

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

*На правах рукописи*

Говоров Алексей Сергеевич



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

Специальность 2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических  
систем

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Фомин С.И.

Санкт-Петербург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....</b>                                     | <b>11</b> |
| 1.1 Анализ современных методов определения контуров карьеров по разработке сложноструктурных рудных месторождений и стратегии управления бортовым содержанием ..... | 11        |
| 1.2 Обоснование развития методов проектирования и средств формирования рабочей зоны рудных карьеров в современных условиях .....                                    | 20        |
| 1.3 Анализ стратегии управления бортовым содержанием при проектировании открытой разработки сложноструктурных рудных месторождений.....                             | 26        |
| 1.4 Выводы по Главе 1 .....   | 29        |
| <b>ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ГЛУБОКИХ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ ЭФФЕКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ БОРТОВЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ В РУДЕ... </b>   | <b>31</b> |
| 2.1 Реализация стратегии определения границ карьеров.....   | 31        |
| 2.2 Анализ базы данных для создания блочной модели и выявление закона распределения содержаний меди в руде.....   | 39        |
| 2.3 Прогнозирование цен на медную руду при проектировании карьеров .....  | 46        |
| 2.4 Выводы по Главе 2 .....   | 49        |
| <b>ГЛАВА 3 ОБОСНОВАНИЕ СИТУАТИВНО-АДАПТИВНОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ГЛУБОКИХ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ</b>   | <b>51</b> |
| 3.1 Обоснование метода определения бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде.....   | 51        |
| 3.2 Оценка факторов, влияющих на принятие проектных решений о границах карьеров с учетом изменения бортового содержания.....  | 59        |
| 3.3 Анализ чувствительности и выявление наиболее значимых факторов при расчете ЧДД и БС.....  | 66        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.4 Оценка надёжности принимаемых организационно-технических и проектных решений.....   | 74         |
| 3.5 Выводы по Главе 3 .....   | 78         |
| <b>ГЛАВА 4 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ НА ПРИМЕРЕ МЕДНОРУДНОГО КАРЬЕРА.....</b>   | <b>80</b>  |
| 4.1 Описание существующих проектных решений по границам карьера.....  | 80         |
| 4.2 Применение метода формирования рабочей зоны карьеров эффективным управлением бортовым содержанием для условий разработки полиметаллического месторождения ..... | 84         |
| 4.3 Оценка эффективности принимаемых проектных решений о границах карьера .....   | 90         |
| 4.4 Выводы по Главе 4 .....   | 91         |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>93</b>  |
| <b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>   | <b>95</b>  |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>  | <b>96</b>  |
| <b>СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА .....</b>   | <b>108</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения .....</b>   | <b>111</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>   | <b>112</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ .....</b>   | <b>113</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

### **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, отрабатывающих 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 деятельность АО «Гипронеруд» при подготовке проектной документации на разработку Длинногорского месторождения от 26.11.2024 г. (Приложение А).

**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:

1. XII Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого-взгляд в будущее» (2-3 ноября 2022 г., г. Тула);

2. XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (7-10 февраля 2023 г., г. Екатеринбург);

3. XXVII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (3-7 апреля 2023 г., г. Томск);

4. 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 (пункты списка литературы № 19, 20, 42, 45-48), 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, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложения Б, В).

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

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## 1.1 Анализ современных методов определения контуров карьеров по разработке сложноструктурных рудных месторождений и стратегии управления бортовым содержанием

Проблемой определения оптимальных границ карьера ученые и горные инженеры начали активно заниматься в прошлом веке. Эпоха индустриализации, появление новых видов техники, различной по мощности и параметрам, в совокупности дало импульс к развитию горной промышленности и методологии проектирования карьеров.

Разработкой методов определения границ отработки месторождений и формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров занимались и занимаются такие отечественные ученые, как М.И. Агошков, Ю.И. Анистратов, А.И. Арсентьев, Н.А. Мацко, С.Е. Гавришев, В.А. Галкин, А.В. Гальянов, П.И. Городецкий, Капустин Н.Г., Ю.Е. Капутин, В.В. Квитка, С.Д. Коробов, С.В. Корнилков, Н.В. Мельников, Н.Н. Мельников, С.П. Решетняк, В.В. Ржевский, К.Н. Трубецкой, С.И. Фомин, Г.А. Холодняков, В.С. Хохряков, О.В. Шпанский, Б.П. Юматов, В.Л. Яковлев и ряда других [1-5, 12, 15-18, 22, 23-24, 25, 26, 27, 30, 31, 35, 36, 40-41, 42-50, 51-52, 53-54, 55, 57, 58].

Методы определения границ карьеров рассматривали зарубежные исследователи: R. Dimitrakopoulos, B. E. Hall, J.A. Krautkraemer, K. Lane, G.J. Mortimer, M. Osanloo, M. Pana, J. Poniewierski, J.M. Rendu, Taylor K, D. Whittle. Разрабатывались как способы определения глубины карьеров, так и алгоритмы определения оптимальных границ карьеров [71, 77, 84, 85-86, 88, 90, 91, 95, 96, 104, 106].

Для понимания истории развития процесса определения границ карьеров и предпосылок к их совершенствованию предлагается рассмотреть в хронологическом порядке работы ученых и инженеров, занимающихся этим направлением с первой половины 20 века.

П.И. Городецкий предложил метод определения границ карьера, использующий нахождение условия максимальной экономичности разработки месторождения. Однако в предложенном методе не учитывались качественные характеристики добываемой руды. В дальнейшем П.И. Городецкий совершенствует свой метод и предлагает метод вариантов, аналитический и графоаналитический способы, учитывающие экономическую эффективность. Благодаря простоте использования предложенных формул этот метод получил широкое распространение в практике проектирования открытых горных работ [31].

Г. Мортимер предложил двухмерный принцип определения бортового содержания полезных компонентов в руде для определения границ карьеров, основанный на двух критериях: среднее содержание полезных компонентов в руде должно обеспечивать горнодобывающей компании минимальный доход, обеспечивающий выживание в условиях рынка минерального сырья; добываемая руда с самым низким содержанием полезных компонентов должна окупать себя за счёт дохода от её реализации. Таким образом, при проектировании границ в контуры карьеров включались только те рудные блоки, которые окупали все затраты на добычу, транспортировку и переработку [87]. В данном случае учитываются все виды эксплуатационных затрат, а для расчета среднего содержания полезных компонентов в рудопотоке используется график зависимости тоннажа от содержания после обоснования такого содержания полезных компонентов в руде, при котором компания получает минимальную прибыль [88].

Итогом работы Г. Мортимера является создание нового двумерного метода определения бортового содержания: определяются два значения бортового содержания, наибольшее выбирается для последующих расчетов и построения предельных контуров карьеров.

Н.Г. Капустин разработал диаграммный метод определения предельной глубины карьера [22]. Суть метода заключалась в построении диаграмм объемов добываемой руды и удаляемой вскрыши с увеличением глубины карьера на поперечных разрезах по месторождению. Обработка диаграмм позволяла

определять границы карьера для рудных тел неправильной формы. Этот метод мог быть использован для проектирования предельных контуров карьеров по разработке сложноструктурных месторождений. Однако отрицательными сторонами данного способа являлись статичность и сложность в изменении стратегии отработки месторождений при изменении внешних факторов.

Б.П. Юматов предлагал способ определения границ карьеров, позволяющий увеличить глубину карьера на 40 %. Суть предлагаемого способа заключалась в построении графиков изменения текущего, среднего и эксплуатационного коэффициентов вскрыши, с последующим определением расчетных затрат, с учетом экономической эффективности капитальных вложений для всех вариантов границ карьера [57].

В.С. Хохряков разработал поэтапный способ определения границ карьера. Главный критериальный показатель для оценки вариантов – сумма приведенной прибыли. Выделяются этапы с различными производственными показателями, для каждого определяется приведенная прибыль. Общая оценка представляет собой сумму приведенных прибылей каждого этапа. В случае, если разница в показателях по вариантам незначительная, то расчет выполняется на основе приведенных затрат [53, 54].

Работы Н.Г. Капустина, Б.П. Юматова, К.Е. Виницкого и К.Н. Трубецкого могут быть использованы для обоснования нового способа определения бортового содержания полезных компонентов в руде с учетом экономических, геологических стохастических исходных данных [14, 41].

В 1965 году был разработан алгоритм Лерча-Гроссмана для решения задачи по оптимизации границ карьеров. Целью применения алгоритма являлось нахождение оптимального графа, с помощью которого определялись оптимальные границы открытой разработки месторождений [29, 61, 81, 82].

В это же время была опубликована статья М. Пана [91], где обосновывался метод оптимизации границ карьеров на основе алгоритма плавающего конуса. Для каждого рудного блока модели создается конус, ребра которого параллельны углам откоса борта карьера. Для каждого конуса производится расчет извлекаемой

ценности путем суммирования ценностей, входящих в него блоков. В случае, если значение извлекаемой ценности для конуса положительно, все блоки включаются в контур разработки, если нет – блоки отсеиваются. Алгоритм повторяет расчеты до тех пор, пока не останутся только отрицательные значения ценности конусов. Стоит отметить, что этот метод не давал точных результатов и впоследствии был усовершенствован.

В работе коллектива авторов Б.П. Юматова, Б.Н. Байкова и В.П. Смирнова приведена классификация сложноструктурных рудных месторождений. В качестве основных групп авторы выделяют следующие виды месторождений по типу оруденения [57]:

- месторождения с гнездовым характером оруденения;
- жильные и линзообразные рудные тела неправильной формы;
- штокверки с неравномерным прожилковкрапленным оруденением;
- пластообразные рудные тела переменной мощности с разными углами падения.

Далее каждый тип месторождения разделяется по типам содержащихся руд и способу их отработки. В работе Б.П. Юматова детально представлены аспекты определения основных параметров и показателей разработки сложноструктурных месторождений и разные подходы к их отработке.

Профессор С.Д. Коробов [26, 29] разработал альтернативный постадийный алгоритм нахождения предельных контуров карьера. На первой стадии определяются параметры конуса с углами равными углам откоса борта карьера, в который входят блоки экономической модели месторождения. Затем производится распределение значений ценностей блоков до тех пор, пока не останутся только отрицательные значения. В случае, если суммарная ценность блоков, включённых в конус положительная, то он относится в группу оптимальных решений. На второй стадии есть два варианта развития событий:

- в первом случае: алгоритм повторяется, и только значение экономической ценности возвращается к блокам, не вошедшим в расчет на первой стадии;

- во втором случае: блок включается в решение, если после первой стадии возвращается пустой конус.

Этот метод позволял принимать более оперативные проектные решения, по сравнению с алгоритмом Лерча-Гроссмана, но он не всегда обеспечивал достаточно точные результаты. В дальнейшем метод был усовершенствован и назван «скорректированным алгоритмом Коробова». Данный метод имеет ограничения и не всегда может быть использован для определения границ карьеров, разрабатывающих сложноструктурные месторождения [29].

В.В. Ржевский в работе «Научные основы проектирования карьеров» проводил анализ существующих на тот момент практик определения границ карьера и отмечал главный их недостаток: не учитывалось влияние фактора времени в эффективности инвестиционных вложений и государственного финансирования. Автор предлагал новый способ определения границ карьеров: сначала находятся границы по поверхности, а затем – его конечная глубина с учетом горнотехнических и геомеханических ограничений [36].

А.И. Арсентьев в своих работах предлагал определять границы карьера по следующему принципу: «конечная глубина проектируемого карьера должна быть такой, чтобы в процессе его эксплуатации сумма первоначального и эксплуатационного коэффициентов вскрыши не превышала граничного коэффициента вскрыши» [3, 4, 5]. Позже он предложил учитывать эффективность капитальных вложений в процессе определения конечных границ карьеров.

Приведенные методы определения границ могут быть использованы при проектировании сложноструктурных полиметаллических месторождений, но в них не учитывается стратегия управления бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде, а также риски неподтверждения геологических исходных данных и возможного кардинального изменения экономических условий реализации проекта [11, 13].

Одной из классических теорий определения бортового содержания является работа К. Лейна «Экономическое обоснование руды» [24, 85]. Математическая модель К. Лейна включала в себя не только геологические и экономические

параметры, но и возможности горнодобывающей компании управления потоками горной массы, руды и конечного продукта. Эту теорию Б. Холл назовет трехмерной теорией определения бортового содержания [77].

В данной работе бортовое содержание представляется как средство достижения максимума (Net Present Value – NPV) проекта. Метод К. Лейна разделяется на две вариации: простой и сложный.

При простом способе оптимизация величины бортового содержания полезного компонента в руде происходит в несколько этапов. Первая итерация включает в себя определения трех значений БС для стадий добычи, переработки и получения готового продукта. Эти значения вычисляются на основе правила безубыточности при условии, что каждая из стадий является сдерживающим фактором. Каждая стадия принимается в качестве «узкого места», а остальные имеют неограниченную пропускную способность.

Следующий этап – это определение сбалансированного бортового содержания, которое рассчитывается исходя из условия, что отношение объема добытой в карьере руды к горной массе будет эквивалентно отношению объемов добытой руды к объему переработанной руды на обогатительной фабрике. Все вычисления производятся на графике зависимости пропорции руды в горной массе от содержания полезных компонентов.

Для других типов пар, как «руда – конечный продукт» и «конечный продукт – горная масса» вычисления проводятся аналогично. Как подчеркивает автор, этот показатель можно использовать в целях краткосрочного и оперативного планирования.

Третьим шагом будет определение оптимального бортового содержания полезного компонента в руде.

Таким образом, оптимальное бортовое содержание полезного компонента в руде вариативно и в разных ситуациях может принимать различные значения [67, 77, 85, 86].

Теория К. Лейна направлена на оптимизацию политики управления бортовым содержанием только для случая отработки однокомпонентных рудных

месторождений. Стоит отметить и недостатки метода: например, сложность в понимании множества математических формул и параметров расчета, которые назначаются по не принятым в горном деле принципам и определениям.

Стоит отметить методику Ж.М. Ренду для определения бортового содержания полезных компонентов в руде. В основу его работы положен принцип К. Лейна, а именно достижение максимального чистого дисконтированного дохода [24, 96]. Однако автор считает, что процесс определения бортового содержания – это итеративный метод, который включает в себя:

- расчет NPV на основе предварительного бортового содержания;
- величина бортового содержания пересчитывается при использовании альтернативных издержек и NPV.

Эти шаги следует повторять до тех пор, пока величина бортового содержания и NPV не достигнет стабильных значений. Кроме того, учитываются ещё экологические, социально-экономические, этические и политические факторы.

Альтернативные издержки в данном случае используется только при наличии ограничений со стороны других производственных процессов.

Когда встает вопрос о том, что делать со вскрытой рудой - оставить в контуре карьера или отправить на переработку, то в таком случае учитывается так называемое внешнее бортовое содержание рудника без учета вскрыши.

В случае, если в горной массе присутствуют вскрышные породы, то добавляется еще и коэффициент вскрыши.

Вышеописанные методы могут эффективно применяться при проектировании открытой разработки однокомпонентных рудных месторождений, однако, как утверждают сами авторы, для многокомпонентных руд их способы оптимизации бортового содержания и стратегии не работают. Также они не учитывают стохастический характер цен на минеральное сырье и высокую степень неопределенности в исходных геологических данных.

Одной из первых публикаций по определению бортового содержания с учетом неопределенности на финансовых рынках была работа Д.А. Крауткраемер. Предложенная автором методика расчета показывала, что оптимальное бортовое

содержание зависит от скорости изменения цен на минеральное сырье относительно нормы дисконта горнодобывающей компании. Недостатком данного метода считается невозможность его применения при проектировании открытой разработки сложноструктурных многокомпонентных месторождений [84].

При проектировании карьеров и планировании развития рабочей зоны необходимо разработать рациональную стратегию управления бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде. Согласно Тэйлору [104], «бортовое содержание – cut-off grade (борт) – это определенное содержание полезного компонента в руде, которое используется для разделения каких-то двух стратегий использования данного сорта руды». Причина использования борта чаще всего связана с экономическими характеристиками проекта.

В ряде работ Ю.Е. Капутин отмечал, что термин «бортовое содержание» обычно используется только для проб, по которым производится разделение руды и вскрышной породы в процессе оконтуривания месторождения. Для разделения рудопотоков чаще применяется термин «минимальное промышленное содержание» [23, 24].

Автор предлагает считать, что борт – это граничное содержание в рудопотоке, которое используется для того, чтобы определить место назначения объёмов извлекаемой горной массы. Предлагается рассматривать различные борта, каждый из которых связан с определенным рудопотоком или методом оценки запасов руды в недрах. Для любого блока, который будет добыт, необходима компенсация затрат за его добычу, переработку и маркетинг. Содержание в руде, которое может возместить все эти затраты (без учета вскрыши), является безубыточным горным бортом - breakeven cut-off grade. Второй тип борта (внутренний борт - internal cut-off grade) может использоваться для блоков, содержание в которых ниже безубыточного горного борта, и которые не были бы добыты с учетом их собственной ценности. Эти блоки в любом случае будут извлечены как порода для получения доступа к более глубоким рудным горизонтам. Затраты на добычу этих блоков оплачиваются за счёт извлекаемой ценности более глубоко залегающих блоков руды [23, 24].

