

На правах рукописи

Говоров Алексей Сергеевич



**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ
ЗОНЫ ГЛУБОКИХ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ УПРАВЛЕНИЕМ
БОРТОВЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ
КОМПОНЕНТОВ**

*Специальность 2.8.7. Теоретические основы
проектирования горнотехнических систем*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Фомин Сергей Игоревич

Официальные оппоненты:

Качурин Николай Михайлович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра механики материалов и геотехнологии, профессор;

Рославцева Юлия Геннадьевна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра разработки месторождений полезных ископаемых, доцент.

Ведущая организация – Общество с ограниченной ответственностью по проектированию предприятий угольной промышленности "СПб-Гипрошахт", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **18 сентября 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В условиях увеличения глубины карьеров существует проблема перманентного ухудшения горнотехнических условий разработки месторождений. Особенно остро данная проблема проявляется при разработке крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений вследствие сложной формы залегания рудных тел с изменяющимися в плане и по глубине карьера содержаниями полезных компонентов. В данном случае подходы к определению границ разработки, формированию рабочей зоны, сложенной рудопородными уступами, кардинально отличаются от разработки месторождений с более простой геологической структурой.

Отработка крутопадающих сложноструктурных месторождений глубокими карьерами характеризуется высокой чувствительностью к изменениям внешних геологических или технико-экономических данных. Проектные решения по формированию рабочей зоны глубоких рудных карьеров в пространстве и времени должны основываться на учёте динамики рынков минерального сырья и прогнозов цен, законе распределения содержаний полезного компонента по месторождению.

Динамика рынков минерального сырья, стохастический характер исходных данных вызывают необходимость теоретического обоснования новых методов формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров по разработке крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений, позволяющих оперативно принимать обоснованные проектные решения по параметрам и показателям системы разработки при формировании рабочей зоны глубоких рудных карьеров на основе сценарного подхода.

Для формирования рабочей зоны карьеров в качестве технико-экономического параметра необходимо использовать бортовое содержание (БС): оптимизация данного показателя в условиях рыночной экономики позволит обоснованно прогнозировать развитие рабочей зоны в процессе углубки карьера.

Целесообразно при планировании горных работ рассматривать различные сценарии развития рабочей зоны с учётом прогноза развития ситуации на рынке минерального сырья, что позволит

принимать обоснованные проектные решения по границам карьера на различных этапах отработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений.

Современные подходы к планированию развития рабочей зоны глубоких рудных карьеров не позволяют оперативно принимать решения об изменении формы рабочей зоны из-за консервативности системы-карьер. В условиях динамики исходной проектной информации, носящей стохастический характер, карьер должен рассматриваться как динамическая система, а решения об изменении параметров рабочей зоны должны позволять оперативно реализовывать наиболее вероятный сценарий.

Степень разработанности темы исследования

Методы определения границ карьеров основываются на большой теоретической базе и широком круге исследований таких ученых, как М.И. Агошков, Ю.И. Анистратов, А.И. Арсентьев, С.Е. Гавришев, В.А. Галкин, А.В. Гальянов, П.И. Городецкий, С.А. Ильин, Н.Г. Капустин, Ю.Е. Капутин, В.В. Квитка, В.С. Коваленко, С.В. Корнилков, А.Н. Косолапов, С.Д. Коробов, Н.А. Мацко, Н.В. Мельников, Н.Н. Мельников, М.Г. Новожилов, С.П. Решетняк, В.В. Ржевский, О.Н. Салманов, П.И. Томаков, К.Н. Трубецкой, С.И. Фомин, Г.А. Холодняков, В.С. Хохряков, В.Г. Шитарев, О.В. Шпанский, Н.Н. Чаплыгин, Б.П. Юматов, В.Л. Яковлев и ряда других. Методы определения границ карьеров рассматривали иностранные специалисты: R. Dimitrakopoulos, M. Osanloo, D. Whittle, J. Poniewierski, J.M. Rendu, K. Lane, J.A. Krautkraemer, G.J. Mortimer.

Несмотря на то, что существуют различные способы и методики оптимизации бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде, учитывающие горно-геологические и горнотехнические условия открытой разработки крутопадающих рудных месторождений, многие из данных методов не учитывают особенности сложной геологической структуры, влияние динамики внешних условий реализации проекта, фактора времени, применение сценарного подхода.

Объект исследования – процесс разработки и оптимизации стратегии формирования рабочей зоны карьеров, обрабатывающих крутопадающие сложноструктурные рудные месторождения в

условиях динамики рынков минерального сырья, стохастического характера исходных проектных данных.

Предмет исследования – метод формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров на основе управления бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде.

Цель работы – обоснование методов формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде, обеспечивающих повышение экономической эффективности отработки месторождения и вероятности реализации принимаемых проектных решений.

Идея – для повышения экономической эффективности принимаемых проектных решений о границах отработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений необходимо использовать методы формирования рабочей зоны карьера эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов, учитывающие стохастический характер исходных данных и динамику рынка минерального сырья.

Поставленная в диссертации цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Обоснование метода формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров по разработке крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде.

2. Прогнозирование цен на медную руду при проектировании карьеров с использованием метода Хольта-Винтерса.

3. Оптимизация бортового содержания полезных компонентов по критерию достижения максимума чистого дисконтированного дохода.

4. Анализ чувствительности и выявление наиболее значимых факторов при расчете чистого дисконтированного дохода и бортового содержания.

5. Оценка надёжности принимаемых организационно-технических и проектных решений.

Научная новизна работы:

1. Установлены аналитические зависимости для определения бортового содержания полезных компонентов в добываемой в карьере руде для различных этапов разработки месторождения и вариантов развития ситуации на рынках минерального сырья.

2. На основе анализа чувствительности показателей открытой разработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений выявлены основные факторы, в наибольшей степени влияющие на чистый дисконтированный доход при реализации проектных решений по разработке крутопадающих рудных месторождений.

3. Выявлен закон распределения содержаний полезного компонента в руде, установлена целевая функция плотности распределения вероятностей для карьеров-аналогов по разработке крутопадающих сложноструктурных меднорудных месторождений.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем по методологическому направлению исследований по подпункту: «Горно-геологическая и технико-экономическая оценка месторождений при проектировании горнотехнических систем».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснован и разработан метод формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров на основе управления бортовым содержанием полезных компонентов, учитывающий горнотехнические особенности отработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений.

2. Разработана модель оценки экономической эффективности проектных решений формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров с использованием созданной базы данных.

3. Разработанный метод оптимизации формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров может быть использован при корректировке норм технологического проектирования в проектных организациях и при планировании развития горных работ техническими отделами горнодобывающих предприятий, что подтверждается актом внедрения результатов кандидатской диссертации в дея-

тельность АО «Гипронеруд» при подготовке проектной документации на разработку Длинногорского месторождения от 26.11.2024 г.

Методология и методы исследования. В качестве основных методов исследований использовались цифровое моделирование и метод Монте-Карло; системный анализ при исследовании технико-экономических показателей работы глубоких рудных карьеров; методы математической статистики и теории вероятностей; классические экономические и финансовые теории и методы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров, основанный на сценарном подходе к определению бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде и учитывающий горнотехнические и горно-геологические особенности разработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений, обеспечит повышение эффективности реализации проектных решений в условиях динамики внешних экономических условий.

2. Оптимизация бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде на основе разработанной математической прогнозной модели, содержащей концепции марковских цепей и метода Монте-Карло, позволит повысить экономическую эффективность разработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений глубокими карьерами.

3. Определение границ карьера следует проводить с учетом динамики базы данных по прогнозным и фактическим бортовым содержаниям полезных компонентов в добываемой руде с целью перманентной корректировки математической прогнозной модели развития рабочей зоны, что обеспечит повышение экономической эффективности и достоверности проектных решений.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается корректным применением фундаментальных положений теории и практики открытых горных работ; обобщением опыта строительства и эксплуатации глубоких рудных карьеров, представительным объемом вычислительных экспериментов, проведенных по надежно апробированным методикам; внедрением организационно-технических решений и рекомендаций в проектирование и планирование горных работ на карьерах, обрабатывающих рудные

месторождения; использованием информации о развитии рынков минерального сырья; математического моделирования.

Апробация результатов проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: XII Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого-взгляд в будущее» (2-3 ноября 2022 г., г.Тула); XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (7-10 февраля 2023 г., г. Екатеринбург); XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (7-10 февраля 2023 г., г. Екатеринбург); XIX Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (10-14 февраля 2025 г., г. Екатеринбург).

Личный вклад автора заключается в разработке и обосновании метода формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде; установлении степени влияния различных факторов на чистый дисконтированный доход и бортовое содержание при принятии решения об изменении границ глубоких рудных карьеров в зависимости от коэффициента эластичности; обосновании методики определения геометрической конфигурации рабочей зоны при проектировании карьеров с учетом горнотехнических особенностей разработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений; подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 4 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включа-

ющего 106 наименований, списка иллюстративного материала и 3 приложений. Диссертация изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка и 11 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю - д.т.н., профессору С.И. Фомину, коллективу кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за помощь, поддержку и ценные советы, повлиявшие на выполнение научного исследования и написание диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор существующих методов определения границ глубоких рудных карьеров по разработке крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений, средств программного обеспечения для оптимизации границ карьеров, их преимущества и недостатки. Произведен обзор методов определения и оптимизации бортового содержания. В выводах подтверждена актуальность темы исследования.

Во второй главе представлено обоснование метода формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде. Приведено общее описание метода, выявлен закон распределения содержаний меди в блочной модели, описан подход к прогнозированию цен на рынке минерального сырья.

В третьей главе обоснован ситуативно-адаптивный метод формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров. Доказана необходимость включения коэффициента вскрыши в расчет бортового содержания. По результатам анализа чувствительности выявлены факторы, в наибольшей степени влияющие на чистый дисконтированный доход и бортовое содержание.

В четвертой главе отражены результаты применения предлагаемых методов формирования рабочей зоны глубоких

рудных карьеров эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде для горно-геологических и горнотехнических условий разработки полиметаллического мед-норудного месторождения.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Метод формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров, основанный на сценарном подходе к определению бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде и учитывающий горнотехнические и горно-геологические особенности разработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений, обеспечит повышение эффективности реализации проектных решений в условиях динамики внешних экономических условий.

Метод представляется как система, характеризующаяся некоторыми состояниями и условиями перехода от одного состояния к другому (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема реализации метода формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров

Конечным результатом реализации состояния S-1 является обоснованная целевая функция распределения содержаний в руде (рисунок 2).

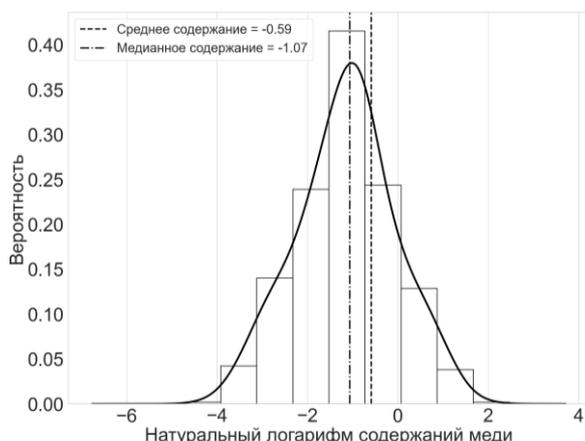


Рисунок 2 – Гистограмма распределения логарифмов содержаний меди в блочной модели

Выявлен закон распределения содержаний полезных компонентов в добываемой руде с целью определения диапазона вероятных значений содержаний до проведения эксплуатационной доразведки месторождения. Закон распределения содержаний меди в блочной модели соответствует следующей зависимости (формула 1):

$$f(\text{Grade}) = \frac{e^{-\left(\frac{\text{LnGrade} + 0,59}{1,15}\right)^2}}{\text{Grade} \cdot 1,07 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi}, \quad (1)$$

где Grade – содержание полезного компонента, %;

LnGrade – логарифм содержания полезного компонента.

Конечным результатом состояния S-2 является выявленный прогнозный диапазон цен на рынке минерального сырья для пессимистичного и оптимистичного сценариев. Предлагается использовать метод Хольта-Винтерса для решения задачи прогнозирования (рисунок 3).

Конечным результатом состояния S-3 является распределение бортовых содержаний (БС) для различных сценариев развития событий в будущем (рисунок 4).

Конечным результатом состояния S-4 является определение максимальных и минимальных границ для пессимистичного и оптимистичного сценариев. В рамках этих границ производится определение оптимальной формы рабочей зоны глубоких рудных карьеров в зависимости от ситуации на рынке минерального сырья и от геологических данных. Состояние S-4 содержит в себе логику, отображенную на рисунке 5.

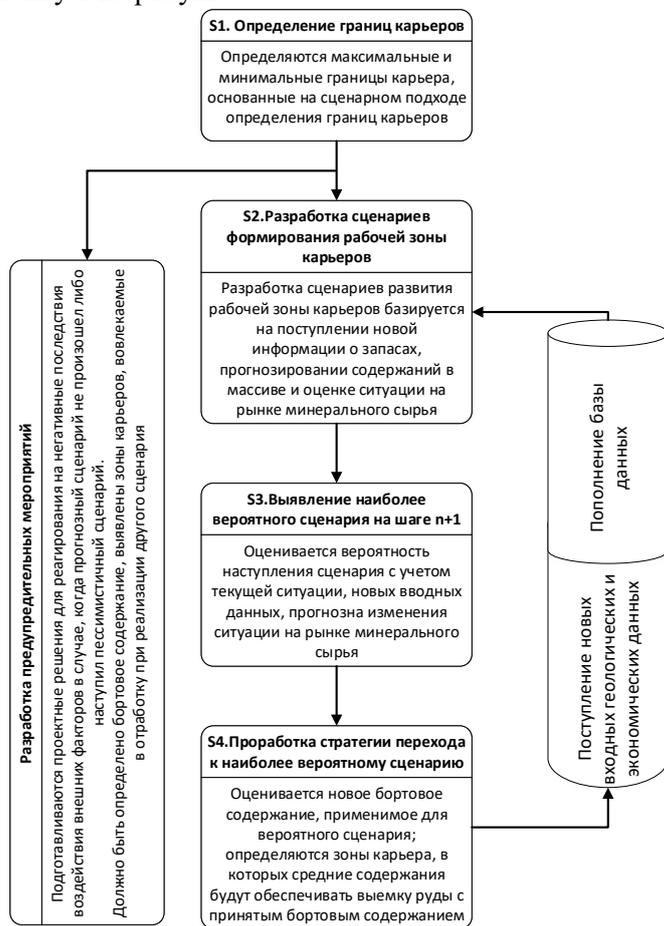


Рисунок 5 – Диаграмма состояний метода формирования рабочей зоны карьеров путем управления БС

Характеристики оптимистичного сценария: ЧДД стремится к максимальным значениям, БС стремится к нулю, границы карьера расширяются до максимума – отрабатываются все запасы руды месторождения, оконтуренные максимальными конечными границами карьера.

Характеристики пессимистичного сценария: ЧДД стремится к нулевому значению, БС достигает максимума, границы карьера сужаются до отработки той части рудного тела, где содержания выше либо равны БС.

На рисунке 5 представлен сценарный подход к формированию рабочей зоны глубоких рудных карьеров. Набор сценариев разрабатывается, ранжируется по вероятностям. Сценарий с наибольшей вероятностью наступления события оценивается с точки зрения влияния на экономические показатели работы карьера. Состояние S-4 предполагает разработку комплекса организационных и технологических мероприятий для перехода системы-карьер к реализации наиболее вероятного сценария.

2. Оптимизация бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде на основе разработанной математической прогнозной модели, содержащей концепции марковских цепей и метода Монте-Карло, позволит повысить экономическую эффективность разработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений глубокими карьерами.

Бортовое содержание полезных компонентов в руде изменяется во времени отработки месторождения. Оптимальная стратегия изменения во времени БС определяется обоснованной последовательностью добычи запасов руды. Оценка извлекаемого блока с содержанием полезного компонента ниже безубыточного граничного не должна учитывать затраты на добычу, поэтому БС в руде для них может быть меньше, чем основное.

Для реализации предлагаемого метода формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров возможно использование концепции цепей Маркова, теории конечных автоматов и метода Монте-Карло для описания и моделирования вероятных сценариев реализации проектных решений.

Метод Монте-Карло позволяет моделировать множество различных вероятных сценариев реализации проектных решений. Цепи Маркова позволяют проводить оценку вероятности реализации сценариев и разработки стратегии перехода между сценариями. Марковские цепи применимы в случае анализа сценариев развития рабочей зоны карьеров при изменениях БС в добываемой руде, так как последующее состояние зависит только от предыдущего звена цепи.

Конечный результат оптимизации БС полезных компонентов – плотность распределения вероятностей достижения максимума ЧДД (рисунок 6).

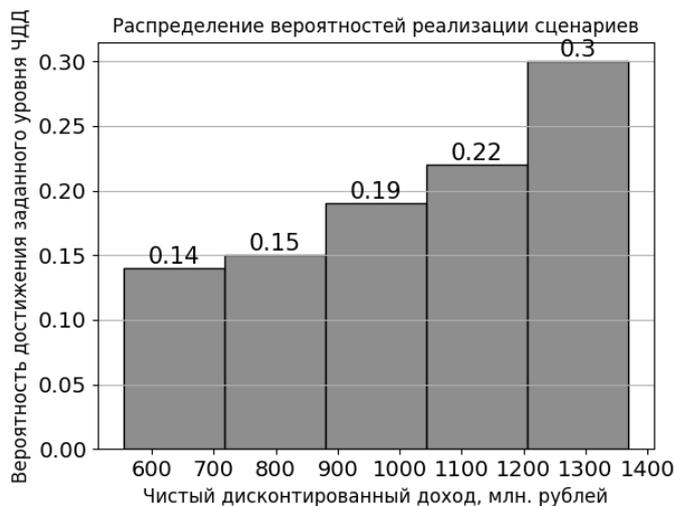


Рисунок 6 – Плотность распределения вероятностей достижения заданного уровня ЧДД

При прогнозной цене на минеральное сырье 186 тыс. руб./т, полученной в ходе анализа цен на рынке минерального сырья, и соответствующим значением БС 0,6%, ЧДД составляет 1256 млн. руб. На рисунке 5 подтверждается, что принятое ЧДД находится в диапазоне наиболее вероятных значений. Для заданных технико-экономических и геологических условий принятое БС является оптимальным.

Для повышения вероятности достижения заданных технико-экономических показателей при принятии решения об изменении БС используется марковская цепь оценки вероятности изменения тренда цен на рынке минерального сырья на основе статического распределения вероятностей, определенного с помощью метода Хольта-Винтерса (рисунок 7).

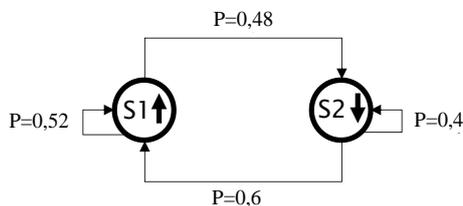


Рисунок 7 – Марковская цепь оценки вероятности изменения ценового тренда на рынке минерального сырья

Анализ данного распределения доказывает, что прогнозная цена на 2025 год является наиболее вероятной. Таким образом, принятое БС соответствует критериям оптимальности и обеспечивает повышение вероятности достижения требуемых технико-экономических показателей работы системы-карьер при изменении формы рабочей зоны.

3. Определение границ карьера следует проводить с учетом динамики базы данных по прогнозным и фактическим бортовым содержаниям полезных компонентов в добываемой руде с целью перманентной корректировки математической прогнозной модели развития рабочей зоны, что обеспечит повышение экономической эффективности и достоверности проектных решений.

Анализ чувствительности – это метод математического моделирования, заключающийся в поочередном изменении параметров при расчете технико-экономического показателя с целью выявления факторов, имеющих наибольшее влияние на конечный результат. Для этого используется показатель эластичности, отражающий процентное изменение расчетного показателя при изменении параметра расчета. Анализ чувствительности проводится на основе базы данных, сгенерированной путем изменения каждого из параметров расчета на одинаковую величину.

Определение факторов, в наибольшей степени влияющих на БС и ЧДД, позволяет в ходе проектирования карьера смоделировать различные сценарии методом Монте-Карло, определить пессимистичный и оптимистичный результат реализации проекта.

Анализ чувствительности БС полезного компонента в руде при разделении горной массы между рудой и вскрышной породой производится с использованием следующей зависимости (формула 2):

$$\alpha_p = \frac{[(Z_d + Z_{пр} + Z_{кр}) + K_B \cdot (Z_B + Z_{по} + Z_{ко})]}{[\varepsilon \cdot (\Pi - R)]}, \quad (2)$$

где Z_d – текущие удельные эксплуатационные затраты на добычу, руб./т;

$Z_{пр}$ – текущие удельные эксплуатационные затраты на переработку руды, руб./т;

$Z_{кр}$ – косвенные удельные затраты на добычу и переработку руды, руб./т;

K_B – эксплуатационный коэффициент вскрыши, т/т;

Z_B – текущие удельные эксплуатационные затраты на вскрышу, руб./т;

$Z_{по}$ – текущие удельные эксплуатационные затраты на переработку породы, руб./т;

$Z_{ко}$ – косвенные удельные затраты на удаление и переработку породы, руб./т;

ε – извлечение полезного компонента из руды, %;

Π – цена конечного продукта на рынке минерального сырья, руб./т;

R – удельные затраты на маркетинг, руб./т;

Анализ чувствительности ЧДД производится с использованием следующей зависимости (формула 3):

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T A_p \cdot (\Pi - \alpha_p \cdot \varepsilon (\Pi - R)) \frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T_u} K \cdot (1+E)^t, \quad (3)$$

где A_p – производственная мощность карьера, млн. т/год;

α_p – бортовое содержание, %;

E – ставка дисконтирования, %;

K – начальные капиталовложения, млн. руб.;

t – шаг расчета, принимаемый равным одному году работы карьера;

t_i – шаг расчета, принимаемый равным одному году реализации инвестиций в проект.

Конечным результатом является определение коэффициента эластичности параметров (рисунок 8).

Установлено, что на БС в наибольшей степени влияет цена на минеральное сырье и величина эксплуатационного коэффициента вскрыши.

Доказано, что БС имеет высокую степень влияния на ЧДД и должен быть непосредственным объектом оптимизации в течение жизненного цикла системы-карьер и что ошибки при определении БС могут существенно сказаться на технико-экономических результатах реализации проекта.

Для упрощения оптимизации БС и ЧДД при оценке сценариев развития внешних условий реализации проекта целесообразно изменять только те факторы, которые в наибольшей степени влияют на конечный результат. Факторы с низкой степенью влияния могут быть проигнорированы без потери достоверности расчетов.

Полученная база данных с различными сценариями, характеризующимися различным БС, при перманентной корректировке и пополнении позволит выявить наиболее вероятный сценарий и его влияние на экономический эффект, повысить экономическую эффективность и достоверность принимаемых проектных решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации излагаются методы формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде, обеспечивающие повышение экономической эффективности и вероятности реализации принимаемых проектных решений.

Основные научные и практические результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Для своевременного реагирования на изменение внешних экономических или геологических данных необходима разработка методов формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров эффективным управлением бортовым содержанием полезных ком-

понентов с набором сценариев развития событий в будущем, что позволит выявить наиболее вероятный сценарий для различных внешних условий реализации проекта при разработке крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений.

2. Для условий крутопадающего сложноструктурного меднорудного месторождения выявлены вид логнормального закона распределения содержаний полезных компонентов в добываемой руде и установлена целевая функция распределения плотностей вероятности для определения диапазона вероятных значений содержаний до проведения эксплуатационной доразведки месторождения.

3. В рамках анализа рынка меднорудного сырья на 2025 год выявлен диапазон цен, характеризующий границу пессимистичного и оптимистичного сценариев развития внешних условий реализации проекта. Цена на меднорудное сырье для пессимистичного сценария составляет 93 тыс. руб./т, цена для оптимистичного сценария – 178 тыс. руб./т, прогнозная цена на 2025 год составляет 186 тыс. руб./т.

4. Анализ чувствительности ЧДД показал, что цена на конечный продукт, бортовое содержание полезного компонента в руде и производительность карьера в наибольшей степени влияют на конечный результат реализации проекта (коэффициент эластичности составляет 105, 101 и 121 % соответственно). Установлено, что на изменение БС в наибольшей степени влияет коэффициент вскрыши и цена на конечный продукт (коэффициент эластичности составляет 78 и -103 % соответственно). Данные риск-переменные должны быть подвержены перманентному анализу и контролю.

5. Повышение вероятности реализации принимаемых проектных решений по формированию рабочей зоны глубоких рудных карьеров в случае падения или повышения цен на руду достигается за счет полученного стационарного распределения вероятностей изменения ценового тренда. Вероятность перехода тренда из нисходящего в восходящее состояние составляет 0,6, что свидетельствует о вероятном повышении цен на рынке меднорудного сырья.

6. Повышение экономической эффективности проектных решений достигается за счет реализации прогнозного сценария развития рабочей зоны глубокого рудного карьера, который характе-

ризуется величиной бортового содержания, равной 0,6%, и ЧДД, равным 1256 млн. рублей.

Результаты работы могут использоваться при планировании развития горных работ и проектировании глубоких карьеров, разрабатывающих крутопадающие сложноструктурные рудные месторождения. Дальнейшее развитие темы предполагает проведение испытаний представленных методов формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров, разработку и обучение нейронной сети для условий заданного месторождения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Фомин, С.И. Анализ стратегии управления бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде / С.И. Фомин, **А.С. Говоров** // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 6(68). – С. 48-53.

2. Фомин, С.И. Обоснование сценарного подхода к определению границ карьеров с учетом стохастического характера исходных данных / С.И. Фомин, **А.С. Говоров** // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 70-78.

3. Фомин, С.И. Оценка надежности проектных решений при определении параметров и показателей открытой разработки месторождений / С.И. Фомин, А. Лелен, **А.С. Говоров** // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 5(133). – С. 60-66.

4. **Говоров, А.С.** Оценка наиболее значимых факторов для реализации проекта открытой разработки рудных месторождений / **А.С. Говоров**, С.И. Фомин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2025. – № 1. – С. 29-38.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования SCOPUS:

5. Фомин, С.И. Обоснование выбора бортового содержания полезных компонентов в руде при проектировании карьеров / С.И. Фомин, **А.С. Говоров** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 12. – С. 169-182.

6. Фомин, С.И. Стратегия формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде / С.И. Фомин, **А.С. Говоров** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 11. – С. 165-179.

Публикации в прочих изданиях:

7. **Говоров, А.С.** Управление бортовым содержанием полезных компонентов в руде на базе стохастического характера исходных геологических и экономических данных / **А.С. Говоров**, А.К. Лобынцев // 12-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого-взгляд в будущее»: материалы конференции. – 2022. – С. 15-18.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619431 Российская Федерация. Программа для расчета бортового содержания при проектировании границ карьеров. Заявка № 2024616670: заявл. 02.04.2024: опубл. 23.04.2024 / С.И. Фомин, **А.С. Говоров**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 93 МБ.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613073 Российская Федерация. Программа для расчета чувствительности бортового содержания, чистого дисконтированного дохода и показателя эластичности параметров вычислений. Заявка № 2025611514: заявл. 31.01.2025: опубл. 07.02.2025 / С.И. Фомин, **А.С. Говоров**, Д.Д. Секерина; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 90 МБ.

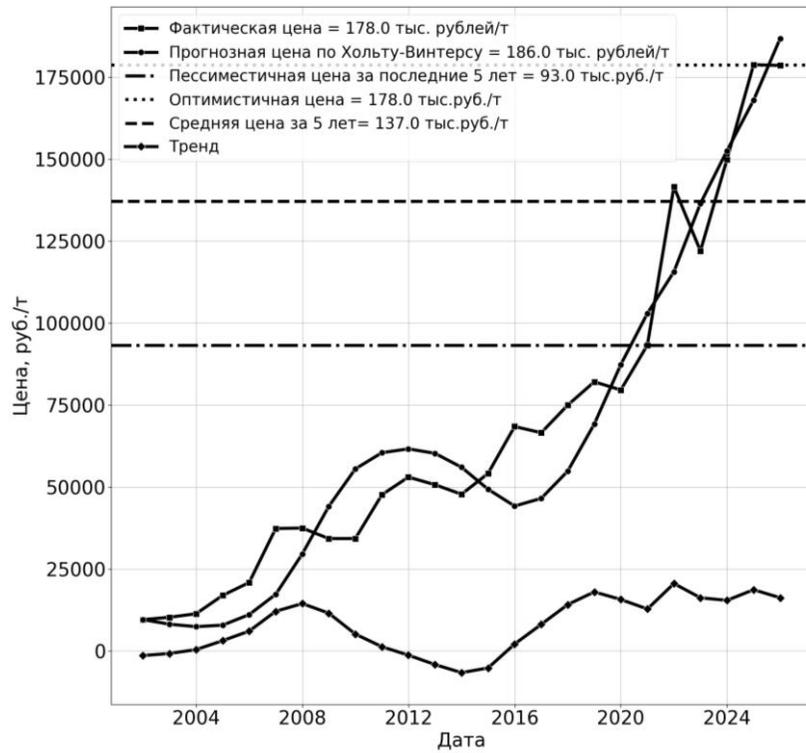


Рисунок 3 – График изменения во времени цен на медь

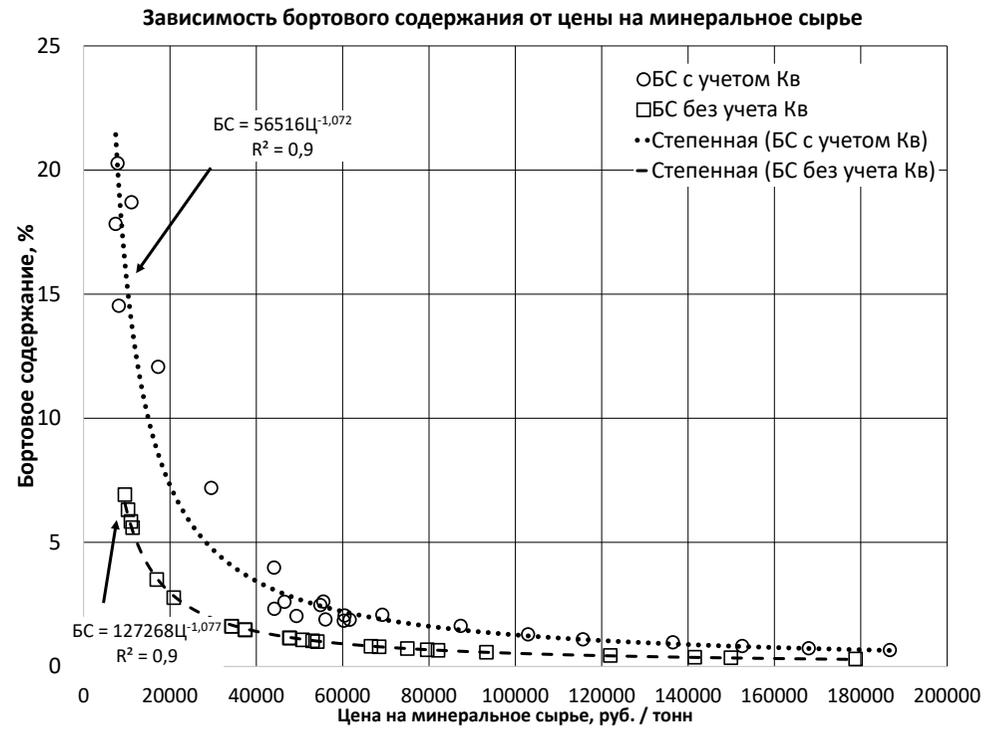


Рисунок 4 – График зависимости бортового содержания (БС) от цены на минеральное сырье (Ц) с учетом и без учета коэффициента вскрыши (Кв)

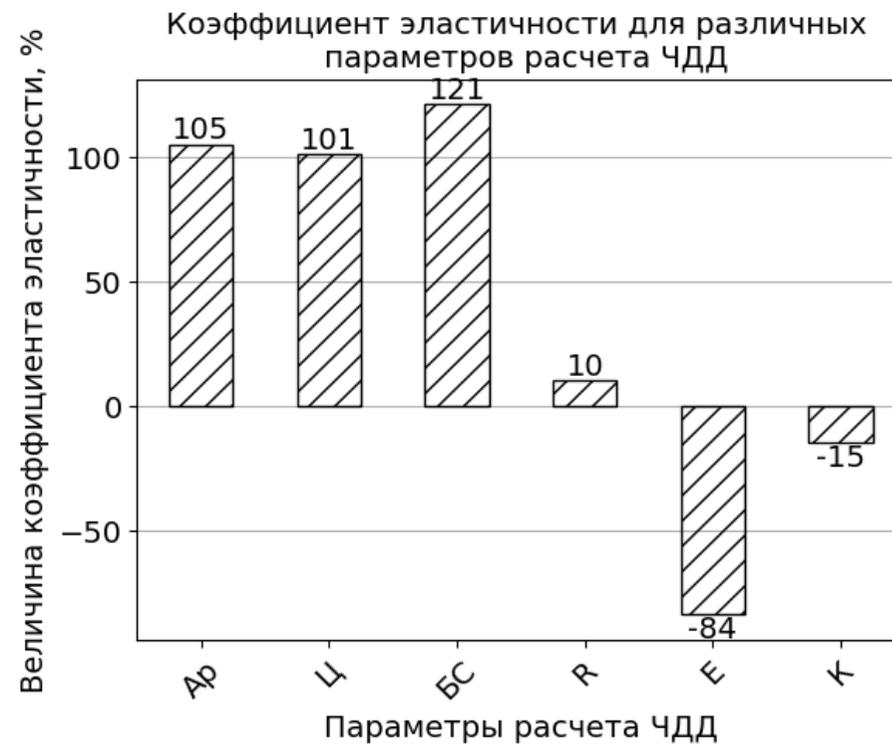
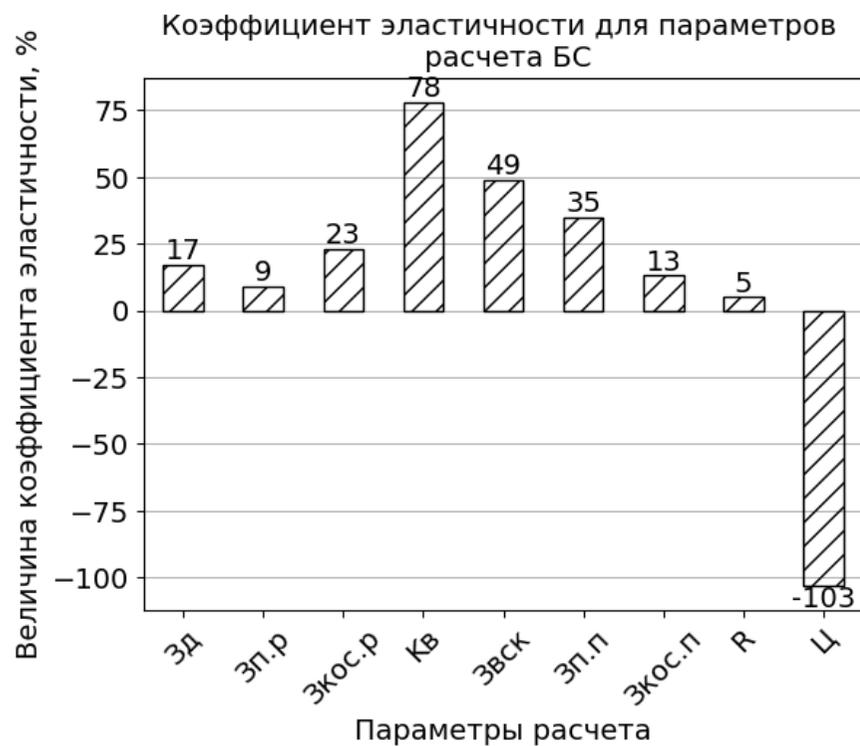


Рисунок 8 – Гистограмма результатов определения коэффициент эластичности для: а) БС, б)ЧДД

З_д – текущие удельные эксплуатационные затраты на добычу, руб./т; З_{вск} – текущие удельные эксплуатационные затраты на вскрышу, руб./т; З_{п.р} – текущие удельные эксплуатационные затраты на переработку руды, руб./т; З_{п.п} – текущие удельные эксплуатационные затраты на переработку породы, руб./т; З_{кос.р} – косвенные удельные затраты на добычу и переработку руды, руб./т; З_{кос.п} – косвенные удельные затраты на удаление и переработку породы, руб./т; К_в – эксплуатационный коэффициент вскрыши, т/т.