативном вебинаре АООН «НАЭН» по теме «Общие методические подходы к подготовке технических проектов разработки месторождений ТПИ (16-17 декабря 2020г.).

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в восьми научных работах, в том числе шесть статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Российской Федерации, получен патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключительных выводов и рекомендаций, списка использованной литературы, насчитывающего 117 наименований. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста, содержит 48 таблиц и 59 рисунков.

1. АНАЛИЗ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОБОСНОВАНИЮ РЕЖИМА РАЗВИТИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

1.1. Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений республики Саха (Якутия)

Золотосодержащие руды отличаются от других металлосодержащих руд тем, что в них содержание золота на несколько порядков меньше, чем других металлов, но ценность золота значительно превышает совокупную ценность всех попутных компонентов. Если в рудах черных металлов содержится железо от 10 до 40%, в рудах цветных металлов – свинец, цинк, медь и другие составляют 0,5-5%, а руды редких элементов – от 0,03 до 0,5%, то в золотосодержащих рудах содержание золота находится в среднем на уровне 0,0003-0,0005% [46].

Большинство золотых месторождений России находится в труднодоступных малонаселенных районах, где ощущается недостаток в энергетических, транспортных коммуникациях, инфраструктуре. Поэтому удельные затраты на промышленное освоение коренных месторождений примерно в 1,5-2 раза превышают адекватные на аналогичных по качеству руд месторождениях в других странах [43].

Оценивая состояние материально-сырьевой базы золота республики Саха (Якутия), следует отметить, что изменение категории запасов и прогнозных ресурсов жильных золоторудных месторождений происходит в условиях постоянного истощения богатых и легкодоступных к разработке руд. Вместе с тем, неуклонное развитие техники и технологий поиска, разведки, добычи и переработки руд в значительной мере компенсирует снижение качества вовлекаемого в разработку золотоносного сырья, обеспечивая прирост производства золота в стране [107].

Нижнеякобитское рудное поле (НЯРП), включающее в себя золоторудные месторождения «Надежда», «Верхнее», «Смежное» и другие, а также ряд рудопроявлений, находится в Алданском районе республики Саха (Якутия) (рис. 1.1) [98].

В связи с изменившимися экономическими условиями по сравнению с датой утверждения ТЭО постоянных разведочных кондиций в 2008 году были пересмотрены кондиции для НЯРП при бортовом содержании золота 0,3 г/т, при минимальной мощности рудного [109].

Месторождение Надежда находится в северо-восточной части Нижнеякобитского рудного поля. Месторождения золота Смежное-1 и Смежное-2 – две несколько отдаленные друг от друга части единого объекта, размещаются в пределах НЯРП в его центральной части. Месторождение Трассовое расположено в западной части НЯРП, в настоящее время находится на начальной стадии промышленного освоения. Принципиальная особенность месторождений НЯРП: богатые руды распространены ограничено.

По гранулометрическому составу резко преобладает пылевидное, тонкое и тонкодисперсное золото (табл.1.1).

Таблица 1.1 – Гранулометрический состав золота месторождений НЯРП

Месторождения	Гранулометрический состав золота, классы в мм		
	0,01-0,05	0,05-0,1	0,1-0,25
Надежда	74%	19%	7%
Смежное	83%	17%	-

Среднее содержание золота и серебра по участкам составило 1,23 г/т и 1,53 г/т, соответственно; извлечение золота и серебра в товарную продукцию 75,50% и 11,56%, соответственно (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Средние содержания металлов в руде и их извлечения за 2008-2015 гг.

Участок	Ср. содержание в руде товарной, г/т		Извлечение, %	
	золото	серебро	золото	серебро
Надежда	1,24	1,46	75,36	12,25
Смежное	1,25	1,42	75,37	10,87
Верхнее	1,16	2,08	76,58	9,11
Трассовое	1,04	1,46	75,32	5,83
Итого	1,23	1,53	75,50	11,56

Таким образом, в период с 2008 по 2016 гг. на ГРК «Нижнеякобитский» перерабатывалась руда участков «Надежда», «Смежное», «Трассовое» методом кучного выщелачивания (рис.1.2).

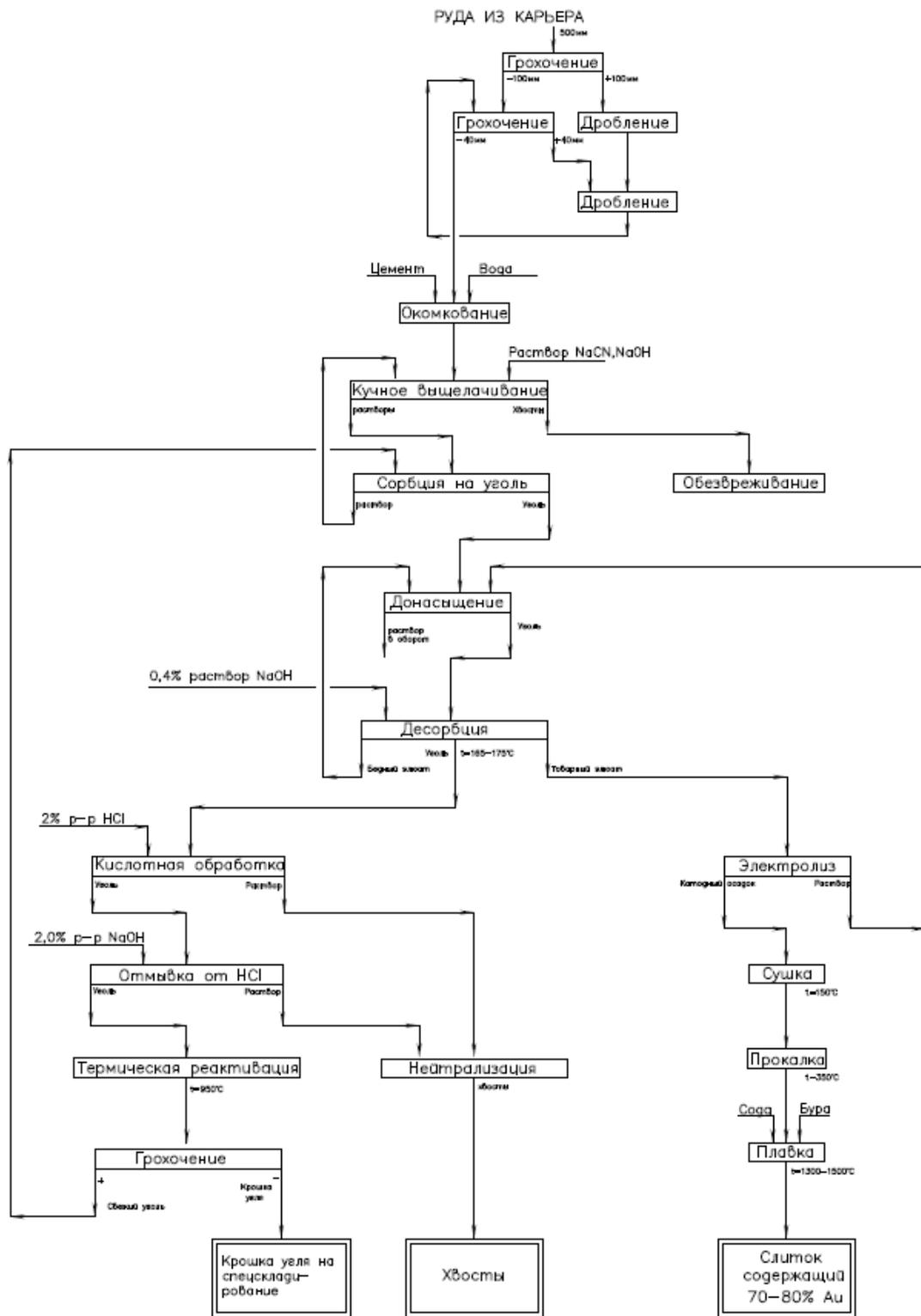


Рисунок 1.2 – Технологическая схема кучного выщелачивания руд Нижнекокитского рудного поля

Контур продуктивной залежи проведен по условному бортовому содержанию – 0,3 г/т. Для забалансовых запасов прирост руды составил 229,3% (количество руды практически возросло втрое), прирост металла 101,4% (табл. 1.3) [109].

Таблица 1.3 – Изменение запасов руды и металла (%) при снижении бортового содержания золота с 0,6 г/т до 0,3 г/т

Запасы по балансовой принадлежности	Изменения запасов в процентах по месторождениям						
	Надежда	Верхнее	Смежное-1	Смежное-2	Хвойное	Трассовое	В целом по НЯРП
1. Балансовые запасы (сумма по кат.С ₁ +С ₂)							
Руда	62,3	43,4	126,3	64,0	89,3	71,7	75,2
Золото	22,6	18,6	59,7	18,2	42,9	28,0	31,3
2. Забалансовые запасы (кат.С ₁ +С ₂)							
Руда	144,4	228,2	372,3	233,8	311,1	247,9	229,3
Золото	56,3	98,5	153,0	92,8	148,7	123,7	101,4
3. Запасы в целом по месторождению (кат.С ₁ +С ₂)							
Руда	89,4	78,3	194,8	126,9	107,3	117,2	106,3
Золото	32,6	29,3	80,4	40,7	50,5	47,9	43,6

Золоторудное месторождение Рябиновое также находится на территории Алданского муниципального района Республики Саха (Якутия) (рис. 1.1.). На участке выделено пять рудовмещающих залежей – Северная, Западная, Восточная, Южная и Центральная [50].

Северная залежь прослежена по простиранию на расстояние 600 м. Среднее содержание золота по рудным пересечениям в среднем составляет 1,74 г/т. Количество запасов, сосредоточенных в залежи, – около 22% от общих запасов золота по месторождению. Центральная залежь пластообразная. Ширина рудной залежи меняется по простиранию от 40 м в местах пережима до 260 м на северо-западном фланге. Центральная залежь характеризуется сравнительно высоким уровнем содержания золота по отношению к другим рудным залежам месторождения. Среднее содержание по залежи в целом – 3,90 г/т. Количество запасов, сосредоточенных в залежи, – около 11% от общих запасов золота по месторождению. Западная залежь залегает субсогласно положению лежащего бока дайки. Содержание золота по рудным пересечениям меняется от 0,86 до 10,6 г/т и в среднем для залежи составляет 2,51 г/т. Запасы Западной залежи составляют около 9% от общих запасов месторождения. Южная залежь располагается в 60–70 м к юго-западу от залежи Западная. Оруденение локализуется в щелочных сиенитах в экзоконтактовой зоне дайки, иногда примыкая непосредственно к щелочным базальтоидам. Залежь имеет удлиненную форму и прослежена по простиранию на 280 м, при ширине в среднем 50 м. Среднее содержание золота – 2,3 г/т. Средние содержания золота Восточной рудной залежи – 1,56 г/т.

На участке Новый находится одна залежь – золотоносный шток эпилейцитовых сиенитов. Рудная залежь прослежена на поверхности (+1040 м), на штольневом горизонте (+940 м) и ниже на глубину около 400 м. Среднее содержание золота в продуктивной части залежи Новая составляет 2,2 г/т при колебаниях по пересечениям от 0,87 до 17,75 г/т. В рудной залежи участка Новый сосредоточено 38% общих запасов месторождения.

Оконтуривание минерализованных зон (рудных залежей), из-за их прерывистого внутреннего строения, носит условный характер, поскольку оруденение не имеет четких геологических границ. Границы рудных интервалов внутри зон определяются только по данным опробования. Промышленные рудные скопления, разделенные некондиционными прослоями, сложно увязать между собой и геометризовать в единое рудное тело, в связи с чем они учитываются в обобщенных границах минерализованных зон (рудных залежей) статистически с применением коэффициента рудоносности. Коэффициент рудоносности – весьма изменчив и варьируется по отдельным блокам от 0,20 до 0,77, в среднем составляя 0,43.

Коэффициент вариации содержания золота составляет 82%. Длина отдельных рудных интервалов изменяется в очень широких пределах (от 0,7 до 170 м), составляя в среднем 14,7 м.

Месторождение Рябиновое, по особенностям строения и распределения золота относится к III группе сложности геологического строения. Для отвода поверхностных вод от территории отвалов и карьера предусмотрены нагорные водоотводные каналы. Руды, содержащие основные запасы золота месторождения Рябиновое, относятся к вкрапленному и прожилково-вкрапленному типу. Оруденение характеризуется бедными и рядовыми концентрациями основного полезного компонента, представленного мелко- и тонковкрапленной минерализацией золота в микроклинитах и серицитолитах, а также в микроклиновых и кварц-микроклиновых жилах, образующих минерализованные сульфидизированные зоны [50].

Из попутных ископаемых промышленный интерес может представлять только серебро в качестве попутного компонента при извлечении золота.

Физико-механические свойства основных пород Рябинового месторождения приведены в таблице 1.4 [50].

Таблица 1.4 – Физико-механические свойства пород Рябинового месторождения

Порода	Объемный вес, г/см ³	Предел прочности при сжатии, кг/см ³	Предел прочности при растяжении, кг/см ³	Сцепление в образце, т/м ²	Угол внутреннего трения, град
Серицитизированные сиениты	2,55	444	17,8	1320	34
Эруптивная брекчия щелочных базальтоидов	2,73	960	38,4	2900	36
Ортоклазиты	2,50	1053	116		
Эгириновые сиениты	2,58	577	22,9	1650	32,1
Шонкиниты	2,78	658	26,3	1790	34,0

Наличие зон ослабления в массиве связано с развитием экзогенной и, в меньшей степени, тектонической трещиноватости. Общий модуль трещиноватости – 2-7 ед./м, породы слабо- и среднетрещиноватые, слабовыветрелые, устойчивые и весьма устойчивые. Среднее значение объемной массы руды месторождения Рябиновое принято равным 2,53 г/см³. Влажность первичных руд и вмещающих пород – 0,8-1,9 %, смешанных руд – 2,0-2,2 %, окисленных руд – 2,8-3,1 %. Пористость горных пород изменяется от 5,0 до 10,3 %, максимальные значения характерны для окисленных разностей.

Крепость руды и породы по шкале проф. Протодьяконова составляет 14-16. В целом руду месторождения «Рябиновое» следует отнести к категории «довольно крепких пород». Породы, слагающие месторождение, характеризуются минимальной размокаемостью, высокой прочностью и малой деформируемостью. Категория пород по буримости XIV-XVI. Сведения о запасах представлены в табл. 1.5 [50].

Таблица 1.5 – Сводный подсчет промышленных запасов

Категория	Запасы руды, тыс. т	Содержание, г/т		Запасы, кг	
		Au	Ag	Au	Ag
C1	5713,2	2,17	4,31	12394,6	24625,2
C2	3800,2	1,99	4,21	7568,2	16002,7
C1+C2	9513,4	2,10	4,27	19962,8	40627,9

Обработка всех залежей на месторождении Рябиновое ведется одновременно четырьмя карьерами, начиная с четвертого года эксплуатации, по участку Мусковитовый: карьером Северный – Северной залежи; карьером Центральный – Центральной, Западной и Восточной; карьером Южный – Южной; по участку Новый – карьером Новый.

Принятая производительность карьеров по годам отработки представлена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Производительность карьеров на месторождении Рябиновое

Карьер	Производительность по годам, тыс.м ³ /год			
	1-й	2-й	3-й	4-й и последующие
Северный	–	180	280	300
Центральный	–	–	90	220
Южный	–	70	130	130
Новый	250	250	250	350
ИТОГО	250	500	750	1000

Данные расчета производственной мощности приведены в табл. 1.7 [50].

Таблица 1.7 – Производственная мощность карьеров на месторождении Рябиновое

Наименование показателя	Обозн.	Ед. изм.	Карьер			
			Северный	Центральный	Южный	Новый
Промышленные запасы руды	Z _п	тыс.т.	2642652	1493595	970363	2606892
Базовая среднегодовая скорость понижения добычных работ	h _б	м/год	17	17	17	17
Угол падения рудного тела (средний)	α	град.	62	67	66	90
Поправка к скорости понижения добычных работ	Δ _h	м/год	-1,8	-1,8	-1,8	-1,2
Среднегодовое понижение добычных работ	h _г	м/год	15,2	15,2	15,2	15,8
Глубина распространения запасов	H	м	100	80	120	120
Объемный вес руды в массиве	γ _р	т/м ³	2,53	2,53	2,53	2,53
Средняя площадь рудного тела	S _р	м ²	10445	7379	3196	8587
Потери	Π	доли ед.	0,051	0,035	0,034	0,032
Разубоживание	P	доли ед.	0,058	0,074	0,086	0,067
Расчетная мощность карьера по руде	A _р	тыс.т/год	405	296	130	356
Принятая мощность карьера по руде	A _п	тыс.т/год	300	220	130	350

К границам конечных контуров карьеров заезды подведены: к карьере Северный – с Запада к горизонту 800 м; к карьере Центральный – с Запада к горизонту 730 м; к карьере Южный – с запада к горизонтам 740 и 860 м; к карьере Новый – с Севера к горизонту 940 м, с Юго-Запада к горизонту 1040 м. Со второго года эксплуатации, транспортная связь с карьером Новый организуется через берму горизонта 860 м карьера Южный. Транспортная связь с промежуточными горизонтами осуществляется по временным автодорогам, прокладываемым по рельефу поверхности и по внутренним скользящим съездам.

Основные параметры горнотехнических систем при открытой разработке месторождения Рябиновое и других месторождений Нижнеякокитского рудного поля, производственная мощность и режим развития горных работ на карьерах определены в соответствии с действующими в Российской Федерации нормативными требованиями.

1.2. Нормативно-правовые требования к обоснованию производственной мощности горнодобывающего предприятия и выбору режима развития горных работ

С целью защиты интересов государства и граждан Российской Федерации Закон «О недрах» предусматривает рациональное освоение и охрану недр, что отражается в правовом регулировании недропользования. Основные нормативные акты, прямо или косвенно затрагивающие вопросы разработки стратегии и оптимизации календарного графика разработки месторождений, представлены в [52, 54, 73, 75, 81]:

Главенствующим сводом правил, регулирующим отношения, возникающие в области геологического изучения, эксплуатации недр, обеспечивающий их сохранность, принципы переработки добытых ресурсов и использования отходов переработки, является Закон РФ от 21.02.1992 N 2395-1 (ред. от 03.08.2018) "О недрах" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2019) [54]. Закон «О недрах» – прямой последователь законодательства Союза ССР и союзных республик о недрах и является своего рода наследием опыта рационального и наиболее полного освоения недр земли советской эпохи горной добычи полезных ископаемых.

Основной закон РФ в области добычи и переработки полезных ископаемых – Закон «О недрах», накладывает на недропользователя обязательства в выборе такой стратегии отработки запасов месторождения, которая способствует наиболее полному и рациональному освоению недр. Кроме того, настоящий закон предполагает отработку временно не пригодных продуктов добычи при помощи организации промежуточного складирования. Нормативный документ Правил охраны недр [75], утвержденный постановлением Госгортехнадзора России от 06.06.03 №71 и зарегистрированный Министерством юстиции РФ, в полной мере развивает идеи аналогичного свода правил, появившегося в советскую эпоху [52].

Правила охраны недр требуют от недропользователей принятия такой стратегии обработки запасов месторождения, которая обеспечивает наиболее полное извлечение полезных компонентов. Отдельное внимание в вышеупомянутых правилах уделяется организации складирования временно непригодного для переработки минерального сырья и мер предосторожности во избежание потерь полезных свойств в данном сырье [75].

Методические рекомендации [73] содержат перечень необходимых действий по подготовке, составлению и последующему применению технико-экономического обоснования (ТЭО) кондиций для месторождений твердых полезных ископаемых.

С целью стандартизации видов и требований к проектной документации, а также порядка и сроков её рассмотрения и согласования было создано Постановление Правительства РФ от 3 марта 2010 г. № 118 [81]. Для содействия реализации Постановления Правительства, а также «для обеспечения рационального и комплексного использования минерально-сырьевого потенциала твердых полезных ископаемых, содержащегося в недрах Российской Федерации» был выпущен Приказ Роснедр от 04.06.2010 № 569 (ред. от 17.09.2014) [82].

Создание Центральной комиссии по разработке месторождений твердых полезных ископаемых Федерального агентства по недропользованию (ЦКР-ТПИ Роснедр) обусловлено формированием перечня задач, которые также отражены в вышеупомянутом Приказе. Приказом Роснедр № 569 установлены права и обязанности ЦКР-ТПИ Роснедр, которые, прежде всего, касаются принятия решений по согласованию или отказу в согласовании проектной документации на разработку месторождений твердых полезных ископаемых.

Анализ Центральной комиссии по разработке месторождений твердых полезных ископаемых (ЦКР-ТПИ Роснедр), проведенный в 2007-2010 гг. на основе собственной сводной базы данных из более чем 400 различных горнодобывающих объектов, выявил отсутствие использования всех возможностей ресурсных потенциалов месторождений полезных ископаемых [110], что объясняется несовершенством методики обоснования производственной мощности горнодобывающего предприятия с учетом всех возможностей и вводимых ограничений на условия развития фронта горных работ.

1.3. Принципы обоснования производственной мощности карьера и режима развития горных работ

Начиная с тридцатых годов прошлого столетия, обоснование производительности карьеров посвящены работы И.А. Кузнецова, Е.П. Звягина, П.И. Городецкого. И.А. Кузнецов в 1932 г. рассматривает производительность карьера [67], как заданную с учетом спроса потребителя, определяемую по горнотехническим факторам и экономическим условиям.

Емкость ковша экскаватора определяется по выражению:

$$V_S = \frac{A_m \cdot t \cdot f_2}{60z \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot \sigma \cdot f_1 \cdot \gamma \cdot n_S \cdot N_S} \quad (1.1)$$

где V_S – емкость ковша экскаватора, м³; A_m – заданная производительность карьера, т/год; f_1 и f_2 – соответственно коэффициенты наполнения ковша и разрыхления пород; t – время цикла экскаватора, мин.; z – число рабочих дней в году; z_1 – число рабочих смен в сутки; z_2 – число рабочих часов в смену; σ – коэффициент использования рабочего времени для производства черпания; γ – объемный вес породы в целике, т/м³; n_S – число рабочих уступов; N_S – число рабочих экскаваторов на уступе.

Решая (1.1) относительно A_m для V_{Smax} , n_{Smax} и N_{Smax} , получим выражение:

$$A_m = \frac{60z \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot \sigma \cdot f_1 \cdot V_{Smax} \cdot n_{Smax} \cdot N_{Smax}}{t \cdot f_2}, \quad (1.2)$$

которое будет определять производительность по горнотехническим условиям.

Автор предлагает определение оптимальной производительности:

$$A_x = \frac{K_1 \cdot T_m - Q_{min} + K_2 \cdot A_{min}}{2K_2}, \quad (1.3)$$

где K_1 – коэффициент снижения себестоимости 1 т полезного ископаемого с расчетом производительности карьера; K_2 – коэффициент изменения капитальных затрат в зависимости от производительности карьера; A_{min} – нижняя граница изменения производительности карьера, млн.т/год; Q_{min} – удельные капитальные затраты при производительности карьера A_{min} руб./т; T_m – запасы полезного ископаемого, млн.т.

В 1950-1960 годах советскими учёными был выпущен ряд фундаментальных работ, базовые принципы которых легли в основу крупнейших иссле-

дований в области повышения эффективности освоения недр во второй половине XX – начале XXI вв. Особый вклад в развитие мировой отрасли добычи полезных ископаемых внесли выдающиеся советские учёные и специалисты, горные инженеры, профессора, доктора наук М.И. Агошков, П.И. Городецкий, В.В. Ржевский, А.И. Арсентьев, Е.Ф. Шешко, В.С. Хохряков, Н.В. Мельников, Ю.И. Анистратов, В.М. Бусырев и др.

Академик М.И. Агошков в 1948 году [30] предложил зависимость для определения ориентировочного значения производительности рудника при разработке крутопадающих залежей с учетом потерь и разубоживания руды:

$$A_p = h_0 S \frac{1-\eta}{1-\rho}, \text{ м}^3/\text{год} , \quad (1.4)$$

где h_0 – скорость понижения добычных работ, м/год; S – площадь полезного ископаемого в геологических контурах в пределах карьера, м^2 ; η – коэффициент потерь полезного ископаемого; ρ – коэффициент объемного разубоживания.

Е.П. Звягинцев в 1948 году [55] предложил устанавливать производственную мощность карьера по фактору наличия фронта работ с учетом: пропускной способности внутрикарьерного транспорта; мощности дробильно-сортировочной фабрики; пропускной способности внешних подъездных путей:

$$M_m = \frac{l_p}{P} Q_{\text{год}} q W, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (1.5)$$

где l_p – длина фронт горных работ, м; P – длина рабочего участка на один экскаватор, м; $Q_{\text{год}}$ – годовая производительность экскаватора на 1 м^3 емкости ковша, т/м³; q – емкость ковша экскаватора, м³; W – коэффициент выхода товарной продукции из горной массы на дробильно-сортировочной фабрике.

П.И. Городецкий в 1949 году [51] в качестве основных факторов, влияющих на производительность горного предприятия, выделил запасы месторождения, их качество, сроки освоения, степень разведанности и перспективы увеличения запасов. Производственная мощность по проф. П.И. Городецкому:

$$A = \frac{P_1 t_1 T_1 N_1}{1 + \frac{\rho}{100}}, \text{ т/год} \quad (1.6)$$

где P_1 – сменная производительность экскаватора или забоя по руде; t_1 – число смен в сутки; T_1 – число рабочих дней в году; N_1 – число забоев, обеспечивающих производительность с учетом резерва; ρ – процент резервных забоев.

С 1956 года большое внимание совершенствованию и разработке новых методов обоснования рациональных режимов развития горных работ уделено в трудах проф. А.И. Арсентьева [33-42]. В результате анализа соотношений извлеченных геологических запасов и экономических показателей освоения месторождений по ряду карьеров А.И. Арсентьев и Л.В. Левин [69] пришли к выводу, что при установлении производительности карьера необходимо учитывать достоверность запасов:

$$A_p \leq A_m(1 - \Delta), \text{ т/год}, \quad (1.7)$$

где A_m – достигаемая производительность карьера на данном этапе, м³/год; A_p – принимаемая производительность, м³/год; Δ – средневзвешенная ошибка подсчета запасов:

$$\Delta = K_1a + K_2b + K_3c, \quad (1.8)$$

где K_1, K_2, K_3 – отношения объемов запасов данной категории к общим запасам вынудой в данный момент руды в долях единицы; a, b, c – допустимые ошибки подсчета запасов категорий А, В, С в добываемой (в данный период) руде.

Согласно проф. А.И.Арсентьеву, после подсчета объемов руды, извлекаемых за период подготовки отдельного горизонта определяется производительность карьера. Производительность по горной массе определяется величиной усредненного эксплуатационного коэффициента вскрыши:

$$A_{гм} = A_p(1+n), \text{ м}^3/\text{год}, \quad (1.8)$$

где A_p – производительность карьера по полезному ископаемому, м³/год; n – усредненный эксплуатационный коэффициент вскрыши, получаемый с помощью графика $V=f(P)$, м³/м³.

Решению ключевых вопросов с учетом отличительных особенностей открытой разработки месторождений была посвящена большая часть научно-исследовательской деятельности академика АН СССР В.В. Ржевского. Одним из главных достижений В.В. Ржевского в 1956 году была опубликованная книга «Проектирование контуров карьеров», в которой была изложена расширенная интерпретация геометрического метода анализа карьера в совокупности с экономическим обоснованием результатов анализа [86]. Разработанный геометрический метод анализа контуров карьера был предназначен для решения ряда

практических задач, таких как определение граничных контуров карьера, формирование «графиков режима горных работ», построение календарных планов.

В.В. Ржевский одним из первых затронул вопрос комплексной разработки месторождений и извлечения некондиционных запасов. Отмечено, что пустые породы, извлекаемые из недр, могут быть отнесены к категории попутно добываемых полезных ископаемых. Реализация такого подхода, обоснованная В.В. Ржевским аналитическими расчетами, приводит к увеличению граничного коэффициента вскрыши, что, в свою очередь, способствует увеличению глубины карьера, а, значит, и более полному освоению недр.

Проектирование разработки месторождения подразумевает разбиение добываемой руды на блоки с определением минимального содержания полезных компонентов в блоке, выше значения которого руда считается кондиционной. При наличии в объемах вскрышных пород некондиционных запасов руд, переход к определению добываемых пустых пород в категорию попутно добываемых полезных ископаемых позволяет снизить кондиции на добываемую руду. Вся руда, с содержанием ниже минимального, складывается в отдельных отвалах бедных и убогих руд, и предусматривается возможность их переработки в будущем.

Таким образом, общее извлечение ценных компонентов из руды при открытой разработке месторождения:

$$U_0 = \sum Q \cdot \alpha_i \cdot \varepsilon_i + M \cdot \alpha_j \cdot \varepsilon_j, \quad (1.9)$$

где Q – запасы кондиционной руды, т; α_i – содержание i -того компонента в руде, дол.ед.; ε_i – извлечение ценных компонент, дол.ед.; M – извлеченные запасы некондиционных руд, т; α_j – содержание j -того компонента в некондиционной руде, дол.ед.; ε_j – извлечение ценных компонент из бедной руды, дол.ед.

Для определения в переработку бедная руда должна в общем случае обладать положительной рентабельностью. В некоторых случаях дополнительная выгода, получаемая от переработки кондиционных руд, может покрыть нулевую, даже отрицательную рентабельность переработки бедных руд, и тем самым повысить суммарное извлечение.

В конечном итоге, В.В. Ржевский пришел к выводу, что «вовлечение в переработку бедных руд увеличивает общий запас металла и позволяет повысить производительность предприятия по металлу». Данное решение особенно привлекательно для предприятий с ограниченным числом запасов и вытекающим из этого непродолжительным сроком эксплуатации, так как привлечение в переработку бедных руд улучшает технико-экономические показатели реализации подобного проекта.

Профессор Е.И. Васильев [47] пришел к выводу, что с ростом масштаба горных работ удельные затраты на их производство существенно снижаются. По Н.Т. Капустину [62] под рациональной производственной мощностью карьера следует понимать мощность, при которой достигается минимальная себестоимость добычи руды, полное использование горной и транспортной техники, максимальная эффективность капиталовложений и экономичность открытой добычи.

В трудах Л.А. Мизерницкого [74] и В.В. Зелинского [56] на основании сравнения темпов развития металлургической железорудной промышленности и анализа технико-экономических показателей функционирования действующих и проектируемых предприятий сделан вывод, что запроектированные и действующие мощности горно-обогатительных комбинатов явно недостаточны [56].

Профессор В.С. Хохряков [112, 113, 115] в своих исследованиях пришел к выводу, экономическое обоснование оптимальной мощности карьера сводится в основном к технико-экономической оценке режима горных работ.

Доктор О.В. Шпанский [116], анализируя распределения по времени и пространству объемов запасов, извлекаемых при необходимом подвигании уступов и максимальном извлечении руды, разработал метод стабилизации кривых, характеризующих эти распределения. Значения производительности карьера, отвечающие периодам наращивания производительности, стабилизации работы и затухания горных работ, предложены в качестве базовых для проектирования.

В трудах академика Н.В. Мельникова, профессоров Э.И. Реентовича, К.Е. Веницкого и В.С. Меньшова [49, 71, 84] установлен гиперболический ха-

рактен изменения себестоимости и удельных капитальных затрат от производственной мощности и линейная зависимость производительности труда от мощности разреза. Гиперболический вид зависимости указывает на снижение приведенных затрат с ростом производственной мощности. В этом случае решение задачи сводится в основном к установлению рационального режима вскрышных работ.

Сфера интересов ведущих отечественных учёных и специалистов второй половины XX – начала XXI вв. затрагивала проблемы сбалансированного недропользования [72], планирования процессов открытых горных работ [87], организации проектирования горных предприятий [31], производительности карьера при поэтапной разработке месторождения [35, 114]. Отдельного внимания заслуживает совместный труд А.И. Арсентьева и Г.А. Холоднякова [40], в котором собран накопленный опыт горнодобывающей промышленности по определению рационального режима развития горных работ и сформулировали основные принципы и методику построения календарного графика отработки запасов месторождений [40].

Календарный план горных работ является основополагающим документом, который определяет особенности, сроки и последовательность действий. На этапе принятия проектных решений календарный график составляется по возможности либо на весь период отработки месторождения, либо на срок 10...15 лет от начала эксплуатации. В дальнейшем на разных этапах разработки месторождения предусмотрено составление более детализированных календарных графиков на период от десятка недель до нескольких лет.

Основными исходными данными, необходимыми для построения календарного графика разработки месторождения, в работе [36] выступают: совокупность планов карьера по различным горизонтам с нанесёнными на них линиями фронта горных работ; таблицы с подсчитанными объемами горных работ и кумулятивный график зависимости нарастающего объёма вскрышных пород от нарастающего объёма руды по мере продвижения в глубину карьера; результаты определения производительности карьера; перечень необходимого оборудования с показателями норм его производительности.

Составление календарного графика разработки месторождения осуществляется на основании принципа достижения наибольшей экономической

эффективности отработки запасов месторождения при последовательном исследовании исходных данных:

- на первом этапе для формирования базы для дальнейших действий устанавливается правильная последовательность горных работ;
- далее проводится выравнивание производительности карьера для равномерного поддержания расчетного значения на протяжении всего периода отработки запасов месторождения. На данном этапе в отдельном порядке рассматривается целесообразность организации резервных складов руды для её последующей переработки на более поздних этапах добычи полезного ископаемого. Основное назначение таких складов заключается в накоплении избытков руды и компенсации недостатков объемов производства при отклонении от календарного графика;
- затем определяется общее потребное число экскаваторов, необходимое для разработки карьера по формуле:

$$N_э = \delta \cdot A \cdot \left(\frac{k_1}{Q_1} + \frac{k_2}{Q_2} + \dots + \frac{k_m}{Q_m} \right), \quad (1.10)$$

где δ – коэффициент, учитывающий долю траншейных работ по разработке месторождения; A – производительность карьера по горной массе, м³; k_1, k_2, \dots, k_m – коэффициенты выемки учитывающие разновидности горных пород; Q_1, Q_2, \dots, Q_m – средние годовые производительности экскаваторов для различных типов горных пород, м³.

Для принятой последовательности горных работ с учётом особенностей каждой конкретной местности проводится распределение необходимого числа экскаваторов по каждому горизонту;

- принимая во внимание производительность экскаваторов, вычерчивают календарный график разработки месторождения. По каждому горизонту указывают установленный объем работ по каждой категории в отдельности: для проходки траншей, по вскрышным работам с указанием количества задействованных экскаваторов;
- производят уточнение календарного графика работы карьера путем построения совмещенных планов для различных календарных сроков с учетом транспортных условий и размеров рабочих площадок. По данным сов-

мещенных планов определяют правильность установленных объемов работ и распределения соответствующего оборудования, при необходимости вносят корректировки по объемам работ и числу задействованных экскаваторов. Как правило, увеличение количества совмещенных планов определяет большую достоверность построения календарного графика.

Открытая разработка месторождения практически всегда, помимо добычи основного компонента сопровождается извлечением попутных полезных ископаемых [40]. Однако, определение производительности, объемов работ, а также построение календарного графика отработки запасов месторождения зачастую осуществляется исключительно по основному добываемому компоненту. Неравномерность добычи попутных полезных ископаемых месторождения во времени влечет за собой неравномерность функционирования перерабатывающего производства, что выражается в недогрузках и перегрузках мощностей в разные моменты времени и нестабильности качества добываемых полезных компонентов.

Достичь равномерного уровня производительности возможно за счет формирования специальных резервных складов. Складированная руда может быть выведена из резерва и отправлена на переработку в нужный момент времени для компенсации снижения показателей и стабилизации производства.

Профессор И.А. Ишкулова [58] рассматривает совместное определение максимально возможной производительности учетом возможностей формирования рабочей зоны с симметричным и асимметричным развитием. Это, по мнению автора, позволяет синхронизировать варианты развития карьера в глубину, что, в свою очередь, обеспечивает корректное составление календарных планов горных работ [37, 38].

Ю.Е. Капутиным [65] рассмотрены преимущества рудных складов, которые заключаются в возможности использования для усреднения свойств руды, положительно влияющих на извлечение компонентов при обогащении.

Доктор И.А. Пыталев [83] определил, что развитие научно-методических основ и методов определения производственной мощности карьера, области определения его предельных параметров условно можно разделить на основных стадии: разработка и усовершенствование методов, полученных при

построении промежуточных и конечных контуров карьера; определение методов оценки экономической эффективности и полноты освоения запасов месторождения.

Академик РАН К.Н. Трубецкой, член-корреспондент РАН Д.Р. Каплунов, профессор М.В. Рыльникова развили теоретические основы обоснования выбора стратегии практической реализации идей рационального и комплексного освоения минеральных ресурсов. К.Н. Трубецкой [101, 103], Д.Р. Каплунов и М.В. Рыльникова [28, 61, 94, 96] в своих исследованиях определили центральную роль комплексного освоения месторождений в концепции поиска пути наиболее эффективного и рационального освоения недр. Комплексное освоение представляет собой совокупность мер, требуемых реализации в проектных решениях разработки месторождений:

- наиболее полное извлечение всех содержащихся в недрах как основных, так и попутных полезных компонентов с последующим получением товарной продукции;
- использование вскрышных пород, некондиционных руд и отходов обогащения в рациональных хозяйственных и промышленных целях;
- сокращение масштабов образования отходов, переработку образовавшихся отходов с целью повышения экологичности производства;
- использование отработанных пространств после извлечения в рациональных хозяйственных целях.

Анализ исследований, направленных на определение производственной мощности карьера и режима развития горных работ, повышение интенсивности и эффективности их ведения с целенаправленным использованием технологического пространства горного отвода, систематизирован в табл.1.8.

В большинстве работ приоритетным методом решения задач проектирования карьера является технико-экономический анализ, представляющий собой совокупность методик количественной и качественной оценки факторов, параметров и показателей, определяющих конечный результат функционирования карьера и определяющих выбор методов проектирования, строительства и эксплуатации карьера и приоритетные объемы финансирования.

Таблица 1.8 – Систематизация направлений исследований по определению мощности карьера

Авторы	Направления научных исследований	Основные решения
И.А. Кузнецов, Е.П. Звягин, П.И. Городецкий	Определение производительности карьера по горнотехническим условиям [51, 55, 67].	В аналитических зависимостях учтены пропускная способность транспорта и мощность дробильно-сортировочной фабрики.
М.И. Агошков	Определение производительности рудника при разработке крутопадающих залежей [30].	Учтены потери и разубоживание руды.
П.Э. Зурков	Увязка во времени и пространстве развития вскрышных и добычных работ в карьере [57].	Установлены аналитические зависимости производительности от горнотехнических условий и расстановки экскаваторов на добычных горизонтах
А.И. Арсентьев Л.В. Левин	Исследование взаимосвязи производительности карьера с эксплуатационными затратами и капиталовложениями [33, 69].	Учтена достоверность запасов в аналитических зависимостях.
А.И. Арсентьев, Г.А. Холодняков, О.В. Шпанский	Методы определения рационального направления углубки карьеров и оптимизации порядка их отработки. Обоснование и развитие теории риска для определения главных параметров карьеров. [34, 35, 40-42, 116]. Проблемы сбалансированного недропользования, планирования процессов открытых горных работ, организации проектирования горных предприятий, производительности карьера при поэтапной отработке [31, 36, 72, 87, 114].	Сформулированы основные принципы и методика построения календарного графика отработки запасов месторождений. Рассмотрена целесообразность организации резервных складов добытой руды для её последующей переработки на более поздних этапах добычи полезного ископаемого. Основное назначение таких складов заключается в накоплении избытков добычи руды и компенсации недостатков объемов производства при отклонении от календарного графика.
Е.И.Васильев	Исследование возможного темпа углубки и подвигания фронта горных работ, пропускной способности капитальных траншей, срока службы карьера, спроса потребителей и себестоимости добычи [47].	Установлено, что с ростом масштаба горных работ удельные затраты на их производство снижаются, а максимально возможная производительность карьера по горнотехническим факторам является предпочтительной.
Н.Т. Капустин	Графоаналитический метод исследования рациональной производственной мощности карьера [62].	Аналитические зависимости мощности карьера от себестоимости продукции, капитальных вложений и эффективности открытой разработки.
Л.А. Мизерницкий В.В. Зелинский	Сравнение темпов развития металлургической и железорудной промышленности, анализ действующих и проектируемых комбинатов [56, 74].	Доказано, что проектируемые и действующие мощности горно-обогатительных комбинатов недостаточны ввиду неполного использования горно-геологических возможностей месторождений. Техничко-экономически обосновано расширение железорудных предприятий в 1,3-1,4 раза, что обеспечивает снижение удельных капитальных вложений на 14-16% и улучшает другие технико-экономические показатели.
Б.П. Юматов	Исследование влияния режима горных работ и качества руды на производительность карьера [117]	Предложено в качестве критерия выбора экономически целесообразной производительности карьера использовать общую условную прибыль за весь срок эксплуатации карьера

Продолжение Таблицы 1.8

Авторы	Направления научных исследований	Основные решения
В.В. Ржевский	Метод геометрического анализа, основанный на теории векторных приращений сложных топографических поверхностей. Комплексная разработка месторождений и извлечение некондиционных запасов [85, 86, 88, 89].	Определение граничных контуров карьера, формирование «графиков режима горных работ» по текущему коэффициенту вскрыши, построение календарных планов. Вовлечение в переработку бедных руд увеличивает объем извлекаемого металла и позволяет повысить производительность по металлу.
В.С. Хохряков	Исследования динамики основных технико-экономических показателей карьера [112, 113, 115]	Доказано, что наибольший экономический эффект достигается при производственной мощности, максимально возможной по горнотехническим факторам и условиям сбыта продукции. Экономическое обоснование оптимальной мощности карьера проводятся на основе технико-экономической оценки режима горных работ.
Н.В. Мельников, Э.И. Реентович, К.Е. Веницкий В.С. Меньшов	Установление математическими методами рациональных производственных мощностей группы карьеров, входящих в состав рудного района или бассейна [49, 70, 84]	Установлены качественные и количественные закономерности формирования себестоимости угля от удельных капитальных затрат, производительности труда и производственной мощности карьера в гиперболические зависимости изменения себестоимости и удельных капитальных затрат от производственной мощности карьера. Рациональная производственная мощность карьера определяется выбором рационального режима вскрышных работ.
И.А. Ишкулова	Решение задачи проектирования возможной по горнотехническим факторам производительности карьеров по полезному ископаемому и горной массе с учетом симметричного развития рабочей зоны карьера [58].	Предложена номограмма для определения протяженности добычного фронта развития горных работ в различных горно-геологических условиях карьера.
К.Н. Трубецкой, А.А. Пешков, Н.А.Мацко	Выделение выработанного пространства, как техногенного ресурса, классификация ресурсосберегающей геотехнологии [77, 104, 105]	Составлена классификация способов формирования и возможностей многофункционального использования выработанного пространства карьера. Развитие ресурсосберегающей геотехнологии
И.А. Пыталев	Анализ подходов и методов определения основных предельных параметров карьеров, отвалов и хвостохранилищ [83]	Предложен подход к определению параметров открытых горных работ, обеспечивающий реализацию экологически сбалансированной геотехнологии.
К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов М.В. Рыльникова	Решение проблем рационального и комплексного освоения недр с обеспечением устойчивого функционирования экологически сбалансированных горнотехнических систем [28, 61, 94-96, 101-103, 106].	Доказана необходимость организации замкнутого оборота минерального вещества в пределах горнотехнической системы при переходе к парадигме рационального техногенного преобразования недр в ходе их освоения.

1.4. Научно-методические подходы к обоснованию производственной мощности карьера по руде, вскрыше и горной массе на различных этапах горных работ

Неоднородность распределения содержания ценных компонентов обусловлена длительной и неравномерной физико-химической изменчивостью среды в процессе генезиса полезных ископаемых. Совершенствованию методов повышения экономической эффективности деятельности горнодобывающих предприятий в целом и оптимизации календарного графика разработки месторождения твердых полезных ископаемых посвящено много трудов известных ученых.

Большой вклад в теорию проектирования открытой разработки месторождений, и, в частности, в теорию и методологию определения производительности карьеров внесли академики АН СССР и РАН: М.И. Агошков, Н.В. Мельников, Н.Н. Мельников, В.В. Ржевский, К.Н. Трубецкой; член-корр. РАН: А.А. Пешков, В.Л. Яковлев; доктора технических наук: Ю.И. Анистратов, А.И. Арсентьев, П.И. Городецкий, Е.П. Звягин, П.Э. Зурков, В.В. Квитка, И.А. Кузнецов, С.П. Решетняк, С.И. Фомин, Г.А. Холодняков, В.С. Хохряков, Е.Ф. Шешко, О.В. Шпанский и другие. В 1950-1960 годах был выпущен ряд фундаментальных работ, базовые принципы которых легли в основу крупнейших исследований в области повышения эффективности освоения недр во второй половине XX – начале XXI вв. не только на территории нашей страны, но и за рубежом.

Работы советских ученых тесно переплетались с зарубежными исследованиями, а их более позднее развитие было связано с одним из научных трудов, объединившего теоретически и практический опыт предыдущих лет разных стран, – это работа 1977 г. канадского исследователя Х.К. Тейлора, который эмпирическим способом определил оптимальную зависимость между производительностью рудника и запасами месторождения твердых полезных ископаемых. Эмпирическое правило Тейлора получило широкое распространение и применение среди горнодобывающих предприятий по всему миру и привлекло внимание ведущих отраслевых исследовательских центров. Наибольший вклад в развитие правила Тейлора и исследование эмпирической зависимости между производительностью рудника и запасами месторождения внесли специалисты Горного бюро США (USGS) Г.М. МакШпаден, У. Шаап,

Д.А. Сингер, У.Д. Мензи, К.Р. Лонг. В результате была получена совокупность «правил Тейлора» для различных типов рудников и видов полезного компонента.

Еще одним знаковым событием в истории развития методов оптимизации разработки месторождений стал выход в 1988 г. книги Кеннета Ф. Лейна «Экономическая оценка руды: расчет бортового содержания в теории и на практике». Идеи, заложенные в теории Лейна, нашли свое отражение в работах многих последователей, в числе которых особо стоит отметить Б. Холла, Ж.М. Ренду, М.В.А. Асада. Их труды стали неотъемлемой частью различных программных обеспечений в сфере проектирования горных работ.

Другой знаковой вехой в истории развития методов оптимизации стало появление в 1984 г. программного обеспечения Whittle, основанного на алгоритме Лерча-Гроссмана. По мере развития информационных технологий и подходов к определению оптимальной стратегии разработки месторождений, программное обеспечение Whittle совершенствовалось и позволяло проводить оптимизацию по все большему числу влияющих факторов. Современная версия программного обеспечения Whittle является одним из мировых лидеров в сфере программного обеспечения автоматизированного определения оптимальной стратегии освоения месторождений.

Результаты анализа проб большого количества месторождений демонстрируют о наличии предпочтительного значения содержания полезного компонента в руде, встречающегося в пробах гораздо чаще по сравнению с другими значениями [80]. Внешний вид распределения содержания полезного компонента большого количества месторождений твердых полезных ископаемых, как правило, приближенно соответствует логнормальному закону распределения случайные величины, представленному на рис. 1.3.

Логнормальный характер распределения содержания ценных компонентов в массиве месторождения накладывает дополнительные условия. Точный анализ значений логнормального распределения требует применения элементов интегрального исчисления и усложняет цикла обработки данных.

В ходе развития опыта мировой горной добычи появлялись различные методики, позволяющие оценить оптимальную производительность рудника и, тем самым, составить наиболее эффективный график.

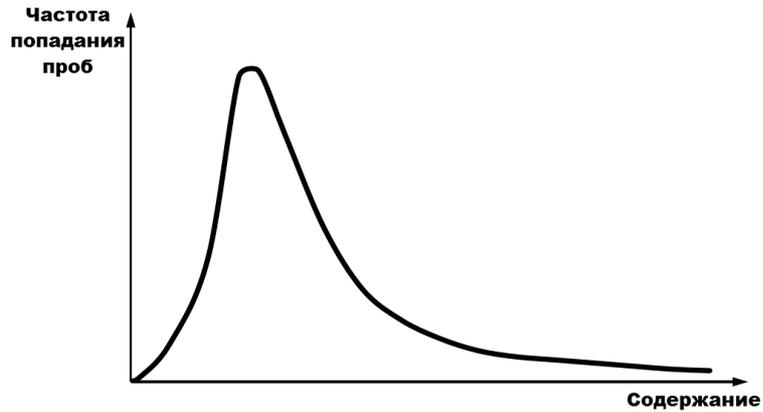


Рисунок 1.3 – Логнормальное распределение содержания полезного компонента в пробах руд месторождений

Наибольшее распространение и популярность получили правила Тейлора и Лейна – именно они легли в основу алгоритмов построения специализированного программного обеспечения.

Отличительной особенностью эмпирического правила, разработанного Х.К. Тейлором, является установление оптимальной производительности рудника в зависимости только от запасов руды. Существуют также и другие методики, в которых, в отличие от правила Тейлора, производительность является функцией, зависящей как от запасов руды, так и от прочих факторов: содержания компонента в руде, иных производственных и финансовых показателей.

В 1977 году Х.К. Тейлор вывел эмпирическую зависимость между оптимальной производительностью рудника и запасами месторождения [26]. Полученная зависимость была основана на анализе 30 реальных проектах и получила название «правило Тейлора». Основная идея правила в том, что наибольшая выгода разработки месторождения достигается тогда, когда установленная производительность рудника пропорциональна объему запасов в степени три четвертых (рис. 1.4). Согласно правилу Тейлора, оптимальная продолжительность разработки месторождения T (лет):

$$T = 0,2 \cdot \sqrt[4]{Q}, \quad (1.11)$$

где Q – запасы месторождения, тонн.

Предполагая, что в году 350 рабочих дней, правило Тейлора принимает вид [25]:

$$P = 0,0143 \cdot Q^{0,75}, \quad (1.12)$$

где P – производительность рудника, т/день.

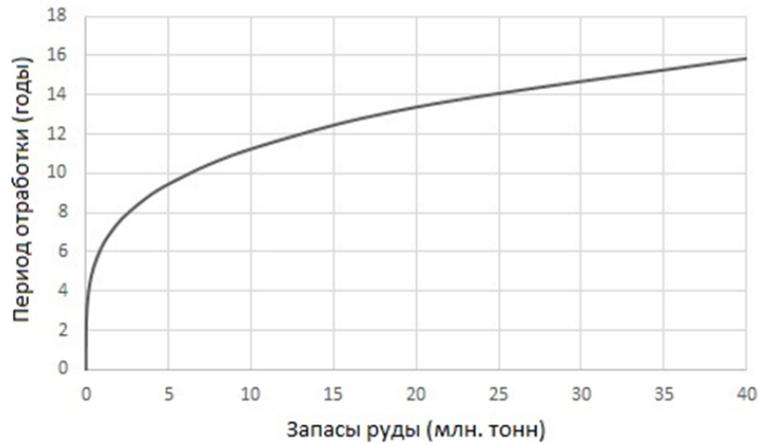


Рисунок 1.4 – Зависимость, лежащая в основе правила Тейлора

В дальнейшем правило Тейлора подвергалось неоднократным проверкам и уточнениям со стороны Горного бюро США (USBM), а также его приемника Геологической службой США (USGS) для большего и более современного набора данных. В 1984 году правило Тейлора было проверено Г.М. МакШпадден и У. Шаап на примере 45 открытых месторождений меди [17]. В результате было выяснено, что правило требует корректировки. Однако, данное решение было обусловлено более узким разнообразием типов месторождений, используемых в своей работе МакШпадден и Шаап, по сравнению с классическим выводом Тейлора.

Основу правила, разработанного К. Лейном, составляет определение бортового содержания полезного компонента в разрабатываемом объеме горной массы. Рудные тела с содержанием выше бортового значения, определенного по правилу Лейна, относятся в категорию экономически эффективных и пригодных для дальнейшей переработки и извлечения ценных компонентов. В дальнейшем самим Лейном, а также его многочисленными последователями методика определения бортового содержания была расширена и подвержена уточнению с принятием во внимание все большего числа факторов, влияющих на величину бортового содержания, в частности, на обоснование оптимальной стратегии разработки месторождения в целом.

В 1998 году правило Тейлора было пересмотрено специалистами USGS Д.А. Сингер, У.Д. Мензи и К.Р. Лонг, основываясь на исследованиях 41 золотых и серебряных рудников открытого типа [22]. Построенная ими модель показала, что для месторождений золота и серебра правило Тейлора должно быть откорректировано:

$$P = 0,416 \cdot Q^{0,5874} . \quad (1.13)$$

Та же группа ученых USGS адаптировала в 2000 году правило Тейлора для месторождений массивных сульфидных руд, разрабатываемых подземным способом [23]. Доказано, что правило Тейлора не приемлемо для подземной добычи и применимо преимущественно для открытой разработки. Для подземной разработки сульфидных руд уравнение приняло вид:

$$P = 0,0248 \cdot Q^{0,704} . \quad (1.14)$$

Д.А. Сингер и К.Р. Лонг в 2001 году дополнительно проверили правило Тейлора для 45 рудников открытого типа [15]. По результатам расчетов оказалось, что для месторождений металлов низкой ценности предпочтительны более низкие показатели производительности, по сравнению с месторождениями ценных руд (1.11):

$$P = 0,0236 \cdot Q^{0,74} . \quad (1.15)$$

Последнее и самое масштабное исследование соответствия правила Тейлора было проведено К.Р. Лонг в 2009 году [16]. Результаты исследований подтвердили значительные различия при оценке производительности открытых и подземных рудников, привели к возникновению двух уравнений: для подземных рудников:

$$P = 0,297 \cdot Q^{0,562} , \quad (1.16)$$

а для открытых рудников: $P = 0,123 \cdot Q^{0,649} . \quad (1.17)$

Таким образом, с момента возникновения правила Тейлора появилось несколько решений для различных типов рудников и видов добываемых полезных ископаемых, решение которых наглядно показаны на рис. 1.5.

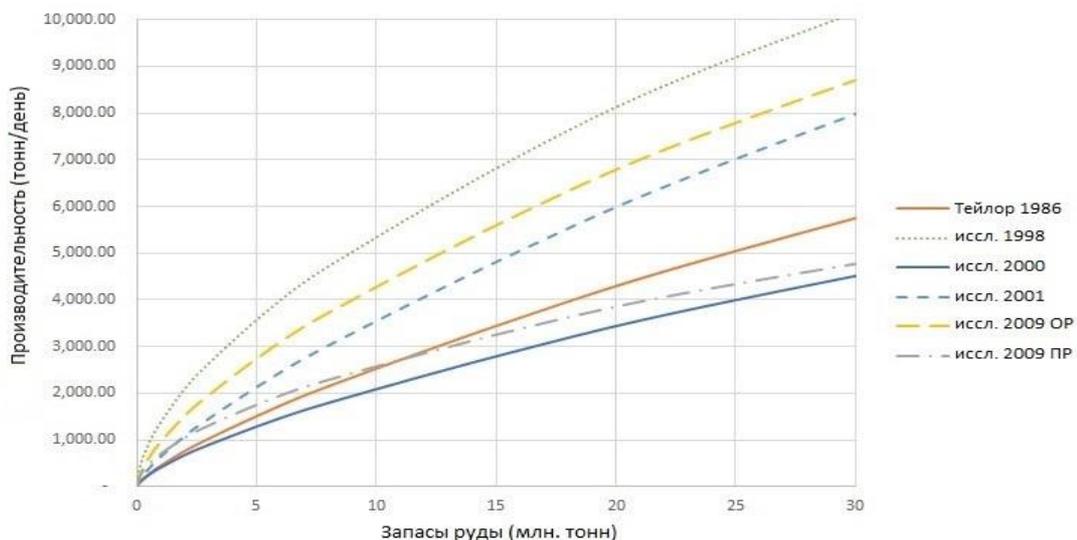


Рисунок 1.5 – Правило Тейлора и его модификации

Общий вид зависимости для определения производственной мощности рудника с различным способом добычи и видом добываемого сырья:

$$P = a \cdot Q^b ; \quad (1.18)$$

где P – суточная производительность рудника, т; Q – запасы месторождения по руде, т; a и b – коэффициенты, определяемые по табл. (1.9).

Таблица 1.9 – Коэффициенты для формулы (1.18)

<i>Тип рудника</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>авторы</i>
Неизвестно	0,0143	0,75	Тейлор (1986)
Открытый; золото и серебро	0,416	0,5874	Сингер, Мензи, Лонг (1998)
Подземный; сульфиды	0,0248	0,704	Сингер, Мензи, Лонг (2000)
Открытый; медь	0,0236	0,74	Сингер, Лонг (2001)
Открытый	0,123	0,649	Лонг (2009)
Подземный	0,297	0,562	Лонг (2009)

Правило Тейлора обладает рядом ограничений, за пределами которых оно не может быть применено для оценки оптимальной производительности рудника, а именно для:

- месторождений с запасами руды более 200 млн. тонн;
- месторождений, введенных в эксплуатацию много десятилетий назад;
- весьма глубоких тонких (менее 3м) залежей рудных тел;
- неравномерно минерализованных многожилных систем.

Анализируя опыт применения формулы (1.18), следует отметить, что с одной стороны, правило Тейлора нашло свое широкое практическое применение среди множества предприятий по всему миру, принеся им колоссальный положительный экономический эффект, а также сыграло свою знаковую роль в развитии рациональных подходов к освоению недр. Но, с другой стороны, поиск оптимальной производительности и, как следствие, наилучшей стратегии освоения запасов месторождений в зависимости от одного параметра – производственной мощности карьера, исключает из рассмотрения влияние множества других значимых факторов.

На заре развития горнодобывающей отрасли отделение руды от породы, не подлежащей переработке, производилось по безубыточному бортовому содержанию (ББС), определенного как граничное содержание полезного компонента, при котором доходы от производственной деятельности от извлечения

полезных ископаемых равны затратам на разработку месторождения [65]. В общем виде формула для расчета ББС имеет вид:

$$\text{ББС} = \frac{З}{Ц \times И}, \quad (1.19)$$

где $З$ – затраты на разработку месторождения, руб; $Ц$ – цена реализации продукта, руб; $И$ – извлечение полезного компонента из руды, дол.ед.

Преимущество метода, заключенное в его простоте и наглядности, является одновременно и его недостатком – расчет ББС не учитывает многих значимых факторов, влияющих на результирующие показатели экономики разработки месторождения: изменение рыночных условий, параметров потерь и разубоживания руды, коэффициента вскрыши, специфики усреднения руды и многих других.

Дальнейший поиск методов определения экономической эффективности разработки месторождений привел к появлению в 1950 г. так называемого двумерного способа оптимизации производственной мощности рудника по бортовому содержанию, впервые упомянутого в работах Г. Мортимера на примере золотодобывающих рудников ЮАР [18]. Согласно этому методу, экономически пригодная для переработки руда должна удовлетворять следующим критериям:

- среднее содержание ценного компонента должно обеспечивать хотя бы минимальное превышение дохода над затратами на тонну перерабатываемой руды;
- объем руды с наименьшим, ближайшим к граничному, содержанием ценного компонента должен быть самоокупаемым.

Оценка производственной мощности по методу Г. Мортимера предусматривает обособленное определение одновременно двух параметров: граничное бортовое содержание руды и ее минимальное содержание в выемочном блоке.

Как классическая методика определения безубыточного бортового содержания, так и расчет оптимального бортового содержания по методу Г. Мортимера не учитывают ряд важнейших факторов, влияющих на выбор стратегии разработки месторождения. Решению этих вопросов посвящены труды Кеннета Ф. Лейн, который в 1988 г. в своей книге расширил существующую

методику оптимизации стратегии разработки месторождений и противопоставил двухмерной оценке Г. Мортимера трехмерную, определяемую по одновременной оптимизации по трем взаимосвязанным критериям [13]. На основе анализа и обобщения мирового опыта определения бортового (граничного) содержания ценных компонентов, разделяющего руду на пригодную к переработке и не подлежащую переработке, К. Лейном была сформирована теория оптимизации стратегии разработки месторождений по бортовому содержанию, определяемому максимумом чистой приведенной стоимости (NPV) проекта.

Математическая модель оптимизации карьеров по бортовому содержанию К. Лейна можно представить в следующем виде:

$$\max NPV = \sum_{n=1}^N \frac{P_n}{(1+d)^n}; \quad (1.20)$$

$$Qm_n \leq M, \forall n; \quad (1.21)$$

$$Qc_n \leq C, \forall n; Qr_n \leq R, \forall n; \quad (1.22)$$

где n – число лет с момента начала отработки, год; N – суммарный период отработки запасов месторождения, лет; d – ставка дисконтирования, %; P_n – величина прибыли за n -ый год, \$; Qm_n – количество добытой руды, тонн/год; Qc_n – количество переработанной руды, тонн/год; Qr_n – количество произведенного конечного продукта, тонн/год; M – максимальная производительность добычи руды, тонн/год; C – максимальная производительность перерабатывающей установки, тонн/год; R – максимальная производительность получения конечного продукта, тонн/год.

В свою очередь, прибыль за каждый год отработки запасов месторождения, соответствующая величине денежного потока за год, вычисляется:

$$P_n = (p_n - r_n) \cdot Qr_n - c_n \cdot Qc_n - m_n \cdot Qm_n - f_n, \quad (1.23)$$

где p_n – цена реализации конечного продукта, \$ за тонну продукта; r_n – себестоимость получения конечного продукта из переработанной руды, \$ за тонну продукта; c_n – себестоимость переработки руды, \$ за тонну; m_n – себестоимость добычи руды, \$ за тонну; f_n – операционные расходы, \$.

На первой стадии оптимизации с помощью формул безубыточности для каждой из трех упомянутых выше стадий должно быть рассчитано значение собственного бортового содержания по факторам:

- добычи горной массы:

$$y_m = \frac{h}{\gamma \cdot (p - r)} ; \quad (1.24)$$

- переработки руды:

$$y_c = \frac{h + f/C}{\gamma \cdot (p - r)} ; \quad (1.25)$$

- получение конечного продукта:

$$y_r = \frac{h}{\gamma \cdot (p - r) - f/R} ; \quad (1.26)$$

где h – переменные затраты на переработку руды; γ – извлечение полезного компонента в процессе переработки руды; p – цена реализации единицы конечного продукта; r – переменные затраты на получение единицы конечного продукта; f – постоянные затраты на переработку руды; C – максимальная производительность перерабатывающей установки; R – максимальная производительность получения конечного продукта.

Помимо наличия трех значимых значений безубыточности, для каждой из стадий производственного процесса метод Лейна предусматривает расчет еще трех промежуточных безубыточных бортовых содержаний, в расчете которых используются попарное рассмотрение каждой из стадий: добычи, переработки руды и получения конечной товарной продукции. (рис. 1.6).

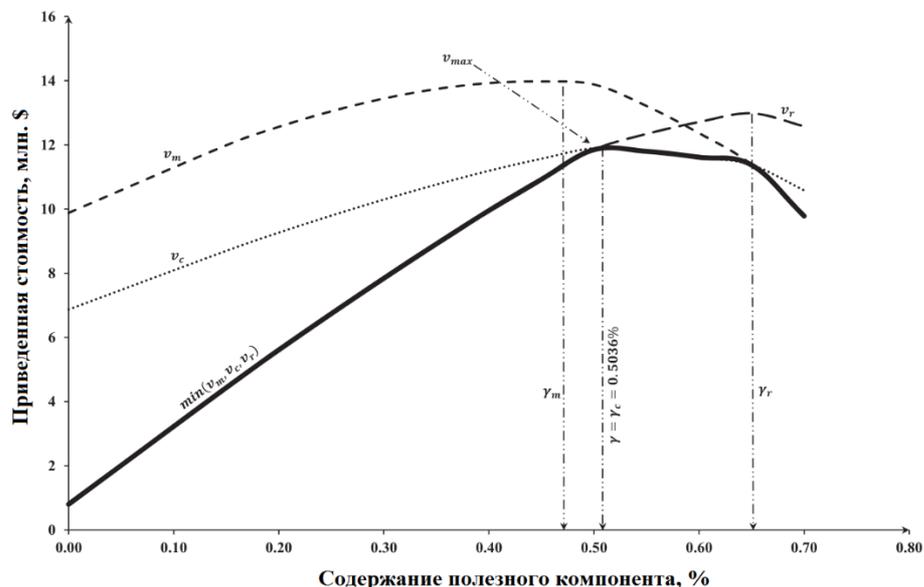


Рисунок 1.6 – График минимальной приведенной стоимости для определения оптимального бортового содержания полезного компонента по методу К. Лейна

По трем графикам приведенных стоимостей каждой стадии производственного процесса строится график минимальной приведенной стоимости.

Максимальное значение данного графика будет являться искомым значением максимума приведенной стоимости реализации проекта:

$$v_{max}(\gamma) = \max [\min (v_m, v_c, v_r)]; \quad (1.27)$$

Отдельное внимание в работах К. Лейна уделено возможности снижения бортового содержания переработки за счет привлечения дополнительного объема руды со средним содержанием полезного компонента в руде, отработка которой экономически невыгодна в ближайшие годы, но имеет потенциал к извлечению выгоды в будущем. Реализовать подобную стратегию отработки руды с промежуточным содержанием на более поздних этапах разработки месторождения возможно путем организации резервного складирования данного типа руды. Главным преимуществом такого подхода к разработке месторождений является вовлечение в отработку руд, которые без складирования были бы определены в отходы производства.

Переработка складированной руды осуществляется после завершения работ по добыче горной массы, что приводит к улучшению общей экономики отработки запасов месторождения за счет создания дополнительных положительных денежных потоков в последние годы производства. Положительный денежный поток от переработки руд с промежуточным средним содержанием достигается за счет исключения из производственного процесса затрат на добычу руды и сохранения исключительно затрат на переработку.

В рамках данной концепции К. Лейном были выделены три основных препятствия на пути достижения экономической выгоды от привлечения в отработку руды с промежуточным средним содержанием полезного компонента. Во-первых, организация резервного складирования – это крупномасштабная логистическая задача. В зависимости от размеров карьера и объемов добычи руды необходимо осуществить размещение складов на производственной территории месторождения в нужном количестве и требуемых геометрических размеров. Сложности в решении данной задачи возникают в результате необходимости учёта особенностей географической местности расположения месторождения, определения базирования прочих производственных объектов и зданий, а также построения транспортных связей между ними.

Во-вторых, организация резервного складирования потребует дополнительных производственных затрат. Строительство складов и необходимого

вспомогательного оборудования повышает капитальные затраты, а поддержание складов в процессе эксплуатации влечет возникновение дополнительных операционных расходов.

В-третьих, длительное пребывание добытой руды на резервных складах оказывает негативное влияние на ее качество, вследствие воздействия природных процессов. Последствиями такого природного воздействия могут быть снижение содержания полезного компонента в добытой руде, а также дополнительные трудности с последующей ее переработкой, что может привести к дополнительным затратам на извлечение.

Организация складирования руды с целью последующей переработки ее части с промежуточным средним содержанием полезного компонента нашла свою реализацию в усложнении математической модели К. Лейна. Ключевым параметром новой усовершенствованной модели, определяющим оптимальную стратегию складирования руды, стало бортовое значение (нижняя граница) промежуточного среднего содержания добываемой руды, которое рассчитывается по формуле:

$$g_s = \frac{h + s + f/C}{\gamma_s \cdot (p - r)}, \quad (1.28)$$

где s – переменные затраты на вывод руды из складов и транспортировку до перерабатывающей установки; γ_s – извлечение полезного компонента из руды с промежуточным средним содержанием.

Таким образом, добытая руда с содержанием ценного компонента, находящегося в диапазоне ниже бортового значения, рассчитанного по формуле (1.26), но выше, рассчитанного по формуле (1.29), определяется в категорию руды с промежуточным средним содержанием полезного компонента и отправляется на склад в ожидании переработки на завершающей стадии разработки месторождения после окончания цикла работ по добычи руды из недр.

Рассмотрению ключевых принципов и целевых показателей, лежащих в основе формирования стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых, было посвящено множество исследований специалистов ИПКОН РАН в начале XXI века. Вклад ИПКОН РАН заключается в привлечении особого внимания к вопросу рационального освоения недр, а также придании исключительного значения комплексности их

освоения. Грамотное решение этих вопросов повышает эффективность освоения недр и позволяет расширить минерально-сырьевую базу разработки месторождений.

Специфика развития горной добычи в СССР базировалась на организации производственного процесса, предусматривающего добычу и последующую переработку только основных полезных ископаемых, заключенных в недрах. Такой подход приводит к тому, что балансовые запасы месторождений быстрее истощаются, а также происходит образование большого количества производственных отходов в виде складированных хвостов обогащения, отвалов вскрышных пород и некондиционных руд, шлаков и промышленных стоков. Реализация комплексного подхода к освоению месторождений позволяет решить обе упомянутые выше проблемы. Комплексное освоение недр приводит к расширению минерально-сырьевой базы месторождений за счет вовлечения в переработку руд с более низким содержанием полезного ископаемого, а также извлечением попутных компонентов. Кроме того, комплексный подход подразумевает борьбу с образованием отходов за счет их рационального повторного использования, что положительно влияет на экономические и экологические показатели проекта разработки месторождения [94].

В частности, член-корр. РАН Д.Р. Каплуновым и проф. М.В. Рыльниковой были рассмотрены перспективы применения комплексного подхода освоения недр на медно-колчеданных месторождениях Южного Урала, на которых ведется добыча полезных ископаемых сложного вещественного состава. Анализ состава и содержания хранилищ хвостов Гайской, Бурибаевской, Учалинской, Сибайской обогатительных фабрик показал разумность их отнесения к категории техногенных месторождений. Реализация комплексного подхода предполагает, что разработка стратегии и календарного графика освоения месторождений, помимо выбора оптимального варианта эксплуатации добываемых из недр руд, должна также включать организацию переработки техногенного сырья [61].

Обоснование оптимальной стратегии разработки месторождений осуществляется в соответствии со специально разработанным алгоритмом. Реализация комплексного подхода в совокупности с достижением максимально

возможной полноты и эффективности освоения месторождения осуществляется в результате выбора наилучшего сочетания физико-технических и физико-химических методов извлечения и переработки основных и попутных компонентов кондиционных и бедных типов руд, а также грамотной эксплуатацией или утилизацией образующихся отходов горнодобывающего производства [28, 96].

Высшей формой реализации комплексного подхода к освоению месторождений является следование цели сохранения недр и минеральных ресурсов, а также защиты окружающей среды на основе управляемого ресурсосбережения и ресурсовоспроизводства [101].

Теоретическое обоснование, а также практическая реализация комплексного подхода разработки недр на примере медно-колчеданных месторождений Южного Урала подтвердили свой положительный эффект в рамках разработки стратегии рационального освоения недр. Таким образом, ключевые действия горнодобывающих предприятий в процессе реализации комплексного подхода освоения недр, которые позволяют повысить эффективность разработки месторождений за счет повышения уровня извлечения полезных компонентов и увеличения объемов товарной продукции, кратковременного складирования некондиционных руд и отходов горной добычи на специально подготовленных площадках без нанесения экологического урона окружающей среде, оперативного контроля качества складированного сырья на выходе из перерабатывающей установки, вовлечения в переработку на последующих этапах некондиционных руд и техногенного сырья: отходов производства, промышленных стоков.

1.5. Цель, задачи и методы исследования

Выполненный анализ литературных источников и опыта разработки рудных месторождений показал, что формирование оптимальной стратегии и календарного графика их разработки предполагает построение структурированной системы расчетов, включающей в себя обработку больших наборов исходных данных, преобразование одних видов данных в другие, различные математические вычисления и проработку множества типовых вариантов с це-

лью поиска наиболее оптимального. Решение такого комплекса задач существенно проще и быстрее воплотить с помощью применения систематизированного подхода и предварительного составления алгоритма расчета. Реализация обоих факторов осуществляется путем построения производственно-финансовой модели разработки месторождения.

В связи с этим, целью исследования является повышение эффективности и полноты освоения золоторудного месторождения на основе разработки методики оптимизации соотношения изменяющихся производственных мощностей горнодобывающих и перерабатывающих производств в едином горно-обогатительном комплексе золотодобывающего предприятия.

Идея работы: достижение рациональной производительности мощностей горнодобывающих и перерабатывающих производств на различных этапах развития горных работ в едином горно-обогатительном комплексе золотодобывающего предприятия обеспечивается на основе разработанной математической модели оптимизации соотношения производительности в циклах открытой добычи и переработки руд методами чанового и кучного выщелачивания, промежуточного складирования рудной массы во временных складах с варьированием бортового и среднего содержания золота в руде и перерабатываемой рудной массе.

Для достижения поставленной цели определены основные задачи исследования:

- анализ современного состояния и перспектив развития методов проектирования горнодобывающих предприятий с открытым способом разработки месторождений твердых полезных ископаемых;
- определение основных критериев и параметров, влияющих на выбор плана развития горных работ и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых;
- разработка производственно-финансовых моделей функционирования горнотехнических систем при освоении месторождений золотоносных руд открытым способом;
- обоснование стратегии освоения золоторудных месторождений Нижнеякокитского рудного поля и Рябинового с максимальной экономической эффективностью.

Ключевая особенность, обеспечивающая теоретическую и практическую значимость диссертационной работы, заключается в том, что предлагаемый метод оптимизации позволяет повысить полноту и увеличить экономическую эффективность освоения участка недр при сокращении срока окупаемости проекта. Разработка месторождений по календарным графикам, оптимизированным с использованием предложенного метода, позволяет существенно, в отдельных случаях до двух раз, увеличить запасы минерально-ресурсной базы эксплуатируемого участка недр. Увеличивается срок разработки месторождения открытым способом с сохранением положительного денежного потока и прибыли горнодобывающего предприятия в течение всего периода эксплуатации месторождения.

Результат применения данного метода полностью соответствует ключевым положениям Закона «О недрах», преследующего цель рационального, эффективного и наиболее полного освоения разрабатываемых месторождений [54]. Кроме того, с точки зрения государства, применение данного метода существенно, на десятки процентов, увеличивает поступления от налога на добычу полезных ископаемых, налога на прибыль, социальных взносов и других налогов и сборов, сопутствующих при разработке месторождений.

Методика, сформулированная и раскрытая в рамках данной диссертации, имеет возможность быть интегрированной в практическую деятельность горнодобывающего предприятия и увеличить реальную выгоду процесса разработки уже эксплуатируемого или потенциально рассматриваемого месторождения. Сотрудники горнодобывающих предприятий могут принять во внимание основные выводы и заключения данного исследования для разработки и реализации собственных целевых программ по организации производственного процесса разработки месторождений твердых полезных ископаемых.

Основная идея, ее структурная реализация, выводы и предложения на основе этой идеи могут представлять интерес для сотрудников исследовательских центров, проектных организаций, горнодобывающих предприятий – пользователей недр, научных объединений, учебных заведений и других учреждений, занятых в сфере поиска оптимального календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых.

Достоверность и методы исследования. Достоверность выводов и рекомендаций, полученных в результате диссертационной работы, подтверждает применение совокупности системных методов исследования:

- мнений квалифицированных специалистов мирового масштаба – для составления обзора существующих подходов к решению задач оптимизации объемов производства и построения календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых;
- базовых законов теории вероятности и дескриптивной статистики на представительной и систематизированной базе распределения содержания полезного компонента в руде месторождения в виде дискретного распределения случайной величины;
- аналитических расчетов в виде интегрального исчисления объемов руды, отправляемых на переработку в каждый из этапов календарного графика разработки месторождения, а также элементов математического анализа для расчета критериев оптимизации календарного графика;
- экономико-математического подхода для построения производственно-финансовой модели календарного графика разработки месторождения твердых полезных ископаемых и последующего определения ключевых параметров, влияющих на оптимизацию календарного графика;
- графического представления результатов определения оптимального календарного графика разработки месторождений полезных ископаемых в виде построения схем и графиков для более наглядной и достоверной обработки полученных данных;
- практическим подтверждением результатов при разработке золоторудных месторождений Нижнеякоитского рудного поля Алданского района республики Саха (Якутия).

Основу теоретической и методической базы составили авторитетные мнения и экспертные заключения, отраженные в диссертационных работах, методических исследованиях, научных публикациях общероссийских и отраслевых журналах, выступлениях на тематических конференциях.

Информационно-эмпирическая база исследования была сформирована на основе данных месторождений золота Рябиновое и совокупности месторождений Нижнеякокитского рудного поля, разрабатываемых ПАО «Селигдар» в Алданском районе Республики Саха (Якутия).

В работе использован комплексный метод исследований, включающий сбор, обобщение и анализ результатов научных исследований и практического опыта в области решения задач оптимизации объемов производства и построения календарного графика разработки месторождений открытым способом, математическое моделирование, производственный эксперимент, математическую обработку результатов в сравнении с показателями практики горных работ. В качестве основных методов исследований использовались: экономико-математический подход к построению производственно-финансовых моделей функционирования горнотехнической системы, статистическая обработка результатов, научное обобщение, технико-экономические расчеты с практическим подтверждением результатов при разработке золоторудных месторождений Нижнеякокитского рудного поля и Рябинового Алданского района Республики Саха (Якутия).

2. РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

2.1. Основные характеристики соотношения производительности комплексов добычи и переработки руд при открытом способе добычи и факторы ее определяющие

Современная минерально-сырьевая база характеризуется, как правило, заниженными значениями доступных для отработки запасов месторождений, сокращенными сроками их эксплуатации и, как следствие, более низкими, по сравнению с потенциально возможными, показателями извлекаемой экономической выгоды. Общепринятая структура ресурсного потенциала месторождений, представленная на рис. 2.1, подразумевает разделение всего объема руды в недрах на балансовые, забалансовые и некондиционные запасы, а также прогнозные ресурсы. Процесс разработки недр месторождения сопровождается формированием отвалов бедных, некондиционных руд, которые по заранее определенным экономическим причинам считаются непригодными в настоящее время для переработки, и отвалов вмещающих пород, которые также могут иметь самостоятельную промышленную ценность.

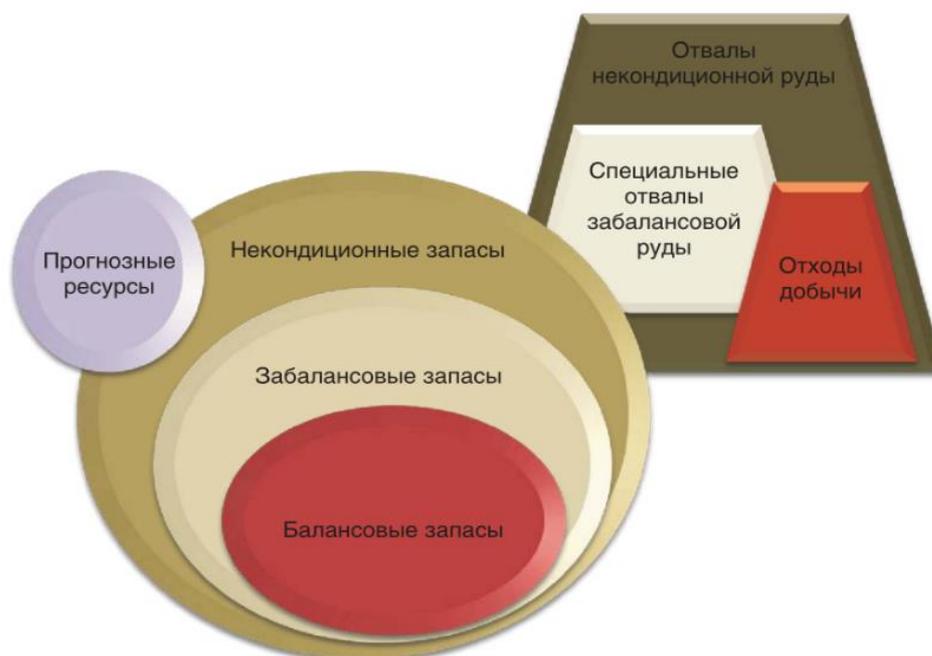


Рисунок 2.1 – Структурная схема ресурсного потенциала месторождений

В основе решения задачи воспроизводства минерально-сырьевой базы для обеспечения полноты использования ресурсного потенциала недр и эффективности разработки месторождений положен новый подход к отработке

полезных ископаемых и формированию производственной мощности горнодобывающего предприятия [97]. Ключевыми действиями, обеспечивающими более рациональное освоение месторождений, являются сокращение потерь полезных ископаемых при разработке, расширение границ разработки за счет переоценки балансовых запасов, привлечение в переработку ранее некондиционных руд и отходов горнодобывающей деятельности [91].

Добиться сокращения потерь в извлечении полезного компонента в процессе разработки месторождения возможно за счет комбинирования двух подходов: совершенствования существующих методов геологоразведочных работ и внедрения технологических инноваций.

Рациональное освоение подразумевает также разрушение стереотипа о статичности месторождения, как объекта эксплуатации. Границы контура разрабатываемого месторождения, объемы потенциальной добычи и переработки руд, содержание полезного компонента в добываемой руде – все это параметры, которые могут принимать различные значения в зависимости от методики и периода времени оценки потенциальных запасов. Таким образом, переоценка запасов, содержащихся в недрах месторождений, является необходимой мерой, способствующей расширению границ рудных карьеров. С позиции восполнения материально-сырьевой базы, увеличение границ разработки уже эксплуатируемых месторождений равноценно открытию новых участков.

Эксплуатация месторождения сопровождается отделением бедных и некондиционных руд, которые складываются в отвалах и временно не подвергаются дальнейшей переработке, ввиду определения их в категорию экономически неэффективных для извлечения полезных компонентов уже на стадии разработки стратегии освоения месторождения. Пересмотр в процессе разработки месторождений категории бедной отвальной руды, определенной изначально в отходы горнодобывающей деятельности, может привести к признанию ее технологической и экономической пригодности для извлечения ценных компонентов, что, в свою очередь, отразится на повышении ресурсного потенциала месторождения.

Под производительностью горного предприятия понимают объем добытого полезного ископаемого заданного качества в единицу времени (смену, сутки, месяц, год); показатель эффективности производственной деятельности

горного предприятия. Производственная мощность горного предприятия — максимально возможная добыча полезного ископаемого установленного качества в единицу времени (сутки, год).

Для достижения рационального освоения месторождений необходимо проведение предварительной оценки возможностей увеличения ресурсного потенциала и проработки способов дальнейшей интеграции данных возможностей в деятельность горнодобывающих предприятий. Эффективным способом проведения данной оценки на основе применения метода последовательных приближений, представленного на рис. 2.2. Особенностью метода является комплексная оптимизация деятельности горнодобывающего предприятия, как технической системы, затрагивающая ключевые уровни иерархии эксплуатации месторождений.



Рисунок 2.2 – Схема метода последовательного приближения

Перед запуском проекта освоения месторождения полезных ископаемых недропользователь, в соответствии с поставленными целями, определяет оптимальную стратегию действий, последовательность операций и продолжительность процессов добычи и переработки руды [31, 40, 95, 102, 106].

Повышение экономической эффективности разработки месторождений достигается за счет циклической оптимизации стратегии освоения недр путем пошагового наращивания ресурсной базы постепенным вовлечением в добычу и переработку бедных руд и некондиционных запасов. Концепция данной стратегии (рис. 2.3) позволяет разделить разработку месторождения на этапы с постепенным снижением содержания ценных компонентов в перерабатываемой руде, но при обязательном сохранении положительного денежного потока на всех этапах освоения месторождения.

Высшей составляющей комплексного подхода к формированию стратегии освоения месторождения является последовательное выполнение дей-

ствий, представленных на рисунке 2.3 и обеспечивающих достижение цели сохранения недр и минеральных ресурсов, а также защиты окружающей среды путем управляемого ресурсосбережения и ресурсовоспроизводства [2, 5, 15, 26, 63].

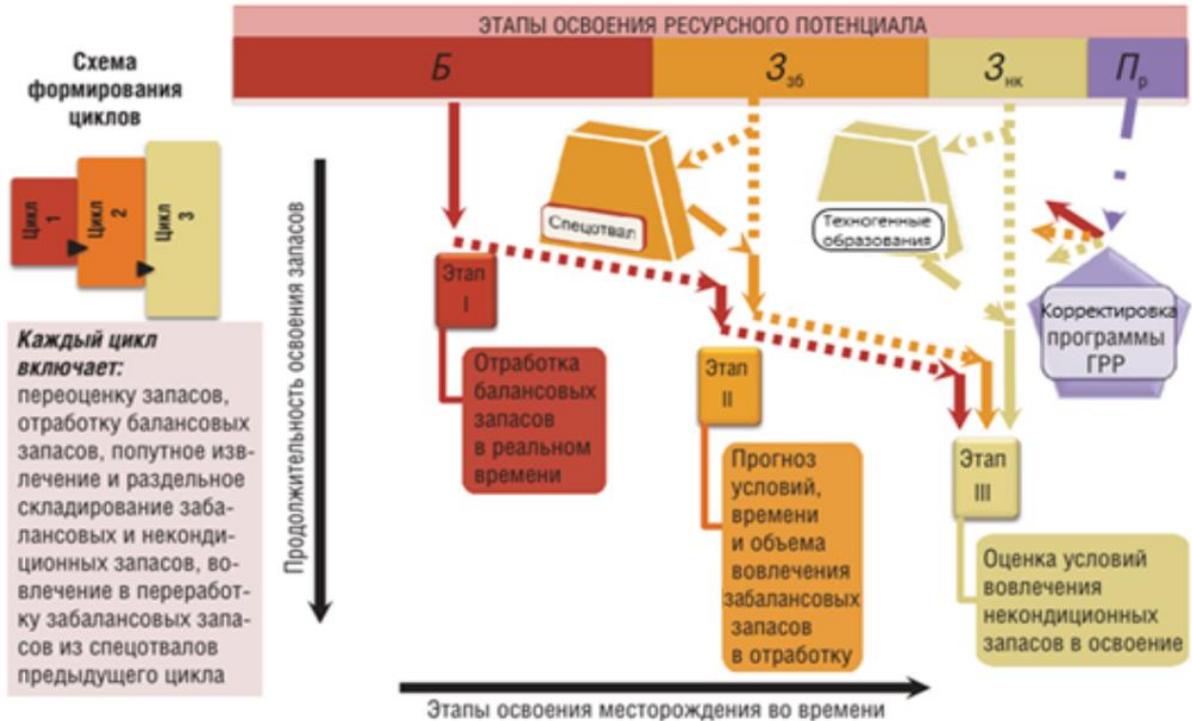


Рисунок 2.3 – Стратегия циклического наращивания ресурсного потенциала месторождения

Таким образом, ключевые действия горнодобывающих предприятий при реализации процессов комплексного освоения месторождений должны предусматривать:

- повышение уровня извлечения ценных компонентов из недр и добытой рудной массы для увеличения объема выпуска товарной продукции;
- кратковременное складирование бедных и некондиционных руд и отходов горной добычи на специально подготовленных площадках без нанесения экологического урона окружающей среде;
- контроль и учет качества складированного сырья и рудной массы на входе и выходе с перерабатывающей установки;
- вовлечение в переработку на последующих этапах некондиционных руд и техногенного сырья: отходов производства и промышленных стоков;
- безубыточность работы предприятия на всех стадиях освоения месторождения;

- максимальный совокупный экономический эффект за весь срок комплексного освоения участка недр.

Реализация данной концепции осуществляется путем составления стратегии и календарного графика разработки месторождения, представляющих собой план развития горных работ и переработки рудной массы с наиболее полным извлечением ценных компонентов, а также с установлением требуемых качественных и количественных показателей, касающихся объемов и сроков освоения каждого участка недр.

Двумя основными параметрами, определяющими результаты производственной деятельности и в то же время находящиеся под полным контролем горнодобывающего предприятия, являются объем фактической добычи руды из недр за единицу времени – производительность рудника, и объем переработки руды за единицу времени производительность перерабатывающего комплекса.

Объем переработки руды напрямую связан с производственными мощностями перерабатывающего комплекса оборудования: дробильных, обогажительных установок, фабрик, циклов выщелачивания и гидрометаллургии [10, 60, 70].

Кроме того, увеличить объемы горных работ можно путем использования резервов, заложенных на этапе проектирования разработки месторождения, например, за счет регулирования режима развития фронтов добычных и вскрышных работ на рабочих уступах. При привлечении подрядной организации повышение производительности по добыче рудной массы может быть осуществлено за счет дополнительных операционных издержек без значительных капитальных затрат.

2.2. Закономерности изменения технико-экономических и финансовых показателей горнодобывающего предприятия в ходе развития горных работ при различном режиме

Наиболее общим критерием эффективности определения границ карьера по экономическим показателям является чистый дисконтированный доход, определенный как сумма текущих эффектов за расчетный период функционирования карьера и индекс доходности, представляющий собой отношение суммы приведенных дисконтированных эффектов и капиталовложений.

Факторы, ограничивающие производственную мощность карьера, можно разделить на горнотехнические и эколого-экономические. Основными горнотехническими факторами, определяющими производственную мощность карьера, является: пропускная способность транспортных коммуникаций, количество и производительность добычных экскаваторов, необходимость обеспечения фронта работ подготовленными запасами в требуемом объеме при заданной протяженности фронта добычных работ. Среди них особое значение имеют параметры формируемых горнотехнических конструкций [45]. К экономическим критериям относят максимальную эффективность капитальных вложений на строительство и размер предотвращенного ущерба окружающей природной среде.

Использование в качестве современной научной основы технологического развития горнодобывающей промышленности сформировавшегося в последние годы программно-целевого метода позволяет обеспечить разработку долгосрочной стратегии инновационно-технологического развития карьера.

Основными управляемыми параметрами, влияющими на результаты производственной деятельности горнодобывающего предприятия, являются объем добычи и переработки руды из недр в единицу времени. Объем переработки руды в единицу времени напрямую связан с производственными мощностями перерабатывающего оборудования, находящегося в ведении горнодобывающего предприятия.

Производительность по добыче руды зависит от количества работ по выемке горной массы, проводимой на месторождении в процессе его разработки, конструктивных параметров карьера и скорости развития фронта горных работ. Повышение производительности может быть обеспечено за счет увеличения количества горнодобывающей техники.

Таким образом, увеличение объемов переработки руды в единицу времени возможно только за счет дополнительных капитальных вложений. Повышение объемов добычи руды за единицу времени может быть осуществимо без значительных капитальных затрат. Данные обстоятельства приводят к тому, что в рамках оптимизации календарного графика стоит варьировать исключительно производительностью по добыче руды, оставляя уровень переработки руды неизменным.

На протяжении всего периода реализации проекта объемы добычи и переработки руды должны определяться для каждого этапа, задействованного в построении стратегии и календарного графика разработки месторождения, на основе оптимизации единой модели освоения запасов. Процесс оптимизации стратегии и календарного графика сводится к варьированию соотношения уровня добычи руды к уровню переработки за единицу времени на различных этапах освоения месторождения.

2.3. Выбор критерия оптимизации режима развития горных работ и соотношения производственной мощности карьера и перерабатывающего производства

Метод оптимизации стратегии разработки месторождений варьированием бортового содержания, а также его практическое применение предложен проф. Б. Холлом [11]. Он расширил границы области применения метода оптимизации отработки запасов месторождений Лейна с учетом применимости новейших вычислительных средств для планирования горных работ. Отдельное внимание Б. Холл акцентировал на необходимости проведения оптимизации в виде многофакторного анализа, учитывающего наряду с бортовым содержанием ценных компонентов в руде, влияние прочих значимых проектных параметров, таких как определение граничных контуров разработки карьеров, разделение разработки карьера на этапы, учет максимальной производительности, установление правильной последовательности отработки различных зон карьера.

Предложенная Б. Холлом схема процесса оптимизации разработки месторождений, в отличие от классического выбора стратегии отработки запасов карьера из нескольких независимых потенциальных вариантов, представляет собой построение модели, в которой происходит одновременная обработка не только всех значимых факторов, но и учет их взаимосвязи друг с другом при совместном воздействии. Визуальная интерпретация обеих схем процессов оптимизации представлена на рис. 2.4.

Ключевым преимуществом данного подхода к процессу оптимизации стратегии разработки месторождений является возможность, помимо чисто механического определения наиболее экономически эффективного варианта

разработки, получение диапазона оптимальных вариантов, в рамках которого можно выбрать предпочтительный вариант разработки.

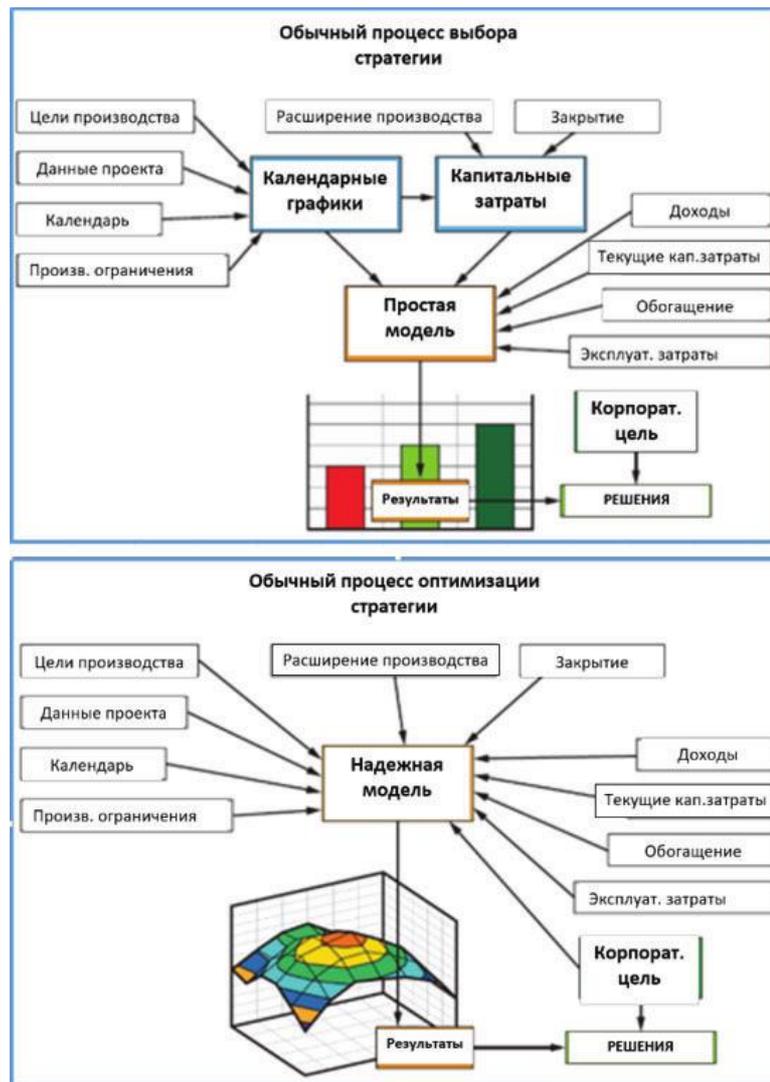


Рисунок 2.4 – Схемы оптимизации стратегии разработки месторождений

Таким образом, появляется возможность принять решение по выбору оптимальной стратегии разработки месторождений с учетом текущего состояния горнотехнической системы, рисков и характера решения приоритетных задач. Например, в случае затруднительного финансового положения компании, возможен выбор в пользу менее рискованного варианта с минимальными потенциальными убытками. И наоборот, если показатели компании демонстрируют стабильную положительную динамику, выбор стратегии развития может быть нацелен на более рискованный вариант с повышенной потенциальной прибылью. Данный подход позволяет более качественно анализировать ре-

зультаты, осуществлять выбор стратегии разработки месторождения в оптимальном диапазоне с учетом целей проектирования, варьируя множеством исходных параметров.

Другим знаковым сторонником теории К. Лейна и идеи оптимизации стратегии разработки месторождений по бортовому содержанию ценных компонентов является директор Комитета по ресурсам и запасам Общества горняков, металлургов и геологов США (SME) Жан-Мишель Ренду. В своих работах он продемонстрировал альтернативное видение процесса оптимизации параметров карьера, предложенный К. Лейном. Согласно его мнению, оптимизация бортового содержания должна производиться по итерационному исчислению: первоначально производится расчет оптимального бортового содержания и чистой приведенной стоимости проекта без учета альтернативных издержек. Далее осуществляется перерасчет тех же самых параметров с принятием во внимание альтернативных издержек. В связи с тем, что перерасчет оптимального бортового содержания и показателя NPV проекта приводит к изменениям в горных планах, варьированию значений денежных потоков и, как следствие, к сдвигам в величине издержек, необходимо проводить еще один цикл переоценки ключевых параметров. Итерационный перерасчет оптимального бортового содержания и чистой приведенной стоимости проекта осуществляется до тех пор, пока оба эти параметра не достигнут стабильных значений [21]. Однако, существенным недостатком предложенного Ж.М. Ренду итерационного метода оптимизации карьера по бортовому содержанию является сложность и длительность процесса определения наилучших значений. В связи с этим в настоящее время еще не разработана рабочая автоматизированная версия алгоритма расчета.

Детальным исследованием возможностей увеличения чистой приведенной стоимости (NPV) разработки месторождений на протяжении более 20 последних лет активно занимался Мухаммед Вакар Али Асад (Curtin University, Австрия). Под его авторством был опубликован целый ряд статей, посвященных влиянию различных производственных параметров как по отдельности друг на друга, так и в совокупности на экономическую эффективность разработки месторождения. В рамках данного ряда отдельное внимание М. Асад

уделил перспективам применения складирования руд с промежуточным средним содержанием полезного компонента, отработка которых экономически неэффективна на этапе извлечения из недр, но имеет выгоду на более поздних этапах после завершения цикла работ по добыче.

В 2005 году М.В.А. Асад опубликовал результаты своего исследования по влиянию складирования бедных руд на оптимизацию стратегии разработки месторождения по бортовому содержанию для карьера с двумя основными полезными компонентами [3]. Алгоритм построения оптимизационной модели по методу К. Лейна, главной задачей которого является поиск максимального значения чистой приведенной стоимости проекта, подвергся модернизации с учетом извлечения двух ценных компонентов. Таким образом, основная задача метода К. Лейна поиска максимума приведенной стоимости v_{max} , соответствующая формуле (1.26), дополняется еще одной составляющей и принимает вид:

$$v_{max}(\gamma) = \max [\min(v_m, v_c, v_{r1}, v_{r2})], \quad (2.1)$$

где v_{r1} – приведенная стоимость получения 1-го конечного продукта; v_{r2} – приведенная стоимость получения 2-го конечного продукта.

Применение модифицированного алгоритма оптимизации на примере медно-золотого карьера доказало экономическую эффективность организации складирования руды с промежуточным содержанием двух ценных компонентов.

В рамках исследования по полученным данным оптимизации бортовых содержаний меди и золота в добываемой руды был построен календарный графики отработки запасов месторождений без складирования руды с промежуточным содержанием компонентов. По тем же самым данным был сформирован календарный график разработки медно-золотого карьера с учетом организации складирования руды с промежуточным содержанием меди и золота, переработка которой осуществляется после завершения отработки кондиционных руд.

Таким образом, организация складирования руды с промежуточным содержанием полезного компонента на примере медно-золотого карьера позволила:

- понизить минимальное содержание меди и золота в руде, пригодной для переработки, тем самым увеличив число вовлеченных в переработку запасов;
- продлить срок эксплуатации месторождения: с 13 до 16 лет;
- увеличить показатель NPV проекта с 193 до 200 млн. долларов.

В 2011 году М.В.А. Асад, совместно со своим коллегой по университету Кёртин Эрканом Топалом, провел исследование по оценке совместного влияния складирования руды с промежуточным содержанием ценного компонента и удорожания ключевых экономических параметров с течением времени на чистую приведенную стоимость разработки месторождения [6]. На примере медесодержащего карьера М.В.А. Асадом была разработана модель, представляющая собой программируемый пошаговый алгоритм расчета оптимального бортового содержания по методу К. Лейна с отдельным определением промежуточного содержания для руды, подлежащей складированию.

По результатам расчета оптимального бортового содержания меди были построены календарные графики разработки медесодержащего карьера для 3 различных случаев: без складирования руды с промежуточным содержанием полезного компонента и без нарастания экономических параметров, без складирования руды с промежуточным содержанием полезного компонента, но с учетом нарастания экономических параметров, с учетом складирования руды с промежуточным содержанием полезного компонента и нарастанием экономических параметров.

Анализ чистой приведенной стоимости трех рассмотренных вариантов разработки карьера по добыче меди показал, что учет нарастания экономических параметров с течением времени ведет к снижению показателя NPV проекта. В свою очередь, организация складирования бедных руд позволяет привлечь дополнительно около 55 млн. тонн руды (без складирования переработке подвергается около 167 млн. тонн) и тем самым компенсировать потери в чистой приведенной стоимости от учета нарастания значений экономических показателей.

В 2012-2014 годах Фелипе Артеага (Felipe Arteaga) исследовал вопрос повышения экономической эффективности разработки карьеров [1]. По ин-

формации Ф. Артеага в настоящее время в мировой практике добычи полезных ископаемых укоренилась позиция, что повысить экономическую эффективность разработки месторождения возможно только снижением затрат на добычу и переработку горной массы. Автор исследования считает, что следование данной концепции далеко не всегда является рациональным решением, а во многих случаях даже может оказать негативный экономический эффект.

Оптимизация графика разработки по скорости добычи руды была воплощена в трех стратегиях разработки месторождений с разным числом экскаваторов при фиксированном объеме переработки руды, добытого в карьере: с применением двух экскаваторов, трех экскаваторов, четырех экскаваторов (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – План карьера с применением трех экскаваторов

Сравнение трех стратегий разработки месторождения было произведено на примере медного карьера с общим количеством руды 320 млн. тонн, средним содержанием Cu 1,2%, переработкой руды методом растворителем с последующим электролизом. Для добычи руды в рассмотрение была принята модель экскаватора РН 41000 ХРС с производительностью 4200 тонн/час, а также 16 самосвалов, 3 бульдозера, 2 буровые установки, 2 колесных бульдозера и 2 грузовика с водой.

Сравнение экономической эффективности трех стратегий разработки месторождения с разным числом экскаваторов, осуществляющих добычу руды, было произведено на основе расчета годовых денежных потоков и чистой приведенной стоимости (NPV).

Результаты расчетов показали, что вовлечение в разработку месторождения дополнительных экскаваторов приводит к сокращению длительности

вскрышных работ и более быстрому переходу к отработке руд с более высоким содержанием полезного компонента с применением двух экскаваторов – за 8 лет, трех экскаваторов – за 6 лет, четырех экскаваторов – за 5 лет.

Переход к отработке руд с более высоким содержанием ценных компонентов соответствует росту денежных потоков и приведенной стоимости проекта разработки месторождения. Кроме того, стратегия разработки с большим числом экскаваторов сокращает срок разработки месторождения.

График зависимости приведенной стоимости от числа экскаваторов, привлеченных к разработке месторождения, представлен на рис. 2.6. Максимум приведенной стоимости был достигнут в стратегии разработки с 4-мя экскаваторами. Привлечение большего числа экскаваторов в разработку месторождения привело к снижению полезности работы одного экскаватора до 59% (по сравнению с 85% для стратегии с 2-мя экскаваторами), что, в свою очередь, привело к увеличению затрат на добычу. Однако, увеличение показателя NPV свидетельствует о том, что выгода от создания дополнительного денежного потока и сокращения срока разработки месторождения превосходит рост затрат на добычу.

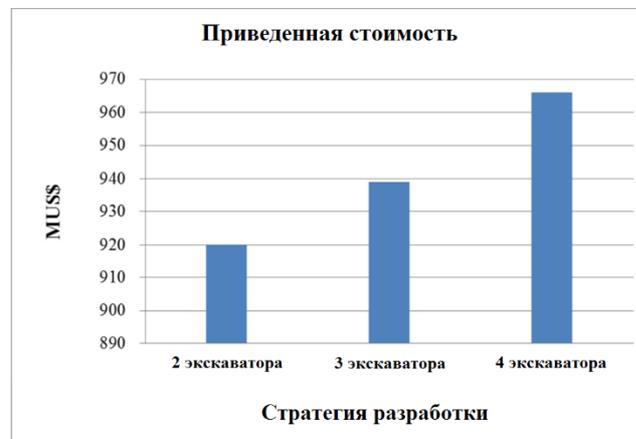


Рисунок 2.6 – Значения NPV проекта разработки месторождения медных руд с различным количеством экскаваторов

После определения оптимальной производительности по добыче руды дальнейшая оптимизация проекта предполагает выбор экономически выгодного уровня бортового содержания полезного компонента, а также выбор производительности перерабатывающего комплекса. Совместная и одновременная корректировка трех значимых параметров, представленная на рис. 2.7, приводит к определению оптимальной стратегии разработки месторождения.

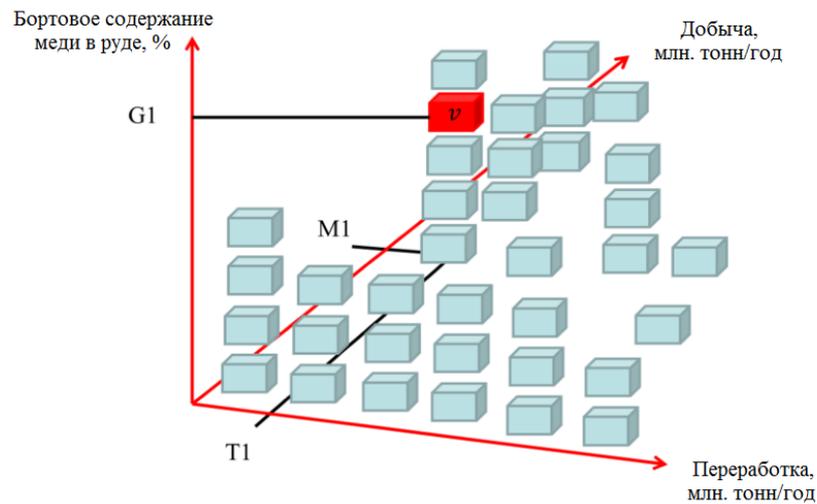


Рисунок 2.7 – Оптимизация разработки месторождения по трем параметрам

Поиск наилучшей стратегии разработки месторождения осуществляется в виде подбора оптимальных значений определяющих параметров, при которых достигается максимальное значение показателя NPV. В процессе оптимизации по трем показателям оказалось, что при использовании 4 экскаваторов наибольшая прибыль достигается при отработке запасов с более низким бортовым содержанием, чем при применении 1 экскаватора. Таким образом, применение данной методики оптимизации, предложенной Ф. Артеага, позволяет достичь большего экономического эффекта за счет снижения бортового содержания полезного компонента в руде, что приводит к другому значимому результату – увеличению балансовых запасов месторождения.

Таким образом, методика оптимизации разработки месторождения, рассмотренная Ф. Артеага, опровергла широко укоренившуюся в мировой практике концепцию, согласно которой повышения экономической эффективности разработки месторождения можно достичь исключительно снижением операционных затрат.

В основе программного обеспечения для оптимизации стратегии разработки месторождений компании COMET Strategy Pty Ltd лежит поиск максимального значения чистой приведенной стоимости (NPV) отработки запасов одного или нескольких карьеров, ограничений по эксплуатации объекта, а также экономических показателей, которые могут изменяться в процессе реализации проекта [24]. Это позволяет проводить оптимизацию параметров карьеров различных типов руд, для которых предусмотрены различные способы добычи и переработки. Основным преимуществом программного обеспечения

является одновременная оптимизация разработки карьера по ключевым зависимым факторам [7]: последовательности развития горных работ, бортового содержания, транспортировки различных типов руд в соответствующие пункты назначения (на переработку или в отвал), временного складирования руды, извлечения руды при переработке; потерь и разубоживания руды; пропускной способности перерабатывающей установки.

Для удобства эксплуатации месторождения, быстроты загрузки исходных данных и программной оптимизации параметров разработки алгоритм расчета максимального NPV на базе динамического программирования с обеспечением возможности использования известных формул, текстового форматирования, контроля за результатами расчета на экране монитора и возможности подключения дополнительного программного обеспечения.

В 1984 году Джефф Уиттл (Австралия) разработал собственное программное обеспечение Whittle Programming, которое на базе алгоритма Лерча-Гроссмана, позволяло производить оптимизацию параметров карьеров. Алгоритм Лерча-Гроссмана представляет собой методику определения разработки карьера с помощью применения теории графов [14]. Реализация данного алгоритма представляет собой граф модели месторождения в виде построения вершин, соединенных между собой ребрами, соответствующих контуру карьера. Последовательность итераций позволяет определить оптимальный контур карьера, при котором достигается максимальная разница между совокупной ценностью полезного компонента в контурах карьера и стоимостью добычи этого компонента [53].

На протяжении последующих 16 лет было выпущено несколько обновленных версий программного обеспечения (ПО) с внедрением передовых на тот момент разработок в сфере добычи полезных ископаемых: теории оптимизации карьеров по бортовому содержанию К. Лейна [13], нелинейной оптимизации графика разработки карьера и др.

Предлагаемая методика оптимизации работы горнодобывающего предприятия с целью поиска наиболее предпочтительного графика разработки месторождения базируется на учете 10 факторов, влияющих на конечный результат [19, 27]: конфигурации карьера, стадии разработки, календарного графика развития горных работ, бортового содержания ценного компонента в руде,

объемов промежуточного складирования руды, совместного воздействия факторов, производительности перерабатывающего комплекса, коэффициента извлечения полезного компонента, логистической схемы предприятия, распределения капитальных затрат по этапам разработки.

Оптимизация осуществляется по каждому фактору в отдельности, но при этом все факторы связаны друг с другом логической цепочкой. Изменение одного из факторов накладывает свой отпечаток на фактическое значение другого фактора. Ключевым параметром процесса оптимизации разработки месторождения выступает чистая приведенная стоимость – NPV. Конечным результатом изменения 10 факторов в отдельности, а также их совместной корреляции является достижение максимально возможного значения NPV, который и будет соответствовать оптимальной стратегии разработки месторождения.

Следует отметить роль программного обеспечения для составления оптимальной стратегии разработки месторождения является компании Datamine, которая используется в предлагаемой в настоящей диссертации методике. Основной продукт компании – пакет программ NPV Scheduler – представляет собой набор модулей, в общем виде представленные на рис. 2.8, объединяющий знания из различных областей науки: экономики, геологии, горного дела, технологий производства.

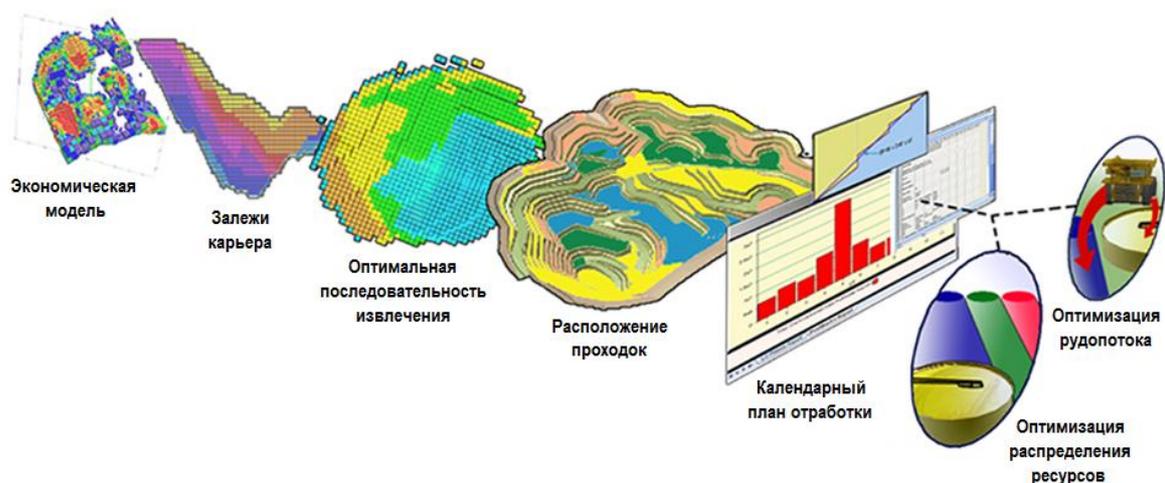


Рисунок 2.8 – Модульность оптимизации ПО NPV Scheduler

Оптимизация стратегии разработки карьера с помощью пакета программ NPV Scheduler осуществляется в строго установленной последовательности.

После ввода исходных данных и определения целей разработки карьера производится построение предельных границ карьера и устанавливается оптимальная поэтапная последовательность ведения горных работ. На основе полученных данных осуществляется детальная проработка размещения основных параметров карьера, определяется расположение вскрывающих съездов, устойчивости и углов откосов бортов, ширины берм и проч. По итогам такой проработки создаются трехмерные модели отработки карьера на конец каждого этапа развития горных работ.

Совокупность полученных трехмерных моделей направляется в следующий модуль пакета программ NPV Scheduler, где осуществляется построение базовой версии календарного плана разработки карьера, внешний вид которой представлен на рис. 2.9.

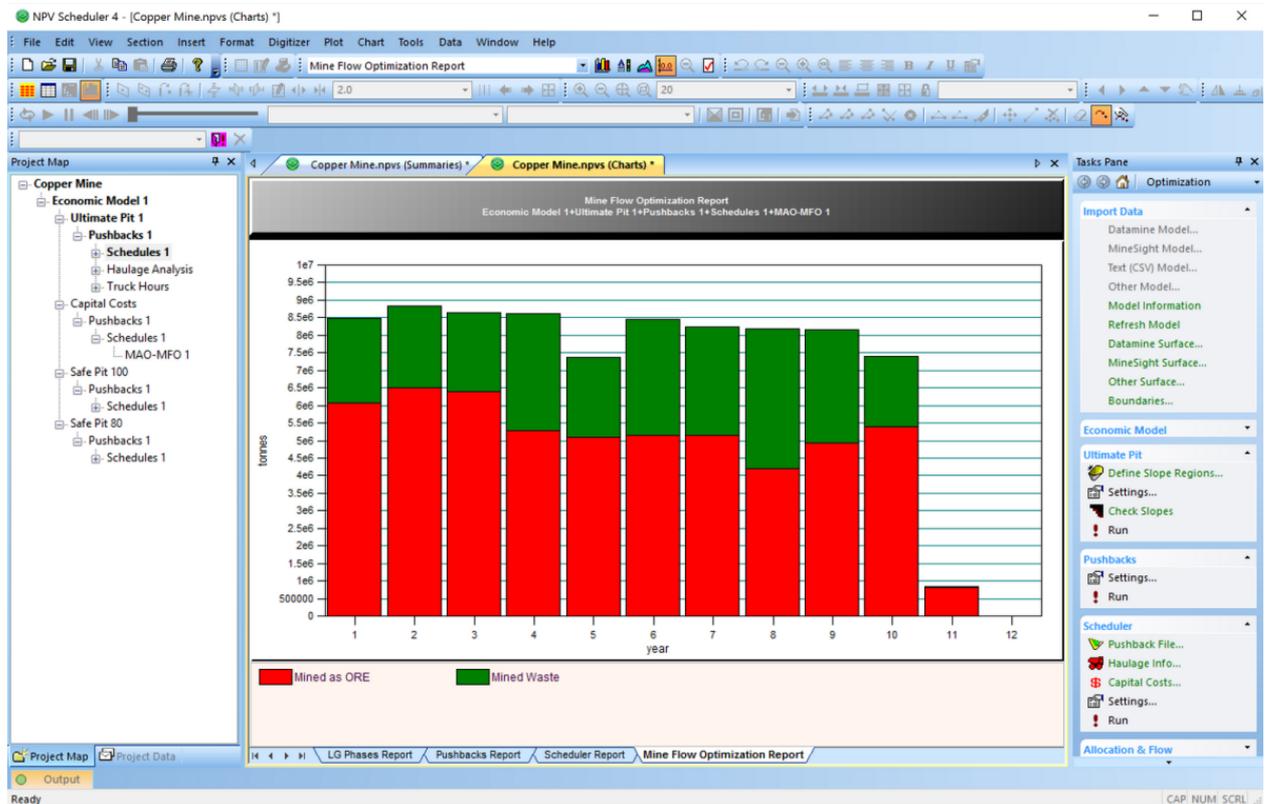


Рисунок 2.9 – Интерфейс ПО NPV Scheduler (Datamine)

На основе базовой версии осуществляется оптимизация параметров рудопотоков, финансовых ресурсов, производится расчет производственных показателей предприятия и определения среднего и бортового содержания ценных компонентов по этапам отработки, вносятся необходимые корректировки в конечные и промежуточные границы карьера и этапы отработки. На основе

всего вышеперечисленного создается оптимальная последовательность выемки блоков карьера, обеспечивающая достижение максимального значения чистой приведенной стоимости проекта.

Таким образом, современный уровень развития научно-технического прогресса и появление качественно новых версий программного обеспечения позволяют по-новому решать ключевые задачи планирования организации разработки месторождений. Представленные на рынке пакеты программного обеспечения для оптимизации календарных графиков отработки месторождений способны в относительно короткие сроки обеспечить выбор наиболее экономически эффективной стратегии развития рудника с учетом всех наложенных условий и ограничений. Однако, несмотря на высокий уровень развития современного программного обеспечения, процесс оптимизации стратегии освоения месторождения все еще является весьма зависимым от опыта, глубины понимания реальных условий и анализа промежуточных результатов программного расчета. Дальнейшие пути развития ПО для построения календарных графиков находятся в области минимизации и в будущем полного исключения участия человека в принятии решения для определения оптимальной стратегии разработки месторождения.

Многолетний опыт, накопленный исследовательским университетом США Горным училищем Колорадо (Colorado School of Mines), был реализован в создании программного обеспечения, получившего название OptiMine, по долгосрочному планированию разработки открытых карьеров и подземных рудников на основе определения оптимальных значений среднего и бортового содержания ценных компонентов. Реализация программного обеспечения осуществлена на базе алгоритмов частично-целочисленного линейного программирования (ЧЦЛП), конечной целью которого является расчет максимального значения чистой приведенной стоимости (NPV) проекта разработки месторождения. Для развития этого положения К. Дагделен и К. Кавахата [8] на примере разработки месторождения золота провели расчет максимально возможного NPV по методу безубыточного бортового содержания и сравнили экономический эффект с аналогичным показателем при расчете на основе оптимизации по бортовому содержанию с помощью программного обеспечения OptiMine.

Поиск максимума чистой приведенной стоимости для рассматриваемого примера золотого месторождения произведен при условии наличия 4-х возможных путей переработки добываемой руды, представленных на рис. 2.10: выщелачивание несортированной руды, дробление с последующим выщелачиванием, дробление, флотация с последующим разделением на сорбционное выщелачивание и автоклавную обработку, дробление с последующей автоклавной обработкой.

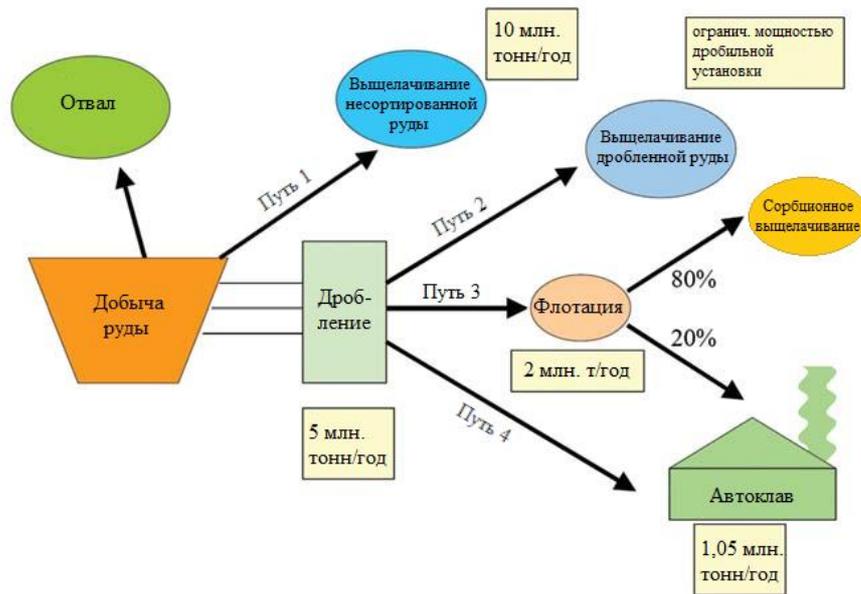


Рисунок 2.10 – Схема возможных путей переработки добываемой руды для сравнительного исследования оптимизации разработки месторождений по безубыточному бортовому содержанию и с помощью ПО OptiMine

В результате расчета по методу безубыточного бортового содержания были получены значения оптимального граничного содержания золота в руде для каждого из 4-х вариантов переработки руды, которые однозначно выбрали приоритетный вариант. Существенным недостатком данного метода расчета является сохранение значения бортовых содержаний на протяжении всего периода отработки запасов, что в свою очередь, отрицательно влияет на значение показателя NPV.

Отличительной особенностью оптимизации с помощью программного обеспечения OptiMine является возможность включения в расчет процесса складирования руды с пониженным средним содержанием, переработка которой экономически невыгодна на этапе ее добычи, но приносит дополнительный денежный поток в будущем. Кроме того, значения бортовых содержаний для различных способов переработки руды, а также для руды, подлежащей

временному складированию, полученные в результате оптимизации ПО OptiMine, отличаются от аналогичных значений оптимизации по безубыточному бортовому содержанию с учетом влияния климатических условий. Величины бортовых содержаний для всего периода реализации проекта, представленные на рис. 2.11, легли в основу расчета максимального значения показателя NPV.

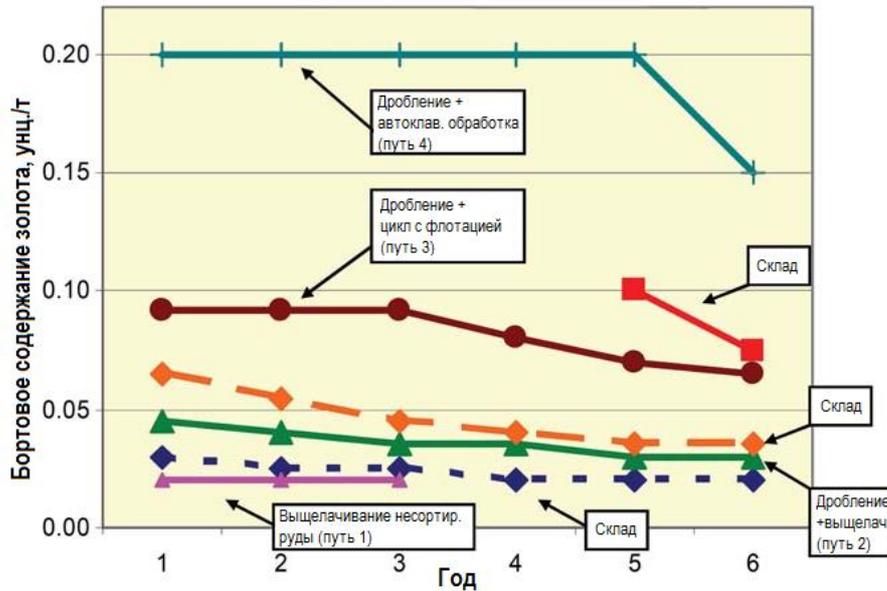


Рисунок 2.11 – Оптимальное бортовое содержание золота в руде для каждого типа переработки в зависимости от года эксплуатации, полученное при помощи ПО OptiMine

Сравнительный анализ двух методов расчета максимального значения чистой приведенной стоимости по оптимальному бортовому содержанию на примере золоторудного месторождения демонстрирует преимущество применения программного обеспечения OptiMine. Оптимизация, проведенная OptiMine, увеличила показатель NPV реализации проекта на 89%,

Другой знаковой функцией преимущества программного обеспечения OptiMine является возможность оптимизации показателя NPV в зависимости от годовых объемов добычи руды. Вычислительные модули OptiMine позволяют построить совокупность календарных годовых графиков разработки месторождений для различных сценариев добычи руды, для каждого из которых определяется свое оптимальное бортовое содержание и максимальное значение чистой приведенной стоимости. Полученные результаты, наглядно изображенные в виде графика на рис. 2.12, представляют собой основу для выбора оптимальной стратегии отработки месторождения.

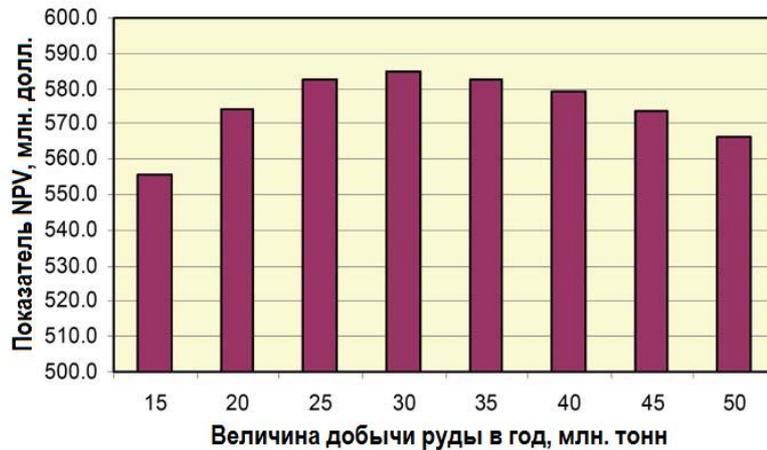


Рисунок 2.12 – Оптимизация показателя NPV при помощи ПО OptiMine в зависимости от объемов годовой добычи руды

Таким образом, программное обеспечение OptiMine, представляющее собой продукт реализации накопленного опыта и многочисленных исследований Горного училища Колорадо, позволяет в относительно короткие сроки осуществлять оптимизацию среднего и бортового содержания ценных компонентов в руде. Построение в результате расчетов совокупности календарных графиков разработки месторождения позволяет достичь максимального значения чистой приведенной стоимости проекта разработки месторождения. Высокое качество проводимых расчетов обеспечивается за счет применения в их основе алгоритмов частично-целочисленного линейного программирования.

Актуализация современного уровня развития методов повышения эффективности стратегического планирования разработки карьеров в XXI веке была произведена Ю.Е. Капутиным. Под его авторством опубликовано 7 известных работ, посвященных интеграции информационных технологий в процесс планирования горных работ, а также обзору главных зарубежных и отечественных трудов, сформировавших современный облик стратегического планирования открытой разработки месторождений [63, 64, 66].

Особое внимание в работах Ю.Е. Капутина уделено установлению приоритетной роли определения оптимального бортового содержания ценных компонентов при определении оптимальной стратегии разработки месторождения.

Определение оптимального бортового содержания должно быть конечным, динамично изменяющимся результатом процесса стратегического планирования отработки месторождения, в виду того, что именно оно определяет

величину вовлеченных в переработку запасов и продолжительность срока службы рудника.

В своих работах Ю.Е. Капутин установил хронологию методов определения оптимального бортового содержания ценных компонентов на основе автоматизированных расчетов показателей стратегии развития горных систем посредством современного программного обеспечения. Выявленной автором проблемой является то, что, несмотря на высокий уровень развития, современные методы оптимизации планирования горных работ страдают зависимостью от уровня компетенции специалиста. Один из главных выводов исследования Ю.Е. Капутина – планирование разработки каждого конкретного месторождения представляет собой обособленный, динамичный, зачастую ручной процесс с уникальным набором исходных данных, малейшие изменения в которых кардинальным образом сказываются на конечном результате построения календарного графика отработки запасов.

Роль базы для сравнительной оценки возможных решений и выбора наилучшего исполняют критерии оптимизации [78, 79]. Общепринятыми критериями оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений являются [48]: денежный поток за время реализации проекта освоения месторождения, чистая приведенная стоимость –NPV, срок окупаемости проекта.

Разница между всеми денежными притоками и оттоками за каждый учитываемый в оценке временной интервал, приведенная к начальному моменту запуска проекта разработки месторождения, составляет величину NPV (англ. Net Present Value) – чистой приведенной стоимости:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (2.2)$$

где CF_t – денежный поток через t лет ($t = 0, 1, \dots, N$), руб.; r – ставка дисконтирования, дол.ед.

Ставка дисконтирования в формуле NPV представляет собой функцию риска ожидаемых денежных потоков. Чем большей величиной принимают ставку дисконтирования, тем более рискованным считается рассматриваемый проект разработки месторождения. Комплексная оценка денежных потоков и

чистой приведённой стоимости от реализации проектов разработки месторождения позволяет определить дисконтированный срок окупаемости проекта – периода времени, за который доход, полученный в результате производственной деятельности горнодобывающего предприятия, превзойдет по величине затраты на инвестирование данной деятельности. То есть, дисконтированный срок окупаемости соответствует минимальному времени t , необходимому для выполнения условия:

$$DPP = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq I_0, \quad (2.3)$$

где CF_t – денежный поток через t лет ($t = 0, 1, \dots, N$), руб.; r – ставка дисконтирования, дол.ед.; I_0 – инвестиционные затраты проекта, руб.

Расчет дисконтированного совокупного дохода и срока окупаемости инвестиций позволяет учесть потерю стоимости денег с течением времени при проектировании разработки месторождений. Стремление к сокращению срока окупаемости проекта обусловлено достижением дополнительной экономической выгоды в случае привлечения начальных капитальных инвестиций извне в виде кредитов.

2.4. Оценка распределения содержания ценных компонентов в руде месторождения

При разработке стратегии освоения нового месторождения горнодобывающая компания каждый раз стремится к достижению максимально возможной экономической выгоды. Достижение наибольшего экономического эффекта осуществляется путем подбора оптимальных производственных параметров.

В рамках проведения геолого-экономической оценки ведущую роль месторождения в определении оптимальных экономических показателей играет планирование календарного графика. Ключевым параметром графика является производительность рудника, измеряемая в тоннах добываемой и перерабатываемой руды за единицу времени.

Для определения оптимального соотношения уровня добычи руды к уровню переработки необходимы структурированные сведения о качестве и

количестве добываемой руды, а также содержащегося в ней ценных компонентов. Наглядным инструментом, содержащим подобные сведения и позволяющим провести оптимизацию, является график распределения содержания полезных ископаемых в руде в массиве месторождения. В общем случае распределение полезного компонента в руде является неоднородным и на разных участках месторождения руды имеет разное среднее содержание ценных компонентов

Процесс анализа распределения содержания полезного компонента в руде основан на проведении статистического анализа исходных данных по отработываемому месторождению, построении дискретного распределения случайной величины и применении базовых законов теории вероятности и дескриптивной статистики. Исходными данными для этого могут быть результаты геологических изысканий, а также данные опробований руды, то есть совокупности небольших объемов руды с последующим вычислением содержания полезного компонента в них при известном значении массы исследуемого объема в совокупности. Поблочные геологические сведения или данные опробования руды собираются в единый массив и подвергаются дальнейшей обработке в программном комплексе Microsoft Excel. Шаг опробывания выбирается в зависимости от суммарного интервала значений содержания полезного компонента в элементах массива и требуемой точности решения задачи. Далее проводится анализ массива сведений о руде, каждый элемент которого сопоставляется с одним из интервалов. Количество элементов массива переводятся в процентный показатель количества измерений от общего числа измерений.

По полученной зависимости строится соответствующий график, вид которого представленный на рис. 2.13. Переход к относительному отображению количества измерений содержания ценных компонентов в руде в % от общего количества измерений – позволяет применить полученную форму статистического распределения содержания ценных компонентов для любого объема запасов, предназначенных к извлечению в различных породах в рамках проекта разработки месторождения. Средневзвешенное значение функции распределения количества измерений равно среднему содержанию полезного компонента в рассматриваемом объеме руды.



Рисунок 2.13 – График распределения содержания полезного компонента в руде

Полученный график статистики распределения содержания ценных компонентов берется за основу определения оптимального соотношения объема добычи руды к объему ее переработки в единицу времени. Характер распределения содержания полезного компонента и максимум количества измерений будут иметь свой собственный уникальный внешний вид для каждого месторождения. Кроме того, для построения статистического графика распределения содержания ценных компонентов может быть применено иное программное обеспечение, аналогичное Microsoft Excel, в функционал которого входит обработка массива данных, формирование и оперирование таблицами, построение графических зависимостей.

2.5. Построение производственно-финансовой модели функционирования золотодобывающего предприятия при различных режимах развития горных работ в карьере

Как было отмечено выше, уровень переработки руды за единицу времени может остаться относительно неизменным на протяжении всего периода освоения месторождения, анализу и оптимизации изменчивости подвергается только уровень добычи руды в единицу времени. Таким образом, выбор наиболее предпочтительной стратегии и календарного графика разработки месторождения сводится к определению оптимального соотношения уровня добычи руды к уровню ее переработки в единицу времени, который соответствует заданной пропорции превышения объемов добычи руды над относительно неизменной во времени величиной переработки.

Базовая стратегия разработки месторождения, как правило, предусматривает равенство объемов добычи и объемов переработки за единицу времени на протяжении всего периода эксплуатации месторождения, при этом добытая руда в полном объеме направляется на переработку. Таким образом, основные производственные показатели разработки месторождения остаются неизменными в течение всего периода эксплуатации месторождения. На рис. 2.14 представлен график сохранения положительного денежного потока на протяжении всего времени отработки запасов месторождения при реализации базовой стратегии разработки [9].

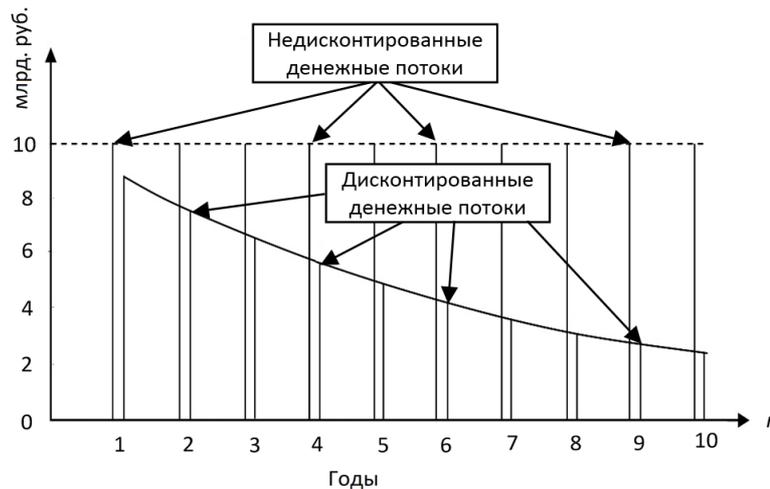


Рисунок 2.14 – Динамика дисконтированных и недисконтированных денежных потоков при базовой стратегии разработки месторождения

Метод оптимизации стратегии и календарного графика, которому посвящено данное исследование, предполагает различие в текущих уровнях добычи и переработки руды. Как было отмечено выше, величина переработки руды за единицу времени остается неизменной на протяжении всего срока эксплуатации месторождения в связи с высокими капитальными затратами на увеличение производственных мощностей перерабатывающих установок, что, в свою очередь, может негативно отразиться на величине чистой приведенной стоимости проекта.

Данный подход приводит к неравенству величин добычи и переработки с течением времени и разделению процесса разработки месторождения на несколько этапов. Для каждого этапа устанавливается свой уровень добычи руды в единицу времени, соответствующий достижению максимально возможной экономической выгоды от разработки месторождения в целом.

Установление величины добычи руды за единицу времени на уровне, превышающем производительность перерабатывающего производства, приводит к откладыванию излишков руды «на потом» путем организации ее складирования и созданию тем самым экономического и технологического буфера.

Определение оптимального соотношения уровней добычи руды к переработке за единицу времени для каждого этапа освоения – ключевое звено предлагаемого метода оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождения. На графике, представленном на рис. 2.15, определяется граничное пороговое содержание ценного компонента.



Рисунок 2.15 – График статистики распределения содержания полезного компонента в руде с разделением на этапы переработки по пороговому значению

Руда с содержанием, выше граничного значения, отправляется на переработку сразу после добычи, в то время как руда, с содержанием ниже порогового значения, складировается для переработки на последующих этапах. Таким образом, устанавливается прямая зависимость между пороговым значением содержания полезного компонента в руде, разделяющим проект освоения месторождения на этапы, и соотношением уровня добычи руды к уровню переработки за единицу времени.

Различие в уровнях добычи и переработки руды приводит к неравномерности распределения значений денежного потока с течением времени, который изменяется от этапа к этапу. Излишки добытой руды на текущем этапе планирования используются в качестве экономического буфера на последующих этапах. В рамках каждого из этапов производительность рудника имеет различные значения, что влияет на величину годового денежного потока, представленного на рис. 2.16.

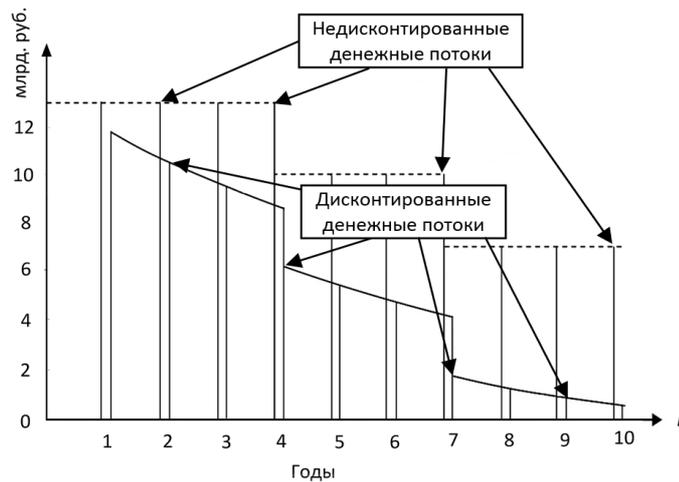


Рисунок 2.16 – Динамика денежных потоков разработки месторождения твердых полезных ископаемых этапами при неравенстве производительности добывающего и перерабатывающего производств

Увеличение денежного потока на первом этапе разработки месторождения приводит к росту показателя NPV разработки месторождения за счет снижения периода дисконтирования с максимальным притоком средств, при этом сумма недисконтированных денежных потоков по годам остается неизменной.

Таким образом, предлагаемый метод оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых реализуется в виде разделения процесса освоения месторождения на этапы путём превышения уровня добычи руды над уровнем переработки за единицу времени на начальных этапах освоения месторождения. При этом менее технологичные руды складировались для переработки в будущем. Задача поиска оптимального сценария разработки месторождения сводится к определению оптимального количества этапов с соответствующей им производительностью рудника, а также рационального соотношения производительности добывающего производства к перерабатывающему на каждом этапе разработки.

Выводы по 2 главе

1. Показано, что стратегия и календарный график разработки месторождений являются результатом формирования сложной имитационной оптимизированной модели, включающей множество параметров, ограничений, уравнений связи, влияющих на производственно-хозяйственные результаты.

2. Доказано, что увеличить объемы горных работ можно путем использования резервов, заложенных на этапе проектирования разработки месторождения, например, за счет регулирования режима развития фронтов добычных и вскрышных работ на рабочих уступах.

3. Оптимизация календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых основана на определении максимальной чистой приведенной стоимости проекта, что в свою очередь накладывает определенные ограничения на величину капитальных вложений. Данные обстоятельства приводят к тому, что в рамках оптимизации календарного графика стоит варьировать исключительно производительностью по добыче руды, оставляя уровень переработки руды неизменным.

4. Отличительной особенностью оптимизации с помощью программного обеспечения OptiMine является возможность включения в расчет процесса складирования руды с пониженным средним содержанием, переработка которой экономически невыгодна на этапе ее добычи, но приносит дополнительный денежный поток в будущем.

5. Предложенная организация складирования руды с промежуточным содержанием полезного компонента на примере медно-золотого карьера позволила: понизить минимальное содержание меди и золота в руде, пригодной для переработки, тем самым увеличив число вовлеченных в переработку запасов, продлить срок эксплуатации месторождения с 13 до 16 лет, увеличить показатель NPV проекта с 193 до 200 млн. долларов.

6. Обоснован новый подход к проектированию устойчивого развития горнотехнических систем, снованный на определении в горном проекте диапазона динамично изменяющихся в ходе развития горных работ на месторождении базовых показателей: производственной мощности комплексов добычи, временного складирования и переработки руд и техногенного сырья, уровня кондиций на добываемые и перерабатываемое руды, бортового содержания ценных компонентов, варьирование которых в разработанной финансово-производственной модели функционирования горнотехнической системы позволяет выбрать оптимальный вариант.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА СООТНОШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДОБЫЧНОГО И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ЗОЛОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

3.1. Исследование зависимости однородности распределения золота в руде месторождения на структуру производственной мощности золотодобывающего предприятия

Месторождения золота в зависимости от особенностей залегания, геологического строения и минерального состава, структуры массива горных пород характеризуются различным распределением содержания ценного компонента на участках рудного тела. Инструментом, позволяющим наглядно отобразить специфику сосредоточения золота в руде, является график статистики распределения содержания драгоценных металлов, отражающий частоту присутствия того или иного содержания золота на различных участках месторождения [92]. В качестве единичного объема рудного массива, характеризующего содержание в рудном теле, принимается элементарная выемочная единица, принятая в проекте отработки месторождения.

Уникальность формы распределения содержания золота для каждого месторождения определяется степенью однородности – величиной разброса содержания относительно среднего значения по месторождению или его участку. Степень однородности распределения содержания драгоценного металла в руде влияет на показатели извлечения золота на различных этапах и технологических стадиях освоения месторождения, что, в свою очередь, оказывает определяющее воздействие на суммарный доход проекта его разработки. Экономическая эффективность разработки месторождений также существенно зависит от однородности графика статистики распределения золота в руде в связи с возникающими различиями среднего содержания ценных компонентов в руде, отправляемой на переработку на различных этапах освоения.

Характер влияния распределения и разброса содержания золота в руде на экономическую эффективность проекта отработки запасов рассмотрим на примере условного месторождения с типичными для современного состояния отрасли золотодобычи производственными и экономическими характеристиками. Для этого рассмотрим три варианта неоднородности унимодального распределения содержания полезного компонента и определим величины эконо-

мической выгоды, достигаемой от применения метода оптимизации структуры производственной мощности предприятия на стадии добычи и переработки для каждого из вариантов. Критерием оценки экономической выгоды принята величина чистой приведенной стоимости проекта освоения месторождения (ЧПС-NPV) с различными характеристиками неоднородности распределения золота в руде.

Все три варианта неоднородностей распределения золота в руде для наглядности и упрощения анализа будут представлены в виде нормального распределения вероятностей с математическим ожиданием $m = 1,2$ г/т, соответствующим среднему содержанию золота в руде условного моделируемого месторождения. Нормальное распределение задается функцией плотности распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1)$$

Различные виды степеней однородностей распределения содержания золота в руде формируются за счет задания различных значений среднеквадратичного отклонения (σ) при нормальном распределении, принимаемых:

- $\sigma = 0,04$ г/т – для весьма однородного распределения;
- $\sigma = 0,2$ г/т – для средне однородного распределения;
- $\sigma = 0,5$ г/т – для неоднородного распределения.

Графики распределения содержания золота с различными степенями неоднородности содержания золота представлены на рис. 3.1-3.3.

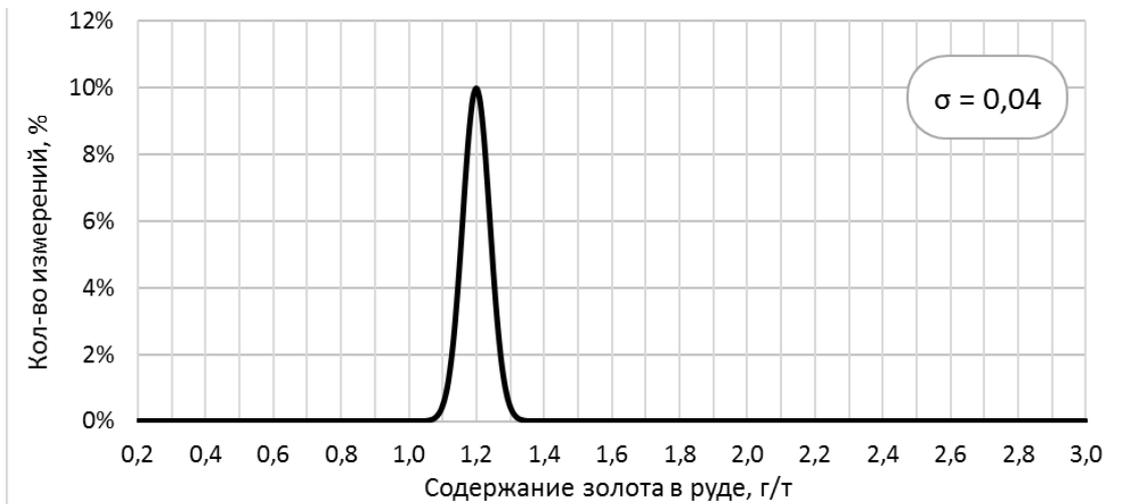


Рисунок 3.1 – Характеристика весьма однородного распределения содержания золота в руде



Рисунок 3.2 – Характеристика средне однородного распределения содержания золота в руде



Рисунок 3.3 – Характеристика неоднородного распределения содержания золота в руде

Из графиков видно, что увеличение среднеквадратичного отклонения приводит к снижению неоднородности распределения содержания золота в руде, что обусловлено зависимостью неоднородности содержания и среднеквадратического отклонения от среднего содержания в соответствии с функцией плотности распределения.

Чем больше величина среднеквадратичного отклонения от среднего значения, тем менее плотно сосредоточены значения содержаний золота в руде относительно математического ожидания, менее вероятно совпадение динамики замера со средним содержанием и тем толще, так называемые, «хвосты» графика распределения вероятностей.

Для расчета критерия оценки эффективности метода оптимизации структуры производственной мощности по максимуму чистой приведенной

стоимости проекта отработки запасов месторождения (NPV) для трех принципиально различных типов распределения содержания золота в руде: выдержанного относительно среднего, среднеоднородного и неоднородного, построены соответствующие производственно-финансовые модели реализации проекта освоения месторождения. Исходные производственные и экономические показатели проекта разработки условного месторождения с суммарными запасами 30 млн. тонн руды со средним содержанием золота 1,2 г/т ля формирования структуры модели представлены в табл. 3.1 и табл. 3.2. Принятые значения соответствуют актуальным характеристикам золотодобывающих предприятий компании «Селигдар», в частности месторождениям золота Якутии – Нижнеякоитского рудного поля и Рябиновое.

Таблица 3.1 – Исходные производственные характеристики проекта отработки запасов месторождения золота

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>
Срок отработки запасов месторождения	10 лет
Добыча руды	3 млн. т в год
Переработка руды	3 млн. т в год
Коэффициент извлечения золота	0,8

Таблица 3.2 – Исходные экономические показатели проекта отработки запасов месторождения золота

<i>Показатель</i>	<i>Значение</i>
Цена реализации золота	3 500 руб./г
Себестоимость добычи	400 руб./г
Себестоимость переработки	400 руб./г
НДПИ	6%
Инвестиции в проект разработки месторождения	8 млрд. руб.
Ставка дисконтирования для расчета NPV	10%

Сведенные в единую таблицу и распределенные по годам отработки исходные производственные и экономические данные позволяют сформировать потоки поступлений и отчислений денежных средств за весь период эксплуатации принятого для моделирования условного золоторудного месторождения. Собранный таким образом база данных проекта отработки запасов представляет собой производственно-финансовую модель освоения месторождения. Конечным результатом модели, являющимся ориентиром в оценке эффективности проекта при реализации неоднородности распределения содержания золота в руде, является показатель чистой приведенной стоимости (NPV) проекта, рассчитанный на основе анализа денежных потоков проекта отработки запасов. Результаты расчета производственно-финансовой модели с оценкой

показателя NPV для базового варианта отработки запасов месторождения с равными значениями производственной мощности предприятия по добыче и переработке руды в год представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Производственно-финансовая модель реализации базового варианта отработки запасов месторождения при производственной мощности 3 млн.т. в год по добыче и переработке руды

Добыча = переработка Наименование	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы											
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Добыча руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Производство золота	0,8	28 800	кг		2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880
Расчет денежных потоков															
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080
Себестоимость добычи	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		605	605	605	605	605	605	605	605	605	605	605
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960	2 960									
Процентные отчисления	12%	1 430	млн. руб.	960	1 075	355									
Операц. Денежный Поток		69 322	млн. руб.		6 000	6 720	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075
Недисконтированный ДП		49 402	млн. руб.	-8 000	-2 960	3 760	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075
Дисконтированный ДП	12%	20 374	млн. руб.	-8 000	-2 643	2 997	5 036	4 496	4 015	3 585	3 200	2 858	2 551	2 278	
NPV		20 374	млн. руб.												

В случае принятия равной производительности предприятия по добыче и переработке золотоносных руд реализация базового варианта проекта разработки месторождения дает равный экономический эффект для всех трех видов неоднородностей распределения содержания золота в руде. При равенстве уровней добычи и переработки руды в год, величина содержания золота в перерабатываемом объеме остается неизменной на протяжении всего срока отработки запасов и соответствует величине среднего содержания золота в руде месторождения – математическому ожиданию функции распределения. Таким образом, чистая приведенная стоимость базового варианта разработки месторождения с равной производительностью добычного и перерабатывающего комплексов, независимо от вида графиков распределения содержания, одинакова и равна 20,37 млрд. руб. При этом степень неоднородности содержания может проявиться только в затратах на передел.

Для оптимизации стратегии освоения месторождения рассмотрим перспективу увеличения уровня добычи в 2 раза по сравнению с уровнем переработки руды в год. Производительность перерабатывающего комплекса остается на прежнем уровне – 3 млн. тонн руды в год, а срок вскрышных и добычных работ сокращается до 5 лет с ежегодным объемом добычи 6 млн. тонн руды. Из всего объема добываемой в первые 5 лет руды первоначально на пе-

переработку отправляется наиболее технологичная часть – с наибольшим содержанием золота. Оставшаяся же часть руды, с более низким содержанием золота в течение первых 5 лет складировается и подвергается переработке во второй 5-летний период отработки запасов месторождения. Таким образом, количество золота, извлекаемого из недр и переходящего в товарную продукцию в первую половину срока освоения месторождения, значительно превышает величину производства благородного металла во второй половине срока эксплуатации месторождения.

Для каждого из трех графиков неоднородности распределения содержания золота в руде характерна своя плотность отклонения от среднего значения этого показателя в рудном теле месторождения. В связи с этим, для каждого из графиков величины среднего содержания полезного компонента в объеме перерабатываемой руды будут отличаться как в первой половине срока отработки запасов месторождения, так и во второй. В табл. 3.4 сведены средние значения содержания золота в объеме руды, отправляемой на переработку в каждом из двух пятилетних периодов освоения запасов месторождения.

На основе представленных в табл. 3.4 данных о среднем содержании золота были построены производственно-финансовые модели отработки запасов месторождения в перерабатываемой рудной массе с превышением объемов годовой добычи руды в год над переработкой в 2 раза.

Таблица 3.4 – Средние значения содержания золота в перерабатываемой руде на различных этапах освоения условного золоторудного месторождения с различной степенью неоднородности содержания золота при превышении объема добычи над переработкой в 2 раза

<i>Характеристика неоднородности</i>	<i>Среднее содержание золота в руде, г/т</i>	
	<i>первых 5 лет</i>	<i>вторых 5 лет</i>
Весьма однородное	1,23	1,17
Средне однородное	1,36	1,04
Неоднородное	1,58	0,82

Расчет динамики денежных потоков, а также показателей NPV на основе построенных моделей для весьма однородного, средне однородного и неоднородного распределения содержания золота в руде представлен в табл. 3.5-3.7.

Для всех трех видов распределения содержания золота в руде при двукратном превышении производительности по добыче в первые 5 лет деятельности над объемом годовой переработки руды операционный денежный поток сохранил положительное значение на протяжении всех 10 лет отработки месторождения золота.

Значения чистой приведенной стоимости проекта при различной неоднородности содержания золота в руде составили:

- NPV = 18,05 млрд. руб. – для весьма однородного распределения;
- NPV = 20,52 млрд. руб. – для средне однородного распределения;
- NPV = 24,76 млрд. руб. – для неоднородного распределения.

Наибольший эффект достигнут при весьма невыдержанном распределении содержания золота в массиве месторождения. По сравнению с базовым проектом обеспечен рост NPV проекта на 4,39 млрд.руб., то есть на 21,6% по сравнению с базовым проектом. При средне равномерном содержании двукратное увеличение производственной мощности горного цеха дало практически сопоставимые результаты по приведенной стоимости проекта, но результат операционной деятельности свидетельствует о возможности и в этом случае роста реальной прибыли предприятия за счет оптимизации структуры производственной мощности.

Главным преимуществом метода оптимизации структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия при разработке месторождения золота является увеличение извлечения золота на первом этапе в течение первых 5 лет освоения месторождения, что, в свою очередь, приводит к увеличению выручки от реализации металла. Однако, при этом рост выручки от реализации золота сопровождается повышением затрат на добычу руды на этом же этапе. Соотношение дополнительного притока денежных средств от увеличения выручки и дополнительного оттока, вызванного повышением уровня добычи руды в год, определяет эффективность метода оптимизации стратегии разработки месторождения.

Для месторождений с весьма однородным распределением содержания золота в руде характерна низкая чувствительность модели к уровню извлечения золота на первом и втором этапах, а дополнительные расходы на добычу руды превосходят выручку от реализации дополнительного объема золота.

Как результат, величина NPV для месторождения с весьма однородным распределением золота в руде уменьшилась, по сравнению с базовым вариантом освоения месторождения, с 20,37 млрд. руб. до 18,05 млрд. руб., то есть на 11,4%.

Для месторождений с неоднородным распределением золота в руде различия в доходе от реализации металла с более высоким содержанием полезного компонента на первом этапе освоения проявляются более ярко. Значительный рост производства золота на первом этапе приводит к увеличению выручки от реализации на величину, превосходящую рост затрат на добычу руды. На рис. 3.4-3.8 представлены графики динамики операционных денежных потоков для базового варианта и трех вариантов распределения содержания золота, а также график зависимости NPV от среднего распределения содержания (рис. 3.9).

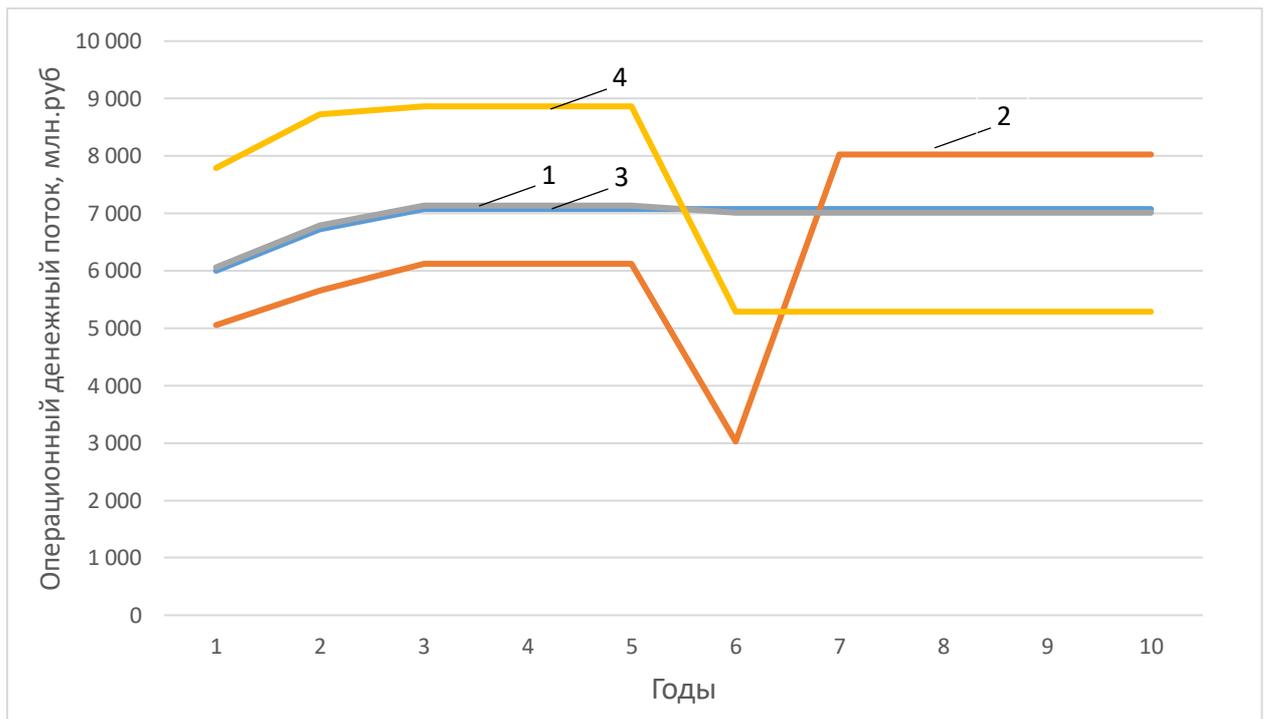


Рисунок 3.4 – Динамика операционных денежных потоков базового варианта (1) при равенстве производительности добычного и перерабатывающего комплексов и по трем вариантам распределения содержания золота: 2 – весьма однородное распределение содержания, 3 – среднеоднородное распределение содержания, 4 – неоднородное распределение содержания.

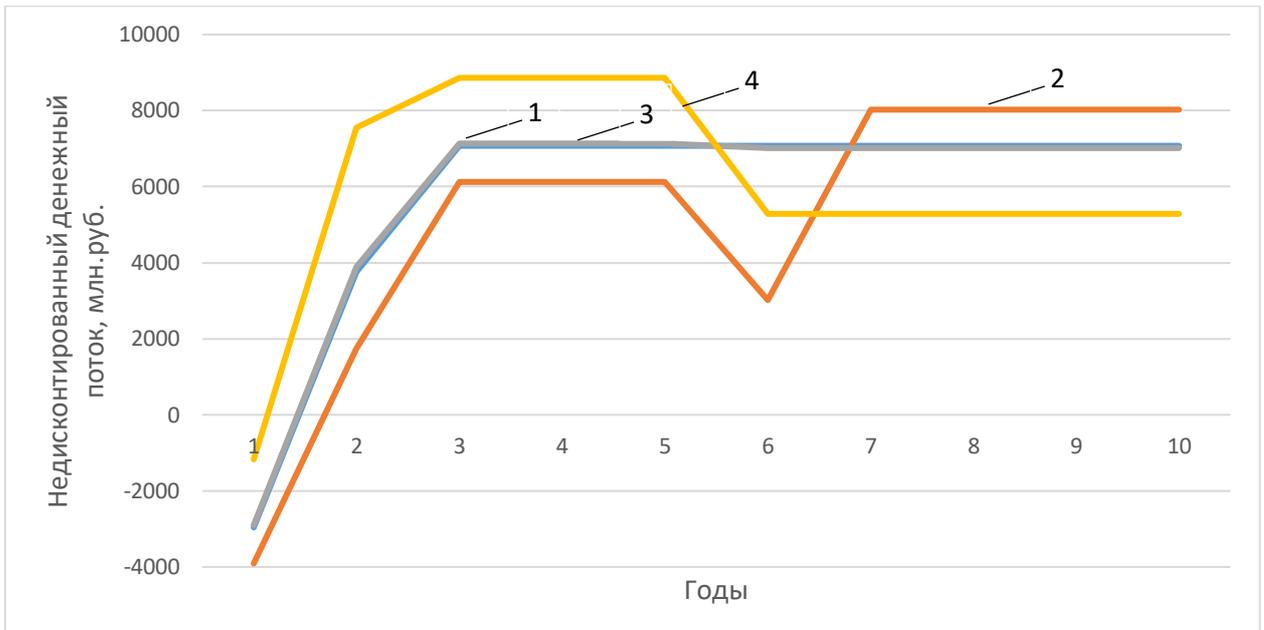


Рисунок 3.5 – Динамика undiscounted денежных потоков базового варианта (1) при равенстве производительности добычного и перерабатывающего комплексов и по трем вариантам распределения содержания золота: 2 – весьма однородное распределение содержания, 3 – среднеоднородное распределение содержания, 4 – неоднородное распределение содержания.

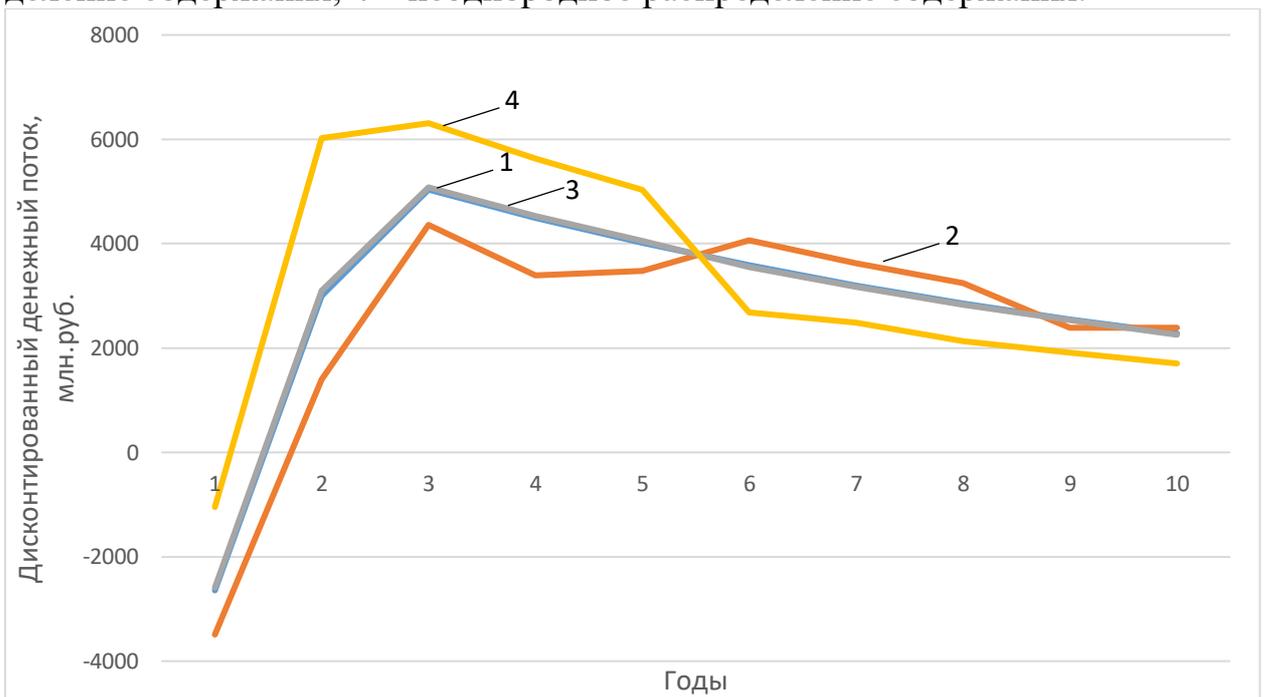


Рисунок 3.6 – Динамика discounted денежных потоков базового варианта (1) при выдержанном среднем содержании и равенстве производительности добычного и перерабатывающих комплексов и при превышении производительности по добыче в 2 раза над переработкой по трем вариантам распределения содержания золота: 2 – весьма однородное распределение содержания, 3 – среднеоднородное распределение содержания, 4 – неоднородное распределение содержания.

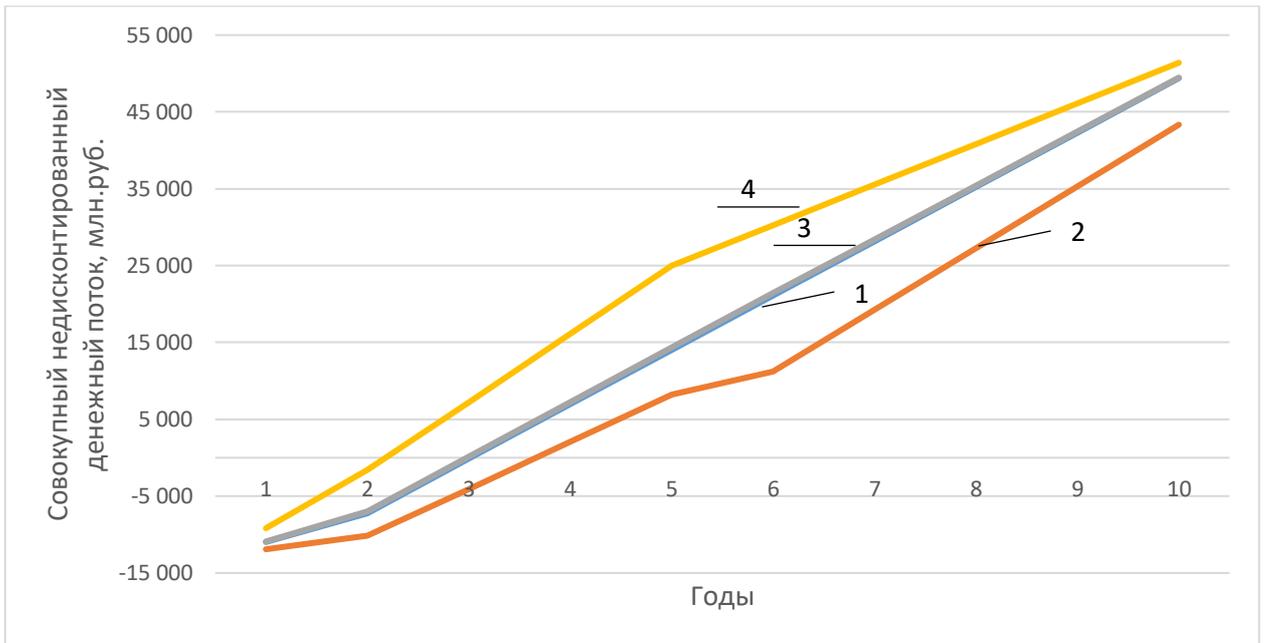


Рисунок 3.7 – Динамика совокупных недисконтированных денежных потоков базового варианта (1) при равенстве производительности добычного и перерабатывающего комплексов и по трем вариантам распределения содержания золота: 2 – весьма однородное распределение содержания, 3 – среднеоднородное распределение содержания, 4 – неоднородное распределение содержания.

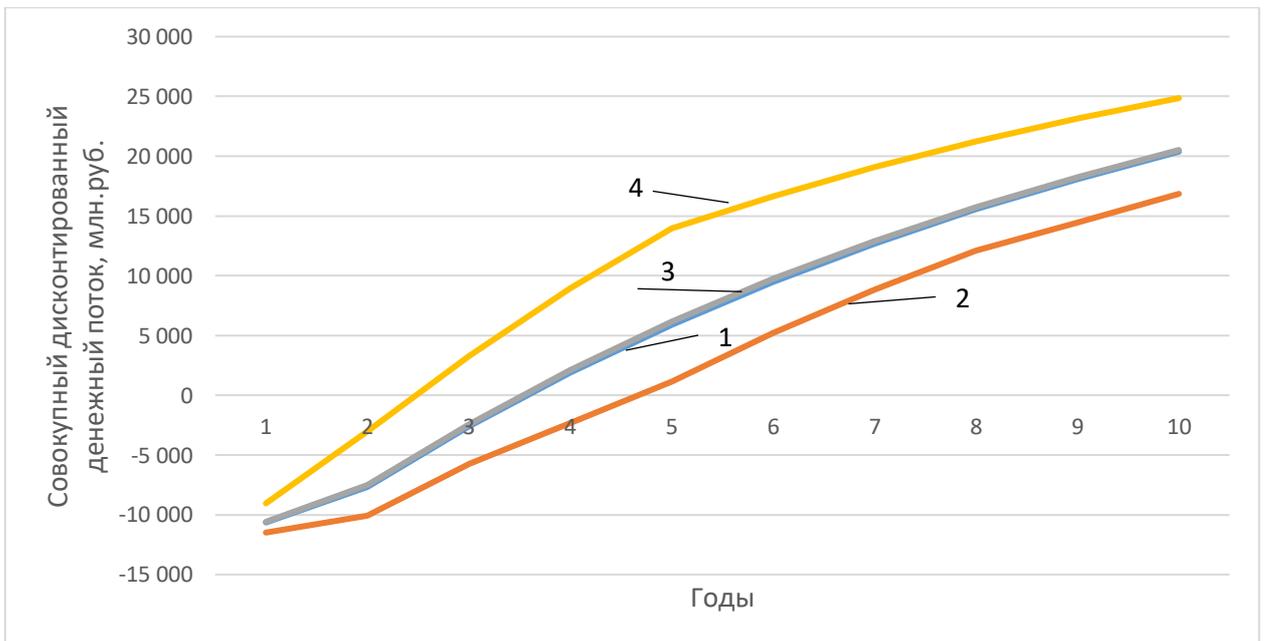


Рисунок 3.8 – Динамика совокупных дисконтированных денежных потоков базового варианта (1) при выдержанном среднем содержании и равенстве производительности добычного и перерабатывающих комплексов и при превышении производительности по добыче в 2 раза над переработкой по трем вариантам распределения содержания золота: 2 – весьма однородное распределение содержания, 3 – среднеоднородное распределение содержания, 4 – неоднородное распределение содержания.

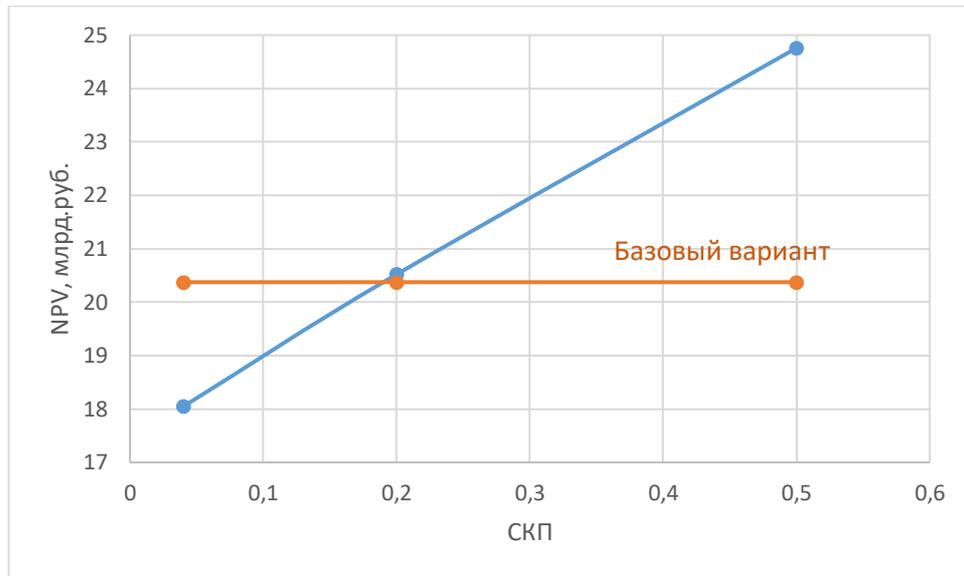


Рисунок 3.9 – График зависимости NPV от среднего содержания золота в добываемой рудной массе и при весьма невыдержанном распределении содержания и превышении производительности горного цеха над перерабатывающим в 2 раза

Анализ представленных на рис. 3.4-3.7 данных графиков относительно близкой динамики распределения операционных, недисконтированных и дисконтированных денежных потоков базового варианта при равенстве и при двукратном превышении производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим и различным разбросе содержания золота относительно среднего значения показывает, что при неоднородном распределении содержания золота по месторождению и превышению производительности горного комплекса над перерабатывающим в 2 раза в первые пять лет освоения операционные и недисконтированные денежные потоки по сравнению с базовым вариантом возрастают в среднем на 28%, дисконтированные – на 24%. Наиболее значительный разрыв отмечается на второй год освоения месторождения. В следующий пятилетний период освоения месторождения отмечается снижение значений операционных денежных потоков в среднем на 28%, недисконтированных и дисконтированных – на 24%.

При весьма однородном распределении содержания золота и превышении объемов добычи над переработкой в 2 раза в первые пять лет освоения месторождения операционные денежные потоки по сравнению с базовым вариантом снижаются в среднем на 14%, недисконтированные – на 16%, дисконтированные – до 25%. В следующий пятилетний период освоения месторож-

дения отмечается рост значений операционных, дисконтированных и недисконтированных денежных потоков в среднем на 14%. При этом на период 6-7 годов освоения месторождения отмечается наиболее интенсивный рост операционных и недисконтированных денежных потоков.

Следует отметить, что в рассмотренных примерах превышение производительности по добыче над переработкой не оптимизировалось, а принято условно в 2 раза.

Чем менее однородно распределение и чем ниже плотность распределения в окрестности среднего содержания, тем больший прирост к показателю чистой приведенной стоимости добавляет превышение объема переработки в начальный период освоения месторождения. Этот показатель должен оптимизироваться с учетом изменения содержания золота с глубиной месторождения, плотности распределения содержания относительно среднего значения с учетом роста эксплуатационных затрат на добычу на глубоких горизонтах.

3.2. Установление влияния закономерностей распределения ценных компонентов в массиве месторождения на структуру производственной мощности золотодобывающего предприятия

Предлагаемый метод оптимизации календарного графика разработки месторождения твердых полезных ископаемых перспективен к практическому применению для горнодобывающих предприятий, разрабатывающих месторождения руд, не склонных к окислению и самовозгоранию. Однако, существует ряд ограничений, которые не позволяют применить предлагаемый метод оптимизации для абсолютно любого месторождения твердых полезных ископаемых. Причины возникновения ограничений применимости метода разделены на три группы: технические, логистические и геологические.

Одним из ключевых факторов, влияющих на оптимизацию календарного плана разработки месторождений, является статистика распределения содержания полезного компонента в руде, которая неоднородность основой для проведения операционного цикла по разделению всего объема руды по этапам разработки [90]. Построение распределения содержания ценных компонентов позволяет определить граничные значения, лежащие в основе распределения

объемов добытой руды на этапах разработки, а также определить среднее содержание ценного компонента в соответствующих объемах рудной массы, направляемой на обогатительный передел, кучное выщелачивание или на временное складирование.

Распределение содержания ценных компонентов в руде может иметь случайный характер, непригодный для установления операционного цикла по разделению всего объема руды на этапах разработки месторождения.

Например, такие нестандартные распределения полезного компонента в руде характерны для алмазных месторождений, имеющие вид кимберлитовых трубок, образовавшихся в результате прорыва магмы (рис. 3.10) [68].

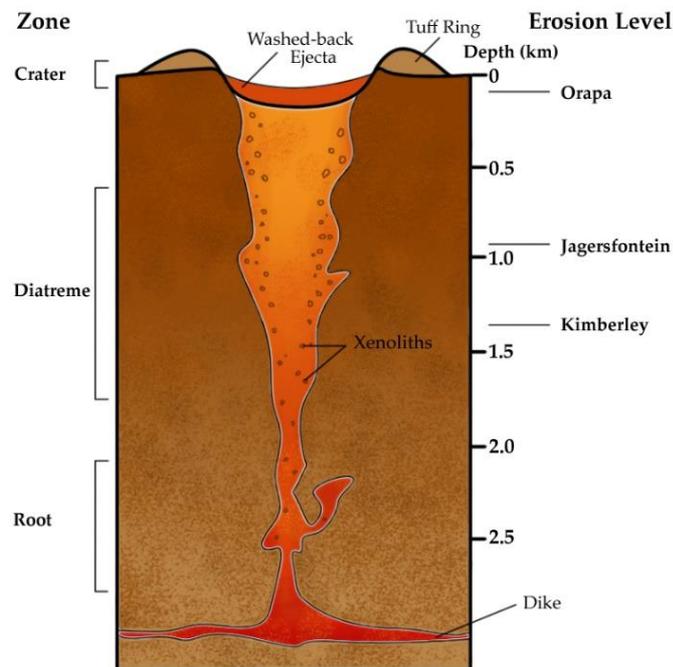


Рисунок 3.10 – Схема образования кимберлитовой трубки

Анализ проб кимберлитовых трубок показал, что средний вес кристаллов алмазов сравнительно мало варьируется от пробы к пробе. Для кимберлитовых трубок характерно равномерное распределение как по средней величине алмазов в объеме, так и по степени насыщенности алмазов в кимберлите, а соответственно и по весовому содержанию [44]. Примерами равномерного распределения содержания алмазов в теле кимберлитовых трубок являются Верхотинское месторождение имени В. Гриба в Архангельской области, а также трубки «Мир» и «Удачная» в республике Саха (Якутия).

Равномерному распределению кристаллов алмаза в кимберлитовой трубке будет соответствовать картина изменения содержания с концентрацией

относительного количества измерений проб руды вблизи определенного среднего значения. Пример такого распределения содержания алмазов в кимберлитовой трубе представлен на рис. 3.11 для Верхотинского месторождения имени В. Гриба, для которого характерна консолидация значений содержания алмазов вблизи среднего – около 1,25 кар/т.

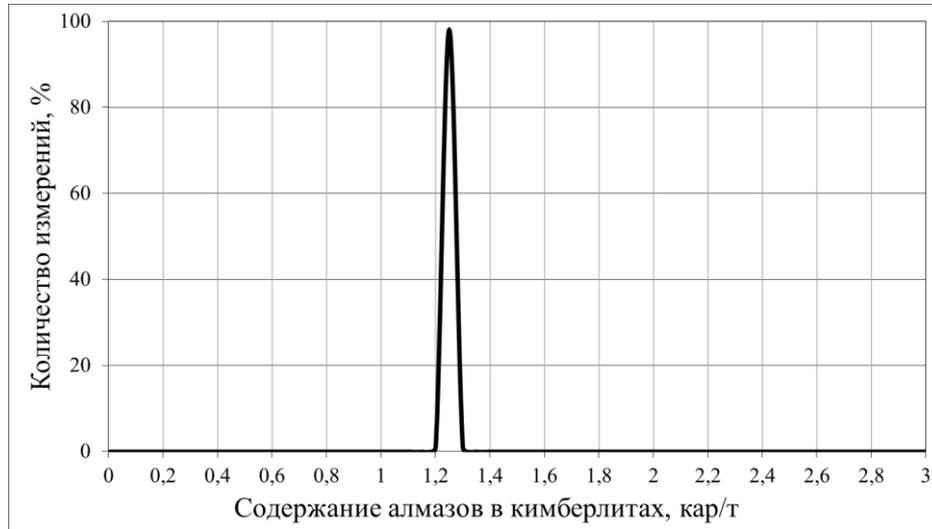


Рисунок 3.11 – Распределение содержания алмазов в кимберлитах

Для такого характера распределения содержания ценных компонентов бесперспективно разделять и оптимизировать объемы добычи и переработки руды на различных этапах развития горных работ. Очевидно, что они должны соответствовать и быть выдержанными по годам разработки месторождения.

Однако, это частный случай. Чаще руда, заключенная в недрах и потенциально пригодная для извлечения, является неоднородной по своему строению и вещественному составу и содержит ценные компоненты различного качества с характерными и свойственными для каждого месторождения закономерностями распределения вещественного состава руд. В связи с этим, метод оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождения должен базироваться на статистике распределения ценного компонента в руде и предполагает предварительный геолого-минералогический анализ разрабатываемого участка недр с целью оптимизации производственной мощности в циклах добычи и переработки соответствующих типов добываемых руд на различных этапах развития горных работ.

Основой формирования плана операционных циклов отработки каждого конкретного месторождения служит критерий экономической эффективности

в расчете на 1 тонну руды. При этом факторы, оказывающие влияние на экономику предприятия, условно разделены на два типа: технологический сорт руды и содержание ценных компонентов.

Технологический сорт руды позволяет разделить весь добываемый объем руды в зависимости от перспектив ее переработки в цикле обогащательного передела, либо чанового низкотемпературного и автоклавного или кучного выщелачивания в специально уложенных штабелях с учетом показателей извлечения ценных компонентов. По содержанию полезных компонентов при оценке качества руды, как правило, выделяется 1-2 основных компонента, ценность которых определяет объем и стоимость товарной продукции, и выделяется ряд попутных компонентов, извлечение которых, попутно с основными, часто без вложения значимых дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат позволяет повысить совокупную стоимость товарной продукции.

При определении календарного графика развития горных работ первоначально для каждого вида основного ценного компонента – металла строится статистика распределения ценного компонента в руде, на основе которой впоследствии определяется наиболее предпочтительное направление подвигания горных работ и выбирается система разработки на основе анализа экономической эффективности потенциальных вариантов.

Для каждого типа руды, отличающегося от остальных технологическими свойствами и содержанием ценных компонентов в руде, формируется свой собственный операционный цикл добычи, хранения и переработки, обеспечивающий наилучшие экономические показатели комплексного освоения месторождения.

В зависимости от специфики генезиса месторождения, формы залегания рудных тел, их расположения в пространстве, распределения качества рудного сырья с учетом установленных закономерностей формирования качества рудной массы на различных участках месторождения, формируется оптимизационная модель операционного плана развития работ по добыче, хранению и переработке рудной массы.

При разработке месторождений золота компанией «Селигдар» установлено, что характер распределения драгоценных металлов, преимущественно

золота, по глубине залегания рудного тела оказывает значимое влияние на экономику освоения месторождения открытым способом. Особенность распределения содержания золота по горизонтам месторождения определяет уровень извлечения золота на каждом из этапов отработки запасов месторождения, что, в свою очередь, обуславливает экономический эффект реализации проекта, который в значительной мере подвержен влиянию изменения качественного состава руд по глубине.

Разработка стратегии освоения месторождения с оценкой оптимального уровня превышения объемов добычи руды над уровнем переработки позволяет варьировать размер товарной продукции от реализации золота на различных этапах отработки запасов, тем самым влияя на совокупный дисконтированный доход от освоения запасов месторождения. Экономический эффект применения указанного метода оптимизации стратегии разработки месторождения будет зависеть от распределения золота в руде по глубине и площади участков месторождения.

Для установления влияния изменения содержания золота по глубине месторождения на производственные и экономические показатели золотодобычи произведено сравнение трех вариантов распределения содержания золота по глубине залегания участков рудного тела при:

- равномерном распределении содержания золота в руде;
- снижении содержания золота по глубине месторождения;
- увеличении содержания золота по глубине месторождения.

Все три варианта распределения заданы граничными значениями, изменяющимися в пределах $0,3 \div 2,1$ г/т и внутри этого диапазона, имеют измерения руды с различными средними содержаниями в равных долях, при среднем содержании золота 1,2 г/т. Во всех трех случаях среднее содержание золота в рудном теле составляет 1,2 г/т. При отсутствии закономерностей распределения содержания золота, это среднее содержание сохраняется неизменным по всей глубине залегания запасов. При равномерном снижении и увеличении содержания золота в массиве содержание задано линейно убывающей или нарастающей функцией изменения по глубине залегания с граничными значениями с содержанием золота в руде 2,1 г/т и 0,3 г/т. Графическое отображение трех

вариантов распределения содержания золота в руде по глубине залегания участков рудного тела представлены на рис. 3.12.

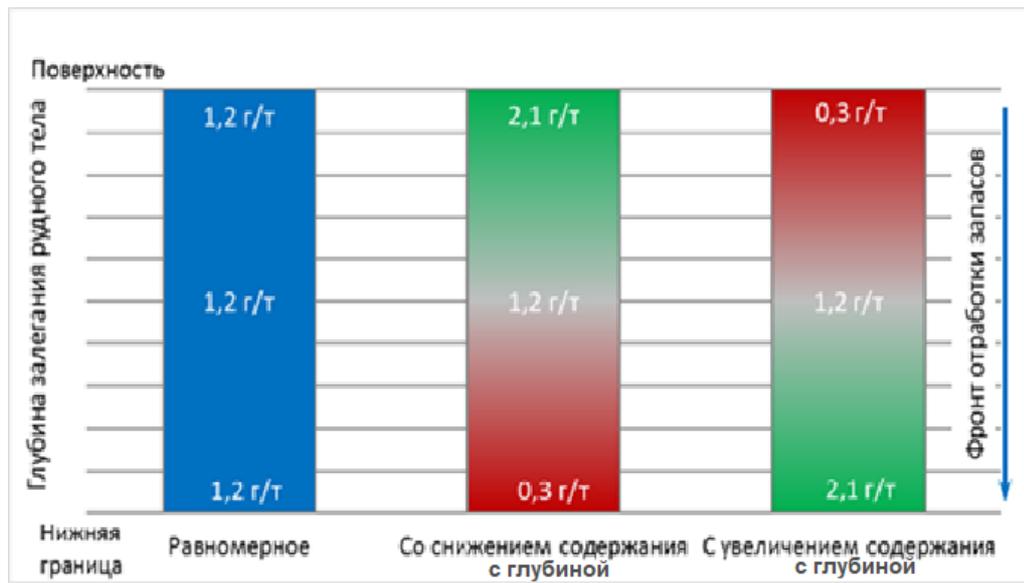


Рисунок 3.12 – Варианты распределения содержания золота по глубине залегания

Критерием выбора предпочтительной экономической стратегии разработки месторождения с выдержанным, в среднем, возрастающим или убывающим с глубиной содержанием золота выступает чистая приведенная стоимость (NPV) проекта разработки месторождения. Для построения денежных потоков операционной и инвестиционной деятельности, необходимых для расчета показателя NPV, формируется производственно-финансовая модель стратегии отработки запасов месторождения. Исходные данные представляют собой расчетную базу для построения производственно-финансовой модели (табл. 3.8 и 3.9). Базовый проект освоение месторождения предусматривает равномерную отработку запасов в количестве 30 млн. тонн руды в течение 10 лет.

Таблица 3.8 – Производственные параметры базового проекта отработки запасов месторождения

Параметр	Ед. изм.	Значение
Срок отработки запасов месторождения	годы	10
Добыча руды	млн. т в год	3
Переработка руды	млн. т в год	3
Коэффициент извлечения золота	-	0,8

Таблица 3.9 – Исходные экономические данные для оценки показателей проекта отработки запасов месторождения

Параметр	Ед. изм.	Значение
Цена реализации золота	руб./г	3 500
Себестоимость добычи	руб./т	400
Себестоимость переработки	руб./т	400
НДПИ	%	6
Инвестиции в проект разработки месторождения	млрд. руб.	8
Ставка дисконтирования для расчета NPV	%	10

Анализ экономической эффективности проекта проводится на основе сравнения производственно-финансовых показателей реализации по значению NPV для двух стратегий освоения месторождения – базовой и по предлагаемому методу оптимизации. Расчет финансовой модели произведен для каждого из трех вариантов распределения содержания золота по глубине месторождения. Базовая стратегия освоения недр ориентирована на соответствие объемов добычи и переработки руды в год в течение всего срока освоения запасов месторождения. Оптимизация структуры производственной мощности добычного и перерабатывающего производств предполагает на начальном этапе разработки месторождения превышение уровня добычи руды в год над переработкой в 2 раза – 6 млн. тонн по добыче руды к 3 млн. тонн по переработке со складированием и накоплением излишков более бедной рудной массы на временном рудном складе.

Реализация метода оптимизации структуры производственной мощности на различных этапах разработки месторождения приводит к завершению капитальных вскрышных и большей части добычных работ в пределах первых 5 лет срока эксплуатации недр с сопутствующим ростом расходов на добычу в течение этого периода. Превышение уровня добычи руды над переработкой приводит к образованию излишков рудной массы, ввиду ограничения производительности перерабатывающей установки на обогатительной фабрике и/или площадке кучного выщелачивания. Из всего объема добываемой каждый год руды на переработку отправляется предпочтительная, т.е. с наиболее высоким содержанием ценных компонентов с наилучшими технологическими характеристиками для переработки. Оставшаяся часть руды с наименьшим содержанием золота складировается на специально оборудованных полигонах.

Базовая стратегия освоения месторождения в случае равномерного распределения содержания золота в руде предполагает сопоставимые производ-

ственные результаты на протяжении всего срока отработки запасов за исключением роста операционных расходов с увеличением глубины горных работ. Производственно-финансовая модель такой стратегии с условно неизменным в течение 10 лет показателем валовой прибыли от реализации золота представлена в табл. 3.10.

Таблица 3.10 – Производственно-финансовая модель базового варианта разработки месторождения с равномерным распределением золота по глубине месторождения при равенстве объемов добычи и переработки руды

Добыча = переработка		Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы									
Наименование					0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Добыча руды			30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Переработка руды			30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота				г/т		1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Производство золота	0,8		28 800	кг		2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880
Расчет денежных потоков														
Выручка от реализации Au	3 500		100 800	млн. руб.		10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080
Себестоимость добычи	400		12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Себестоимость переработки	400		12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль			76 800	млн. руб.		7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680
НДПИ	6%		6 048	млн. руб.		605	605	605	605	605	605	605	605	605
Тело кредита				млн. руб.	8 000	8 960	2 960							
Процентные отчисления	12%		1 430	млн. руб.	960	1 075	355							
Операц. Денежный Поток			69 322	млн. руб.		6 000	6 720	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075
Недисконтированный ДП			49 402	млн. руб.	-8 000	-2 960	3 760	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075
Дисконтированный ДП	12%		20 374	млн. руб.	-8 000	-2 643	2 997	5 036	4 496	4 015	3 585	3 200	2 858	2 551
NPV			20 374	млн. руб.										

Превышение уровня добычи руды над переработкой в 2 раза в первоначальный период срока отработки запасов месторождения при реализации метода оптимизации структуры производственной мощности в случае равномерного распределения содержания золота в руде по глубине оказывает положительный экономический эффект на стратегию освоения недр. В течение первых 5 лет на переработку отправляется руда с повышенным содержанием золота по сравнению со средним значением, а все, что ниже среднего содержания – направляется на склад.

Увеличение выручки от реализации золота с повышенным по сравнению с базовой стратегией содержанием в перерабатываемой руде превосходит рост расходов на двойной объем добычи руды более чем в 3 раза. В результате такого подхода, значительно увеличивается денежный поток в первые 5 лет разработки месторождения. Во второй 5-летний период денежный поток снижается, но сохраняет положительное значение за счет переработки другой половины руд с более низким содержанием золота, складированной в первый 5-летний период эксплуатации месторождения, но отсутствие операционных затрат на добычу руды позволяет сохранить положительный поток. Показатель NPV, рассчитанный по производственно-финансовой модели (табл. 3.11), увеличивается на 28% за весь период отработки запасов по сравнению с базовой стратегической моделью освоения месторождения.

Таблица 3.11 – Результаты расчета производственно-финансовой модели разработки месторождения с двукратным превышением мощности добычного комплекса относительно перерабатывающего с равномерным распределением золота по глубине

Наименование	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы											
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Добыча руды		30 000	тыс. т		6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	0	0	0	0	0
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Производство золота	0,8	28 800	кг		3 960	3 960	3 960	3 960	3 960	3 960	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800
Расчет денежных потоков															
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		13 860	13 860	13 860	13 860	13 860	13 860	6 300	6 300	6 300	6 300	6 300
Себестоимость добычи	400	12 000	млн. руб.		2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	0	0	0	0	0
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		10 260	10 260	10 260	10 260	10 260	10 260	5 100	5 100	5 100	5 100	5 100
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		832	832	832	832	832	832	378	378	378	378	378
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960	607									
Процентные отчисления	12%	1 148	млн. руб.	960	1 075	73									
Операц. Денежный Поток		69 604	млн. руб.		8 353	9 356	9 428	9 428	9 428	9 428	4 722	4 722	4 722	4 722	4 722
Недисконтированный ДП		52 037	млн. руб.	-8 000	-607	8 749	9 428	9 428	9 428	9 428	4 722	4 722	4 722	4 722	4 722
Дисконтированный ДП	12%	26 144	млн. руб.	-8 000	-542	6 974	6 711	5 992	5 350	2 392	2 136	1 907	1 703	1 520	
NPV		26 144	млн. руб.												

Сравнительная динамика совокупного операционного денежного потока и дисконтированного доходов при равной и двукратно превышающей производительности добычного и перерабатывающего комплексов показана на рис.3.13.

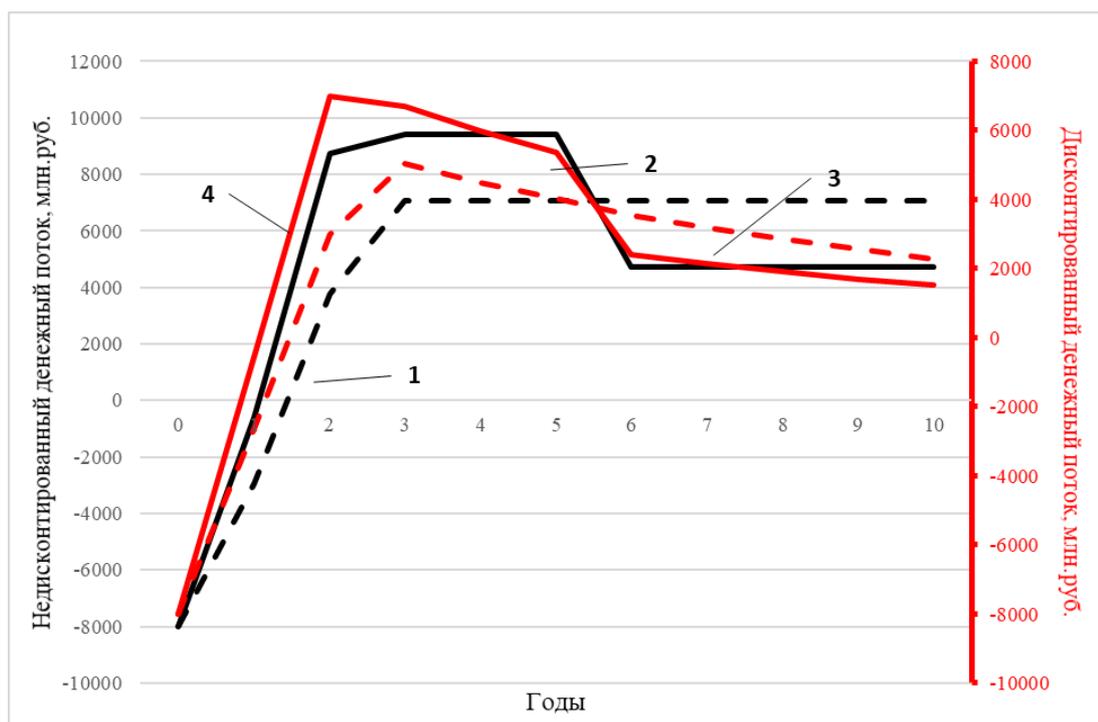


Рисунок 3.13 – Динамика денежного потока недисконтированного (1 – при равенстве, 2 – при двукратном превышении производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим) и дисконтированного (3 – при равенстве, 4 – при двукратном превышении производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим)

Как видно из данных рисунка, даже при выдержанном по глубине содержанию золота в массиве месторождения, превышение в начальный период

(первые 5 лет освоения) производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим в 2 раза позволяет увеличить NPV в 1,25 раз.

Разработка месторождения золота с содержанием, снижающимся по глубине залегания месторождения, при всех прочих равных составляющих является более экономическим выгодным проектом при равенстве производительности добычного и перерабатывающего комплексов. Более высокое содержание золота в руде вблизи поверхности позволяют извлекать самое большое количество золота и наибольшую выручку в первые годы отработки запасов месторождения. Достижение максимумов денежного потока в первые годы разработки месторождения положительно влияет на показатель NPV проекта освоения месторождения, в расчете которого используются принципы дисконтирования. В этом случае денежные потоки первых лет меньше подвержены обесцениванию от дисконтирования, способствуя тем самым росту показателя NPV, расчет которого представлен в табл. 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты расчета производственно-финансовой модели базового варианта разработки месторождения со снижающимся содержанием золота по глубине залегания руды

Добыча = переработка	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование														
Добыча руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		2,01	1,83	1,65	1,47	1,29	1,11	0,93	0,75	0,57	0,39
Производство золота	0,8	28 800	кг		4 824	4 392	3 960	3 528	3 096	2 664	2 232	1 800	1 368	936
Расчет денежных потоков														
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		16 884	15 372	13 860	12 348	10 836	9 324	7 812	6 300	4 788	3 276
Себестоимость добычи	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		14 484	12 972	11 460	9 948	8 436	6 924	5 412	3 900	2 388	876
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		1 013	922	832	741	650	559	469	378	287	197
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960									
Процентные отчисления	12%	1 075	млн. руб.	960	1 075									
Операц. Денежный Поток		69 677	млн. руб.		12 396	12 050	10 628	9 207	7 786	6 365	4 943	3 522	2 101	679
Недисконтированный ДП		52 717	млн. руб.	-8 000	3 436	12 050	10 628	9 207	7 786	6 365	4 943	3 522	2 101	679
Дисконтированный ДП	12%	30 367	млн. руб.	-8 000	3 068	9 606	7 565	5 851	4 418	3 224	2 236	1 422	758	219
NPV		30 367	млн. руб.											

Превышение объема добычи над объемом переработки в 2 раза в этом случае при снижении содержания золота по глубине месторождения не способствует увеличению чистой приведенной стоимости проекта освоения месторождения. Добиться роста объемов реализации золота в первый 5-летний срок разработки месторождения не удастся, ввиду увеличения в этот период общих затрат на добычу руды, что влечет снижение операционных доходов по сравнению с базовой стратегией освоения, подразумевающей равную произ-

водственную мощность горного и перерабатывающих производств. Негативный эффект от роста объемов добычи на первом этапе освоения месторождения с двойной производительностью добычного производства относительно перерабатывающего комплекса отражен в табл. 3.13.

Сопоставимая динамика операционного денежного потока за 10 лет отработки карьера с равной производительностью добычного и перерабатывающего производства – 3 млн.т. и при двукратном превышении производительности карьера – 6 млн. и сохранении годовых объемов переработки 3 млн.т. свидетельствует о явном проигрыше второго варианта: объем недисконтированного дохода в этом случае снижается на 20%, дисконтированного на 15%, а показатель NPV ниже на 10%.

Таблица 3.13 – Результаты расчета производственно-финансовой модели разработки месторождения при двукратном превышении производственной мощности горного цеха относительно перерабатывающего в случае снижения содержания золота по глубине месторождения

Добыча к переработке 2 к 1	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование														
Добыча руды		30 000	тыс. т		6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	0	0	0	0	0
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		2,01	1,83	1,65	1,47	1,29	1,11	0,93	0,75	0,57	0,39
Производство золота	0,8	28 800	кг		4 824	4 392	3 960	3 528	3 096	2 664	2 232	1 800	1 368	936
Расчет денежных потоков														
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		16 884	15 372	13 860	12 348	10 836	9 324	7 812	6 300	4 788	3 276
Себестоимость добычи	400	12 000	млн. руб.		2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	0	0	0	0	0
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		13 284	11 772	10 260	8 748	7 236	8 124	6 612	5 100	3 588	2 076
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		1 013	922	832	741	650	559	469	378	287	197
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960									
Процентные отчисления	12%	1 075	млн. руб.	960	1 075									
Операц. Денежный Поток		69 677	млн. руб.		11 196	10 850	9 428	8 007	6 586	7 565	6 143	4 722	3 301	1 879
Недисконтированный ДП		52 717	млн. руб.	-8 000	2 236	10 850	9 428	8 007	6 586	7 565	6 143	4 722	3 301	1 879
Дисконтированный ДП	12%	28 496	млн. руб.	-8 000	1 996	8 649	6 711	5 089	3 737	3 832	2 779	1 907	1 190	605
NPV		28 496	млн. руб.											

Это свидетельствует, что в случае, если верхняя часть золоторудного месторождения представлена более богатой рудой, не имеет смысла увеличивать объемы добычных комплексов, а перерабатывать следует ровно столько, сколько можно переработать, отказавшись от дополнительных затрат на добычу и складирование излишних объемов руды, которые только снижают операционные доходы в начальный, наиболее ответственный для инвестиционного проекта период. Проект отработки запасов месторождения с увеличивающимся содержанием золота по глубине залегания руды по базовому проекту является явно убыточным. Низкая выручка от реализации золота в первые годы разработки месторождения, обусловленная малым содержанием драгоценного металла в руде вблизи поверхности земли, генерирует отрицательный

или весьма малый положительный денежный поток, который растягивает срок возврата инвестиций на несколько лет и делает проект явно убыточным.

Рост значений денежных потоков проявляется только в последние годы отработки запасов месторождения, когда на переработку поступают руды с высоким содержанием золота, извлеченные из самых глубоких горизонтов недр. Однако, ввиду удаленности срока приведения стоимости проекта при дисконтировании и, как следствие, сильной подверженности этому влиянию, высокий денежный поток последних лет не позволяет вывести проект освоения месторождения из убытка к прибыли. Производственно-финансовая модель с отрицательным значением показателя NPV такого проекта по базовой стратегии разработки представлена в табл. 3.14.

Отработка запасов месторождения с ростом содержания золота в руде по глубине месторождения с применением способа оптимизации стратегии освоения недр и выбором рациональной структуры производительности горнодобывающего предприятия позволяет вывести проект разработки на положительную рентабельность и увеличить совокупный доход по сравнению с базовой стратегией.

Таблица 3.14 – Результаты расчета производственно-финансовой модели базового варианта разработки месторождения с равной производительностью горного и перерабатывающего цеха при условии увеличения содержания золота по глубине месторождения

Добыча = переработка	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование														
Добыча руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		0,39	0,57	0,75	0,93	1,11	1,29	1,47	1,65	1,83	2,01
Производство золота	0,8	28 800	кг		936	1 368	1 800	2 232	2 664	3 096	3 528	3 960	4 392	4 824
Расчет денежных потоков														
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		3 276	4 788	6 300	7 812	9 324	10 836	12 348	13 860	15 372	16 884
Себестоимость добычи	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		876	2 388	3 900	5 412	6 924	8 436	9 948	11 460	12 972	14 484
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		197	287	378	469	559	650	741	832	922	1 013
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960	10 035	9 139	6 713	2 576					
Процентные отчисления	12%	4 491	млн. руб.	960	1 075	1 204	1 097	806	309					
Операц. Денежный Поток		66 261	млн. руб.		-396	896	2 425	4 138	6 055	7 786	9 207	10 628	12 050	13 471
Недисконтированный ДП		20 838	млн. руб.	-8 000	-9 356	-9 139	-6 713	-2 576	3 480	7 786	9 207	10 628	12 050	13 471
Дисконтированный ДП	12%	-6 995	млн. руб.	-8 000	-8 353	-7 285	-4 778	-1 637	1 975	3 945	4 165	4 293	4 345	4 337
NPV		-6 995	млн. руб.											

Увеличение объемов добычи в 2 раза дает возможность на более ранней стадии освоения месторождения привлекать в переработку руды с более высоким содержанием полезного компонента, заключенные на большей глубине в недрах за счет изменения режима развития горных работ и более быстрых темпов углубки карьера. Реализация такой возможности увеличивает денежный

поток, несмотря на дополнительные операционные затраты на увеличение добычи в 2 раза, сокращает срок возврата инвестиций в проект. Все это приводит к положительному значению показателя NPV проекта, расчет которого с помощью производственно-финансовой модели представлен в табл. 3.15.

Таблица 3.15 – Результаты расчета производственно-финансовой модели разработки месторождения с увеличением производительности добычного цеха по отношению к перерабатывающему комплексу при условии роста содержания золота по глубине месторождения

Добыча к переработке 2 к 1	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование														
Добыча руды		30 000	тыс. т		6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	0	0	0	0	0
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		0,57	0,93	1,29	1,65	2,01	1,83	1,47	1,11	0,75	0,39
Производство золота	0,8	28 800	кг		1 368	2 232	3 096	3 960	4 824	4 392	3 528	2 664	1 800	936
Расчет денежных потоков														
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		4 788	7 812	10 836	13 860	16 884	15 372	12 348	9 324	6 300	3 276
Себестоимость добычи	400	12 000	млн. руб.		2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	0	0	0	0	0
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		1 188	4 212	7 236	10 260	13 284	14 172	11 148	8 124	5 100	2 076
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		287	469	650	832	1 013	922	741	559	378	197
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960	10 035	7 496	1 810						
Процентные отчисления	12%	3 396	млн. руб.	960	1 075	1 204	900	217						
Операц. Денежный Поток		67 356	млн. руб.		-174	2 539	5 686	9 211	12 271	13 250	10 407	7 565	4 722	1 879
Недисконтированный ДП		31 055	млн. руб.	-8 000	-9 134	-7 496	-1 810	7 401	12 271	13 250	10 407	7 565	4 722	1 879
Дисконтированный ДП	12%	5 030	млн. руб.	-8 000	-8 156	-5 976	-1 288	4 704	6 963	6 713	4 708	3 055	1 703	605
NPV		5 030	млн. руб.											

Сравнение динамики операционного недисконтированного и дисконтированного денежных потоков свидетельствуют, что изменение направления развития горных работ в глубину при углубочной системе открытой разработки с возможным складированием бедных руд с верхних горизонтов во временный отвал и первоочередной отработкой богатых руд с глубоких горизонтов позволяет при удвоенной производительности горного цеха вывести инвестиционный проект освоения месторождения в положительную динамику. При этом NPV проекта увеличивается до 5080 млн.руб. и абсолютное положительное изменение составляет 12025 млн.руб.

Выполненные расчеты наглядно свидетельствуют о возможности управлять привлекательностью проекта за счет изменения объемов добычи и переработки руды на различных этапах развития горных работ. При этом весьма важное значение имеют закономерности распределения содержания ценных компонентов в массиве месторождения.

Следует отметить, что в большинстве случаев превышение производительности добычного производства над перерабатывающим в первые годы функционирования карьера позволяет существенно увеличить операционные денежные потоки, за счет этого сократить сроки оплаты кредита. При этом недисконтированный доход от освоения месторождения увеличивается в 1,5-2

раза, а дисконтированный – в 1,7-2 раза. В совокупности это способствует росту показателя NPV проекта в 1,5 раза.

В случае относительно выдержанных колебаний в содержании драгоценных металлов по глубине месторождения предпочтительно превышение объемов добычи над переработкой со складированием относительно бедных руд во внешних временных рудных складах. При росте содержания золота с глубиной месторождения превышение объемов добычи позволяет значимо поднять доходность проекта за счет управляемых направлений развития горных работ в глубину массива. В случае более высокого содержания золота вблизи поверхности, доходы проекта выше при равенстве объемов добычи и переработки руды.

Результаты расчетов чистой приведенной стоимости для каждого из трех вариантов распределения золота по глубине залегания руды при реализации двух различных стратегий освоения месторождения – базовой и по методу оптимизации представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Сравнение показателей NPV по базовой стратегии при равенстве производительности добычного и перерабатывающего комплексов и при удвоении значения производственной мощности горного цеха по отношению к обогательному

Вариант распределения содержания золота в массиве месторождения	Содержание золота, г/т		Показатель NPV, млн. руб.			
	среднее	вблизи поверхности /на глубине	3 млн.т./ 3 млн.т.	6 млн.т./ 3 млн.т.	Изменение	
					млн.т.	%
В среднем не меняется	1,2	1,2/1,2	20 374	26 144	+ 5 770	28
Снижается с глубиной	1,2	2,1/0,3	30 367	28 496	- 1 871	-6
Увеличивается с глубиной	1,2	0,3/2,1	- 6 995	5 030	+ 12 025	171

Экономический эффект применения предложенного способа оптимизации структуры производственной мощности горнодобывающего предприятия с открытым способом добычи зависит от характера распределения содержания золота по глубине месторождения и плотности распределения содержания относительно среднего значения. Наибольшую выгоду метод оптимизации приносит проектам, для которых характерно залегание руды с наибольшим содержанием полезного компонента в глубинных слоях недр, расположенных в са-

мых далеких участках рудного тела относительно поверхности Земли. Реализация метода оптимизации производственной мощности для таких месторождений может позволить рентабельно отработать ранее не перспективные месторождения с достижением положительных значений NPV горного проекта. Чем выше разброс содержания относительно среднего значения, тем более привлекательно применение метода оптимизации соотношения производственной мощности добычного и перерабатывающего комплексов

3.3. Исследование процессов переработки руд месторождения Рябиновое

Для исследования процессов переработки руд месторождения Рябиновое были взяты представительные пробы и определены основные природные разновидности различных руд: первичные сульфидные, полуокисленные смешанные, окисленные. Пробы отбирались методом выборности по наиболее представительным разностям. Основным ценным компонентом в исследованных пробах является золото. Результаты определения минерального состава исследованных проб представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Результаты исследования минерального состава проб месторождения Рябиновое

Минералы	Содержание в пробах, %				
	М-1	НО-1	НС-1	НП-1	МН-1 (шихта)
Кварц	2,91	9,70	9,70	12,5	7,48
Калишпат	63,50	70,00	71,00	64,00	66,00
Плагиоклаз	2,30	1,60	1,20	1,60	1,86
Карбонаты	0,10	-	-	0,50	0,17
Роговая обманка	0,40	0,10	0,10	0,20	0,25
Пироксен	зн.	-	-	зн.	зн.
Мусковит, серицит	25,0	11,0	7,0	12,0	10,87
Эпидот	зн.	зн.	зн.	зн.	зн.
Сфен	0,1	зн.	зн.	зн.	0,04
Пирит	0,59	0,50	2,90	4,00	1,65
Халькопирит	0,10	0,10	0,20	0,10	0,11
Сфалерит	зн.	зн.	зн.	зн.	зн.
Галенит	зн.	0,10	0,10	0,10	0,06
Гематит	4,00	6,90	8,50	5,00	5,64

Серебро присутствует только в качестве примеси в самородном золоте (10-15%). Рудные минералы представлены сульфидами, преобладающим среди них является пирит. Общее содержание сульфидов не превышает 3-5%.

Самородное золото в полированных шлифах не обнаружено. Оно наблюдалось только в тяжелых фракциях. Размер золотинок колеблется от 0,01 мм до 1,5 мм.

По химическому составу пробы участков «Мусковитовый» и «Новый» месторождения Рябиновое очень похожи между собой и относятся к алюмосиликатным. Преобладающими элементами во всех пробах являются кремний, алюминий и калий. По результатам изучения химического состава исследуемых проб руды сделан вывод о том, что основными ценным компонентом в руде является золото. Серебро будет извлекаться попутно с золотом и самостоятельной ценности в руде не представляет.

Содержание сульфидной серы в пробах составило 0,3 до 2,3%, что свидетельствует о малом количестве в руде сульфидных минералов. Следует отметить незначительное содержание в рудах таких вредных примесей как сурьма и мышьяк, препятствующих извлечению золота из руд. Значительное количество в рудах углерода в органической форме косвенно может указывать на наличие у руд сорбционной активности. Значительная массовая доля золота в исследуемых пробах находится в амальгамируемой форме, в которой золото извлекается гравитационными методами обогащения и изменяется от 10 до 49%. Цианируемого золота в пробах содержится от 66,67 до 91%. На долю упорного, не извлекаемого прямым цианированием золота приходится от 9,0 до 33,33 %, что в абсолютном значении составляет 0,24 – 0,8 г/т. Изменение содержания золота в исследованных пробах составило 1,8-2,64г/т.

Выполненный фазовый анализ проб показал, что руда месторождения «Рябиновое» перспективна к переработке комбинированными методами с использованием гравитационного обогащения и гидрометаллургических методов переработки. Гранулометрический анализ предусматривал рассев пробы руды, массой 5 кг, с определением выхода классов крупности, определением содержания золота в каждом классе и расчет распределения золота по классам крупности (табл. 3.18-3.19).

Таблица 3.18 – Результаты гранулометрического анализа исходной пробы месторождения «Рябиновое», участок «Мусковитовое»

Проба	Исх. содерж., прямой анализ	Фракция	Выход		Содержание золота		Распределение золота по фракциям
	г/т		мм	г	%	г/т	
Дробление по классу «-40» мм	1,48	-60+40	57	1,14	1,01	3,51	63,7
		-40+20	3420	68,40			
		-20+10	1055	21,10	1,35	1,42	25,8
		-10+5	245	4,90	1,17	0,29	5,2
		-5+2	117	2,34	0,88	0,10	1,9
		-2+1	32	0,64	1,74	0,18	3,3
		-1+0	74	1,48			
итого			5000	100	1,10	5,51	100,0
Дробление по классу «-20» мм	1,58	-20+10	2845	56,90	1,01	2,87	46,5
		-10+5	782	15,64	1,29	1,01	16,3
		-5+2	503	10,06	1,51	0,76	12,3
		-2+1	316	6,32	1,12	0,35	5,7
		-1+0	202	4,04	1,25	0,25	4,1
		-0,5+0	352	7,04	2,66	0,94	15,1
итого			5000	100	1,24	6,18	100,0

Таблица 3.19 – Результаты гранулометрического анализа исходной пробы месторождения «Рябиновое», участок «Новое»

Проба	Исх. содерж., прямой анализ	Фракция	Выход		Содержание		Распределение золота по фракциям
	г/т		мм	г	%	г/т	
Дробление по классу «-40» мм	1,65	-60+40	395	7,90	1,96	0,77	8,6
		-40+20	2443	48,86	1,66	4,06	45,0
		-20+10	1021	20,42	1,34	1,37	15,2
		-10+5	440	8,80	3,33	1,47	16,3
		-5+2	265	5,30	1,39	0,37	4,1
		-2+1	144	2,88	2,38	0,34	3,8
		-1+0	292	5,84	2,19	0,64	7,1
итого			5000	100	1,80	9,01	100,0
Дробление по классу «-20» мм	1,96	-20+10	1857	37,14	1,68	3,12	39,7
		-10+5	1283	25,66	1,19	1,53	19,4
		-5+2	626	12,52	1,34	0,84	10,7
		-2+1	381	7,62	1,51	0,58	7,3
		-1+0	278	5,56	1,54	0,43	5,5
		-0,5+0	575	11,50	2,37	1,36	17,4
итого			5000	100	1,57	7,85	100,0

По данным гранулометрического анализа неравномерное распределение золота по классам крупности косвенно подтверждает наличие свободного золота. Зафиксировано наличие в руде свободного и связанного золота, крупностью от долей мкм до 1,5 мм.

По шкале проф. М.М. Протодьяконова шихту руд можно отнести к категории довольно крепких (IV категории). Данная категория крепости по

шкале М.М. Протодьяконову соответствует II категории дробимости по общепринятой классификации руд («руды средней твердости»). Руды характеризуются средней упорностью при измельчении.

Наличие в рудах месторождения «Рябиновое» значительного количества тонковкрапленного золота, не раскрывающегося в полном объеме при крупности измельчения 90 % класса – 0,074 мм, и присутствие органического углерода позволяет на стадии изучения вещественного состава характеризовать руды как труднообогатимые.

Также были выполнены лабораторные исследования перколяционного выщелачивания руд без укладки дополнительного дренажного слоя. Размеры перколяционной колонны: площадь сечения – 0,149 м²; диаметр колонны – 0,435 м. Непосредственно перед подачей выщелачивающего раствора с помощью гидравлического домкрата создавали давление на выщелачиваемую руду в каждой колонне, эквивалентное давлению при высоте слоя штабеля 10 м (1,5 МПа). В таком состоянии каждую колонну выдерживали 24 часа, после чего измерили усадку рудной массы. Затем в колонну с помощью перистальтического насоса подавали сверху вниз выщелачивающий раствор с pH~10,5 и C_{NaCN}~0,25 г/л. Плотность орошения руды ~ 175 л/сут м².

Динамика выщелачивания золота и суммарного его извлечения в раствор в процессе выщелачивания пробы руды участков «Мусковитовое» и «Новое» представлена на рис. 3.14, 3.15.

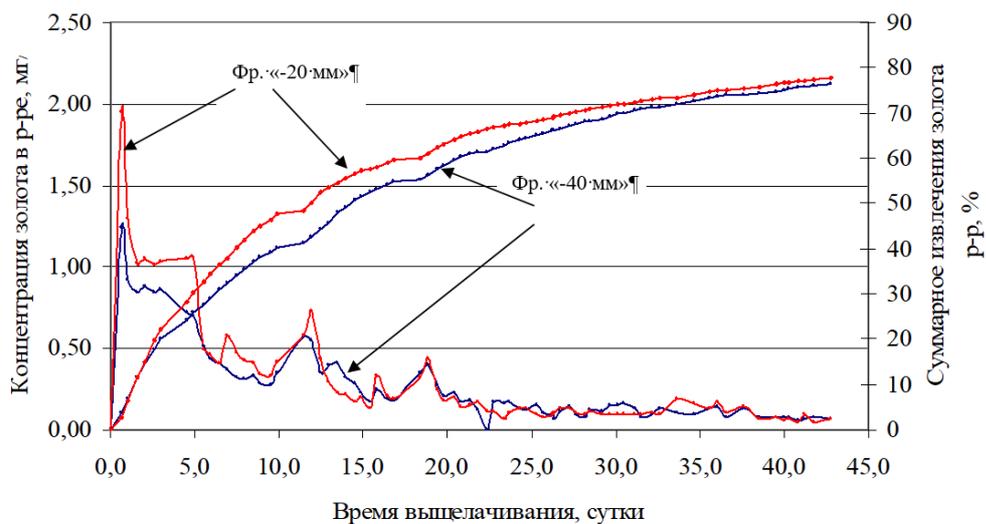


Рисунок 3.14 – Динамика концентрации золота в продуктивных растворах и суммарное извлечение в раствор перколяционного выщелачивания пробы руды участка «Мусковитовое» при среднем размере куска -20 мм и -40 мм

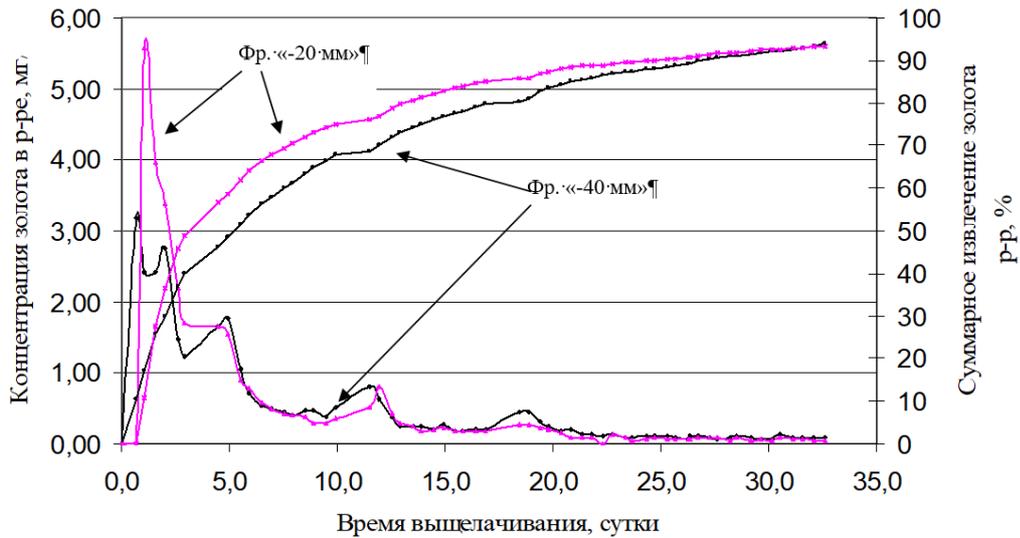


Рисунок 3.15 – Динамика концентрации золота в продуктивных растворах и суммарное извлечение золота в раствор перколяционного выщелачивания пробы руды участка «Новое» при среднем размере куска -20 мм и -40 мм

После промывки штабеля водой от растворенного золота и цианида пробы выгрузили из колонн. Далее руду подсушили на воздухе, отобрали пробы хвостов на ситовой анализ. После отсева определили остаточное содержание золота по выделенным классам пробирным методом.

Результаты гранулометрического анализа и вещественного состава хвостов выщелачивания в течение 35 суток руды участков «Мусковитое» и «Новое» месторождения Рябиновое представлены в таблицах 3.20, 3.21.

Таблица 3.20 – Результаты гранулометрического анализа хвостов выщелачивания в течение 35 суток руды месторождения «Рябиновое», участок «Мусковитовое»

Проба	Исх. содерж., прямой анализ	Фракция	Выход		Содержание золота		Распределение золота по фракциям
	г/т		мм	г	%	г/т	
Дробление по классу -40 мм	0,38	-60+40	383	7,66	0,83	0,32	10,3
		-40+20	2505	50,10	0,66	1,65	53,4
		-20+10	1107	22,14	0,26	0,29	9,3
		-10+5	760	15,20	0,3	0,23	7,4
		-5+2	689	13,78	0,46	0,32	10,2
		-2+1	414	8,28	0,19	0,08	2,5
		-1+0	770	15,40	0,28	0,22	7,0
итого			6628	100	0,47	3,10	100,0
Дробление по классу -20 мм	0,30	-20+10	3901	58,82	0,47	1,83	74,7
		-10+5	1147	17,29	0,26	0,30	12,2
		-5+2	677	10,21	0,2	0,14	5,5
		-2+1	360	5,43	0,18	0,06	2,6
		-1+0	181	2,73	0,25	0,05	1,8
		-0,5+0	366	5,52	0,21	0,08	3,1
итого			6632	100	0,37	2,45	100,0

Таблица 3.21 – Результаты гранулометрического анализа хвостов выщелачивания в течение 35 суток руды месторождения «Рябиновое», участок «Новое»

Проба	Исх. содерж., прямой анализ	Фракция	Выход		Содержание		Распределение золота по фракциям
			г	%	г/г	мг	
Дробление по классу -40 мм	0,37	-60+40	619	8,33	0,1	0,06	4,2
		-40+20	3330	44,82	0,26	0,87	58,5
		-20+10	1290	17,36	0,17	0,22	14,8
		-10+5	726	9,77	0,14	0,10	6,9
		-5+2	482	6,49	0,14	0,07	4,6
		-2+1	286	3,85	0,16	0,05	3,1
		-1+0	696	9,37	0,17	0,12	8,0
итого			7429	100	0,20	1,48	100,0
Дробление по классу -20 мм	0,27	-20+10	1511	33,38	0,14	0,21	30,2
		-10+5	1109	24,50	0,19	0,21	30,1
		-5+2	582	12,86	0,14	0,08	11,6
		-2+1	379	8,37	0,12	0,05	6,5
		-1+0	251	5,54	0,13	0,03	4,7
		-0,5+0	695	15,35	0,17	0,12	16,9
итого			4527	100	0,15	0,70	100,0

Результаты извлечения золота из различных классов крупности пробы руды месторождения «Рябиновое» на участке «Мусковитовое» и «Новое» представлены в таблицах 3.22 и 3.23. Сводные результаты по исследованию технологии кучного выщелачивания в лабораторных перколяторах представлены в таблице 3.24.

Таблица 3.22 – Результаты извлечения золота методом кучного выщелачивания в течение 35 суток руды по классам крупности руды месторождения «Рябиновое» участок «Мусковитовое»

Проба	Фракция, мм	Содержание золота по фракциям, г/г		Извлечение, %	
		в исходной пробе	в хвостах выщелачивания		
Дробление по классу "-40" мм	-60+40	1,01	0,83	26,2	
	-40+20		0,66		
	-20+10	1,35	0,26	80,7	
	-10+5	1,17	0,30	74,4	
	-5+2	0,88	0,46	47,7	
	-2+1	1,74	0,19	86,5	
	-1+0		0,28		
Итого		1,10	0,47	57,6	
Анализ обобщенной пробы			1,48	0,38	74,3
Дробление по классу "-20" мм	-20+10	1,01	0,47	53,5	
	-10+5	1,29	0,26	79,8	
	-5+2	1,51	0,20	86,8	
	-2+1	1,12	0,18	83,9	
	-1+0,5	1,25	0,25	80,0	
	-0,5+0	2,66	0,21	92,1	
Итого		1,24	0,37	70,1	
Анализ обобщенной пробы			1,58	0,30	81,0

Таблица 3.23 – Результаты извлечения золота методом кучного выщелачивания в течение 35 суток руды по классам крупности руды месторождения «Рябиновое» участок «Новое»

Проба	Фракция, мм	Содержание золота по фракциям, г/т		Извлечение, %
		в исходной пробе	в хвостах выщелачивания	
Дробление по классу "-40" мм	-60+40	1,96	0,10	94,9
	-40+20	1,66	0,26	84,3
	-20+10	1,34	0,17	87,3
	-10+5	3,33	0,14	95,8
	-5+2	1,39	0,14	89,9
	-2+1	2,38	0,16	93,3
	-1+0	2,19	0,17	92,2
	Итого	1,80	0,20	88,9
Анализ обобщенной пробы		1,65	0,37	77,6
Дробление по классу "-20" мм	-20+10	1,68	0,14	91,7
	-10+5	1,19	0,19	84,0
	-5+2	1,34	0,14	89,6
	-2+1	1,51	0,12	92,1
	-1+0,5	1,54	0,13	91,6
	-0,5+0	2,37	0,17	92,8
	Итого	1,57	0,15	90,2
Анализ обобщенной пробы		1,96	0,27	86,2

Концентрации золота в продуктивных растворах перколяционного выщелачивания проб исходных руд для всех участков месторождения Рябиновое составили: 0,9 мг/л для пробы М-1; 0,43 мг/л для пробы НП-1; 1,0 мг/л для пробы НС-1; 1,2 мг/л для пробы НО-1. Как видно из результатов таблицы 3.23 среднее извлечение золота составило 47,4 %. Результаты выполненных исследований по перколяционному выщелачиванию проб руды месторождения «Рябиновое» (участки «Мусковитовое» и «Новое»), раздробленных и отсеянных по классам крупности -40 мм и -20 мм, показали, что извлечение золота протекает равномерно по всей высоте штабеля.

При этом, золото распределено достаточно равномерно по всем классам крупности. Из результатов гранулометрического анализа следует, что при крупности дробления -40 мм руды участков «Мусковитовое» и «Новое» извлечение золота недостаточно. Поэтому рекомендуется дробить руду по крупности не менее -20 мм, а для руды уч. «Мусковитовое» - желательно до -10 мм.

Для определения форм теряемого золота рекомендуется проводить фазовый анализ хвостов выщелачивания.

Таблица 3.24 – Результаты перколяционного выщелачивания цианированием в течение 35 суток руд месторождения «Рябиновое»

№	Участок, тип руды, проба	Содержание в исходной руде ,г/т		Содержание в кеках выщелачивания, г/т		Извлечение по кеку,%		Расход реагентов, кг/т руды	
		Золото	Серебро	Золото	Серебро	Золото	Серебро	NaCN	CaO
1	Мусковитовый, М-1	2,8	5,3	1,8	4,6	35,7	13,2	0,34	2,0
2	Новый, первичная, НП-1	1,5	17,4	1,2	11,2	20,0	35,6	0,27	2,5
3	Новый, смешанная, НС-1	1,6	17,5	0,8	15,2	50,0	13,1	0,20	2,7
4	Новый, окисленная, НО-1	1,5	10,7	1,0	9,0	33,3	15,9	0,41	2,5
	Итого	1,9	12,7	1,0	10,0	47,4	19,4	0,31	2,4

Кроме того, выявлена принципиальная возможность извлечения золота из руд месторождения «Рябиновое» методом кучного выщелачивания [76]. Процесс характеризуется высокими показателями по степени извлечения и скорости выщелачивания золота. Степень извлечения золота зависит от крупности дробления исходной руды.

Исходя из проведенных исследований для расчета экономической модели приняты: извлечение золота – 56%, извлечение серебра – 4,5% крупность дробления – минус 10 мм, продолжительность выщелачивания – 76 суток, расходы: КаСК - 0,5 кг/т; NaOH - 0,1 кг/т.

В целом, следует отметить, что принятые технологические решения на основе результатов исследования процессов переработки руд обеспечивают увеличение производительности ЗИФ до 1500 тыс. т/год, увеличение производительности участка кучного выщелачивания до 850 тыс. т/год, а также увеличение извлечения золота из руд при переработке способом кучного выщелачивания с 56% до 65%.

Эти данные были заложены в качестве базовой модели переработки руды месторождения Рябиновое и использованы при оценке экономических показателей.

3.4. Влияние глубины разработки на структуру производственной мощности

В процессе открытой разработки месторождения себестоимость добычных работ существенно растет с увеличением глубины горных работ на различных этапах освоения месторождения. Это обуславливает рост транспортных расходов и в целом затрат на добычу руды. Рост себестоимости добычи оказывает влияние на экономику отработки запасов месторождения в целом.

Для оценки степени влияния изменчивости себестоимости добычи руды при росте глубины горных работ на эффект применения метода оптимизации рассмотрим теоретическое месторождение глубиной 200 м с производственными и экономическими параметрами, характерными для современного золотодобывающего производства Южной Якутии.

Критерием определения экономического эффекта является величина чистой приведенной стоимости (NPV) проекта разработки месторождения. Для

построения денежных потоков операционной и инвестиционной деятельности, необходимых для расчета показателя NPV, формируется производственно-финансовая модель стратегии отработки запасов месторождения [59, 93]. Исходные данные, представляющие собой расчетную основу данных для построения производственно-финансовой модели, представлены в табл. 3.25, 3.26. Проект освоение месторождения предусматривает равномерную отработку запасов месторождения в количестве 30 млн. тонн руды в течение 10 лет.

Таблица 3.25 – Производственные параметры проекта отработки запасов месторождения

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Срок отработки запасов месторождения	10 лет
Добыча руды	3 или 6 млн. т в год
Переработка руды	3 млн. т в год
Коэффициент извлечения золота	0,8

Таблица 3.26 – Экономические параметры проекта отработки запасов месторождения

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Цена реализации золота	3 500 руб./г
Себестоимость добычи (среднее значение)	400 руб./т
Себестоимость переработки	400 руб./т
НДПИ	6%
Инвестиции в проект разработки месторождения	8 млрд. руб.
Ставка дисконтирования для расчета NPV	10%

Ряд исследований в области определения корреляционной зависимости между себестоимостью добычи руды и глубиной горных работ на основе фактических данных с предприятий [29, 100, 111] свидетельствуют о наличии между ними прямой связи, причем эта связь растет с ростом глубины горных работ. Однако, анализ практических данных показал, что для карьеров, глубиной не более 200 м, себестоимость добычи руды по мере углубления и достижения крайней точки растет на величину около 10%, относительно значения себестоимости у поверхности.

Для оценки влияния глубины горных работ и, соответственно, роста себестоимости добычи руды на соотношение производительности комплексов добычи и переработки руд проведены исследования для двух видов производственно-финансовых моделей с расчетом показателя NPV при двух стратегиях

освоения месторождения – базовой и по методу оптимизации соотношения производительности добычного и перерабатывающих комплексов.

Первый вид производственно-финансовой модели включает в себя неизменную величину себестоимости добычи 1 тонны руды на протяжении всего срока отработки запасов, независимую от глубины ведения горных работ. Второй вид производственно-финансовой модели отличается тем, что по мере углубления карьера принят рост удельной себестоимости добычи руды. Для второго вида модели себестоимость добычи повышалась по линейному закону с равным шагом по годам разработки месторождения, при этом минимальное и максимальное значения себестоимости отклонялись на 5% от средней величины в меньшую и большую стороны, соответственно. Базовая стратегия освоения недр предусматривала равенство объемов добычи и переработки руды в течение всего срока отработки запасов месторождения. Во второй модели было принято превышение уровня добычи руды в год над переработкой в 2 раза: добыча – 6 млн. тонн руды, переработка - 3 млн. тонн.

Результаты расчета производственно-финансовой модели базовой стратегии освоения месторождения с неизменными в течение 10 лет показателями себестоимости добычи руды и валовой прибыли от реализации золота представлены в таблице 3.27.

Таблица 3.27 – Производственно-финансовая модель базового варианта разработки месторождения с неизменной себестоимостью добычи по глубине разработки

Добыча = переработка	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование														
Добыча руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Производство золота	0,8	28 800	кг		2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880	2 880
Расчет денежных потоков														
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080	10 080
Себестоимость добычи	400		руб./т		400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680	7 680
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		605	605	605	605	605	605	605	605	605	605
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960	2 960								
Процентные отчисления	12%	1 430	млн. руб.	960	1 075	355								
Операц. Денежный Поток		69 322	млн. руб.		6 000	6 720	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075
Недисконтированный ДП		49 402	млн. руб.	-8 000	-2 960	3 760	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075	7 075
Дисконтированный ДП	12%	20 374	млн. руб.	-8 000	-2 643	2 997	5 036	4 496	4 015	3 585	3 200	2 858	2 551	2 278
NPV		20 374	млн. руб.											

Превышение уровня добычи руды в 2 раза в первой половине срока отработки запасов месторождения при оптимизации месторождения с неизменной себестоимостью добычи по глубине разработки оказывает положитель-

Аналогичная картина наблюдается и для производственно-финансовой модели с увеличивающейся себестоимостью добычи по глубине разработки для стратегии освоения месторождения по методу оптимизации, представленной в табл. 3.30. Показатель NPV увеличивается на 28% по сравнению с базовой стратегией освоения месторождения – так же, как и в модели с неизменной себестоимостью добычи по глубине разработки.

Результаты расчетов чистой приведенной стоимости для двух видов производственно-финансовых моделей с различными методиками расчета себестоимостей добычи по глубине разработки при реализации двух различных стратегий освоения месторождения – базовой и по методу оптимизации сведены в таблице 3.31.

Таблица 3.30 – Производственно-финансовая модель разработки месторождения по методу оптимизации с увеличивающейся себестоимостью добычи по глубине разработки

Добыча к переработке 2 к 1	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Наименование														
Добыча руды		30 000	тыс. т		6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	0	0	0	0	0
Переработка руды		30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Производство золота	0,8	28 800	кг		3 960	3 960	3 960	3 960	3 960	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800
Расчет денежных потоков														
Выручка от реализации Au	3 500	100 800	млн. руб.		13 860	13 860	13 860	13 860	13 860	6 300	6 300	6 300	6 300	6 300
Себестоимость добычи	400		руб./т		384	392	400	408	416					
Себестоимость добычи		12 000	млн. руб.		2 304	2 352	2 400	2 448	2 496	0	0	0	0	0
Себестоимость переработки	400	12 000	млн. руб.		1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
Валовая прибыль		76 800	млн. руб.		10 356	10 308	10 260	10 212	10 164	5 100	5 100	5 100	5 100	5 100
НДПИ	6%	6 048	млн. руб.		832	832	832	832	832	378	378	378	378	378
Тело кредита			млн. руб.	8 000	8 960	511								
Процентные отчисления	12%	1 136	млн. руб.	960	1 075	61								
Операц. Денежный Поток		69 616	млн. руб.		8 449	9 415	9 428	9 380	9 332	4 722	4 722	4 722	4 722	4 722
Недисконтированный ДП		52 145	млн. руб.	-8 000	-511	8 904	9 428	9 380	9 332	4 722	4 722	4 722	4 722	4 722
Дисконтированный ДП	12%	26 269	млн. руб.	-8 000	-456	7 098	6 711	5 961	5 295	2 392	2 136	1 907	1 703	1 520
NPV		26 269	млн. руб.											

Таблица 3.31 – Сравнение показателей NPV для различных стратегий разработки и вариантов себестоимостей добычи по глубине разработки

Себестоимость добычи по глубине разработки	Показатель NPV, млн. руб.	
	Базовая стратегия	По методу оптимизации
Неизменная	20 374	26 144
Увеличивающаяся	20 484	26 269
Относительное изменение, %	0,54%	0,48%

Таким образом, при глубине карьера в пределах 200 м, незначительный рост себестоимости добычи руды с увеличением глубины горных работ не оказывает значительного влияния на соотношение производительности комплексов добычи и переработки руд при освоении месторождений открытым способом. Как для базовой стратегии, так и для стратегии по методу оптимизации,

увеличение себестоимости добычи руды на протяжении всего проекта освоения месторождения на 10% привело к снижению показателя чистой приведенной стоимости (NPV) на 0,5%. Данное влияние можно считать пренебрежительно малым и на стадии проектных расчетов не учитывать.

Разработка стратегии освоения месторождений твердых полезных ископаемых предусматривает анализ доступности ресурсов, необходимых для обеспечения заданных производственных мощностей. Лежащий в основе предлагаемого метода оптимизации календарного графика разработки месторождений принцип превышения в начальный период освоения месторождения объемов добычи руды за единицу времени над уровнем переработки [59]. Следует иметь в виду, что рост глубины горных работ, в свою очередь, приводит к повышению потребляемых внешних ресурсов и создает необходимость пересмотра стратегии освоения месторождения с точки зрения обеспеченности ресурсной базы. Таким образом, может возникнуть логистическое ограничение применимости предлагаемого метода оптимизации календарного графика в виде невозможности задействования дополнительного количества внешних ресурсов для обеспечения разработки месторождения твердых полезных ископаемых с повышенным уровнем добычи руды

3.5. Алгоритм выбора рационального соотношения производительности комплексов добычи и переработки руд в ходе развития работ в карьере

Формирование оптимальной стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых представляет собой построение структурированной системы расчетов, включающей в себя обработку больших наборов исходных данных, преобразование одних видов в другие, различные математические вычисления и проработку множества однотипных вариантов с целью поиска оптимального. Реализация метода предполагает построение производственно-финансовой модели разработки месторождения.

Производственно-финансовая модель служит инструментом для расчета трех ключевых показателей процесса оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождения твердых полезных ископаемых:

- денежный поток за время реализации проекта освоения месторождения;

- чистая дисконтированная приведенная стоимость проекта – показателя NPV;
- срок окупаемости проекта.

Алгоритм выбора ключевых показателей определяется моделью устойчивого развития горнодобывающего предприятия (рис. 3.16).

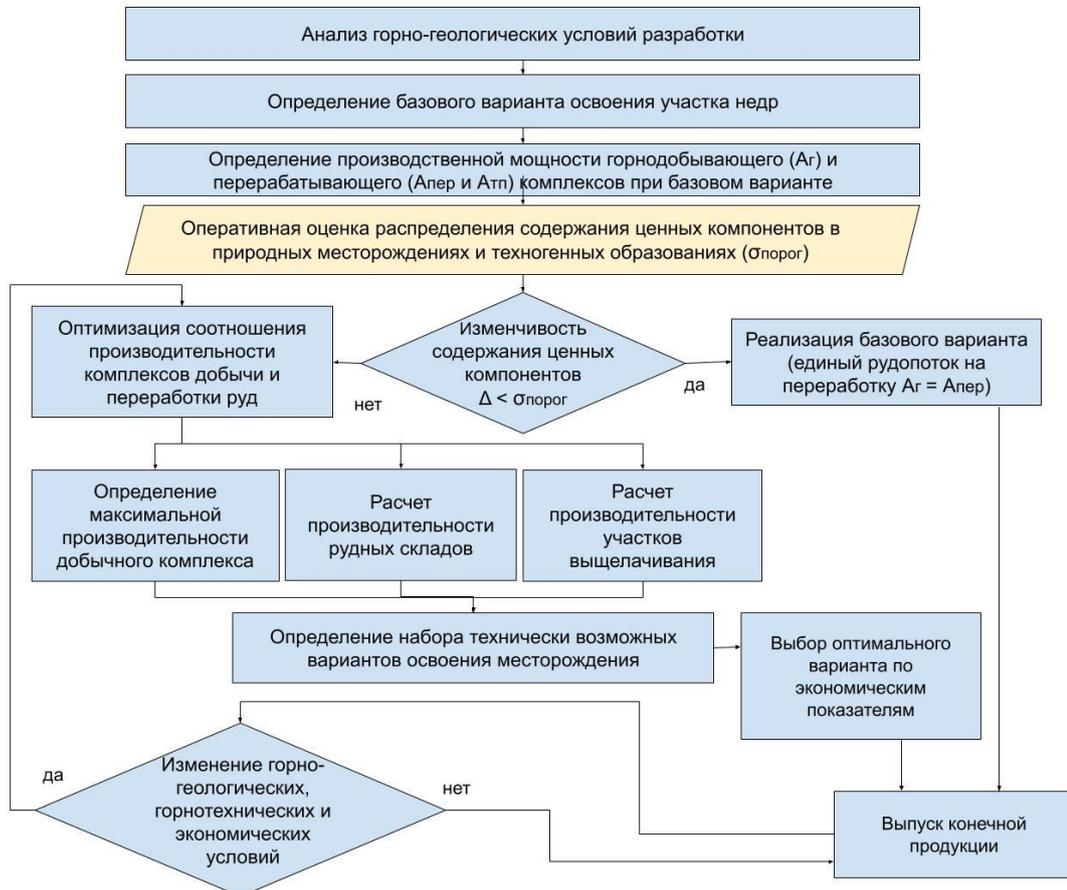


Рисунок 3.16 – Модель устойчивого развития горнотехнической системы

Расчет ключевых показателей осуществляется для каждого рассматриваемого соотношения объемов добычи и переработки руды за единицу времени для каждого этапа освоения месторождения. Исходные параметры, являющиеся основой построения производственно-финансовой модели, условно можно разделить на 3 категории:

- горно-геологические характеристики месторождения;
- производительность комплексов добычи и переработки руды;
- экономические показатели.

Первым типом исходных данных, необходимых для построения производственно-финансовой модели, являются горно-геологические характеристики месторождения. Они включают в себя:

- количество запасов руды месторождения;
- распределение содержания полезных компонентов в массиве месторождения;
- среднее содержание полезных компонентов в руде;
- коэффициент извлечения ценных компонентов из рудной массы.

Суммарный объем запасов руды на каждом конкретном месторождении может быть определен на основе данных государственных и негосударственных экспертиз – ФГУ «ГКЗ», JORC, Горного бюро США и др., а также в результате собственных геологоразведочных работ компании, в чьей собственности находится лицензия на право пользования месторождением.

Распределение содержания полезных компонентов в руде может быть получено в результате анализа опробований руды, добытой в предыдущие периоды эксплуатации месторождений или взятой из недр в качестве образца для вновь разрабатываемых участков. На основе данных опробований строится график статистики распределения содержания ценных компонентов в руде в относительном виде, что позволяет применить данную форму для любого количества разрабатываемых запасов. Средневзвешенное значение функции распределения соответствует среднее содержание ценных компонентов в руде.

Коэффициент извлечения характеризует потерю части балансовых запасов месторождения в процессе добычи и переработки твердых полезных ископаемых. Коэффициент извлечения является относительной величиной, отображающей пропорциональность фактически извлечённого из недр количества ценных компонентов к их величине, официально утвержденной данными геологической разведки в качестве балансовых запасов.

Основными показателями, лежащими в основе производительности любого рудника, являются величина добычи и переработки руды за единицу времени. Чаще всего в производственно-финансовых моделях производится оптимизация стратегии и календарного графика разработки месторождений с определением уровня добычи и переработки за 1 календарный год.

Ключевой особенностью формирования календарного графика разработки месторождения в рамках рассматриваемой методики является различие в уровнях добычи и переработки руды за единицу времени. Величина перера-

ботки руды в условиях ограничения производственной мощности перерабатывающего комплекса остается неизменной на протяжении всего периода отработки месторождения.

В начальный период освоения месторождения количество добываемой руды за единицу времени превосходит величину переработки за тот же период, что приводит к тому, что не вся добываемая руда отправляется на переработку сразу после добычи. Часть руды, не поступившая на обогатительную установку, отправляется на склад, где ожидает своей переработки. Таким образом, срок работ по добыче руды становится короче срока проведения операций по переработке. Различные величины превышения уровня добычи руды над переработкой требуют отдельного рассмотрения с определенным шагом изменения величины превышения производительности и требований к добываемой и перерабатываемой рудной массе с построением соответствующих производственно-финансовых моделей.

Еще одним типом данных, необходимым для построения календарного графика разработки месторождения, обеспечивающим взаимосвязь производственных и финансовых показателей модели функционирования горнотехнической системы, являются экономические параметры:

- себестоимость добычи руды;
- себестоимость переработки руды;
- цена реализации единицы товарной продукции;
- налог на добычу полезных ископаемых;
- величина тела кредита, предоставленного на реализацию проекта;
- ставка дисконтирования.

Себестоимость добычи руды формируется из всех затрат, понесенных в процессе извлечения горной массы из недр, начиная с приобретения и разведки участка месторождения, вскрытия, очистных работ и заканчивая доставкой на место переработки. В общем случае себестоимость добычи руды включает в себя затраты на буровзрывные работы, эксплуатацию технологического оборудования, специального транспорта, расходные материалы, электроэнергию, обслуживание и ремонт производства, перевозку горнорудной массы в процессе добычи и к месту последующей переработки, оплату труда сотрудникам и подрядным организациям, амортизационные отчисления, касающиеся

этапа приобретения участка месторождения и проведения геологоразведочных работ с последующим утверждением запасов и прочие расходы, предшествующие этапу переработки руды.

Формирование показателя себестоимости переработки руды осуществляется путем учета необходимых затрат по доведению сырья, доставленного с места добычи, до товарного вида, подлежащего продаже потребителю. Расширенный перечень составляющих себестоимости переработки руды складывается из затрат на эксплуатацию, обслуживание и ремонт производственных объектов, расходные материалы и энергию для технологических целей, применение специализированной техники, перемещение руды в рамках цикла переработки, оплату труда рабочих с резервом и отчислениями, амортизацию оборудования цикла переработки, а также расходы, связанные с реализацией произведённой продукции, включая аффинаж, транспортировку, маркетинг и пр.

Цена реализации единицы товарной продукции, как правило, напрямую связана с ценой соответствующего биржевого товара, определенной на организованных рынках. Например, цена реализации цветных металлов определяется по курсу Лондонской биржи металлов (The London Metal Exchange, LME), после чего конвертируется в необходимые единицы измерения и валюту, по которой совершается сделка по реализации.

Налог на добычу полезных ископаемых (НДПИ) – еще одна статья затрат предприятия-недропользователя, осуществляющего разработку месторождений на территории Российской Федерации. В связи с тем, что согласно Закону РФ «О недрах» практически все полезные ископаемые (за исключением некоторых общераспространенных, таких как мел, песок и др.) являются государственной собственностью, необходимым условием начала извлечения таких полезных ископаемых помимо приобретения специального разрешения является постановка предприятия-недропользователя на учет плательщика НДПИ. В разных странах мира существует множество систем налогообложения аналогичных НДПИ в РФ.

Величина тела кредита, предоставленного на реализацию проекта разработки месторождения, представляет собой денежную сумму, выданную предприятию перед началом реализации намеченных планов по отработке участка

недр. Полученные средства могут быть направлены как на строительство новых объектов и оборудования, так и на модернизацию старых, необходимых для начала осуществления работ по добыче и переработке руд участка проекта разработки.

Производственно-финансовая модель представляет собой вспомогательный инструмент для проведения процесса оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений. Правильность построения модели обеспечивает достоверность реализации поставленной задачи и точность достижения цели оптимизации. В связи с этим крайне важно на этапе формирования производственно-финансовой модели проводить периодические расчеты на упрощенных системах с известным результатом с целью проверки правильности построения модели и обнаружения потенциальных ошибок на стадии формирования.

Построение производственно-финансовой модели производится с использованием современного программного обеспечения, возможности которого позволяют проводить обработку массивов данных, связывать элементы в таблицы, производить операции математического анализа, строить графические зависимости наборов данных. В качестве такого программного обеспечения может быть выбрано Microsoft Excel, отличающееся в настоящее время своей доступностью, широкой распространенностью и огромной широтой спектра потенциально возможных решаемых задач.

Перед началом формирования производственно-финансовой модели необходимо на основе поблочных геологических данных или фактических опробований руды в процессе выемки построить график статистики распределения полезного компонента в руде. Полученный график формирует новый массив сведений о количестве руды с каждым конкретным содержанием полезного компонента в процентном соотношении от всего объема руды разрабатываемого карьера. Данный массив является неотъемлемой частью производственно-финансовой модели, где играет роль базы расчета среднего содержания полезного компонента в объеме руды, отправляющейся на переработку для каждого этапа освоения месторождения.

В общем виде производственно-финансовая модель представляет собой совокупность таблиц, в которых производится расчет трех основных показателей процесса оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых: денежного потока за время реализации проекта освоения месторождения, величины чистой приведенной стоимости (показателя NPV) и срока окупаемости проекта.

Для каждого рассматриваемого варианта отработки запасов месторождения применяется подход, согласно которому на каждом этапе из всего объема добытой руды в переработку в приоритетном порядке вовлекаются наиболее технологичные типы руд или руды с самым высоким содержанием полезного компонента. Нижняя граница содержания полезного компонента такого типа руд соответствует пороговому значению графика статистики распределения содержания полезного компонента в руде (рис. 2.15).

Каждая таблица совокупности, составляющей производственно-финансовую модель, имеет схожую структуру построения, представленную в табл. 3.32.

Таблица 3.32 – Структура элемента производственно-финансовой модели оптимизации разработки месторождений твердых полезных ископаемых

<i>Наименование</i>	<i>Единицы измерения</i>	<i>Интервал времени</i>				<i>Всего</i>
		<i>1-й</i>	<i>2-й</i>	<i>...</i>	<i>N-й</i>	
<u>Исходные данные</u>						
Добыча руды	т					
Переработка руды	т					
Сред. сод. пол. ком-та	г/т					
Кэф. извлечения	-					
Цена реализации товара	руб./г					
НДПИ	%					
<u>Расчет денежных потоков</u>						
Затраты на добычу	руб.					
Затраты на переработку	руб.					
Производство золота	руб.					
Операционный ДП	руб.					
Тело кредита	руб.					
Процентные отчисления	руб.					
<u>Результурующие показатели</u>						
Денежный поток	руб.					
NPV	руб.			-		
Срок окупаемости	лет			-		

В строках таблицы заключена информация по исходным и расчетным параметрам, касающихся количества добычи и переработки руды, содержанию полезного компонента, величине соответствующих затрат, а также стоимости реализации товарной продукции. Столбцы таблицы соответствуют разбиению стратегии и календарного графика разработки месторождения на интервалы времени. Группа из нескольких столбцов, расположенных по соседству и имеющих одинаковые значения исходных и расчетных параметров, формируют этап разработки месторождения. Кроме того, каждый этап характеризуется неизменностью денежных потоков на протяжении всех интервалов времени, входящих в его состав.

Для определения среднего содержания ценных компонентов в руде для различных вариантов разработки месторождения, соответствующих различным уровням соотношения уровня добычи руды к уровню переработки за единицу времени, используется понятие геометрического смысла определенного интеграла. Из курса математического анализа известно, что определенный интеграл от непрерывной и неотрицательной функции $f(x)$ в интервале от a до b численно равен площади криволинейной трапеции, ограниченной линиями $y = 0$, $x = a$, $x = b$ и $y = f(x)$, представленной на рис. 3.17. В виде формулы, обозначив площадь такой трапеции за F , получим:

$$F = \int_a^b f(x) dx . \quad (3.2)$$

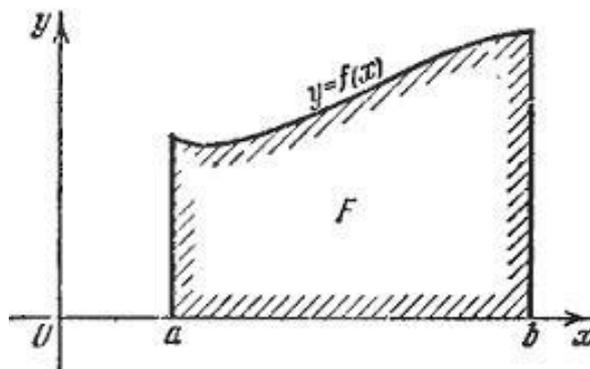


Рисунок 3.17 – Интерпретация геометрического смысла определенного интеграла

Функция $f(x)$ в рассматриваемой методике представляет собой функцию распределения содержания полезного компонента в руде. Наиболее под-

ходящим способом определения математического вида записи функции графика статистики распределения полезного компонента является подбор приближенной полиномиальной функции. В программном комплексе Microsoft Excel есть встроенный алгоритм проведения данной процедуры.

Кроме того, для особо сложных видов кривой графика статистики распределения полезного компонента в руде, можно прибегнуть к методам численного интегрирования [99]. Основная идея такого подхода заключается в представлении функции графика распределения в виде множества более простых функций, интегралы которых легко вычисляются аналитически. Наиболее доступными и практичными в применении в рассматриваемой ситуации являются метод прямоугольников, метод трапеций, метод парабол (метод Симпсона) и для более высокого порядка точности – метод Гаусса. Ключевой чертой численных методов интегрирования является тезис, согласно которому соотношение уровня добытой руды $Q_{\text{доб}}$ к уровню переработанной $Q_{\text{пер}}$ за единицу времени равно соотношению среднего содержания полезного компонента в наиболее технологичной части руды $c_{\text{н.т.}}$ к среднему содержанию всего объема руды $c_{\text{общ}}$, и, в свою очередь, равно соотношению площади под участком кривой, наиболее привлекательной к переработке руды, $F_{\text{н.т.}}$ к площади под всей кривой распределения содержания полезного компонента в руде $F_{\text{общ}}$:

$$\frac{Q_{\text{доб}}}{Q_{\text{пер}}} = \frac{c_{\text{н.т.}}}{c_{\text{общ}}} = \frac{F_{\text{н.т.}}}{F_{\text{общ}}}. \quad (3.3)$$

Таким образом, зная каждый раз площадь под участком графика кривой, соответствующей объему руды, перерабатываемой непосредственно после добычи, и площадь под участком графика кривой, соответствующей общему руды, подвергающейся складированию на этапе добычи и переработки на последующих этапах, можно определить среднее содержания ценных компонентов в руде на каждом из этапов.

Сгенерированная совокупность таблиц с различными соотношениями уровня добычи руды к уровню переработки за единицу времени составляет производственно-финансовую модель метода оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождения твердых полезных ископаемых.

Максимальные значения денежных потоков каждого варианта соотношения уровня добычи руды к переработке за единицу времени извлекаются из каждой таблицы совокупности производственно-финансовой модели и формируют отдельный массив данных. На основе данного массива строится график зависимости денежного потока первого этапа отработки запасов от соотношения уровней добычи и переработки, представленный на рис. 3.18.

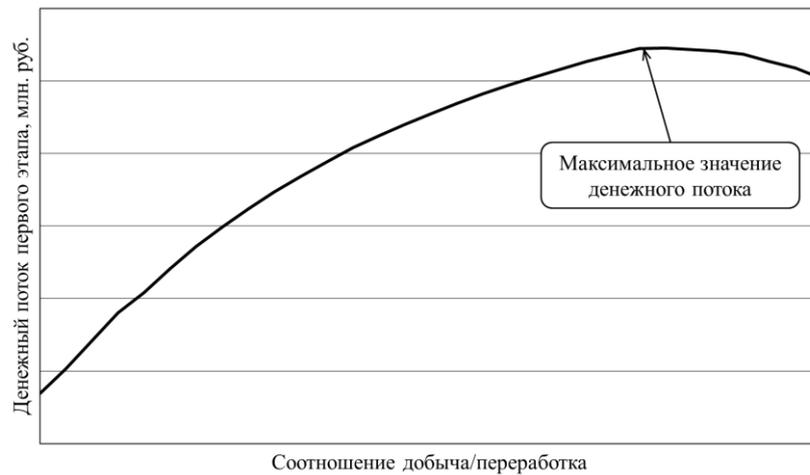


Рисунок 3.18 – Форма зависимости денежного потока первых лет от соотношения уровня добычи руды к уровню переработки

С ростом соотношения добычи к переработке руды увеличивается величина денежного потока, достигая своего экстремума – максимального значения при определенном соотношении, после которого график зависимости начинает свое снижение. Задача оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых по данному параметру сводится к определению такого соотношения уровня добычи и переработки руды на первом этапе освоения запасов, при котором будет достигнуто максимально возможное значение денежного потока.

По аналогии с денежными потоками первых этапов осуществляется формирование массива данных из показателей чистой приведенной стоимости (ЧПС, NPV) для каждого потенциального варианта освоения месторождения. Из собранных воедино показателей NPV строится график зависимости соотношения уровня добычи руды к уровню переработки за единицу времени, представленный на рис. 3.19.

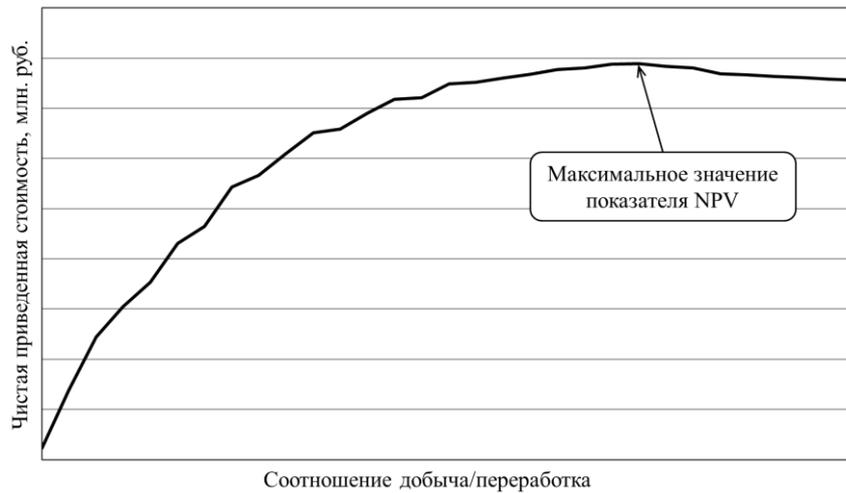


Рисунок 3.19 – Форма зависимости чистой приведенной стоимости от соотношения уровня добычи руды к уровню переработки

Форма зависимости чистой приведенной стоимости проекта (ЧПС) от соотношений уровней добычи к переработке так же, как и форма зависимости денежного потока, внешне напоминает перевернутую параболу. Поиск рационального варианта освоения запасов сводится к нахождению на нем максимального значения чистой приведенной стоимости и принятия соответствующего соотношения уровня добычи и переработки руды за единицу времени в качестве оптимального. Стоит отметить, что, несмотря на схожесть внешних видов графиков зависимости денежного потока первого этапа и ЧПС от соотношения объемов добычи и переработки руды, в общем случае их максимальные значения не обязательно должны совпадать, что, в свою очередь, говорит о том, что критерии являются независимыми друг от друга и их оценка является самостоятельной.

Третий массив данных, формируемых из полученной совокупности таблиц производственно-финансовой модели, состоит из сроков окупаемости потенциальных вариантов освоения месторождения. Для реализации третьего критерия оценки оптимального сценария и календарного графика разработки месторождений на основе собранного массива данных производится построение графика зависимости сроков окупаемости потенциальных проектов отработки запасов от соотношения уровня добычи руды к уровню переработки за единицу времени, представленного на рис. 3.20.

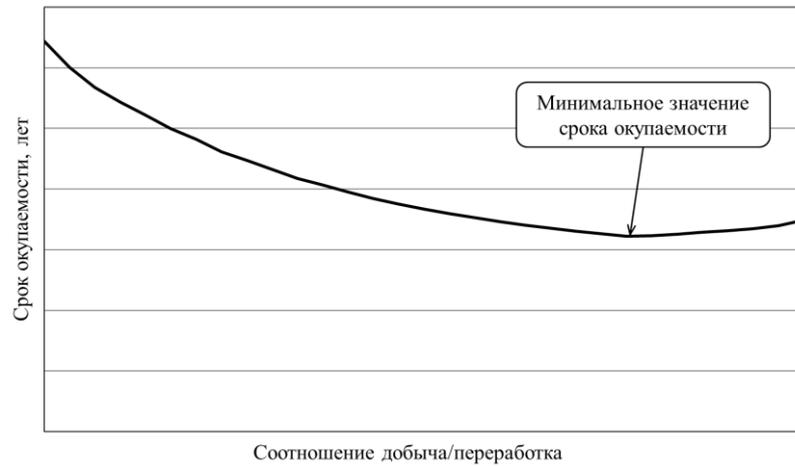


Рисунок 3.20 – Форма зависимости срока окупаемости проекта от соотношения уровней добычи и переработки руды

Построенный график зависимости сроков окупаемости проекта эксплуатации месторождения от соотношения уровней добычи и переработки руды имеет схожий вид с графиком параболической функции. Оптимизация стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых по критерию срока окупаемости проекта освоения недр сводится к определению минимального значения срока окупаемости инвестиций на графике выше указанной зависимости. Критерий срока окупаемости инвестиций также является независимым и не связан напрямую с критериями денежного потока первого этапа и показателя ЧПС. Выбор критериев определяется инвестором в соответствии с конкретными интересами на соответствующем этапе освоения месторождения.

Таким образом, реализация алгоритма достигается путем управляемого изменения взаимосвязанных параметров добычи и переработки руд и техногенного сырья на базе оперативной оценки при выборе фронта развития горных работ структуры и свойств природных и техногенных массивов с изменяющимся содержанием ценных компонентов. В результате перераспределения минерально-сырьевых потоков формируются подготовленные к переработке запасы, используемые для поддержания устойчивого функционирования горнотехнической системы.

Выводы по 3 главе

1. Показано, что увеличение среднеквадратичного отклонения фактического содержания ценных компонентов в анализируемой порции руды от

среднего значения свидетельствует о росте неоднородности распределения содержания золота в руде и снижении плотности распределения этого показателя.

2. Выполнена оптимизация структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия для трех принципиально различных типов распределения содержания золота в руде: выдержанного относительно среднего, среднеоднородного и неоднородного. Доказано, что при выдержанном в массиве месторождения содержании золота в рудах, близком к среднему, объём добычи руды должен соответствовать производительности перерабатывающего производства. Если среднеквадратическое отклонение содержания золота от среднего значения превышает 0.04 г/т, следует оптимизировать соотношение объемов добычи и переработки руд с учетом распределения их качества с переработкой более богатых руд методами обогащения и выщелачивания и временным размещением добытой рудной массы с низким содержанием ценных компонентов в специальных складах на поверхности для переработки в будущие периоды

3. Анализ производственно-финансовых моделей проекта освоения месторождения показал:

- для месторождений с весьма однородным распределением содержания золота в руде характерна низкая чувствительность модели к уровню извлечения золота на первом и втором этапах, а дополнительные расходы на добычу руды превосходят выручку от реализации дополнительного объема золота;
- для месторождений с неоднородным распределением золота в руде различия в доходе от реализации металла с более высоким содержанием полезного компонента на первом этапе освоения проявляются более ярко. Значительный рост производства золота на первом этапе приводит к увеличению выручки от реализации на величину, превосходящую рост затрат на добычу руды;
- при неоднородном распределении содержания золота по месторождению и превышению производительности горного комплекса над перерабатывающим в 2 раза в первые пять лет освоения операционные и недисконтированные денежные потоки по сравнению с базовым вариантом возрастают в среднем на 28%, дисконтированные – на 24%. Наиболее значительный разрыв

отмечается на второй год освоения месторождения. В следующий пятилетний период освоения месторождения отмечается снижение значений операционных денежных потоков в среднем на 28%, недисконтированных и дисконтированных – на 24%;

– при весьма однородном распределении содержания золота и превышении объемов добычи над переработкой в 2 раза в первые пять лет освоения месторождения операционные денежные потоки по сравнению с базовым вариантом снижаются в среднем на 14%, недисконтированные – на 16%, дисконтированные – до 25%. В следующий пятилетний период освоения месторождения отмечается рост значений операционных, дисконтированных и недисконтированных денежных потоков в среднем на 14%.

4. Показано, что главным преимуществом метода оптимизации соотношения производственной мощности подразделений золотодобывающего предприятия при разработке месторождения золота является увеличение извлечения золота на первом этапе в течение первых лет освоения месторождения, что, в свою очередь, влечет увеличение выручки от реализации металла.

5. Доказано, что чем менее однородно распределение и чем ниже плотность распределения в окрестности среднего содержания, тем больший прирост к показателю чистой приведенной стоимости добавляет превышение объема переработки в начальный период освоения месторождения. Этот показатель должен оптимизироваться с учетом изменения содержания золота с глубиной месторождения, плотности распределения содержания относительно среднего значения с учетом роста эксплуатационных затрат на добычу на глубоких горизонтах.

6. Анализ закономерностей распределения ценных компонентов в массиве месторождения показал, что при выдержанном по глубине содержанию золота в массиве месторождения, превышение в начальный период (первые 5 лет освоения месторождения) производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим в 2 раза позволяет увеличить NPV в 1,25 раз. Показано, что в случае уменьшения среднего содержания золота в руде по глубине в массиве месторождения, на начальном этапе его разработки производительность перерабатывающего комплекса должна соответствовать объемам переработки рудной массы. Если содержание ценных компонентов в

руде месторождения с глубиной растёт, следует в планах развития горных работ на начальном этапе освоения предусмотреть повышенные темпы углубки со складированием резервов бедных руд на поверхности в штабелях кучного выщелачивания или во временных рудных складах.

7. Установлено, что превышение производительности добычного производства над перерабатывающим в первые годы функционирования карьера позволяет существенно увеличить операционные денежные потоки, за счет этого сократить сроки оплаты кредита. При этом недисконтированный доход от освоения месторождения увеличивается в 1,5-2 раза, а дисконтированный – в 1,7-2 раза. В совокупности это способствует росту показателя NPV проекта в 1,5 раза.

8. Выполненное исследование процессов переработки руд месторождения Рябиновое выявило принципиальную возможность извлечения золота из руд месторождения «Рябиновое» методом кучного выщелачивания. Процесс характеризуется высокими показателями по степени извлечения и скорости выщелачивания золота. Степень извлечения золота зависит от крупности дробления исходной руды. Принятые технологические решения на основе результатов исследования процессов переработки руд обеспечивают увеличение производительности ЗИФ до 1500 тыс. т/год, увеличение производительности участка кучного выщелачивания до 850 тыс. т/год, а также увеличение извлечения золота из руд при переработке способом кучного выщелачивания с 56% до 65%.

9. Доказано, что изменчивость себестоимости добычи руды в зависимости от глубины разработки, не превышающей 200 м, не оказывает значительного влияния на результат применения метода оптимизации стратегии освоения месторождений открытым способом. Как для базовой стратегии, так и для стратегии по методу оптимизации увеличение себестоимости добычи руды на протяжении всего проекта освоения месторождения на 10% приводит к снижению показателя чистой приведенной стоимости (NPV) на 0,5%. При предельной глубине карьера менее 200 м, соответствующей залеганию запасов Нижнеякокитского рудного поля и месторождения Рябиновое, глубина карьера не оказывает значимого влияния на выбор производственной мощности горнодобывающего предприятия.

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ ЗОЛОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

4.1. Обоснование оптимальной мощности участка «Надежда» Нижнеякокитского рудного поля

Реализация рассматриваемого метода оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых на практике была осуществлена на золоторудных месторождениях Южной Якутии – Нижнеякокитском рудном поле (НЯРП) и Рябиновом – находящихся в собственности группы компаний ПАО «Селигдар». По состоянию на 2019 год, ПАО «Селигдар» входит в топ 10 золотодобывающих компаний по объему годового производства золота, величина которого по итогам 2018 года достигла 6 т. Кроме того, ПАО «Селигдар» является единственным поставщиком отечественного олова в РФ, уровень производства которого за 2018 год составил 1 531 т металла в концентрате. На 01.01.2019 группа компаний ПАО «Селигдар» владеет запасами 115 т золота и 201 тыс. т олова.

К практическому применению данного метода привели 2 ключевых фактора:

- руководством ПАО «Селигдар» было принято решение увеличить величину запасов Нижнеякокитского рудного поля путем снижения бортового содержания руды, подлежащей переработке; при этом в период пересчета запасов и экспертизы, проводимой ФГУ «ГКЗ», действовало еще предыдущее утвержденное ТЭО кондиций, а руда с содержанием, находящимся в интервале между утвержденным и новым бортовым значением, складировалась отдельно;

- стремление к эксплуатации забалансовых запасов в соответствии с требованиями существующего законодательства РФ.

Нижнеякокитское рудное поле (НЯРП) представляет собой единый горнорудный комплекс по добыче и переработке золотосодержащей руды и включает участки «Надежда» и «Межсопочный», территориальное расположение которых представлено на рис. 4.1. В общепринятой практике (при традиционных методах подсчета запасов) определение рациональных параметров карьера производится методом сопоставления значений эксплуатационного, граничного (экономического) и контурного коэффициентов вскрыши.



Рисунок 4.1 – Расположение месторождений Нижнеякокитского рудного поля

В современной международной практике оптимизация контуров карьеров производится блочными компьютерными моделями месторождений (WhittleTechnology, Micromine, NPV Scheduler, MaxiPit, Surpac и др.) [109].

Для отстройки карьеров в предельном положении и оптимизации контуров карьеров в экономически обоснованных границах применялся программный комплекс Micromine. Применение метода определения границ карьеров с использованием компьютерной программы-оптимизатора обусловлено сложностью контуров оруденения, неравномерным распределением золота, сложностью топографии рельефа, пространственной позиции и морфологии рудных тел, их большим количеством, что значительно усложняет конфигурацию контуров карьеров и требует выполнение привязки дна карьера на отдельных участках к различным гипсометрическим отметкам.

В соответствии с Ведомственными нормами технологического проектирования ВНТП 35-86 мощность карьера по горнотехническим условиям определялась по формуле:

$$Q = h_r \times S \times \eta \times (1 + r_0) \times \gamma, \text{ тыс.т в год,} \quad (4.1)$$

где S - средняя горизонтальная площадь рудных тел, тыс. м²; η - коэффициент извлечения руды в долях единицы; r_0 - коэффициент разубоживания руды в долях единицы; γ - объемный вес руды в массиве, т/м³;

Максимально возможная годовая величина понижения горных работ получена в соответствии с нормами технологического проектирования [ВНТП 35-86] по формуле:

$$h_r = h_0 + \Delta h, \text{ м,} \quad (4.2)$$

где h_T – среднегодовое понижение горных работ, м/год; h_0 – базовая скорость понижения горных работ, м/год; Δh – поправка при автомобильном транспорте, м/год.

Следует отметить, что в условиях НЯРП, где на многих месторождениях помимо определяющих производительность крупных карьеров в отработке также находятся большое количество небольших и очень мелких карьеров, определить общую суммарную производительность является непростой задачей. В данной работе в качестве определяющих величину производительности по месторождениям выбраны показатели максимальной годовой производительности наиболее крупных карьеров. Срок отработки мелких карьеров определялся исходя из их глубины и объемов руды.

Добыча на участках осуществляется открытым способом, а применяемые методы переработки включают в себя дезинтеграцию руды, цианирование, кучное выщелачивание.

Наглядная демонстрация практической реализации исследуемого метода оптимизации проводится на примере одного из двух участков НЯРП – «Надежда», отработка которого объединена деятельностью единого одноименного горнорудного комплекса (ГРК).

Для оценки ключевых показателей модели оптимизации были определены статистические значения распределения содержания золота в руде на данном участке путем определения среднего содержания золота в кузове загруженных самосвалов. Каждое опробование фиксировало уникальные весовые характеристики с различным содержанием золота (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Характеристики посамосвальных опробований руды участка «Надежда» Нижнеякокитского рудного поля

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Тип руды	Товарная
Всего добыто руды (01.2017–09.2018)	7 306,1 тыс. т
Количество опробований	18 833 шт.
Среднее содержание золота в руде	0,93 г/т
Всего золота в руде	4 750,5 кг
Массы опробований	от 14 до 60 160 т
Содержание золота в пробах	от 0 до 21,69 г/т

На основе данного массива был построен статистический график распределения содержания золота в руде участка «Надежда», представленный на рис. 4.2

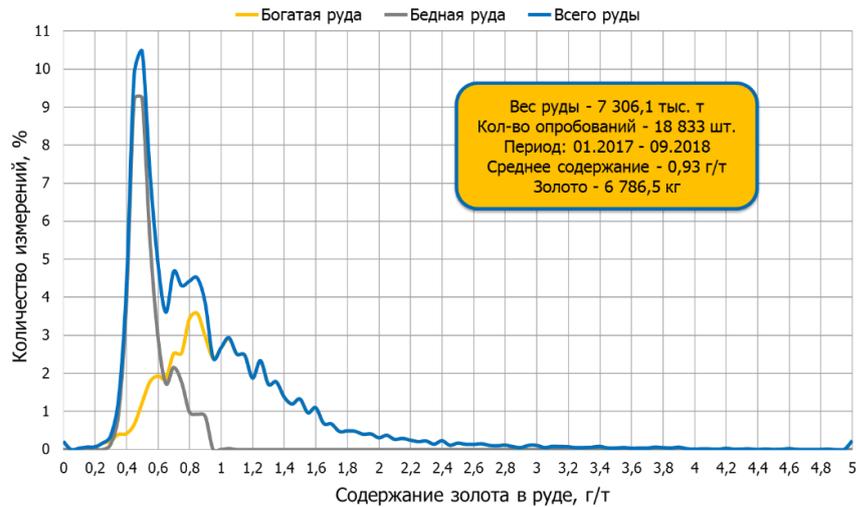


Рисунок 4.2 – График статистического распределения содержания золота в руде на участке «Надежда»

Для наглядности интерпретации данного подхода на рис. 4.3 представлена графическая зависимость количества руды, подлежащей переработке на первом этапе, и среднего содержания золота в этой руде от принятого порогового содержания полезного компонента на основе статистической обработки совокупности данных посамосвального опробования руды, извлеченной на участке «Надежда».

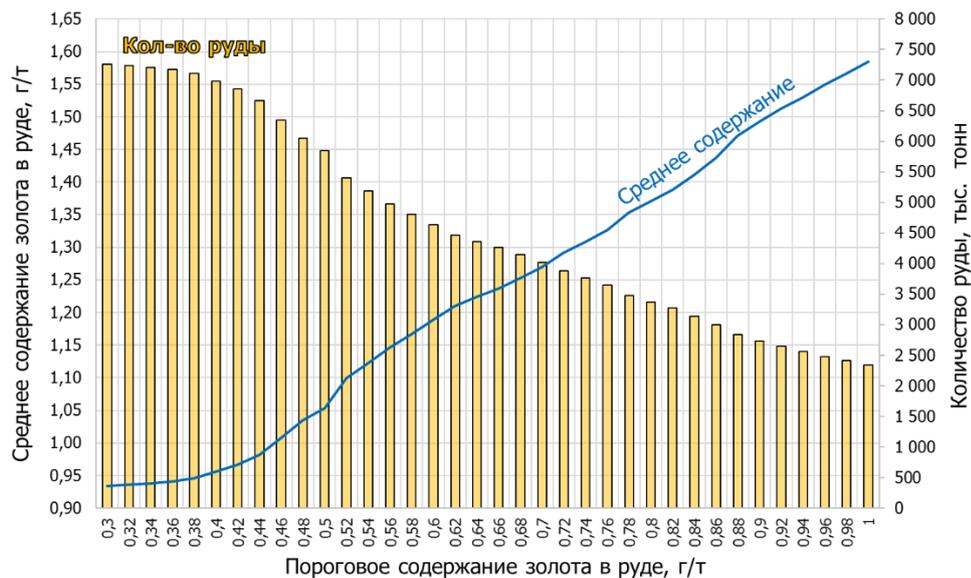


Рисунок 4.3 – Зависимость количества перерабатываемой на первом этапе руды и среднего содержания золота в ней от порогового содержания золота в руде участка «Надежда»

Для формирования производственно-финансовой модели разработки участка «Надежда», согласно описанной выше методике, вводились исходные данные 3-х категорий, представленные в табл. 4.2:

- горно-геологические параметры месторождения;
- параметры производительности по добыче и переработке руды;
- экономические параметры.

Единицей времени расчета производственно-финансовой модели принят 1 календарный год.

Таблица 4.2 – Исходные параметры производственно-финансовой модели разработки участка «Надежда» НЯРП

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
<u>Горно-геологические параметры</u>	
Запасы руды	30 млн. т
Распределение золота в руде	см. рис. 4.2
Среднее содержание золота в руде	0,93 г/т
Коэффициент извлечения	0,7
<u>Производственные параметры</u>	
Переработка руды в год	3 млн. т
Добыча руды в год	от 3 до 7,5 млн. т
<u>Экономические параметры</u>	
Себестоимость добычи руды	300 руб./т
Себестоимость переработки руды	401 руб./т
Цена реализации золота	3 000 руб./г
НДПИ	6%
Тело кредита	7 млрд. руб.
Ставка дисконтирования	12%

На основе исходных данных и графика статистики распределения содержания полезного компонента в руде осуществлялось построение таблиц, соответствующих различным потенциально возможным стратегиям и календарным графикам разработки участка «Надежда», совокупность которых формировала производственно-финансовую модель, являющуюся расчетной базой процесса оптимизации. Каждая таблица представляет собой один из вариантов превышения уровня добычи руды над уровнем переработки в год на первом этапе реализации проекта освоения участка недр.

Для простоты расчетов и наглядности демонстрации примера реализации рассматриваемого метода оптимизации разрабатываемая производственно-финансовая модель рассчитана на отработку запасов участка «Надежда» в два этапа. Пример одной из таблиц производственно-финансовой

модели оптимизации разработки участка «Надежда» для превышения уровня добычи руды над уровнем переработки в год на 60% представлен в табл. 4.3.

По результатам формирования и расчета производственно-финансовой модели были получены результирующие значения трех ключевых показателей метода оптимизации для различных вариантов стратегий и календарных графиков разработки участка «Надежда». На основе результирующих значений различных вариантов производственно-финансовой модели формируются массивы зависимостей значений каждого из трех ключевых показателей от превышения уровня добычи руды в год над переработкой. Данные полученных массивов формируют три графика соответствующих зависимостей.

Таблица 4.3 – Элементы производственно-финансовой модели для варианта превышения величины добычи руды в год над величиной переработки на 60% для участка «Надежда»

Наименование	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0-й	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
Исходные данные														
Добыча руды		30 000	тыс. т		4 800	4 800	4 800	4 800	4 800	4 800	1 200	0	0	0
Переработка руды	к.и.=0,7	30 000	тыс. т		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
Содержание золота			г/т		1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	0,66	0,48	0,48	0,48
Расчет денежных потоков														
Производство золота		19 503	кг		2 513	2 513	2 513	2 513	2 513	2 513	1 388	1 013	1 013	1 013
Выручка от реализации Au	3000 руб/г	58 510	млн. руб.		7 539	7 539	7 539	7 539	7 539	7 539	4 163	3 038	3 038	3 038
Себестоимость добычи	300 руб/т	9 000	млн. руб.		1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	1 440	360	0	0	0
Себестоимость переработки	401 руб/т	12 030	млн. руб.		1 203	1 203	1 203	1 203	1 203	1 203	1 203	1 203	1 203	1 203
Валовая прибыль		37 480	млн. руб.		4 896	4 896	4 896	4 896	4 896	4 896	2 600	1 835	1 835	1 835
НДПИ	6%	3 511	млн. руб.		452	452	452	452	452	452	250	182	182	182
Опер. денежный поток		33 969	млн. руб.		4 443	2 351	1 653	1 653	1 653					
Тело кредита			млн. руб.	7 000	7 840	5 038	1 967							
Процентные отчисления	12%	1 781	млн. руб.	840	941	605	236							
Прибыль до налога		32 188	млн. руб.		3 503	3 839	4 207	4 443	4 443	4 443	2 351	1 653	1 653	1 653
Налог на прибыль	20%	6 438	млн. руб.		701	768	841	889	889	889	470	331	331	331
Недисконтированный ДП		18 750	млн. руб.	-7 000	2 802	3 071	3 366	3 555	3 555	3 555	1 881	1 322	1 322	1 322
Дисконтированный ДП		8 710	млн. руб.	-7 000	2 502	2 448	2 396	2 259	2 017	1 801	851	534	477	426
Накоплен. дисконт. ДП			млн. руб.	-7 000	-4 498	-2 050	346	2 605	4 622	6 423	7 274	7 808	8 284	8 710
NPV		8 710	млн. руб.											
Срок окупаемости		2,86	лет											

На рис. 4.4 представлена графическая зависимость операционного денежного потока на первом этапе разработки участка «Надежда» от процентного превышения годового уровня добычи руды над уровнем переработки. График зависимости чистой приведенной стоимости проекта освоения участка «Надежда» НЯРП от превышения уровня добычи руды над переработкой в год представлен на рис. 4.5.

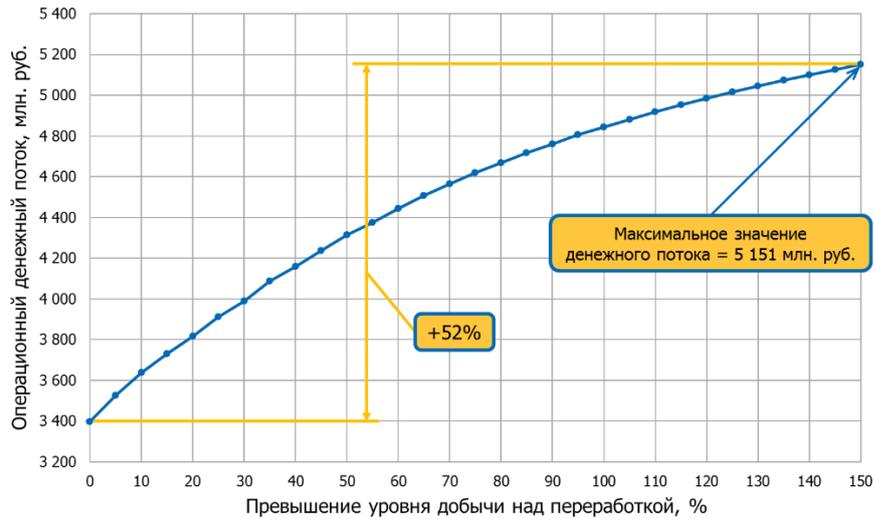


Рисунок 4.4 – Зависимость операционного денежного потока первого этапа освоения участка «Надежда» от процентного превышения годового объема добычи руды над переработкой

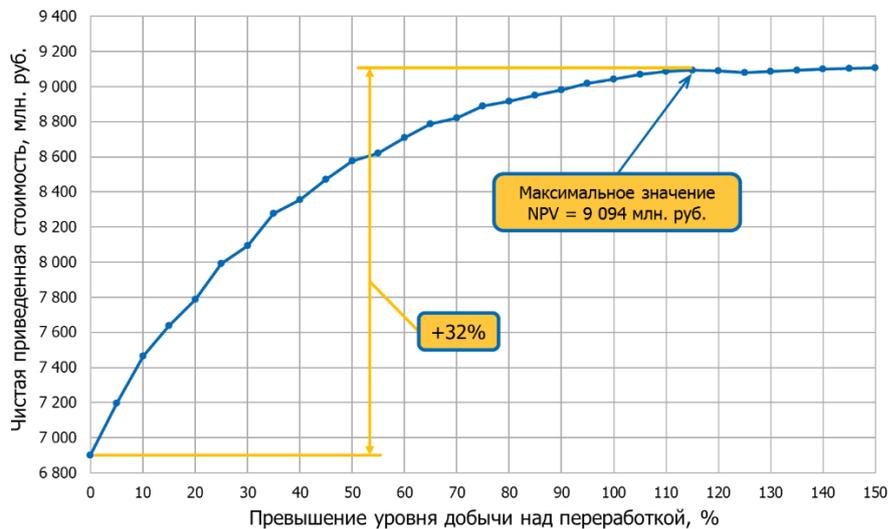


Рисунок 4.5 – Зависимость показателя NPV первого этапа освоения участка «Надежда» от процентного превышения годового объема добычи руды над переработкой

Согласно графику на рис. 4.5, максимальное значение показателя NPV, достигается при 115%-ном превышении добычи руды над переработкой в год. При этом показатель NPV для такого уровня превышения на 32% выше аналогичного показателя для базового варианта на первом этапе разработки участка «Надежда», соответствующего равенству годовых объемов добычи и переработки руды.

График третьего ключевого показателя – зависимости срока окупаемости проекта разработки участка «Надежда» от уровня превышения в процентах добычи руды от переработки в год – представлен на рис. 4.6.

График демонстрирует снижение срока возврата вложенных в проект инвестиций с ростом уровня превышения добычи над уровнем переработки. Однако, чем больше становится уровень превышения, тем менее значительно происходит снижение срока окупаемости.

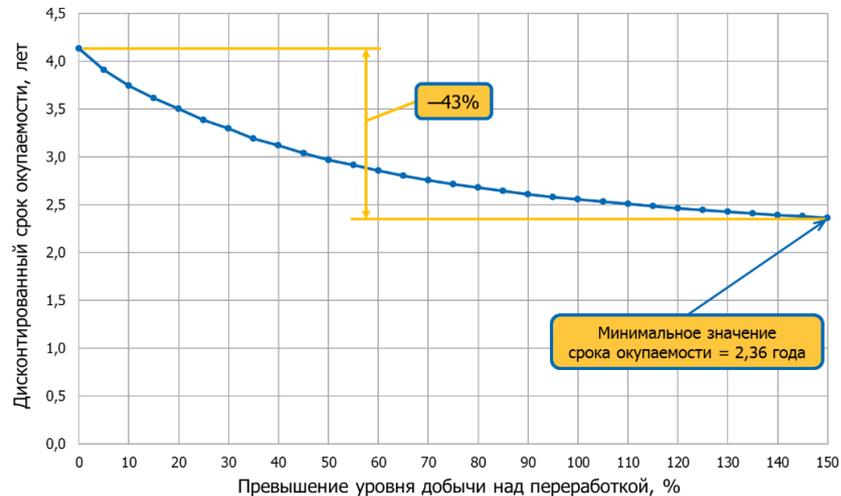


Рисунок 4.6 – Зависимость срока окупаемости проекта освоения участка «Надежда» на первом этапе разработки карьера от процентного превышения годового объема добычи руды над переработкой

В целом, выполненное исследование структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия на основе разработанной производственно-финансовой модели освоения участка «Надежда» Нижнеякоитского рудного поля на первом этапе развития открытых горных работ доказали экономическую целесообразность установления превышения уровня добычи руды над уровнем переработки в год. Оптимальный уровень превышения объемов добычи над переработкой составил 115%, что обеспечило:

- увеличение производства золота на первом этапе на 47%;
- увеличение операционного денежного потока на первом этапе на 46%;
- увеличение показателя чистой приведенной стоимости на 32%;
- снижение срока окупаемости проекта на 40%.

При этом, отдельно стоит отметить, что операционная рентабельность и положительный денежный поток обеспечиваются на протяжении всего периода разработки участка «Надежда».

Апробация и реализация предложенной методики оптимизации соотношения производственной мощности предприятия в циклах добычи и переработки показала работоспособность учета различия в показателях качества

руды, операционных ограничений, изменения кондиций на среднее и бортовое содержание ценного компонента в массиве руды месторождения, что имеет высокое научное и практическое значение и расширяет возможности использования предложенного оптимизационного метода.

4.2. Обоснование режима развития горных работ на месторождения Рябиновое

Для месторождения Рябиновое по состоянию на 2019 год также проводится пересчет запасов, по итогам которого часть руды, которая по действующему ТЭО кондиций относится к категории забалансовой, перейдет в категорию балансовой.

Месторождение рудного золота Рябиновое расположено в Центрально-Алданском золотоносном районе республики Саха (Якутия), в 44 километрах на северо-восток от г. Алдан, и занимает бассейн ручья Рябиновый, являющегося правым притоком р. Якокут. В настоящее время лицензия на право пользования недрами принадлежит АО «Золото Селигдар», входящее в состав холдинговой компании ПАО «Селигдар». Относительное территориальное расположение месторождения представлено на рис. 4.7.



Рисунок 4.7 – Расположение месторождения Рябиновое

С 2007 по 2011 годы на месторождении Рябиновое были проведены геологоразведочные работы, разработаны технический регламент и ТЭО постоянных кондиций. В 2015 году по результатам аудита запасов JORC были утверждены доказанные и вероятные запасы (P&P) величиной 26,2 тонн золота, а также выявленные и предполагаемые ресурсы (I&I) – 36,2 тонн золота.

В 2013 году был построен и запущен первый участок по добыче золота методом кучного выщелачивания производственной мощностью 0,3 млн. тонн руды в год. В 2017 году была введена в эксплуатацию золотоизвлекательная фабрика, предназначенная для переработки богатых руд месторождения Рябиновое, плановым объемом переработки 1 млн. тонн руды в год.

Созданию производственно-финансовой модели вариантов разработки месторождения Рябиновое с целью расчета трех ключевых показателей оптимизации – денежных потоков, величины чистой приведенной стоимости и срока окупаемости проекта – предшествует построение графика статистики распределения содержания полезного компонента в руде. Формирование данного графика осуществляется на основе 16 955 посамосвальных (отгружаемых самосвалами) опробований руды, извлеченной из недр на месторождении Рябиновое в период с января 2017 года по ноябрь 2018 года. По каждому опробованию фиксируется значение его массы и среднего содержания полезного компонента. Сведения о посамосвальных опробованиях извлеченной руды представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 Характеристики посамосвальных опробований руды месторождения Рябиновое

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Тип руды	Товарная
Всего добыто руды (01.2017–11.2018)	2 403,3 тыс. т
Количество опробований	16 955 шт.
Среднее содержание золота в руде	1,35 г/т
Всего золота в руде	2 277,0 кг
Массы опробований	от 23 до 306 т
Содержание золота в пробах	от 0 до 26,44 г/т

На основе собранных посамосвальных опробований был сформирован массив сведений о количестве руды, приходящейся на каждый дискретный интервал содержания полезного компонента. На основе данного массива был построен график статистики распределения содержания полезного компонента в руде на участке «Надежда», представленный на рис. 4.8. Формирование различных вариантов освоения месторождения, совокупность которых образуют производственно-финансовую модель рассматриваемого метода оптимизации стратегии и календарного графика разработки, осуществляется на основе различных уровней превышения величины добычи руды к величине переработки.

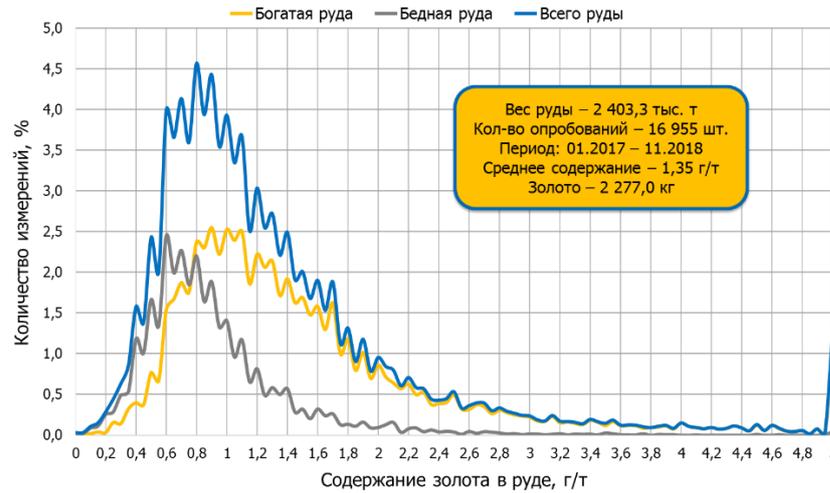


Рисунок 4.8 – График статистики распределения содержания полезного компонента в руде на месторождении Рябиновое

Из всего добытого объема руды на переработку отправляется самая технологичная с наибольшим содержанием полезного компонента в ней. Таким образом, на первом этапе освоения месторождения определяется пороговое значение содержания полезного компонента, разделяющее всю добытую руду на подлежащую переработке и отправляющуюся на склад для отработки в будущем. На рис. 4.9 представлен график зависимости количества руды, отправляющейся на переработку сразу после добычи на первом этапе, а также среднего содержания золота в этой руде от порогового содержания золота для полученной совокупности посамосвальных опробований на месторождении Рябиновое.

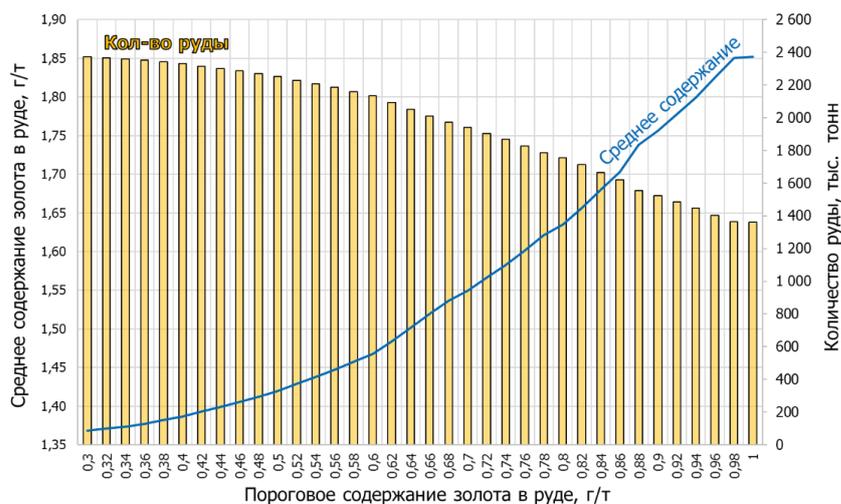


Рисунок 4.9 – График зависимости количества перерабатываемой на первом этапе руды и среднего содержания золота в ней от порогового содержания золота в руде для посамосвальных опробований месторождения Рябиновое

К построенному графику статистики распределения золота в руде для формирования производственно-финансовой модели разработки месторождения Рябиновое в качестве исходных данных вводятся также параметры 3-х категорий:

- горно-геологические параметры месторождения;
- параметры производительности по добыче и переработке руды;
- экономические параметры.

Отличительной особенностью производственного процесса разработки месторождения Рябиновое является разделение процедуры переработки руды на два независимых процесса. Две трети части руды с наибольшим содержанием золота из всего объема, подлежащего переработке, отправляются на золотоизвлекательную фабрику (ЗИФ). Одна третья части руды с наименьшим содержанием золота – перерабатывается методом кучного выщелачивания (КВ). Таким образом, исходные параметры производственно-финансовой модели для месторождения Рябиновое, представленные в табл. 4.5, включают в себя сведения как для переработки на золотоизвлекательной фабрике, так и методом кучного выщелачивания. Расчетным интервалом времени производственно-финансовой модели принимается 1 календарный год.

Таблица 4.5 – Исходные параметры производственно-финансовой модели разработки месторождения Рябиновое

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
<u>Горно-геологические параметры</u>	
Запасы руды	21 млн. т
Распределение золота в руде	см. рис. 4.9
Среднее содержание золота в руде	1,35 г/т
Коэффициент извлечения ЗИФ	0,86
Коэффициент извлечения КВ	0,65
<u>Производственные параметры</u>	
Переработка руды в год	2,1 млн. т
Добыча руды в год	от 2,1 до 5,25 млн. т
<u>Экономические параметры</u>	
Себестоимость добычи руды	600 руб./т
Себестоимость переработки руды ЗИФ	556 руб./т
Себестоимость переработки руды КВ	600 руб./т
Цена реализации золота	2 500 руб./г
НДПИ	6%
Тело кредита	7 млрд. руб.
Ставка дисконтирования	12%

Полученные исходные данные формируют совокупность возможных вариантов разработки месторождения Рябиновое, соответствующих различным уровням превышения величины добычи руды над переработкой в год в процентном соотношении. Производственно-финансовая модель, как и в рассмотренной практической реализации метода оптимизации на участке «Надежда» НЯРП, подразумевает освоение запасов месторождения Рябиновое в два этапа. Первый этап, как уже было отмечено выше, предусматривает отработку руд с наибольшим содержанием полезного компонента, второй этап – оставшуюся часть руды. Пример одного из вариантов разработки месторождения Рябиновое для уровня превышения величины добычи руды над величиной переработки в год на 80% представлен в табл. 4.6.

В результате построения производственно-финансовой модели были определены величины трех ключевых показателей метода оптимизации разработки месторождения Рябиновое для различных вариантов превышения уровня добычи руды над переработкой в год.

Таблица 4.6 – Элементы производственно-финансовой модели для варианта превышения величины добычи руды в года над величиной переработки на 80% для месторождения Рябиновое

Наименование	Удельное значение	Всего	Ед. изм.	Годы										
				0-й	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
Исходные данные														
Добыча руды		21 000	тыс. т		3 780	3 780	3 780	3 780	3 780	2 100	0	0	0	0
Переработка ЗИФ	к.и.=0,86	14 000	тыс. т		1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400
Содержание Au на ЗИФ			г/т		2,23	2,23	2,23	2,23	2,23	1,72	0,82	0,82	0,82	0,82
Переработка КВ	к.и.=0,65	7 000	тыс. т		700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Содержание Au на КВ			г/т		1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	0,64	0,49	0,49	0,49	0,49
Расчет денежных потоков														
Производство золота		23 240	кг		3 206	3 206	3 206	3 206	3 206	2 358	1 213	1 213	1 213	1 213
Выручка от реализации Au	3000 руб/г	69 721	млн. руб.		9 619	9 619	9 619	9 619	9 619	7 074	3 638	3 638	3 638	3 638
Себестоимость добычи	600 руб/г	12 600	млн. руб.		2 268	2 268	2 268	2 268	2 268	1 260	0	0	0	0
Себест-сть переработки ЗИФ	556 руб/г	7 784	млн. руб.		778	778	778	778	778	778	778	778	778	778
Себест-сть переработки КВ	600 руб/г	4 200	млн. руб.		420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Валовая прибыль		45 137	млн. руб.		6 152	6 152	6 152	6 152	6 152	4 615	2 440	2 440	2 440	2 440
НДПИ	6%	4 183	млн. руб.		577	577	577	577	577	424	218	218	218	218
Опер. денежный поток		40 954	млн. руб.		5 575	4 191	2 222	2 222	2 222	2 222				
Тело кредита			млн. руб.	7 000	7 840	4 132	69							
Процентные отчисления	12%		млн. руб.	840	941	496	8							
Прибыль до налога		39 509	млн. руб.		4 634	5 079	5 567	5 575	5 575	4 191	2 222	2 222	2 222	2 222
Налог на прибыль	20%	7 902	млн. руб.		927	1016	1113	1115	1115	838	444	444	444	444
Недисконтированный ДП		31 607	млн. руб.	-7 000	3 708	4 064	4 454	4 460	4 460	3 353	1 777	1 777	1 777	1 777
Дисконтированный ДП		19 519	млн. руб.	-7 000	3 310	3 239	3 170	2 835	2 531	1 699	804	718	641	572
Накоплен. дисконт. ДП		68 361	млн. руб.	-7 000	-3 690	-450	2 720	5 554	8 085	9 784	10 588	11 305	11 946	12 519
NPV		8 710	млн. руб.											
Срок окупаемости		2,86	лет											

Анализ полученных результатов производится с помощью построения графиков зависимости трех ключевых показателей от процентного превышения уровня добычи руды в год над переработкой.

График зависимости первого из трех ключевых показателей метода оптимизации разработки месторождения Рябиновое представлен на рис. 4.10.

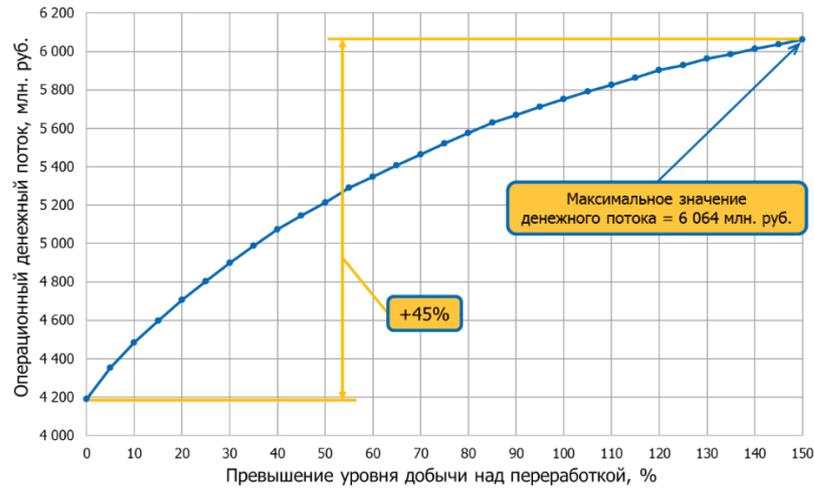


Рисунок 4.10 – Зависимость операционного денежного потока первого этапа от уровня превышения добычи над переработкой руды в год для месторождения Рябиновое

Из графика видно, что существует прямая зависимость между нарастанием величины операционного денежного потока первого этапа освоения месторождения с увеличением процента превышения добычи над переработкой, однако скорость роста денежного потока при этом сокращается.

На рис. 4.11 представлен график зависимости другого ключевого показателя метода оптимизации – чистой приведенной стоимости проекта разработки месторождения Рябиновое от превышения уровня добычи руды над переработкой в год.

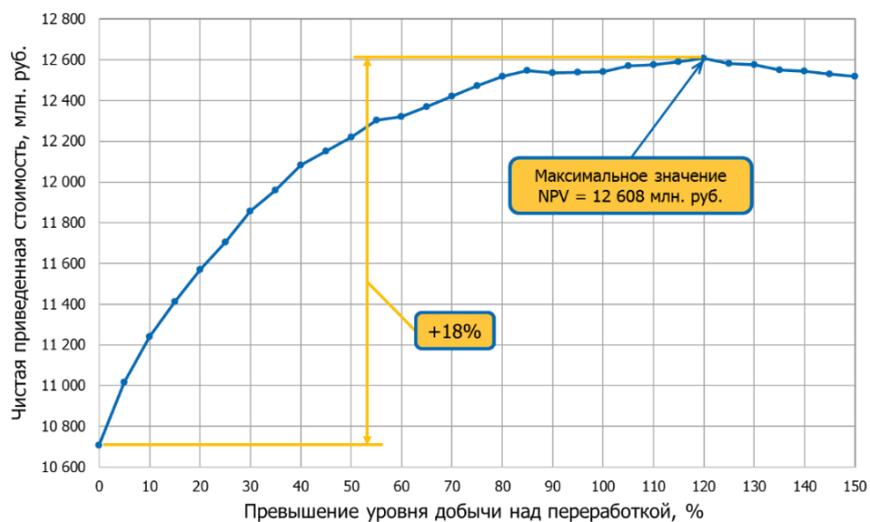


Рисунок 4.11 – Зависимость показателя NPV от уровня превышения добычи над переработкой руды в год для месторождения Рябиновое

С увеличением уровня добычи руды по сравнению с переработкой в год величина показателя NPV демонстрирует рост, достигает своего максимального значения на уровне превышения добычи на 120%, после чего идет на снижение.

График зависимости третьего ключевого показателя рассматриваемого метода оптимизации, представленный на рис. 4.12, посвящен демонстрации зависимости дисконтированного срока окупаемости проекта разработки месторождения Рябиновое от превышения уровня добычи руды в год над переработкой. Рост уровня добычи руды в год над переработкой способствует снижению срока окупаемости, но скорость снижения при этом уменьшается. Таким образом, практическая реализация метода оптимизации стратегии и календарного графика на примере месторождения Рябиновое подтвердила положительный экономический эффект данного метода.

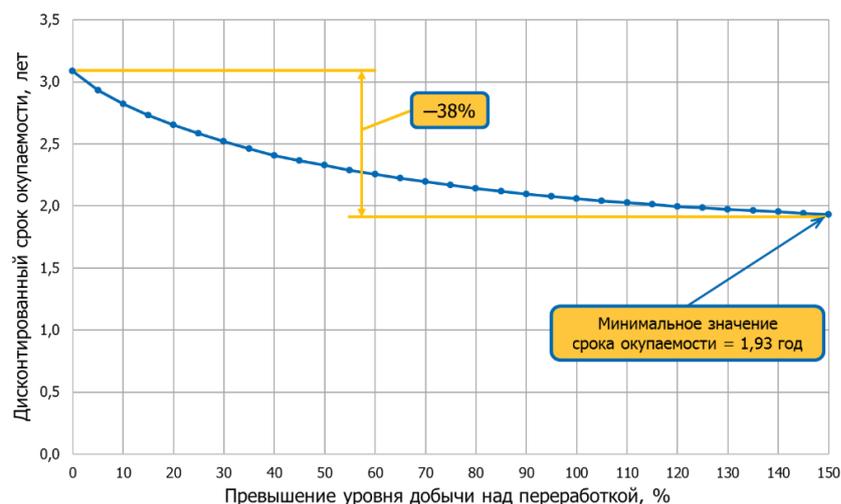


Рисунок 4.12 – Зависимость срока окупаемости проекта от уровня превышения добычи над переработкой руды в год для месторождения Рябиновое

Анализ результатов расчета производственно-финансовой модели, а также построенных на их основе графиков позволил сделать вывод, согласно которому оптимальное превышение уровня добычи руды в год над переработкой для разработки месторождения Рябиновое составляет 120%, что в свою очередь приводит к:

- увеличению производства золота на первом этапе на 48%;
- увеличению денежного потока на первом этапе на 41%;
- увеличению показателя чистой приведенной стоимости на 18%;
- снижению срока окупаемости проекта на 35%.

Реализация данного подхода предполагает изучение потенциального участка разработки для обоснования стратегии его освоения и проектирования горнотехнических систем с параметрами, обеспечивающими заданные показатели экономического и экологического эффектов [32-35, 38].

Выполненная оптимизация производственной мощности золотодобывающего предприятия позволила выбрать оптимальные параметры горных работ на месторождении Рябиновое. Так, с учетом горно-геологических и горнотехнических условий принята отдельная выемка вскрышных пород и руд. В одновременной работе будет находиться четыре карьера. В процессе понижения добычных работ контуры трех карьеров участка Мусковитовый сольются в один (рис. 4.13).

На карьерах выделяется как нагорная зона с разомкнутыми горизонтами, имеющими непосредственный выход на поверхность, так и углублённая. Карьеры рекомендовано отрабатывать сверху вниз 10 м уступами по вскрыше, 5÷10 м уступами по руде. Вскрытие рабочих горизонтов карьеров целесообразно осуществлять полутраншеями, имеющими заезды как непосредственно с соответствующих горизонталей поверхности, так и с использованием временных внутренних съездов. Рациональное направление разрезных траншей – по простиранию рудных тел.

Для отработки нижних горизонтов карьеров целесообразно формировать постоянные и временные наклонные транспортные съезды. Уклон транспортных берм принят равным 80%. Вывоз вскрышных пород предусмотрен в отвал пустой породы, добытой товарной и забалансовой руды через промежуточные склады – на рудный склад дробильно-сортировочного комплекса площадки кучного выщелачивания и площадку золотоизвлекательной фабрики.

В состав месторождения входят два участка:

- участок Мусковитовый – разрабатывается тремя карьерами, которые на конец разработки соединятся в единый карьер: карьер «Северный», карьер «Центральный», карьер «Южный»
- участок «Новый» - разрабатывается карьером «Новый».

Вскрышные и добычные работы в карьере осуществляются с использованием БВР и экскаваторно-транспортных комплексов. Обоснована транспортная система разработки с размещением вскрышных пород во внешних отвалах.

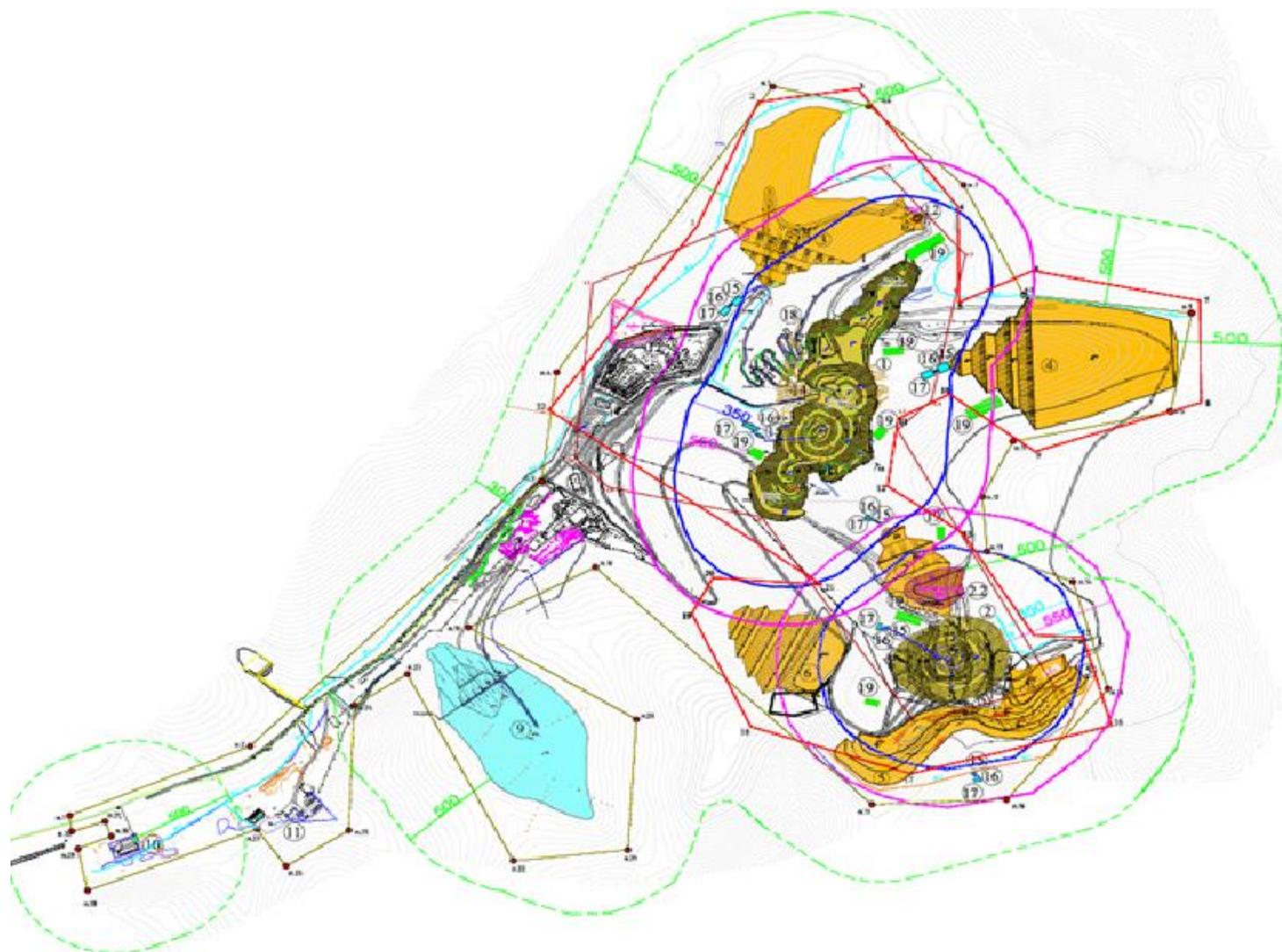


Рисунок 4.13 – Ситуационный план месторождения Рябиновое

Основные параметры системы разработки определяются принятой технологией вскрышных (добычных) работ и выбранным горным оборудованием (табл. 4.7). Рекомендованные конструктивные параметры элементов системы разработки обеспечивают устойчивость бортов карьера с коэффициентом запаса устойчивости бортов по всем карьерам. Основные параметры горнотехнических систем при открытой разработке месторождения Рябиновое определены с учетом оптимизации производственной мощности и режима развития горных работ на карьерах основных структурных подразделений по добыче и переработке разнорудных руд.

Таблица 4.7 – Основные параметры карьеров

Наименование показателей	Ед. изм.	Значения по карьерам			
		Северный	Центральный	Южный	Новый
Длина по поверхности	м	595	615	338	630
Ширина по поверхности	м	229	443	330	440
Длина по дну	м	105	65	89	60
Ширина по дну	м	50	48	34	30
Отметка дна карьера	м	780	625	700	830
Площадь по поверхности	тыс.м ²	429			191
Средняя глубина карьера	м	80	85	110	170
Углы откоса борта при погашении	град.	50-55	40-55	45-55	40-45
Объем горной массы в чаше карьера	тыс.м ³	7286,3	10145,7	4146,7	16275
в т.ч. руда	тыс. т	3144,9	2652	1149,7	3625,3
вскрыша	тыс.м ³	6043,3	8356,8	3692	14842
Средний эксплуатационный коэффициент вскрыши	м ³ /т	1,9	3,8	3,2	4,1

В общем случае потенциал применения комплексного подхода к рациональному освоению недр зависит от основных факторов [51, 55]:

- геологических, предусматривающих наличие полезных ископаемых в недрах месторождений, а также прочих видов природного и техногенного сырья;
- технических, обуславливающих возможность наиболее полного извлечения полезных компонентов в процессе добычи и переработки руды, а также контроля и минимизации негативного экологического воздействия;
- экономических, основанных на достижении положительной разницы дисконтированных денежных потоков между доходами проекта комплексной разработки месторождения и затратами на реализацию такого проекта.

4.3. Оценка экономической эффективности применения рекомендуемого метода оптимизации режима горных работ

Практическая реализация метода оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых на примере золоторудных месторождений Южной Якутии подтвердила экономическую эффективность теоретических обоснований данного метода. Изменения трех ключевых показателей оптимизации – операционного денежного потока за период освоения месторождения, чистой приведенной стоимости и дисконтированного срока окупаемости проекта – продемонстрировали исключительно положительную тенденцию, совокупность которых обеспечила достижение дополнительной экономической выгоды разработки месторождений.

Важнейшим экономическим результатом применения метода оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений стало увеличение чистой приведенной стоимости – показателя NPV – проекта освоения участка недр. Главной особенностью, приведшей к росту показателя NPV, представленной на рисунке 4.14, стало перераспределение операционных денежных потоков по годам отработки для оптимизированного варианта освоения месторождения.

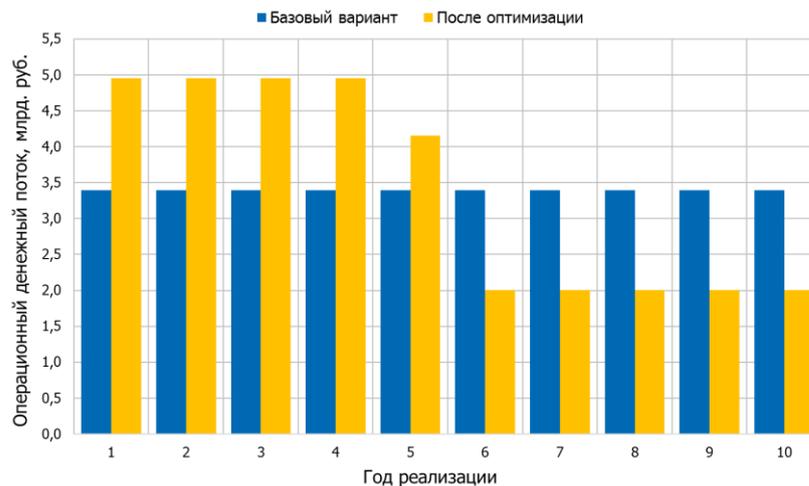


Рисунок 4.14 – Перераспределение операционных денежных потоков по годам реализации проекта разработки месторождения в результате оптимизации

Превышение уровня добычи руды над уровнем переработки за единицу времени увеличивает величину денежных потоков на первом этапе отработки запасов за счет повышения среднего содержания полезного компонента в пе-

перерабатываемом объеме руды и увеличению, соответственно, выручки от реализации конечного продукта. Несмотря на сокращение величин денежных потоков последующих этапов отработки запасов, при равенстве суммы денежных потоков для базового и оптимизированного вариантов разработки, показатель чистой приведенной стоимости возрастает в связи большей ценностью денежных средств, вырученных на более ранних стадиях проекта.

График изменения денежного потока первого этапа отработки от соотношения величины добычи руды к величине переработки за единицу времени, представленный на рисунке 4.15, построенный для различных примеров месторождений свидетельствует об увеличении максимального значения денежного потока для оптимизированного варианта отработки в среднем на 25 - 35% по сравнению с базовым вариантом.

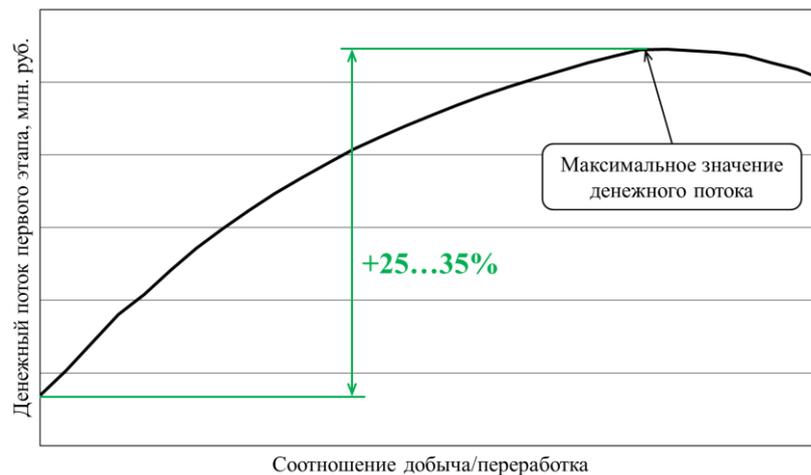


Рисунок 4.15 – Форма зависимости операционного денежного потока первых лет от соотношения уровня добычи руды к уровню переработки

График изменения другого показателя оптимизации стратегии и календарного графика – показателя чистой приведенной стоимости, – построенный для различных примеров месторождений, представленный на рисунке 4.16, также демонстрирует целесообразность превышения величины добычи руды над переработкой для различных случаев, отличающихся масштабами освоения и характеристиками добываемой руды. Максимальное значения показателя NPV для оптимизированного варианта отработки в среднем превышает чистую приведенную стоимость базового варианта на 8% - 12%.

Другим важным экономическим эффектом метода оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений является ускорение сроков возврата инвестиций в проект освоения участка недр.

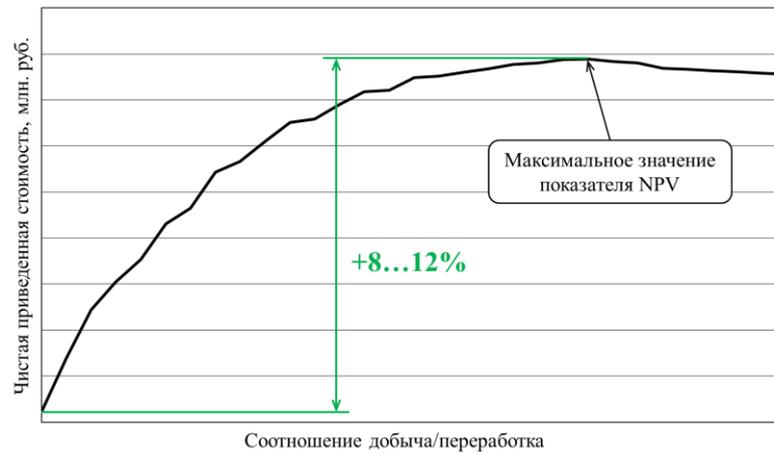


Рисунок 4.16 – Форма зависимости чистой приведенной стоимости от соотношения уровня добычи руды к уровню переработки

Значимость данного показателя оптимизации определяется снижением процентных отчислений по кредитам, полученным горнодобывающими предприятиями для реализации намеченных планов разработки месторождений. Чем раньше предприятие может вернуть выделенную в виде инвестиций сумму, тем меньшую стоимость за право пользования кредитом ему нужно будет уплатить. Более ранний возврат инвестиций становится возможным за счет увеличения денежных потоков на ранней стадии освоения месторождения, и, следовательно, выделение большего объема денежных средств на погашение кредитной нагрузки.

Оптимизация стратегий и календарных графиков разработки различных месторождений приводит к построению схожей картины ускорения сроков возврата инвестиций в виде графика зависимости срока окупаемости проекта разработки от превышения уровня добычи руды над переработкой за единицу времени, представленного на рисунке 4.17.

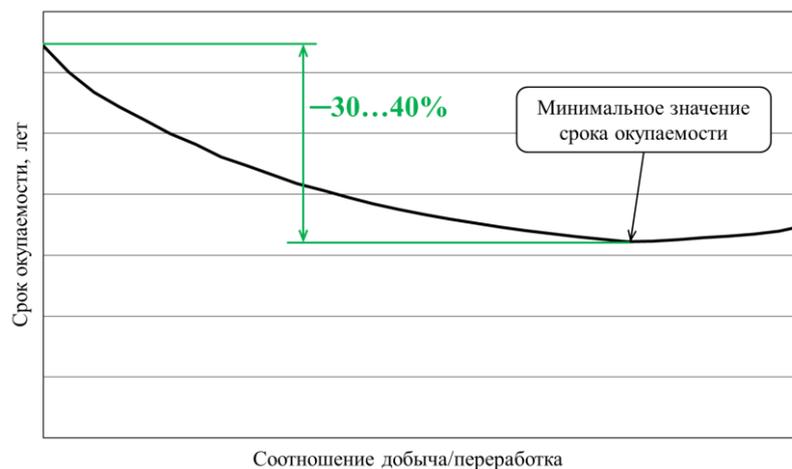


Рисунок 4.17 – Форма зависимости срока окупаемости проекта от соотношения уровня добычи руды к уровню переработки

Анализ графиков для различных месторождений свидетельствуют об ускорении сроков возврата инвестиций в среднем на 30% - 40%.

Выбранная стратегия освоения запасов золоторудного месторождения Рябиновое основывается на комплексном подходе, обеспечивающем безопасную и эффективную разработку месторождения за счет повышения уровня извлечения полезных компонентов и увеличения объемов товарной продукции, дифференцированного выбора способа переработки руд различного качества с обоснованием рациональной структуры производственных мощностей при минимальном экологическом воздействии на окружающую среду.

Выводы по 4 главе

1. Выполненное исследование структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия на основе разработанной производственно-финансовой модели освоения участка «Надежда» Нижнеякокитского рудного поля на первом этапе развития открытых горных работ доказали экономическую целесообразность установления превышения уровня добычи руды над уровнем переработки в год. При этом, операционная рентабельность и положительный денежный поток обеспечиваются на протяжении всего периода разработки участка «Надежда». Оптимальный уровень превышения объемов добычи над переработкой составил 115%, что обеспечило:

- увеличение производства золота на первом этапе на 47%;
- увеличение операционного денежного потока на первом этапе на 46%;
- увеличение показателя чистой приведенной стоимости на 32%;
- снижение срока окупаемости проекта на 40%.

2. Апробация и реализация предложенной методики оптимизации соотношения производственной мощности предприятия в циклах добычи и переработки показала работоспособность метода учета различия в показателях качества руды, операционных ограничениях, изменения кондиций на среднее и бортовое содержание ценного компонента в массиве руды месторождения, что имеет высокое научное и практическое значение и расширяет возможности использования предложенного оптимизационного метода.

3. Практическая реализация метода оптимизации стратегии и календарного графика на примере месторождения Рябиновое подтвердила положительный экономический эффект данного подхода. Анализ результатов расчета производственно-финансовой модели, а также построенных на их основе графиков позволил сделать вывод, согласно которому оптимальное превышение уровня добычи руды в год над переработкой для разработки месторождения Рябиновое составляет 120%, что в свою очередь приводит к:

- увеличению производства золота на первом этапе на 48%;
- увеличению денежного потока на первом этапе на 41%;
- увеличению показателя чистой приведенной стоимости на 18%;
- снижению срока окупаемости проекта на 35%.

4. Выполненная оптимизация производственной мощности золотодобывающего предприятия и режима развития горных работ на карьерах основных структурных подразделений по добыче и переработке разнородных руд позволила обосновать основные параметры горнотехнических систем при открытой разработке месторождения Рябиновое. Рекомендована отдельная выемка вскрышных пород и руд. В одновременной работе будет находиться четыре карьера. Карьеры рекомендовано отрабатывать сверху вниз 10 м уступами по вскрыше, 5÷10 м уступами по руде. Вскрытие рабочих горизонтов карьеров целесообразно осуществлять полутраншеями, имеющими заезды как непосредственно с соответствующих горизонталей поверхности, так и с использованием временных внутренних съездов. Рациональное направление разрезных траншей – по простиранию рудных тел.

5. Разработан новый подход к проектированию устойчивого развития горнотехнических систем, основанный на определении в горном проекте диапазона динамично изменяющихся в ходе развития горных работ на месторождении базовых показателей: производственной мощности комплексов добычи, временного складирования и переработки руд и техногенного сырья, уровня кондиций на добываемые и перерабатываемое руды, бортового содержания ценных компонентов, варьирование которых в разработанной финансово-производственной модели функционирования горно-технической системы позволяет выбрать оптимальный вариант

6. Практическая значимость результатов состоит в реализации предложенного метода оптимизации соотношения производительности горнодобывающих и перерабатывающих производств, календарного графика развития горных работ и режима разработки золоторудных месторождений Нижнеякокутского рудного поля и Рябиновое. Результаты исследования могут также найти практическое применение на стадии стратегического планирования разработки иных месторождений твердых полезных ископаемых, не склонных к изменению технологических свойств руд при хранении.

Заключение

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, дано новое решение актуальной научно-практической задачи обоснования рационального соотношения производственной мощности золотодобывающего карьера, комплексов временного складирования руд и перерабатывающих производств на различных этапах развития горных работ, что имеет важное значение для безопасного и устойчивого функционирования золотодобычи в России.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Доказано, что достижение рационального динамично изменяющегося соотношения производственных мощностей горнодобывающих и перерабатывающих циклов добычи и переработки руд методами обогащения, кучного, подземного и чанового выщелачивания, участков промежуточного складирования рудной массы на временных складах в едином горно-обогатительном комплексе обеспечивается на основе разработанной математической модели оптимизации по максимуму совокупного дисконтированного дохода и минимуму срока окупаемости инвестиций на реализацию горного проекта с учетом распределения содержания ценных компонентов в массиве месторождения путем варьирования бортового и среднего содержания золота в руде и перерабатываемой рудной массе с оперативным его контролем и управлением на различных этапах полного цикла освоения золоторудных месторождений и дифференциацией в динамике разработки уровней кондиций на добываемые и перерабатываемые руды.

2. Обоснован новый подход к проектированию устойчивого развития горнотехнической системы, основанный на определении в горном проекте диапазона динамично изменяющихся в ходе развития горных работ на месторождении базовых показателей: производственной мощности комплексов добычи, временного складирования и переработки руд и техногенного сырья, уровня кондиций на добываемые и перерабатываемое руды, бортового содержания ценных компонентов, варьирование которых в разработанной финансово-производственной модели функционирования горнотехнической си-

стемы позволяет выбрать оптимальный вариант. Доказано, что увеличить объемы горных работ возможно путем использования резервов, заложенных на этапе проектирования разработки месторождения, например, за счет регулирования режима развития фронтов добычных и вскрышных работ на рабочих уступах.

3. Доказано, что при выдержанном в массиве месторождения содержании золота в рудах, близком к среднему, объём добычи руды должен соответствовать производительности перерабатывающего производства. Если среднеквадратическое отклонение содержания золота от среднего значения превышает 0,04 г/т, следует оптимизировать соотношение объемов добычи и переработки руд с учетом распределения их качества. Установлено, что превышение производительности добычного производства над перерабатывающим в первые годы функционирования карьера позволяет существенно увеличить операционные денежные потоки. При этом недисконтированный доход от освоения месторождения увеличивается в 1,5-2 раза, а дисконтированный – в 1,7-2 раза. В совокупности это способствует росту показателя NPV проекта в среднем в 1,5 раза.

4. Анализ закономерностей распределения ценных компонентов по глубине в массиве месторождения показал, что, в случае уменьшения среднего содержания золота в руде с глубиной, на начальном этапе разработки производительность перерабатывающего комплекса должна соответствовать объемам переработки рудной массы. Если содержание ценных компонентов в руде месторождения с глубиной растет, следует в планах развития горных работ на начальном этапе освоения предусмотреть повышенные темпы углубки со складированием резервов бедных руд на поверхности в штабелях кучного выщелачивания или на временных рудных складах. При выдержанном по глубине содержанию золота в массиве месторождения и его среднеквадратическом отклонении от среднего значения 0,2 г/т превышение в первые пять лет освоения месторождения производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим в два раза позволяет увеличить NPV в 1,25 раза.

5. Доказано, что изменчивость себестоимости добычи руды в зависимости от глубины разработки при глубине карьера до 200 м оказывает незначительное влияние на применение метода оптимизации стратегии освоения

месторождений открытым способом. Как для базовой стратегии, так и для стратегии по методу оптимизации увеличение себестоимости добычи руды на протяжении всего проекта освоения месторождения на 10% приводит к снижению показателя чистой приведенной стоимости (NPV) на 0,5%.

6. Определены основные параметры горнотехнической системы при открытой разработке месторождения Рябинового. Рекомендована отдельная выемка вскрышных пород и руд, в одновременной работе должны находиться четыре карьера. Карьеры рекомендовано отрабатывать сверху вниз уступами высотой 10 м по вскрыше и 5÷10 м – по руде. Вскрытие рабочих горизонтов карьеров целесообразно осуществлять полутраншеями, имеющими заезды как непосредственно с соответствующих горизонталей поверхности, так и с использованием временных внутренних съездов. Рациональное направление разрезных траншей – по простиранию рудных тел. Научно обоснованы технологические решения процессов переработки руд месторождения Рябинового на золотоизвлекательной фабрике (ЗИФ) и в штабелях кучного выщелачивания, что обеспечивает увеличение производительности ЗИФ до 1500 тыс. т/год, участка кучного выщелачивания до 850 тыс. т/год.

7. Реализация метода оптимизации соотношения производственных мощностей горнодобывающих и перерабатывающих производств, календарного графика развития горных работ и режима разработки золоторудных месторождений Южной Якутии выявила, что оптимальное превышение уровня добычи руды в год над переработкой в первые пять лет разработки месторождений Нижнеякокитского рудного поля составляет 2,35, для месторождения Рябинового 2,2, что, в свою очередь, при освоении последнего приводит к росту производства золота на 48%, увеличению денежного потока на 41%, повышению показателя чистой приведенной стоимости на 18% и снижению срока окупаемости проекта на 35%. Результаты исследования перспективны для практического применения на стадии стратегического планирования разработки иных месторождений твердых полезных ископаемых, не склонных к изменению технологических свойств руд при хранении.

Список использованной литературы

1. Arteaga F. The Mining Rate in Open Pit Mine Planning. A thesis submitted for the degree of Master of Philosophy at The University of Queensland in 2014. 110 p.
2. Asad M.W.A. Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals. *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.* 2005. 19 (3). Pp. 176–187.
3. Asad M.W.A. Cutoff grade optimization algorithm with stock-piling option for open pit mining operations of two economic minerals // *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.* 2005. 19 (3). Pp. 176–187.
4. Asad M.W.A., Qureshi M.A., Jang H. A review of cut-off grade policy models for open pit mining operations. *Resources Policy* 49. 2016. Pp. 142–152.
5. Asad M.W.A., Topal E. Net present value maximization model for optimum cut-off grade policy of open pit mining operations // *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* 2011, 111 (11). Pp. 741–750
6. Asad M.W.A., Topal E. Net present value maximization model for optimum cut-off grade policy of open pit mining operations. *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.* 111. 2011. Pp. 741–750.
7. COMET Strategy Pty Ltd brochure. 2018.
8. Dagdelen K. Kawahata K. Value creation through strategic mine planning and cutoff-grade optimization. *Min. Eng.* 2008. 60(1). Pp. 39–45.
9. Friedrich-Wilhelm Wellmer, Roland W. Scholz, What Is the Optimal and Sustainable Lifetime of a Mine? // *Sustainability*, Volume 10, Issue 2. 2018. P. 480.
10. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal de-posits combined development experience // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. T.7. №6. С. 591-594.
11. Hall B.E. Cut-off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy). 2014. 311 P.
12. Howe S., Pan J., Application of Enterprise Optimisation Considering Ultra High Intensity Blasting Strategies, Whittle Consulting Ltd. 2018. 35 p.
13. Lane K. F. The Economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice, (Mining Journal Books Limited), 1988. 149 p.
14. Lerchs H., Grossman F. Optimum Design of Open-Pit Mines. *Transaction CIM*. 1965. 58. P. 47-54.
15. Long K. R., Singer D. A. A Simplified Economic Filter for Open-Pit Mining and Heap-Leach: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-218, 2001. 18 p.
16. Long, K.R. A Test and Re-Estimation of Taylor's Empirical Capacity–Reserve Relationship: *Natural Resources Research*, March 2009. Volume 18, Issue 1. Pp 57–63.
17. McSpadden G. M., and Schaap W. A., A test and comment on Taylor's rule of mine life: *Bull. Proc. Australasian Institution Mines Metall.*, 1984, V. 289, № 6. P. 217–220.
18. Mortimer, G J. Grade control, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 1950. 59. P. 1– 43.
19. Place D., Whittle G., Baxter N. GEOVIA Whittle Simultaneous Optimization. White paper, Dassault Systèmes. 2017. 6 p.

20. PwC. Обзор горнодобывающей промышленности, 2018 год. Время соблазнов. 26 с.
21. Rendu J.M. An introduction to cut-off grade estimation. Second edition (SME). 2014. 159 P.
22. Singer D.A., Menzie W.D., Long K.R. A simplified economic filter for open-pit gold-silver mining in the United States: U. S. Geological Survey Open-File Report. 1998. 98-207.10 p.
23. Singer D.A., Menzie W.D., Long K.R. A simplified economic filter for underground mining of massive sulfide deposits: U. S. Geological Survey Open-File Report. 2000. 00-349. 20 p.
24. Strategic Mine Planning with COMET Software, Strategy Optimisation Systems Pty Ltd. 2009.
25. Taylor H.K. Rates of working mines; a simple rule of thumb: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 1986, v. 95, P. 203-204.
26. Taylor, H. K. Mine valuation and feasibility studies // in Hoskins, J. R., and Green, W. R., eds., Mineral industry costs: 2nd ed, Northwest Mining Association, 1977, Spokane, Washington. P. 1–17.
27. Whittle, Gerald, Enterprise Optimisation, Proceedings of Mine Planning and Equipment Selection Conference, Ed. E. Topal, 2010. Pp. 105-117.
28. Абдрахманов И.А., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Перспективы повышения полноты и комплексности освоения месторождений // Недропользование XXI век. 2009. №3. С. 28-32.
29. Авдеев П. Б. Научное обоснование эффективных ресурсосберегающих технологий открытой разработки рудных месторождений в сложных геокриологических условиях Забайкалья // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. 2010. 37 с.
30. Агошков М.И. определение производительности рудника // Metallurgizdat. 1948. 271 с.
31. Анистратов Ю. И., Анистратов К. Ю. Проектирование карьеров / Учебное пособие для ВУЗов // М.: Издательство НПК «Гемос Лимитед». 2002. 176 стр.
32. Арсентьев А.И. Динамика параметров и показателей карьера в процессе работы со стабильной производительностью по горной массе // Горный журнал. Известия ВУЗов. 2001. №1. С. 26-30.
33. Арсентьев А.И. Определение производительности и глубины карьеров // Сб. трудов КГРИ,. Вып. 4. Киев: Гостехиздат. 1956.
34. Арсентьев А.И. Определение производительности и границ карьеров // 1 изд. Госгортехиздат. 1961 г., 2 изд. М.: Недра. 1970. 319 с.
35. Арсентьев А.И. Производительность карьеров // СПб.: СПГГИ. 2002. 85 с.
36. Арсентьев А.И. Разработка месторождений твёрдых полезных ископаемых открытым способом // Санкт-Петербургский горный институт имени Г.В. Плеханова. 2009. 137 с.
37. Арсентьев А.И. Стратегия и тактика проектирования открытых горных работ // Горный журнал. 2008. № 11. С. 54-58.

38. Арсентьев А.И., Пищито В.Я. Интенсификация обработки месторождений при использовании временных складов руды // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1983. №8. С. 9-12.
39. Арсентьев А.И., Тихонов Р.А. Показатели и параметры карьера при работе со стабильной производительностью по горной массе // Горный вестник. 1998. №2.
40. Арсентьев А.И., Холодняков Г.А. Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений // М.: Недра. 1994. 336 с.
41. Арсентьев А.И., Шпанский О.В. Развитие методов определения производительности карьеров // Горный журнал. Известия вузов. 1973. №9.
42. Арсентьев А.И., Шпанский О.В. Развитие рабочей зоны карьера при максимальной интенсивности горных работ // Межвузовский сборник Разработка угольных месторождений открытым способом. Кемерово. 1972. вып.1.
43. Беневольский Б. И. Золото России // М.: ООО «Геоинформцентр». 2002. 452 с.
44. Бобриевич А.П., Бондаренко М.Н., Гневушев М.А. и др. Алмазные месторождения Якутии // Под. ред. В.С. Соболева. М.: Госгеолтехиздат. 1959. 536 с.
45. Бобров С.А., Кисляков В.Е. Определяющие технико-экологические параметры рабочей зоны карьера и принципы их установления при проектировании и развитии открытых горных работ // Фундаментальные исследования. 2005. № 1. С. 45-47.
46. Вареничев А.А., Комогорцев Б.В., Громова М.П. Сырьевая база золота России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 8. С. 212-220.
47. Васильев Е.И. Некоторые вопросы обоснования производительности и размера карьера при разработке свиты крутопадающих пластов // МГИ. 1958. 47 с.
48. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика // Учебное пособие. 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Поли Принт Сервис. 2015. 1300 с.
49. Веницкий К.Е., Меньшов В.С., Реентович В.И. Установление рациональных производственных мощностей группы карьеров // Добыча угля открытым способом. 1968. № 13. С.17-22.
50. Горно-обогащительный комплекс «Рябиновый». Проектная документация // ЗАО «ТОМС инжиниринг». 2012. т.2.1, Раздел 5, Подраздел 7, кн. 1. 98 с.
51. Городецкий П.И. Основы проектирования горнорудных предприятий // Металлургиздат. 1949. 450 с.
52. Единые правила охраны недр при разработке месторождений твердых полезных ископаемых // Госгортехнадзор СССР. – М.: Недра 1987. 60 с.
53. Ерёмин Д. И., Ягфарова Н. И., Абишев Д. А. Алгоритм Лерча – Гроссмана и его реализация на центральном и графическом процессорах // Современные тенденции технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Казань, октябрь 2014 г.). Казань: Бук. 2014. С. 8-13.
54. Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 N 2395-1. С изм. и доп. от 08.12.2020.

55. Звягинцев Е.П. Определение производственной мощности открытых рудников // Горный журнал. 1948. № 4. С.19-20.
56. Зелинский В.В. Годовая производительность горно-обогатительного комбината железорудной промышленности // Горный журнал. 1961. №5. С. 16-17.
57. Зурков П.Э. Определение производительности карьера // Сб. трудов Магнитогорского горно-металлургического комбината. Вып. 15, Магнитогорск, Metallurgizdat. 1958. С. 16-21.
58. Ишкулова И.А. Обоснование развития рабочей зоны карьера при переменном направлении углубки с максимальной скоростью // Сб. Записки горного института. СПб.: СПГИ (ТУ). 2004. Том 159. С. 47-49.
59. Каплунов Д.Р., Рыжов С.В. Обоснование рациональной производственной мощности по добыче и переработке золотоносных руд // Материалы к конференции Международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». М.:ИПКОН РАН. 2020. С. 19-22.
60. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Перспективные направления развития комбинированной геотехнологии в свете совершенствования технологического уклада горного производства // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 3. С. 7-22.
61. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие теории проектирования и реализации идей комплексного освоения недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. №4 С. 20-41.
62. Капустин Н.Г. Обоснование производственной мощности карьера // В кн.: Техника и технология открытых горных работ. М.:Углетехиздат. 1959. С. 43-61.
63. Капутин Ю. Е. Вероятностное стратегическое планирование развития карьеров // СПб.: «Недра». 2019. 316 с.
64. Капутин Ю. Е. Повышение эффективности управления минеральными ресурсами горной компании (геологические аспекты) // СПб.: «Недра». 2013. 246 с.
65. Капутин Ю.Е. Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ // СПб., Недра. 2017. 280 с.
66. Капутин Ю.Е. Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ // СПб: Недра. 2017. 280 с.
67. Кузнецов И.А. Основные расчеты при разработке рудных месторождений / ч.2 Открытые работы // М.: Государственное научно-техническое горно-геологическое издательство. 1932. 168 с.
68. Лазько Е.Е. Минералы-спутника алмаза и генезис кимберлитовых пород // М.: Наука. 1979. 192 с.
69. Левин Л.В. Учет достоверности запасов при определении производительности карьеров // В кн.: Работа карьеров в сложных условиях. Л.: Наука. 1967. С.56-58.
70. Лузин Б.С., Голик В.И. Выщелачивание золота из некондиционного сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 4. С. 84-88.

71. Мельников Н.В., Веницкий К.Е., Меньшов В.С., Реентович В.И. Вопросы выбора производственной мощности карьера // М.: Наука. 1971. 167 с.
72. Мельников Н.Н., Бусырев В.М. Ресурсобалансированное недропользование: теория и методы // Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2007. 110 с.
73. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев) // Москва, 2007.
74. Мизерницкий Л.А. Годовая производительность горно-обогачительного комбината железорудной промышленности // Горный журнал. 1969. №9. С. 22-26.
75. Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль. Правила охраны недр (ПБ 07-601-03).
76. Патент РФ на изобретение №2622534. Способ извлечения благородных металлов из отработанных штабелей кучного выщелачивания / Башлыкова Т.В., Рыжов С.В., Аширбаева Е.А., Грознов И.Н. – Оpubл.16.06.2017. Бюл. №17.
77. Пешков А.А. Управление развитием горных работ на глубоких карьерах // М.: ИПКОН РАН. 1999. 321 с.
78. Пешкова М.Х. Экономическая оценка горных проектов // М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. 422 с.
79. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям // Изд. 2-е. М.: ЛЕНАНД. 2016. 194 с.
80. Порцевский А.К. Управление качеством рудной массы на открытых горных работах // Учебное пособие по курсу лекций для студентов специальности «Технология и комплексная механизация подземной разработки месторождений полезных ископаемых». Москва. 1998. 44 с.
81. Постановление Правительства РФ от 03.03.2010 № 118 (ред. от 12.11.2020) «Об утверждении Положения о подготовке, согласовании и утверждении технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых и иной проектной документации на выполнение работ, связанных с использованием участками недр, по видам полезных ископаемых и видам пользования недрами».
82. Приказ Роснедр от 04.06.2010 № 569 (ред. от 26.05.2015, с изм. от 19.04.2017) «О создании Центральной комиссии Федерального агентства по недропользованию и комиссий его территориальных органов по разработке месторождений твердых полезных ископаемых».
83. Пыталев И.А. Тенденции развития научно-методических основ определения параметров открытых горных работ при комплексном освоении недр земли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Горная книга. 2015. №15. С. 29-35.
84. Реентович В.И. Применение линейного программирования для оптимального порайонного планирования режима горных работ карьеров. –В кн.: Проектирование и строительство угольных предприятий // М.: ЦНИИТЭ угля. 1964. № 68. С. 93-97.

85. Ржевский В.В. Определение мощности карьеров при разработке богатых железных руд Михайловской группы месторождений КМА // МГИ, М. 1959. 42 с.
86. Ржевский В.В. Проектирование контуров карьера // Metallurgizdat. 1956.
87. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ / Изд. 3-е, перераб. и доп. // М.: Недра. 1978. 541 с.
88. Ржевский В.В. Режим горных работ при открытой добыче угля и руды // Углеиздат. 1957. 200 с.
89. Ржевский В.В., Анистратов Ю.И., Ильин С.А. Открытые горные работы в сложных условиях // М.: Недра. 1964. С.48-63.
90. Рыжов С. В., Иляхин С. В., Сытенков В. Н. Влияние календарного графика разработки месторождения на срок окупаемости проекта строительства перерабатывающего предприятия // Рациональное освоение недр. 2019. №1. С. 62-68.
91. Рыжов С. В., Иляхин С. В., Сытенков В. Н., Никитин А. А. Повышение эффективности использования ресурсного потенциала рудных месторождений // Горный журнал. 2020. -№12. С. 25-29.
92. Рыжов С.В., Рыльникова М.В., Есина Е.Н., Рокосовский К.С. Влияние факторов распределения ценного компонента в массиве месторождения на структуру оптимальной производственной мощности золотодобывающего предприятия // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Вып. 4. Тула. С. 224-239.
93. Рыжов С.В., Рыльникова М.В., Есина Е.Н., Рокосовский К.С. Исследование влияния распределения ценного компонента в массиве месторождения на структуру оптимальной производственной мощности золотодобывающего предприятия // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «ЗОЛОТО. ПОЛИМЕТАЛЛЫ. XXI ВЕК». М.:ИПКОН РАН. 2020. С. 28-30.
94. Рыльникова М.В., Илимбетов А.Ф., Абдрахманов И.А. Комплексное освоение медноколчеданных месторождений Южного Урала // Недропользование XXI век. 2006. №1. С. 65-71.
95. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Методологические аспекты проектирования системы управления минерально-сырьевыми потоками в полном цикле комплексного освоения рудных месторождений // Рациональное освоение недр. 2016. № 2-3. С. 36-41.
96. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Илимбетов А.Ф., Маннанов Р.Ш. Комбинированная физико-техническая и физико-химическая технология комплексного освоения медноколчеданных месторождений Урала // Недропользование XXI век. 2007. №5. С. 34-38.
97. Рыльникова М.В., Рыжов С.В. Обоснование структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия на различных этапах развития открытых горных работ // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2020. № 2. С. 458-470.
98. Рыльникова М.В., Рыжов С.В., Есина Е.Н. Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений

- Нижнеякоkitского рудного поля // Горная промышленность. 2020. №2. С. 115-120.
99. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы // Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1989. 432 с.
100. Терёхина Ю. В. Обоснование оптимальных параметров малых карьеров на предпроектной стадии оценки // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург. 2006. 23 с.
101. Трубецкой К.Н. Основные направления и пути решения проблем ресурсосбережения при комплексном освоении недр // Маркшейдерия и недропользование. 2010. №3 (47). С. 22-29.
102. Трубецкой К.Н. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых // М.: ИПКОН РАН. 2014. 196 с.
103. Трубецкой К.Н., Галченко Ю.П., Бурцев Л.И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества // М.: Научтехлитиздат. 2003. 262 с.
104. Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В., Коваленко В.С. Проектирование карьеров // М. 2009. 694 с.
105. Трубецкой К.Н., Пешков А.А., Мацко Н.А. Метод и результаты исследований оптимизации стратегий освоения месторождений // Горный вестник. 1996. №4.
106. Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1-1. С. 21-32.
107. ТЭО постоянных разведочных кондиций для золоторудных месторождений Нижнеякоkitского рудного поля и подсчет запасов по месторождениям Надежда, Смежное, Верхнее, Трассовое, Хвойное и проявлениям Табардыр, Кэдэрги, Склон, Еннье Центрально-Алданского золотоносного района Республики Саха (Якутия) и Отчет с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2016 г // ООО «ОРЕОЛЛ-ГЕО». 2017. Том I. Кн.1. 272 с.
108. ТЭО постоянных разведочных кондиций для золоторудных месторождений Нижнеякоkitского рудного поля и подсчет запасов по месторождениям Надежда, Смежное, Верхнее, Трассовое, Хвойное и проявлениям Табардыр, Кэдэрги, Склон, Еннье Центрально-Алданского золотоносного района Республики Саха (Якутия) и Отчет с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2016 г // ООО «ОРЕОЛЛ-ГЕО». 2017. Том I. Кн.2. 193 с.
109. ТЭО постоянных разведочных кондиций для золоторудных месторождений Нижнеякоkitского рудного поля и подсчет запасов по месторождениям Надежда, Смежное, Верхнее, Трассовое, Хвойное и проявлениям Табардыр, Кэдэрги, Склон, Еннье Центрально-Алданского золотоносного района Республики Саха (Якутия) и Отчет с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2016 г // ООО «ОРЕОЛЛ-ГЕО». 2017. Том 2. Кн.1. Горная часть ТЭО. 155 с.
110. Филиппов С.А., Сытенков В.Н. Рациональное освоение ресурсов месторождений – путь к воспроизводству минерально-сырьевой базы горноперерабатывающих комплексов // Рациональное освоение недр. 2011. №11. С. 16-21.

111. Фицак В.В., Богуславский Э.И. Эффективное использование ресурсов пологозалегающего рудного месторождения // Современные проблемы науки и образования. 2005. № 1.
112. Хохряков В.С. Показатели технического прогресса на карьерах СССР // Изд-во ВУЗов. Горный журнал // 1963. №6. С.9-12.
113. Хохряков В.С. Учет равномерности затрат при технико-экономическом сравнении вариантов открытой разработки // Горный журнал. 1962. №7. С. 21-26.
114. Хохряков В.С. Церенщиков П.Т. Поэтапное развитие горных работ на карьерах // ЦНИИ МЦМ. М. 1968.
115. Хохряков В.С. Экономическая оценка вариантов открытой разработки с учетом фактора времени // СГИ. 1969. 38с.
116. Шпанский О.В. Исследование влияния направления развития и интенсивности горных работ на формирование рабочей зоны возможную производительность карьера по полезному ископаемому / Диссертация на соискание уч. степени канд.техн.наук // Л. 1973. 197 с.
117. Юматов Б.П. Влияние бортового и минимального содержания на глубину и производительность карьеров // Изв. ВУЗов. Горный журнал. 1962. №2. С. 18-27.