Вычисление борта зависит от времени принятия решения в течение эксплуатации карьера [23, 24].

Динамические кондиции (ДК) до сих пор не нашли широкого применения в методологии проектирования, так как не доказана эффективность их использования для целей государства на уровне сырьевой базы. В ряде работ показана эффективность применения ДК на примере разработки отдельных месторождений [12].

В работе И.В. Эпштейна, посвященной оценке инвестиционного проекта разработки золоторудного месторождения «Полиметалл», показан ущерб от невозможности своевременного изменения бортового содержания БС. Автором доказано, что почти всегда за самое низкое БС принимаются «геологические границы», а самое большое БС сокращает запасы руды немногим более чем на треть (по правилу 10-процентного минимума тоннажа между вариантами). В результате оптимальный вариант БС оказывается вне рассмотрения, что подтверждается практикой ТЭО кондиций, когда в рассмотренных вариантах максимум чистого дисконтированного дохода (ЧДД) не достигается [56].

Постоянное бортовое содержание является оптимальным для конкретного временного интервала, для статических экономических условий. Колебания цен, затрат в рыночных условиях приводят к тому, что разработка месторождения по дискретному значению БС не обеспечивает отработку запасов по оптимальным контурам и не способствует рациональному использованию недр [12, 60].

При изменении цен на рынке минерального сырья или других экономических параметров БС необходимо пересматривать, корректировать проектные решения по оконтуриванию и пересчету запасов руды. Для решения данной проблемы «Методическими рекомендациями по составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по технико-экономическим обоснованиям кондиций для подсчета запасов месторождений полезных ископаемых» (Утверждено Минприроды России 05.06.2007) предлагается использование наряду с постоянными эксплуатационными кондициями динамических кондиций. ТЭО эксплуатационных кондиций

разрабатывается на ограниченный срок (не более 3-5 лет) и распространяется на запасы, намеченные к отработке в этот период. Действие эксплуатационных кондиций может продлеваться на следующий срок при согласовании с ГКЗ в отношении определенного участка недр [12, 22, 23, 56].

Существует проблема в понимании смысла бортового содержания полезного компонента в руде и его роли в проектировании карьеров по разработке сложноструктурных рудных месторождений.

Как правило, БС принимается в качестве исходных данных, принятых как дискретная величина. Однако, учитывая значимость параметра, следует обосновывать принимаемое рациональное значение БС и управлять им не только в плане стратегии отработки месторождения, но и в тактических целях – это выведет процесс проектирования и планирования развития горных работ на другой уровень. При этом будут соблюдаться интересы как государства, так и горнодобывающей компании. К этому выводу специалисты пришли еще в начале 21 века.

Несмотря на то, что существуют различные способы и методики управления стратегией оптимизации бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде, которые учитывают горно-геологические и горнотехнические условия открытой разработки месторождений, многие из них не рассматривают результат в контексте динамики внешних условий реализации проекта и фактора времени.

## **1.2 Обоснование развития методов проектирования и средств формирования рабочей зоны рудных карьеров в современных условиях**

С развитием компьютерных технологий стали создаваться различные программные продукты, позволяющие оперативно решать сложные оптимизационные задачи. В таком программном обеспечении (ПО) бортовое содержание полезных компонентов в руде используется как исходный параметр.

В настоящее время большое распространение в практике определения границ карьера приобрел алгоритм Лерча-Гроссмана, адаптированный под современные ПО. Этот алгоритм используется в программах NPV Scheduler, в оптимизационном модуле Micromine и Gemcom Whittle [87, 92, 99-101, 106].

В качестве исходных выступают геометрические, геологические и экономические данные. В программных продуктах применяется ограничение: обрабатываются только подготовленные к выемке блоки, то есть блок С можно обработать после выемки блоков А и В (рисунок 1.1).

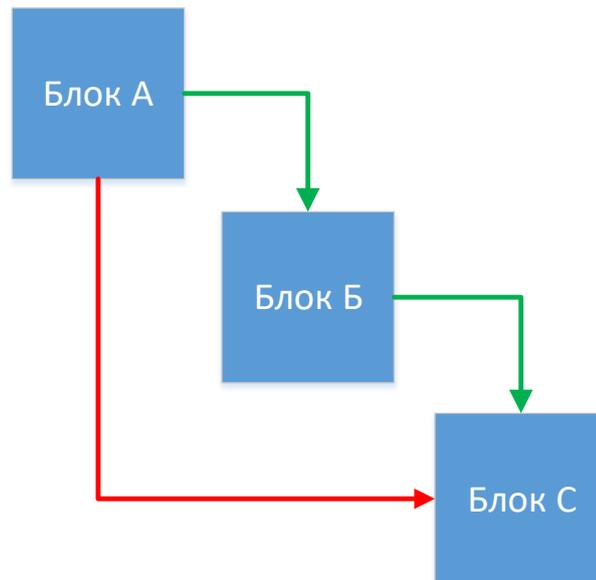


Рисунок 1.1 – Схема последовательности выемки рудных блоков  
(составлено автором)

Представленная на рисунке 1.1 связь в математической модели называется аркой, а узлом выступает центр блока.

Каждый блок имеет экономическую извлекаемую ценность (1.1):

$$Ц = Д - Р, \quad (1.1)$$

где  $Ц$  – извлекаемая ценность добытого блока руды;

$Д$  – доходы от реализации продукции;

$Р$  – эксплуатационные расходы на добычу, переработку, продажу и маркетинг продукции.

Процесс оптимизации проходит по следующему алгоритму:

1. Формируются возможные арочные связи и суммируются их ценности.
2. В случае, если блок помечен, то он принимается к обработке, делается соответствующая графическая метка.
3. Когда непомяченных блоков не остается, оптимизация завершается.
4. Ветки с отрицательной извлекаемой ценностью исключаются из рассмотрения и не идут в обработку.

Последовательность шагов представлена на рисунке 1.2.

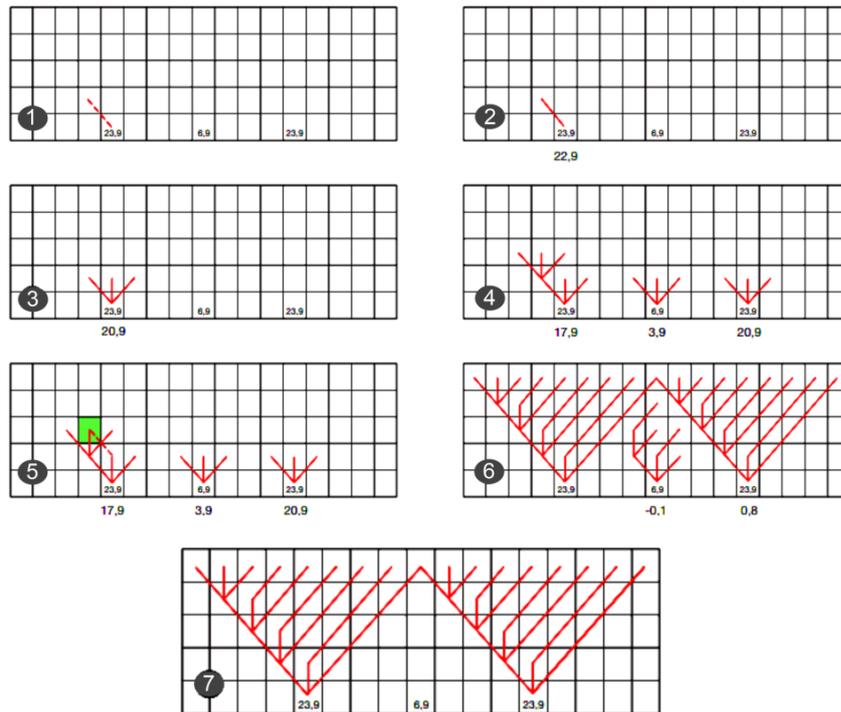


Рисунок 1.2 - Последовательность расчетов при оптимизации границ карьеров алгоритмом Лерча-Гроссмана (Стагурова, 2010) [37]

Несмотря на распространенность алгоритма Лерча-Гроссмана, в проектной практике, применение этого способа не дает достаточно точных результатов. Результатом оптимизации является экономически целесообразный «конус», без соответствующих горных выработок. В ходе проектирования способа вскрытия, места заложения системы траншей, границы карьеров разносятся, увеличиваются объёмы удаляемых вскрышных пород, что снижает экономические показатели оптимизированной оболочки [29, 62, 88].

Главным недостатком метода считается сложность программирования и длительность вычислений.

Более оперативный алгоритм – это использование псевдопотока для определения предельных контуров карьера. Это решение реализовано в ПО Deswik Pseudoflow Pit Optimization [82, 89, 95, 97,], основанном на теории графов, но с некоторыми модификациями. Помимо основных узлов и арок добавляются:

- источник потока (source node) и конечная точка схождения потока (sink node);
- арки от источника до положительных (рудных) блоков;



В работе Б. Холла обосновывается подход к оптимизации стратегии управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде. Суть метода заключается в нахождении оптимальных стратегий определения бортового содержания, которые будут учитывать диапазоны значений стохастических параметров. Автор предлагает учитывать риски и допущения, которые появляются при принятии решений о различных стратегиях управления бортовым содержанием [24, 77]. В работе автор описывает множество аспектов при оптимизации значений бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде:

- входные параметры для оптимизации;
- способы определения приемлемого параметра для описания извлекаемых ценностей блоков;
- критерии эффективности реализации проектов.

В работе Ю.Е. Капутина описана отечественная практика определения бортового содержания полезных компонентов в руде. В российской проектной практике бортовое содержание – это минимальное содержание в краевой пробе. Также принято определять минимальное промышленное содержание – содержание в крупном блоке, который характеризуется совокупностью проб [23, 24].

Минимальное промышленное содержание отвечает соотношению, которое приемлемо для безубыточного бортового содержания (1.2):

$$C_u = Z_n \quad (1.2)$$

Где  $C_u$  – извлекаемая ценность полезного компонента в блоке;

$Z_n$  – предстоящие затраты на добычу и переработку заключенного в блоке минерального сырья.

Минимально промышленное содержание полезного компонента (1.3):

$$C_{min} = \frac{Z_n}{C \cdot K_p \cdot K_u}, \quad (1.3)$$

где  $Z_n$  – предстоящие затраты на получение единицы готовой продукции;

$C$  – цена реализации продукции;

$K_p$  – коэффициент разубоживания;

$K_u$  – коэффициент извлечения при переработке.

Формула (1.3) не применима к определению бортового содержания, так как величина предстоящих затрат зависит от производительности карьера. Производительность карьера определяется исходя из запасов месторождения, а запасы для разработки зависят от величины бортового содержания полезных компонентов.

Таким образом, бортовое содержание в отечественной проектной практике определяется методом вариантов, то есть месторождение оконтуривается по нескольким значениям бортового содержания, и затем по каждому варианту просчитываются основные технико-экономические показатели карьера. Рациональный вариант выбирается по оптимальным значениям после проведённых расчетов.

Автор отмечает, что в отечественной практике на стадиях проектирования устанавливаются статичные величины бортового содержания полезных компонентов в руде. При изменении экономических или геологических условий бортовое содержание пересматривается только для запасов руды в обоснованном контуре. Для остальных запасов бортовое содержание остается прежним, а недропользователь обязан сохранить в целости эти запасы и в дальнейшем либо опять проходить процедуру пересмотра бортового содержания, либо работать с прежним.

Также следует отметить, что в первую очередь при разработке месторождения полезных ископаемых открытым способом учитываются интересы государства, как собственника недр, а не горнодобывающей компании. Это создает менее благоприятные условия для разработки месторождения и получения максимальной эффективности и полноты отработки запасов в условиях рыночной экономической модели [23, 24].

Стратегия управления бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде – это одна из главных целей проектирования. На основе неё можно формировать более гибкие горнотехнические системы, на которые не оказывают значительное влияние изменения внешних факторов реализации

проекта в условиях стохастического характера исходных геологических и экономических данных.

### **1.3 Анализ стратегии управления бортовым содержанием при проектировании открытой разработки сложноструктурных рудных месторождений**

Определение оптимальной стратегии управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде – это одна из первоочередных задач проектирования карьеров, решение которой обеспечивает создание более гибкой и устойчивой к внешним факторам горнотехнической системы-карьер, позволяющей отрабатывать месторождение в условиях неопределенности исходных данных и изменения внешних факторов реализации проекта.

Как показал анализ методов определения границ карьеров, бортовое содержание – это экономический параметр, определяемый на базе стохастических экономических исходных данных.

Однако в таком случае не учитываются технологические параметры, что при проектировании границ карьеров по разработке сложноструктурных рудных месторождений приводит к некорректным результатам. После проектирования способа вскрытия объемы «конуса» и объемы запасов руды в границах спроектированного карьера сильно отличаются, что приводит к значительному ухудшению экономических показателей реализации проекта отработки месторождения [6, 7].

Для определения бортового содержания полезных компонентов в руде необходимо учитывать технологические параметры, а именно – коэффициент вскрыши. С учетом коэффициента вскрыши можно выстроить такую систему управления бортовым содержанием, при которой система-карьер не будет подвержена значительному изменению после учёта стохастических исходных данных: цены на сырье, геологическое строение месторождения или запасы руды [23, 24].

Процедура организации формирования рабочей зоны рудных карьеров может быть разделена на три стадии. Первоначально определяется порядок извлечения

запасов или последовательность добычи руды, затем обосновывается стратегия изменения во времени бортового содержания полезных компонентов, которая будет оптимальна для принятого набора параметров горного производства и, наконец, выбирается такая комбинация производительности рудника, обогатительной фабрики (ОФ) и металлургического производства, которая будет оптимальна с точки зрения логистических, финансовых, маркетинговых и других ограничений [8, 10, 12, 23, 24, 27].

В ситуации, когда порода с низким содержанием полезных компонентов в руде должна быть удалена из карьера, чтобы вскрыть руду, может использоваться более низкое БС, чтобы определить, может ли эта низкосортная горная масса быть переработана [23, 24].

Это более низкое БС называется внутренним бортом, который определяется без учета эксплуатационных затрат на горные работы. Оптимальный борт будет обычно иметь более высокий уровень, чем предельный (внутренний) борт и будет уменьшаться во времени, чтобы в конце отработки месторождения стать ему равным. Чем выше уровень организации горного производства, тем меньше будут различия между оптимальным и предельным бортами [23, 24].

Стратегия, используемая в компьютеризированных методах расчёта параметров этапов развития рабочей зоны карьера, должна состоять в том, чтобы использовать более высокие эксплуатационные затраты или низкие цены на продукцию в начальной стадии разработки и затем, для каждой последовательной стадии, понижать эксплуатационные затраты или увеличивать цены на продукцию. Результатом этой стратегии будет то, что начальная стадия разработки месторождения карьером будет иметь большее БС и извлекаемую ценность руды, чем на каждой последующей стадии [23, 24, 28, 64, 65].

Высокое бортовое содержание целесообразно использовать, чтобы увеличить краткосрочную доходность и чистый дисконтированный доход от реализации проекта отработки месторождения, а возможно, и повысить доход акционеров и прочих финансово заинтересованных лиц, включая государственные структуры. Повышение бортового содержания приведет к уменьшению срока

отработки месторождения карьером. Более короткий срок эксплуатации рудника может отразиться на экономических показателях, например, амортизации горнотранспортного оборудования. Сокращение продолжительности эксплуатации карьера приводит к негативным социально-экономическим последствиям, поскольку сокращается количество долгосрочных рабочих мест и снижаются экономические мотивации персонала [23, 24, 44, 49, 70, 72].

При повышении цен на металл бортовое содержание можно, при необходимости, увеличить для улучшения финансово-экономического положения горнодобывающей компании и снижения рисков банкротства при падении цен на металл на рынке минерального сырья. Можно уменьшать бортовое содержание в периоды подъема цен на металл, чтобы увеличить продолжительность отработки месторождения и сохранить имеющееся высококачественное минеральное сырье для поддержания доходности в периоды снижения цен. Бортовое содержание также стимулируется экономическими критериями и требованиями к техническим характеристикам готовой продукции [9, 69, 73-76, 79].

В некоторых случаях целесообразно принимать обоснованное решение, направленное на увеличение производственных мощностей карьера, при этом производительная мощность перерабатывающего комплекса остается постоянной. Таким образом, можно увеличить бортовое содержание, а часть минерального сырья более низкого качества следует складировать для последующей переработки. Складирование добытой руды без вовлечения в переработку, создание резервов минерального сырья имеет ряд последствий – как положительных (например, продление срока эксплуатации перерабатывающих мощностей), так и отрицательных (консервация средств из-за отсутствия реализации готовой продукции, повышение риска негативного воздействия на окружающую среду и снижение объемов металлургического производства).

В процессе проектирования и планирования развития горных работ бортовое содержание полезных компонентов в добываемой руде следует регулярно пересматривать в соответствии с изменяющимися внешними условиями реализации проекта и неопределенности исходных данных.

В таком случае следует прогнозировать несколько вариантов изменения цен на минеральное сырье за время реализации проекта: пессимистичный, оптимистичный, наиболее вероятный. Необходимо при создании стратегии определения бортового содержания учитывать стохастический характер исходной проектной информации, высокую степень неопределенности геологических данных, постоянно обновлять базу данных в ходе проектирования, строительства карьера и эксплуатации. Для каждого прогнозного варианта развития внешних условий реализации проекта разрабатывается стратегия определения бортового содержания, обеспечивающая гибкость проектных решений и их устойчивость при изменении входных параметров и показателей.

Бортовое содержание полезных компонентов в руде изменяется по мере понижения горных работ, а эксплуатационные затраты на добычу возрастают с увеличением глубины карьера.

Таким образом, стратегия управления бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде для формирования рабочей зоны карьеров по разработке сложноструктурных рудных месторождений должна базироваться на прогнозных ценах на минеральное сырье, учитывать коэффициент вскрыши при расчетах и вероятность неподтверждения геологических данных о запасах руды.

#### **1.4 Выводы по Главе 1**

1. Бортовое содержание в отечественной практике проектирования карьеров принимается как входная информация, которая является статичной и изменяется по сложной процедуре, что приводит к созданию негибких систем, подверженных высокому риску при изменении внешних экономических и геологических факторов;

2. Оптимальная стратегия управления бортовым содержанием полезных компонентов в руде должна быть одной из целевых задач при проектировании карьеров с учетом стохастического характера исходных геологических и экономических данных;

3. Стратегия определения бортового содержания должна базироваться на учёте стохастического характера исходных технико-экономических данных.

Необходимо учитывать прогнозные цены, рассматривать несколько вариантов развития событий на рынке минерального сырья, финансовых рынках и для каждого из них разрабатывать стратегию отработки месторождения с учётом консерватизма горнотехнической системы (когда реализация принятых организационно-технических решений происходит с определённой задержкой во времени), а база исходных проектных данных должна постоянно обновляться и корректироваться для создания гибкой горнотехнической системы, устойчивой к изменению внешних факторов.

## **ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ГЛУБОКИХ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ ЭФФЕКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ БОРТОВЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ В РУДЕ**

### **2.1 Реализация стратегии определения границ карьеров**

Одной из важных задач, решаемых при проектировании открытой разработки сложноструктурных рудных месторождений, является определение границ карьеров на основе оптимального бортового содержания полезных компонентов в полезном ископаемом и стратегии его изменения в течение отработки месторождения.

При проектировании горнотехнической системы-карьер необходимо принимать рациональные решения, обеспечивающие высокий уровень адаптивности и гибкости при изменении внешних факторов реализации проекта, например, спроса и цен на рынке минерального сырья.

В рамках представленного исследования рассмотрена стратегия формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием в добываемой руде.

1. Бортовое содержание (БС) – это минимальное содержание полезного компонента в руде, добыча которой позволяет, как минимум, окупить удельные эксплуатационные затраты на добычу 1 т руды. При определении бортового содержания учитываются экономические факторы и технологические показатели отработки месторождения открытым способом [23, 24, 38, 43, 47].

2. Рабочая зона карьера – это часть карьера, в которой в данный период разработки месторождения выполняются основные технологические процессы ведения горных работ: подготовка, выемка, транспортирование горной массы, отвалообразование и складирование [4, 41].

Безубыточное бортовое содержание (ББС) — это содержание полезного компонента в руде, при котором достигается безубыточность деятельности горнодобывающей компании, т.е. эксплуатационные затраты на производство готового продукта равны доходу, получаемому от реализации этого продукта [23, 24, 85, 96].

Многие исследователи полагают, что ББС, как дискретное значение, не является синонимом безубыточности и в принципе не способно обеспечить выполнение намеченных целей горнодобывающей компании. ББС не учитывает напрямую таких важных факторов горного производства, как геологическая характеристика разрабатываемого месторождения, производительность рудника и обогатительной фабрики, последовательность добычи руды, политические и экологические риски [24, 56].

Негативные последствия отработки запасов по неактуальному бортовому содержанию могут иметь место как при отрицательном тренде изменения цен на минеральное сырьё, так и при положительном.

В случае же отрицательного ценового тренда горнодобывающее предприятие будет вынуждено в убыток перерабатывать нерентабельную минерализацию либо оставлять балансовые запасы в недрах.

Как правило, за самое низкое БС принимаются «геологические границы», а принятие самого большого БС сокращает запасы руды месторождения. В этом случае оптимальный вариант БС оказывается вне рассмотрения, что находит отражение во многих технико-экономических обоснований (ТЭО) кондиций, когда в рассмотренных вариантах максимум ЧДД не достигается.

Увеличение бортового содержания может рассматриваться в качестве инструмента для снижения проектного риска путем обеспечения прибыли за меньший период времени. При повышении цен на металл бортовое содержание можно, при необходимости, увеличить для улучшения финансового положения компании и снижения рисков банкротства при падении цен на металл [24, 41, 46].

С другой стороны, можно уменьшать бортовое содержание в периоды роста цен, чтобы продлить срок службы карьера и сохранить высококачественные запасы сырья для обеспечения нормы рентабельности в периоды снижения цен [24, 46, 47]. Бортовое содержание, признанное оптимальным по результатам оценки в ходе проектирования, следует регулярно переоценивать, поскольку изменения текущих и расчетных затрат и цен, а также производительности карьера и

перерабатывающего производства приводит к изменению будущих притоков денежных средств и издержек выбора.

В ходе проектирования горнотехнических систем целесообразно использовать ситуативно-адаптивный метод формирования рабочей зоны карьеров на основе управления бортовым содержанием в добываемой руде [47, 48].

Применение ситуативно-адаптивного метода позволяет обеспечить оперативную адаптацию горнотехнических систем к изменению внешних факторов на основе прогнозирования, разработки сценариев развития ситуации на рынке минерального сырья, оценки вероятности реализации сценариев и стратегии перехода между сценариями» [48].

Для реализации ситуативно-адаптивного метода формирования рабочей зоны карьеров возможно использование концепции цепей Маркова [21], теории конечных автоматов и метода Монте-Карло для описания и моделирования вероятных сценариев реализации проектных решений [21, 32, 47, 48, 76, 80-82].

Теория конечных автоматов реализуется в виде определенных состояний горнотехнической системы-карьер и условий перехода от одного состояния к другому. При применении автоматов Мили система переходит от одного состояния к другому, основываясь на поступающих входных исходных данных и оценке текущего состояния горнотехнической системы [32, 47, 48].

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 бортового содержания в добываемой руде, так как последующее состояние зависит только от предыдущего звена цепи. Бортовое содержание определяется на основе анализа комплекса факторов – геологических, экономических и технологических, зависящих от параметров, которые могут быть спрогнозированы с помощью марковских цепей [47, 48, 93, 97, 98].

Метод представляется как система, характеризующаяся некоторыми состояниями и условиями перехода от одного состояния к другому (рисунок 2.1).

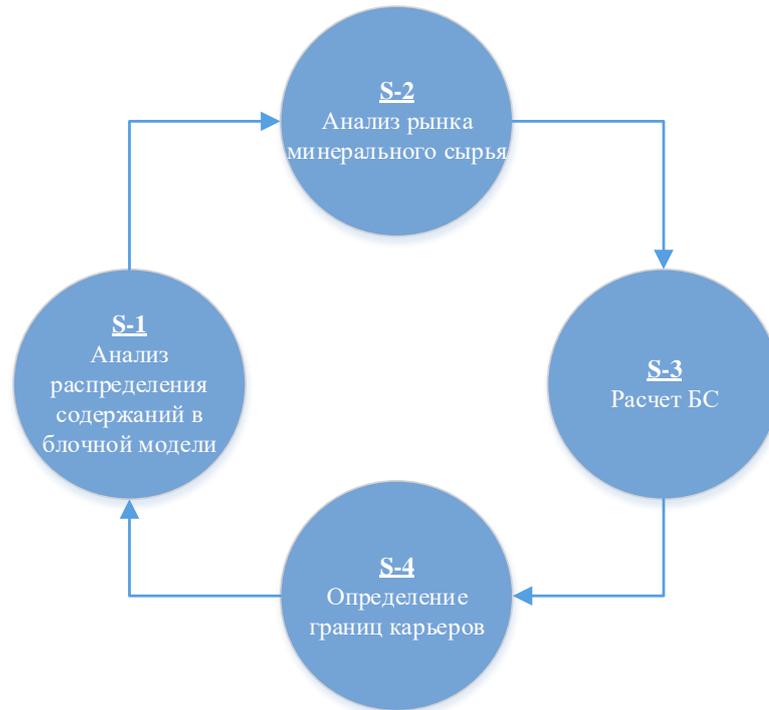


Рисунок 2.1 – Схема реализации стратегии определения границ карьеров  
(составлено автором)

На рисунке 2.1 представлены 4 состояния системы:

S-1 – состояние, в котором происходит анализ геологических данных, а именно – распределения содержания полезного компонента в руде для блочной модели.

Переход к следующему состоянию происходит после получения данных о распределении и диапазона наиболее вероятных значений содержаний полезного компонента в массиве месторождения.

Определение вида закона распределения содержаний в рудных телах позволяет оценить вероятность извлечения руды с определенным содержанием полезного компонента.

S-2 – состояние, при котором анализируется экономическая ситуация на рынке определенного вида минерального сырья. Переход к следующему состоянию происходит после получения информации о трендах развития цен на рынке и прогнозирования возможных минимальных и максимальных цен.

Анализ экономической ситуации необходим для оценки вероятности перехода к пессимистичному или оптимистичному сценарию развития событий при ежегодном колебании цен на рынке минерального сырья.

S-3 – состояние определения БС полезного компонента в руде. Переход к следующему состоянию осуществляется после определения возможных максимальных и минимальных БС.

Бортовое содержание полезных компонентов в добываемой руде напрямую влияет на объемы вовлеченных в разработку рудных тел и, как следствие, на пространственную конфигурацию рабочей зоны глубоких рудных карьеров [42].

S-4 – состояние, позволяющее проводить оптимизацию границ карьеров. Результатом оптимизации являются два вида границ: максимально и минимально возможные. Переход к первому состоянию осуществляется через один год или с учётом изменения геологических или экономических исходных данных. Детальное представление данного состояния раскрывается на рисунке 2.2.

После определения вариантов максимальных и минимальных границ карьеров осуществляется переход к состоянию S-2.

Состояние S-2 характеризуется выявлением возможных сценариев реализации проектных решений, характеризующихся параметрами рабочей зоны карьера на различных этапах отработки месторождения.

Результатом реализации состояния S-2 является распределение различных сценариев, сгенерированных методом Монте-Карло. Полученный набор сценариев является условием перехода к состоянию S-3 и входным параметром для выявления сценариев с наибольшей вероятностью реализации согласно текущей ситуации на рынке минерального сырья и геологической изученности месторождения.

Состояние S-4 внутри себя содержит следующую логику (рисунок 2.2):

1. Методом Монте-Карло генерируется набор сценариев, характеризующихся параметрами:

1.1. Цена на рынке минерального сырья.

1.2. Бортовое содержание полезного компонента в руде.

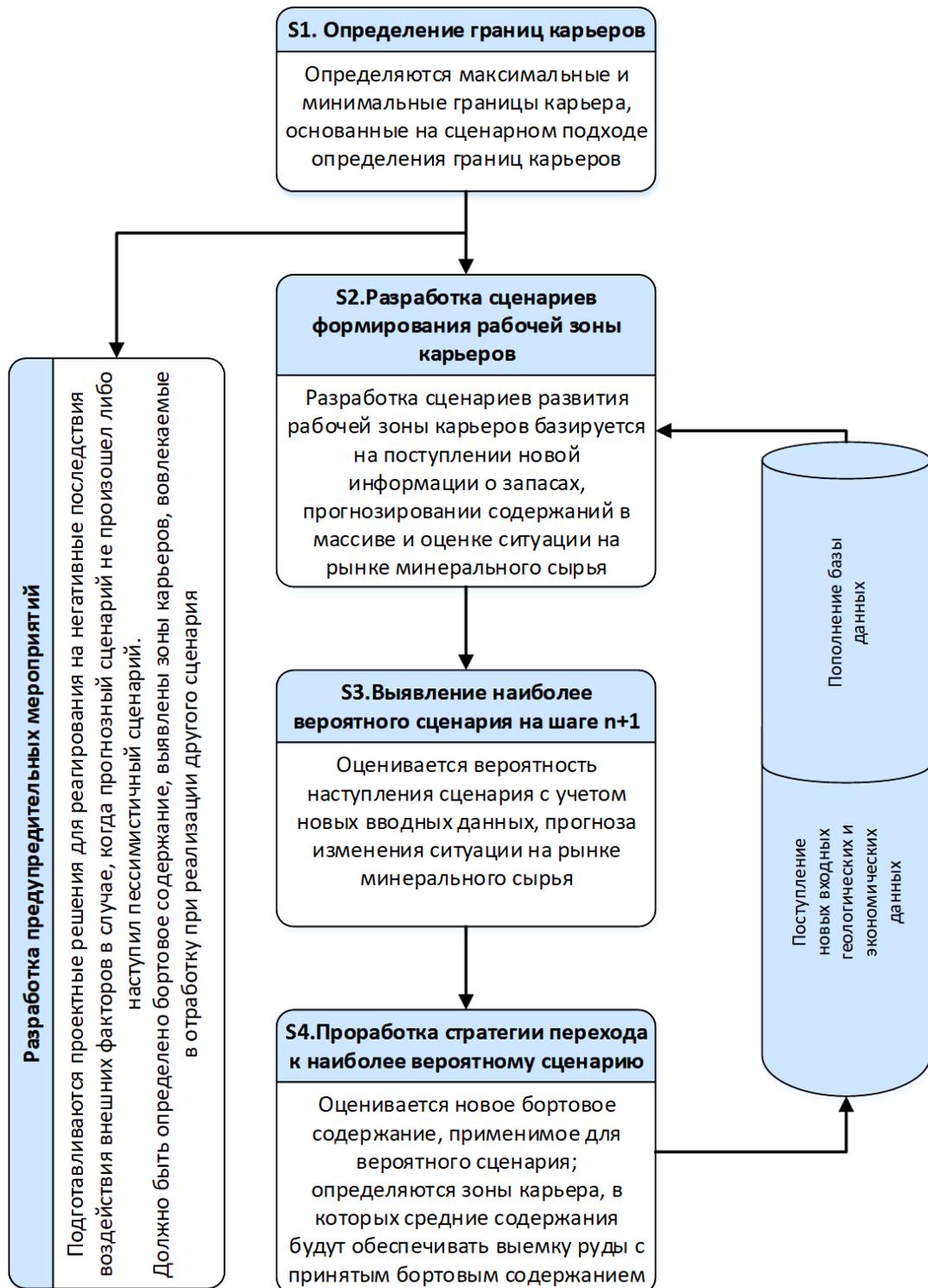


Рисунок 2.2 – Диаграмма состояний метода формирования рабочей зоны карьеров путем управления бортовым содержанием (составлено автором)

2. С помощью модели марковских цепей создается прогноз на следующий период реализации проектных решений (рациональный период принимается равным одному году):

2.1. Наиболее вероятный сценарий.

2.2. Сценарий менее вероятный, необходимый для снижения негативных последствий, если наиболее вероятный сценарий не реализуется.

3. Решается задача классификации сценариев на пессимистичный и оптимистичный. Пограничные сценарии будут являться точками перехода между пессимистичным и оптимистичными вариантами будущего состояния.

4. Сценарии заносятся в базу данных для перманентной оптимизации прогнозной модели.

5. Оценивается надежность проектных решений как вероятность достижения установленных показателей отработки месторождения на основе прогнозных и фактических данных:

5.1. В случае, если показатель надежности не удовлетворяет установленным требованиям, то реализуется оптимизация модели.

5.2. Параметр надежности удовлетворяет установленным требованиям – прогнозная модель производит вычисления на следующий год без дополнительной оптимизации.

6. Ежегодный повтор вычислений по пп. 1 – 5 [47, 48].

Представленный набор сценариев ранжируется по вероятностям. Сценарий с наибольшей вероятностью наступления события оценивается с точки зрения влияния на экономические показатели работы карьера. Сценарий может быть оптимистичным или пессимистичным (рисунок 2.3).

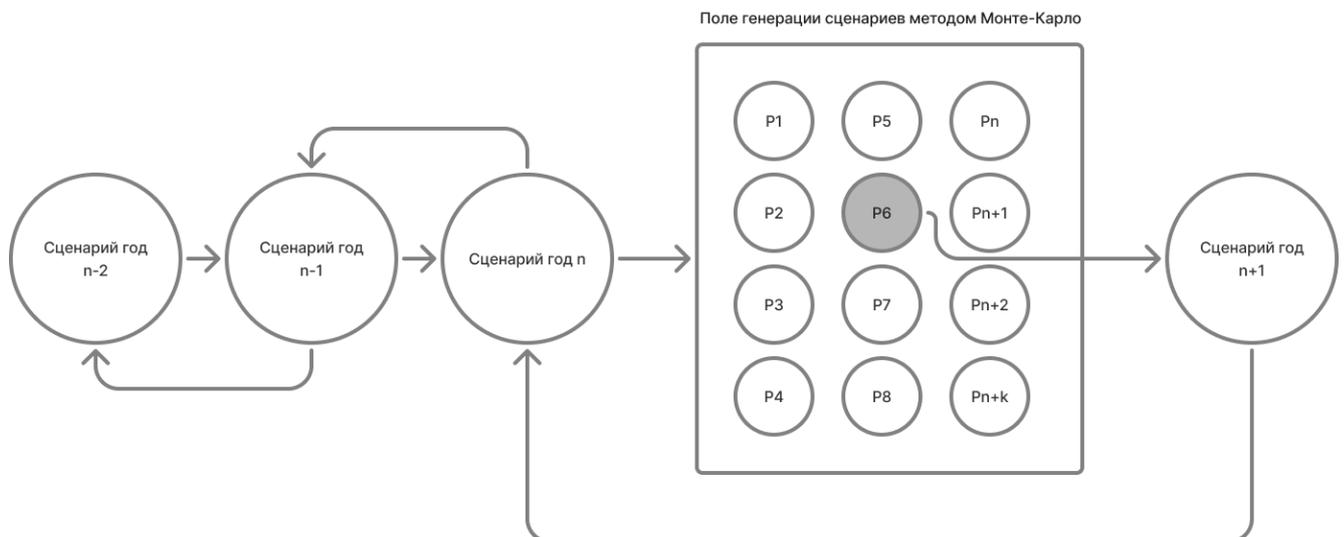


Рисунок 2.3 – Схема реализации моделирования Монте-Карло и марковских цепей при определении наиболее вероятного сценария (составлено автором)

Характеристики *оптимистичного* сценария: ЧДД стремится к максимальным значениям, БС стремится к нулю, границы карьера расширяются до максимума – отрабатываются все запасы руды, 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.

Переход к состоянию S-4 происходит при выявлении наиболее вероятного сценария развития событий и определения статуса системы относительно оптимистичного и пессимистичного сценариев.

Состояние S-4 предполагает разработку комплекса организационных и технологических мероприятий для перехода системы-карьер к реализации наиболее вероятного сценария.

Реализация сценариев управления рабочей зоной карьеров осуществляется на основе управления бортовым содержанием в добываемой руде [24, 28, 46, 47, 48, 73].

«Управление рабочей зоной – это не только стратегические, но и тактические мероприятия, реализуемые в рамках текущего этапа отработки месторождения. Необходимо принимать во внимание стохастический характер геологических и технико-экономических данных, поэтому целесообразно осуществлять прогнозирование возможных вариантов реализации проектных решений на основе сценарного подхода» [47, 48].

Формирование рабочей зоны производится на базе величины оптимального бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде. Оптимальное бортовое содержание определяет объемы горной массы, которые должны быть отработаны на последующем периоде.

Формирование рабочей зоны карьеров происходит по следующему алгоритму на этапе S-2 (рисунок 2.4):

1. Определяется оптимальное направление рабочей зоны в глубину.
2. Определяется оптимальное направление рабочей зоны в плане.

3. Производится корректировка планов развития горных работ на следующий период.

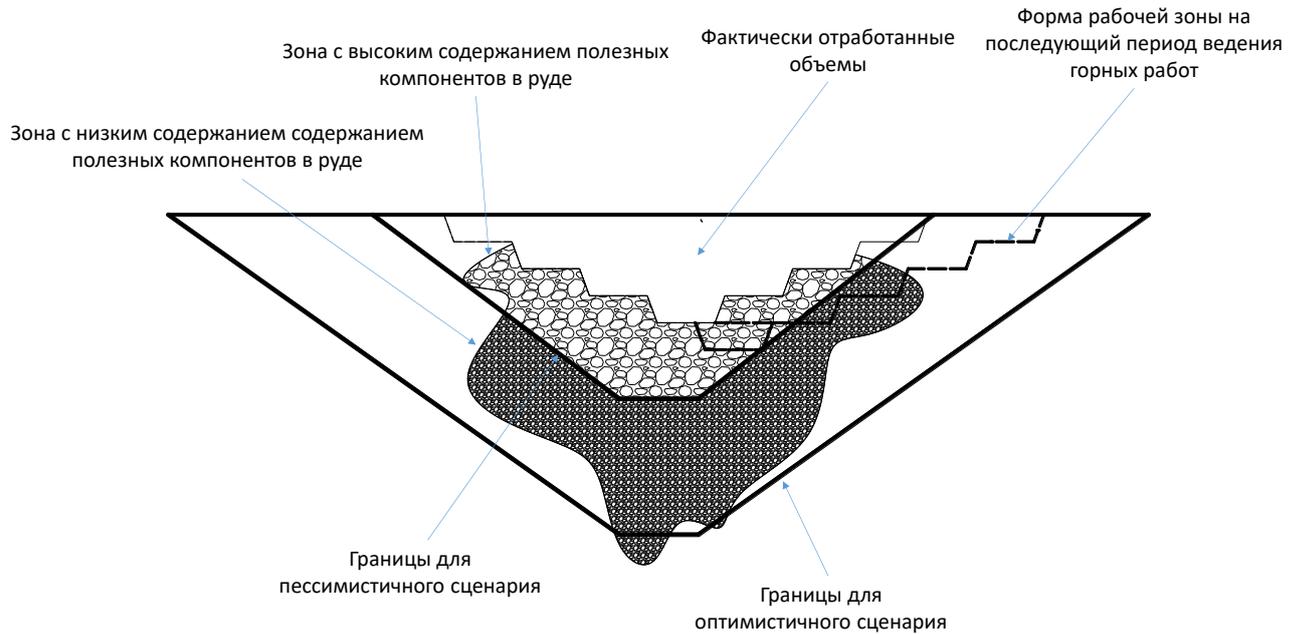


Рисунок 2.4 – Схема реализации формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров (составлено автором)

Разработка комплекса мероприятий для перехода к наиболее вероятному сценарию развития событий должна проводиться ежегодно. Таким образом, можно нивелировать время, необходимое для внесения корректировок в проектную и рабочую документацию. Также это позволит гибко реагировать на изменения внешних факторов: экономической ситуации на рынке минерального сырья и геологической информации при эксплуатационной доразведке месторождения.

Бортовое содержание полезных компонентов в руде является функцией глубины карьера, так как эксплуатационные затраты на добычу увеличиваются с увеличением глубины карьера.

## 2.2 Анализ базы данных для создания блочной модели и выявление закона распределения содержаний меди в руде

При проектировании карьеров необходимо учитывать стохастический характер исходных геологических и экономических данных [38, 41- 45, 100, 102].

Неподтверждение данных геологической разведки приводит к снижению экономических показателей отработки, корректировке проектных решений или

вообще к консервации карьера. Одним из вариантов снижения степени неопределенности геологических исходных данных являются результаты эксплуатационной доразведки месторождений, проводимой параллельно с ведением эксплуатационных горных работ [42, 45, 46, 47].

При долгосрочном проектировании границ карьеров и стратегии их изменения целесообразно применять инструменты математической статистики. С помощью анализа распределения содержаний полезных компонентов в рудном массиве выявляются диапазоны наиболее вероятных значений содержаний и составляются обоснованные прогнозы по распределению содержаний полезных компонентов по глубине месторождения [47, 48, 68, 76, 78, 80, 83, 87, 90, 102, 105].

Как правило, содержания полезных компонентов в руде распределяются в массиве согласно нормальному или логарифмически нормальному закону распределения.

Интегральная функция распределения содержаний полезных компонентов в рудном теле (2.1):

$$f(Grade) = \frac{1}{Grade \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{LnGrade} \frac{1}{Grade} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{LnGrade - \overline{Grade}_{ln}}{2 \cdot \sigma_{ln}^2} \right)^2} dGrade \quad (2.1)$$

где  $Grade$  - содержание полезного компонента, %;

$\sigma$  – среднеквадратичное отклонение эмпирического ряда содержаний;

$\sigma_{ln}^2$  – дисперсия эмпирического ряда данных;

$\overline{Grade}_{ln}$  - среднее значение логарифмов содержаний в блочной модели, %.

На рисунке 2.5 представлена гистограмма распределения содержания меди в руде, добываемой в рудном карьере.

В общем виде логарифмически нормальный закон распределения характеризуется следующей функцией плотности вероятностей (2.2):

$$f(Grade) = \frac{e^{-\left( \frac{LnGrade - \overline{Grade}_{ln}}{2 \cdot \sigma_{ln}^2} \right)^2}}{Grade \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (2.2)$$

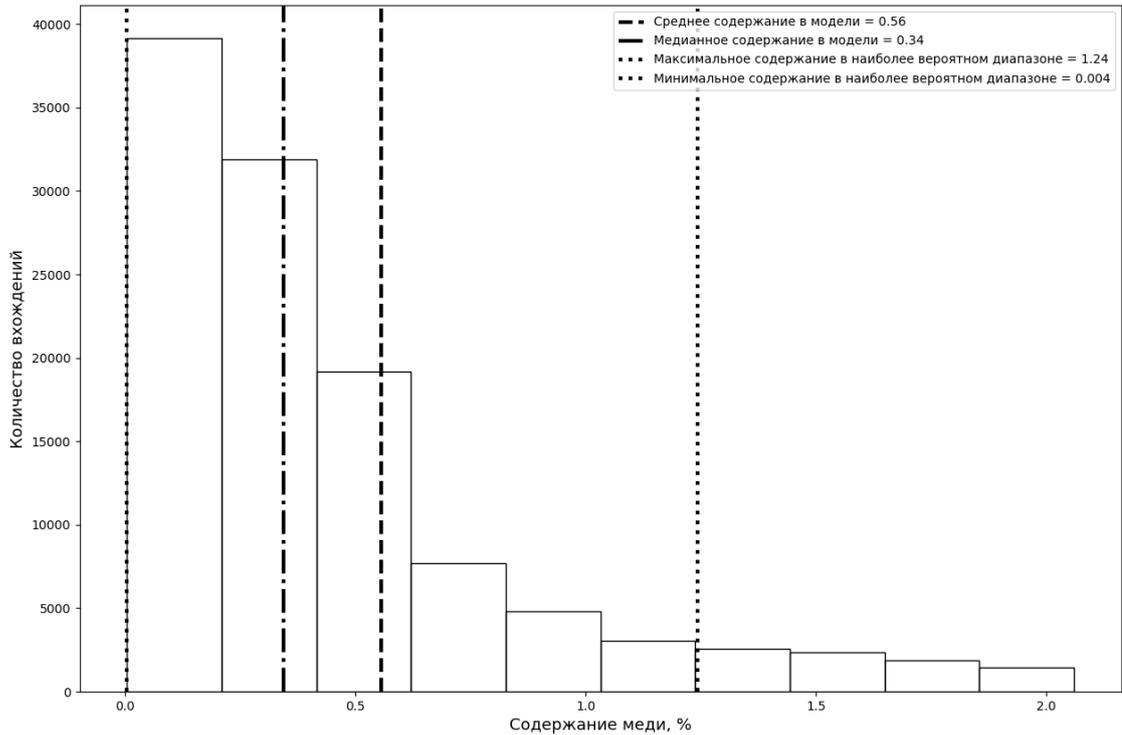


Рисунок 2.5 – Гистограмма распределения содержания меди в руде, добываемой в рудном карьере (составлено автором)

Дисперсия логарифмов содержаний меди в блочной модели (2.3):

$$\sigma_{ln}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln Grade_i - \ln Grade_{med})^2 \cdot m_i \quad (2.3)$$

где  $n$  – количество измерений;

$\ln Grade_i$  – логарифм содержания  $i$ -го блока;

$\ln Grade_{med}$  – медианное значение логарифмов содержаний блочной модели;

$m_i$  – частота  $i$ -го интервала измерения.

Среднее квадратическое отклонение содержаний блочной модели от среднего значения (2.4):

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{ln}^2} \quad (2.4)$$

Математическое ожидание содержаний блочной модели (2.5):

$$E(Grade) = e^{\overline{Grade}_n + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{ln}^2} \quad (2.5)$$

Используя выражения 2.2, 2.3, 2.4, определяются значения  $\sigma_{ln}^2$ ,  $\sigma$ ,  $E(Grade)$  (2.6):

$$\sigma_{ln}^2 = 1,15, \sigma = 1,07, E(Grade) = 0,28 \quad (2.6)$$

На рисунке 2.6 представлена гистограмма распределения логарифмов содержаний меди в блочной модели.

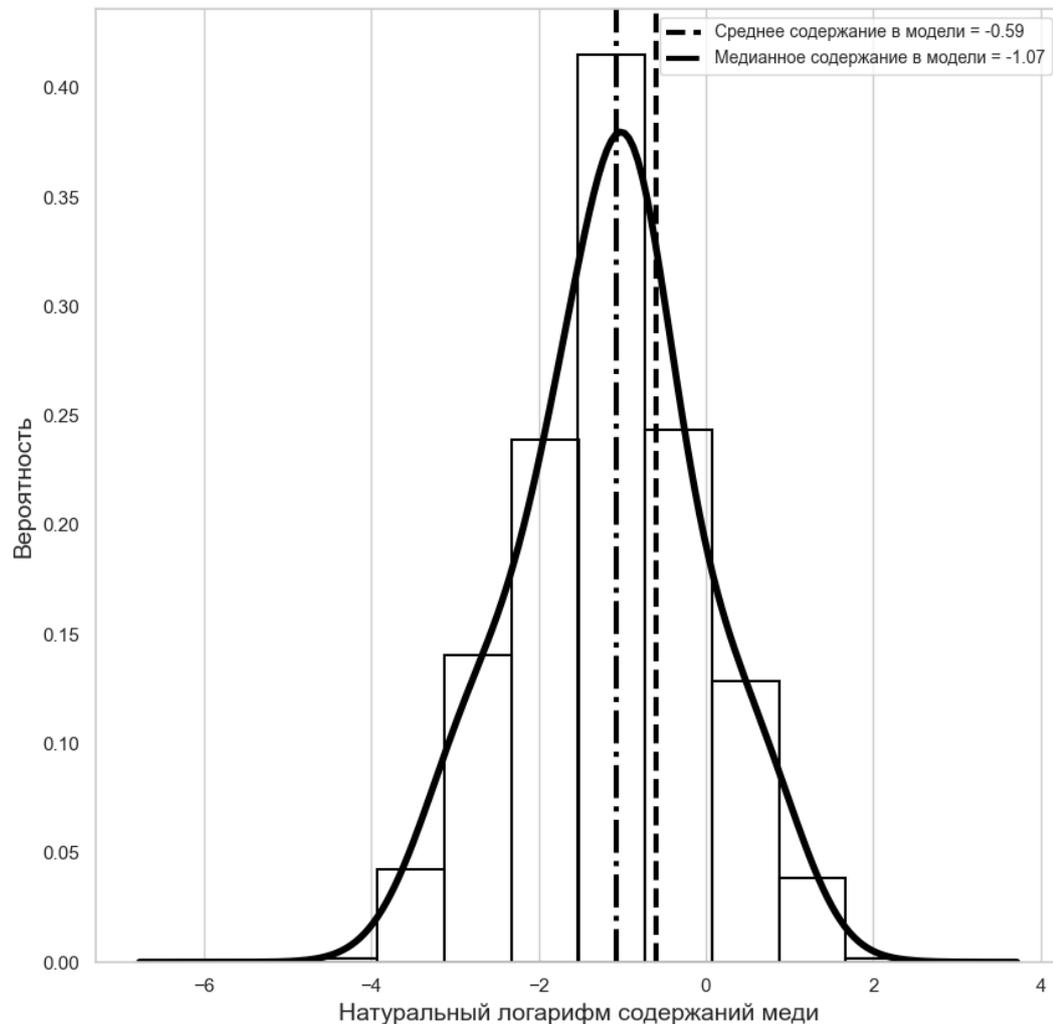


Рисунок 2.6 – Гистограмма распределения логарифмов содержаний меди в блочной модели (составлено автором)

В таблице 2.1 представлены результаты анализа данных по содержаниям меди в блочной модели.

Таблица 2.1 - Результаты анализа данных по содержаниям меди в блочной модели (составлено автором)

| Интервалы измерения логарифмов содержаний меди | Частота, m | Накопленная частота, M | Частость, m' % | Накопленная частость, M' |
|--|------------|------------------------|----------------|--------------------------|
| (-1.525, -0.726]                               | 39729      | 39729                  | 33,2049        | 33,2049                  |
| (-0.726, 0.0731]                               | 23283      | 63012                  | 19,4596        | 52,6645                  |
| (-2.325, -1.525]                               | 22857      | 85869                  | 19,1035        | 71,768                   |
| (-3.124, -2.325]                               | 13410      | 99279                  | 11,2079        | 82,9759                  |
| (0.0731, 0.872]                                | 12318      | 111597                 | 10,2952        | 93,2711                  |
| (-3.923, -3.124]                               | 4039       | 115636                 | 3,3757         | 96,6468                  |

## Продолжение таблицы 2.1

| Интервалы измерения логарифмов содержаний меди | Частота, m | