

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»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук в отделе теории проектирования освоения недр

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рыльникова Марина Владимировна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пыгалев Иван Алексеевич,
директор Института горного дела и транспорта
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

кандидат технических наук, доцент
Пастихин Денис Валерьевич,
доцент кафедры «Геотехнологии освоения
недр», Горный институт НИТУ «МИСиС»,
г.Москва

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится « » _____ 2021 г. в ____ на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН:
<http://ипконран.рф>.

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

И.Ф. Жариков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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.

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 крутопадающих 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 Нижнеякутского 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 Нижнеякобитского 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 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 Нижнеякобитского 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, объем добычи руды должен соответствовать производительности перерабатывающего производства. Если среднее квадратическое 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 растёт, 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 залегаю запасы 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 Рябиновое 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 геологический 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. Полиметаллы. XXI век» (г. Пласт, 1–3 декабря 2020 г.); информационно-консультативном вебинаре АООН «НАЭН» по теме «Общие методические подходы к подготовке технических проектов разработки месторождений ТПИ» (16–17 декабря 2020 г.).

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 62 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу научно-методических и практических подходов к обоснованию режима развития открытых горных работ и производственной мощности предприятия. Выполнено обобщение горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений Республики Саха (Якутия).

Совершенствованию методов повышения экономической эффективности деятельности горнодобывающих предприятий в целом и оптимизации календарного плана разработки месторождений твердых полезных ископаемых посвящено много трудов известных ученых. Значительный вклад в теорию проектирования открытой разработки месторождений, и в частности в теорию и методологию определения производительности карьеров, внесли члены академии АН СССР и РАН М.И. Агошков, Н.В. Мельников, Н.Н. Мельников, Д.Р. Каплунов, А.А. Пешков, В.В. Ржевский, К.Н. Трубецкой, В.Л. Яковлев; доктора технических наук Ю.И. Анистратов, А.И. Арсентьев, Е.И. Васильев, К.Е. Веницкий, П.И. Городецкий, И.А. Ишкулова, Е.П. Звягин, П.Э. Зурков, Н.Г. Капустин, В.В. Квитка, И.А. Кузнецов, В.С. Меньшов, И.А. Пыталев, Э.И. Реентович, С.П. Решетняк, М.В. Рыльникова, В.Н. Сытенков, С.И. Фомин, Г.А. Холодняков, В.С. Хохряков, Е.Ф. Шешко, О.В. Шпанский, Б.П. Юматов 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 в. не только на территории нашей страны, но и за рубежом.

Проведенные ранее исследования, практический опыт, анализ проектных и научных решений свидетельствуют, что производственная мощность – это основной параметр горнотехнической системы, определяющий все прочие базовые параметры: тип основного технологического оборудования, его количество, высоту уступов, режим развития горных работ. При этом вопросы обоснования рационального соотношения производственной мощности золотодобывающего карьера и перерабатывающего производства на различных этапах развития горных работ в известных публикациях отсутствуют.

Формирование оптимальной стратегии и календарного графика разработки месторождения предполагает построение структурированной системы расчетов, включающей в себя обработку больших наборов исходных данных, преобразование одних результатов в другие, математические вычисления и проработку множества типовых вариантов с целью поиска оптимального. Очевидно, что решение такого комплекса задач существенно проще и быстрее воплотить с помощью применения систематизированного подхода и предварительного составления алгоритма расчета. Реализация расчетов осуществляется путем построения производственно-финансовой модели разработки месторождения.

Анализ состояния изученности проблемы позволил сформулировать цель, задачи и определить методы исследований.

Во второй главе диссертации получили развитие теоретические основы определения производственной мощности золотодобывающего предприятия. Перед запуском проекта освоения месторождения полезных ископаемых недропользователь, в соответствии с поставленными целями, определяет оптимальную стратегию действий, последовательность и масштабы операций, продолжительность процессов добычи и переработки руды. 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 ранее некондиционных запасов. Концепция данной стратегии (рис. 1) 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.

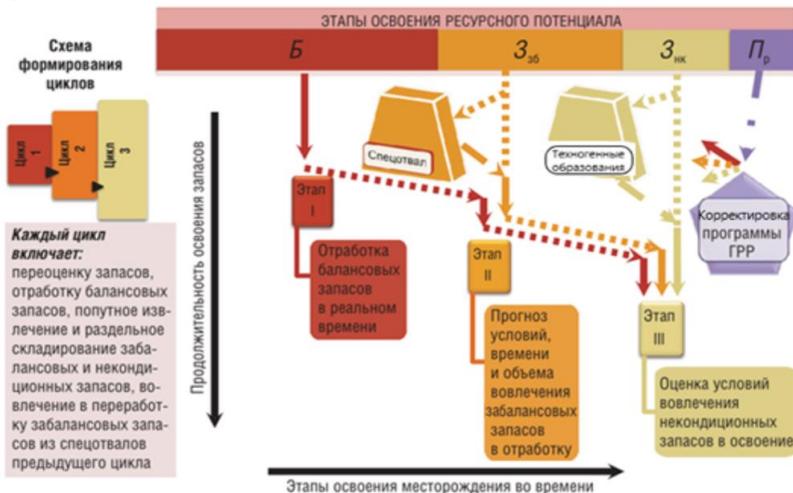


Рисунок 1. Стратегия циклического наращивания ресурсного потенциала месторождения

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 этапах освоения месторождения;
- достижение максимального совокупного экономического эффекта 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.

Обоснован новый подход к проектированию устойчивого развития горно-технических 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 горнотехнической системы позволяет выбрать оптимальный вариант.

Метод оптимизации стратегии и календарного графика предполагает различие в текущих объемах добычи и переработки руды. 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. 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 (рис. 2). 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.



Рисунок 2. График статистики распределения содержания полезного компонента в руде с разделением на этапы переработки по пороговому значению

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 (рис. 3а). 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. 3.

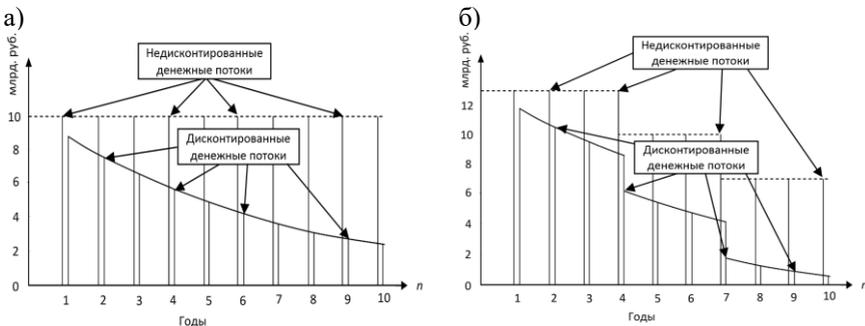


Рисунок 3. Динамика дисконтированных и недисконтированных денежных потоков: а) при базовой стратегии разработки месторождения; б) при неравенстве производительности добывающего и перерабатывающего производств

Предлагаемый метод оптимизации стратегии и календарного графика разработки месторождений твердых полезных ископаемых реализуется в виде разделения процесса освоения месторождения на этапы путем 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 комплекса и перерабатывающего на каждом этапе разработки.

Третья глава посвящена исследованию влияния основных факторов на соотношение производительности добычного и перерабатывающих комплексов золотодобывающего предприятия.

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. Установлено, 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.

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, объем 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 на специальных складах на поверхности для переработки в будущие периоды.

Собранная таким образом база данных проекта отработки месторождения представляет собой производственно-финансовую модель функционирования горнотехнической системы. Конечным результатом модели, являющимся ориентиром в оценке эффективности проекта при неоднородном распределении содержания золота в руде, является показатель чистой приведенной стоимости проекта, рассчитанный на основе анализа денежных потоков проекта отработки запасов.

Анализ производственно-финансовых моделей проекта освоения месторождения (рис. 4) показал, что для месторождений с весьма однородным распределением содержания золота в руде характерна низкая чувствительность модели к уровню извлечения золота на первом и втором этапах, при этом

дополнительные расходы на добычу руды превосходят выручку от реализации дополнительного объема золота.

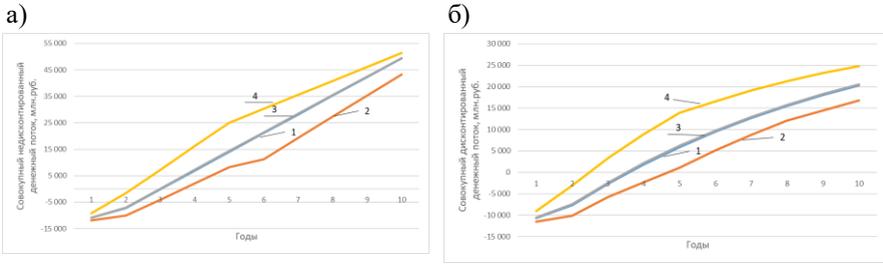


Рисунок 4. Динамика совокупных недисконтированных (а) и дисконтированных (б) денежных потоков базового варианта (1) при равенстве производительности добычного и перерабатывающих комплексов и при превышении производительности по добыче в два раза над переработкой по трем вариантам распределения содержания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

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 этом наибольший эффект от оптимизации производственной мощности горнодобывающего предприятия при двукратном превышении объемов добычи над объемами переработки руды достигнут при весьма невыдержанном распределении содержания золота в массиве месторождения.

По сравнению с базовым проектом при равенстве объемов добычи и переработки руды обеспечен рост NPV проекта на 4,39 млрд руб., то есть на 21,6% по сравнению с базовым вариантом (рис. 5).

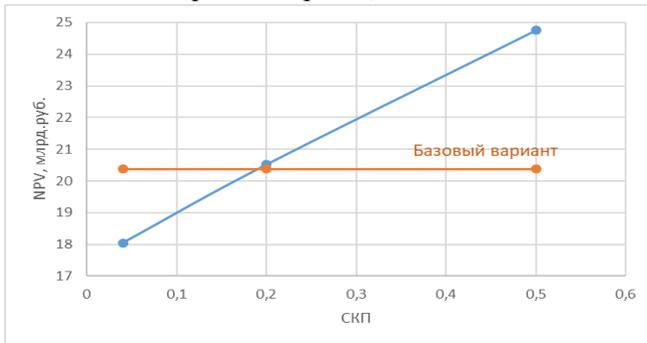


Рисунок 5. График зависимости NPV от среднего содержания золота в добываемой рудной массе и при весьма невыдержанном распределении содержания и превышении производительности горного цеха над перерабатывающим в два раза

При среднеравномерном содержании двукратное увеличение производственной мощности горного цеха дало практически сопоставимые результаты по приведенной стоимости проекта, но анализ результатов операционной деятельности свидетельствует о возможности и в этом случае роста реальной прибыли предприятия за счет оптимизации структуры производственной мощности.

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

Одним из ключевых факторов, влияющих на оптимизацию режима развития горных работ и календарного плана разработки месторождений, является статистика распределения содержания ценных компонентов в руде по глубине месторождения, неоднородность которой становится основой для оптимизации операционного цикла по разделению всего объема руды по этапам разработки. 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 содержания золота, изменяющимися в пределах $0,3 \div 2,1$ г/т при среднем содержании 1,2 г/т.

Установлено, что увеличение объемов добычи в два 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 (рис. 6). Реализация такой возможности увеличивает денежный поток, несмотря на дополнительные операционные затраты на увеличение добычи в два раза, сокращает срок возврата инвестиций.

Определено, 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 на начальной, наиболее ответственной для инвестиционной стадии реализации горного проекта.

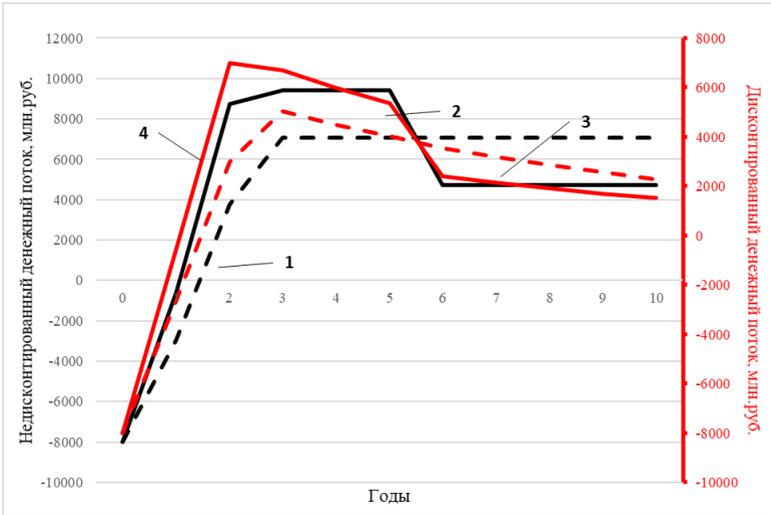


Рисунок 6. Динамика денежного потока недисконтированного (1 – при равенстве, 2 – при двукратном превышении производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим) и дисконтированного (3 – при равенстве, 4 – при двукратном превышении производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим)

Сравнение динамики операционного недисконтированного и дисконтированного денежных потоков свидетельствует (рис. 5), 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.

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 и роста эксплуатационных затрат на добычу на глубоких горизонтах.

Анализ закономерностей распределения ценных компонентов в массиве месторождения показал, что при выдержанном по глубине содержании золота в массиве месторождения превышение в начальный период (первые пять лет освоения месторождения) производительности добычного комплекса по сравнению с перерабатывающим в два раза позволяет увеличить NPV в 1,25 раза. Показано, что, в случае уменьшения среднего содержания золота в руде по глу-

бине 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 на временных рудных складах.

Выполненные исследования процессов переработки руд месторождения Рябинового подтвердили принципиальную возможность извлечения золота из руд этого месторождения 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 и участка кучного выщелачивания до 850 тыс. т/год.

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 на 0,5%. Таким образом, при предельной глубине карьера менее 200 м, соответствующей залегаанию запасов Нижнеякокитского рудного поля и месторождения Рябинового, глубина карьера не оказывает значимого влияния на выбор производственной мощности горнодобывающего предприятия.

Обоснован алгоритм выбора рационального соотношения производительности комплексов добычи и переработки руд в ходе развития работ в карьере, определяемый моделью устойчивого развития горнодобывающего предприятия (рис. 7). 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.

В четвертой главе на основании выполненных исследований даны рекомендации по применению метода оптимизации производственной

мощности золотодобывающего предприятия и выполнена оценка их экономической эффективности.

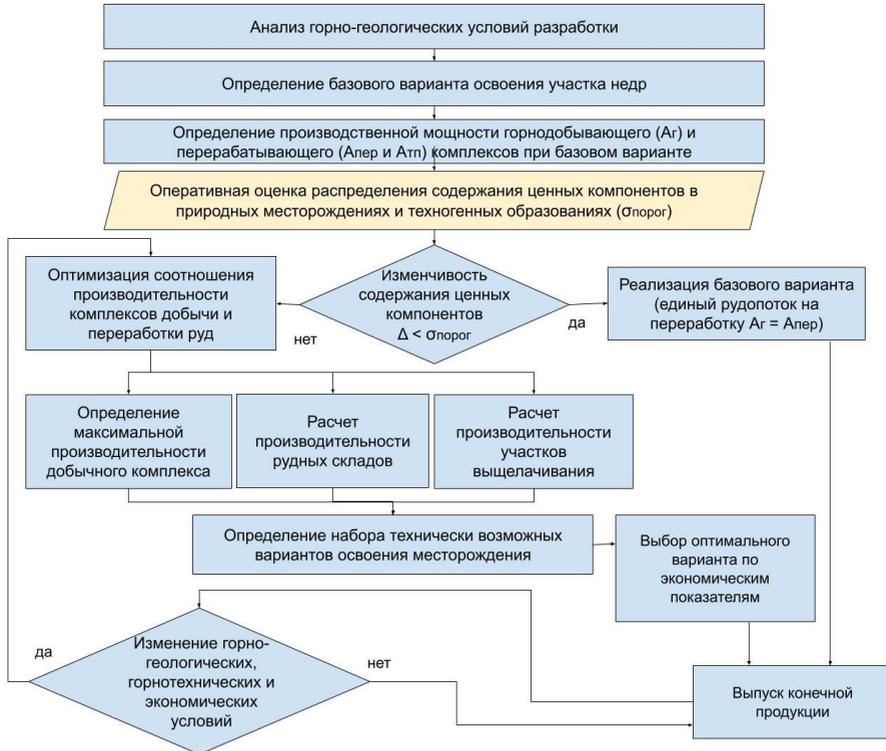


Рисунок 7. Модель устойчивого развития горнотехнической системы

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 месторождения, что имеет высокое научное и практическое значение и расширяет возможности использования предложенного оптимизационного подхода.

Выполненное исследование структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия на основе разработанной производственно-финансовой модели освоения участка «Надежда» Нижнеякокитского рудного поля доказало 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 обеспечивает:

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

Практическая реализация метода оптимизации стратегии и календарного графика на примере месторождения Рябинового также 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 Рябинового 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%.

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 Рябинового. Рекомендована раздельная выемка вскрышных пород и руд. В одновременной работе будет 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.

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 системы 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, объем 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 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 на временных рудных складах. При выдержанном по глубине содержании 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 обрабатывать 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 простирацию 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 Нижнеякоkitского рудного поля составляет 2,35, для месторождения Рябинового 2,2, что, в свою очередь, при освоении последнего приводит к росту производства золота в годы первого этапа освоения 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.

Основные научные и практические результаты диссертации изложены в следующих опубликованных работах автора Рыжова С.В.:

В изданиях, рекомендуемых ВАК России:

1. Рыжов С.В., Иляхин С.В., Сытеньков В.Н. Влияние календарного графика разработки месторождения на срок окупаемости проекта строительства перерабатывающего предприятия // Рациональное освоение недр. – 2019. – № 1. С. 62–68.
2. Рыжов С.В., Иляхин С.В., Сытеньков В.Н., Никитин А.А. Повышение эффективности использования ресурсного потенциала рудных месторождений // Горный журнал. – 2020. – № 12. С. 25–29.
3. 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. – Вып. 2. С. 458–470.
4. Рыльникова М.В., Рыжов С.В., Есина Е.Н. Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудных месторождений Нижнекокинского рудного поля // Горная промышленность. – 2020. – № 2. С. 115–120.
5. 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. С. 224–239.
6. Рыжов С.В., Рыльникова М.В., Есина Е.Н. Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудного месторождения Рябиновое // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – Т. 21. № 2. С. 113–122.

Патент на изобретение

7. 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. – Опубл. 16.06.2017. Бюл. № 17.

В прочих изданиях

8. Каплунов Д.Р., Рыжов С.В. Обоснование рациональной производственной мощности по добыче и переработке золотоносных руд // Материалы конференции Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» – М.: ИПКОН РАН, 2020. – С. 19–22.
9. 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.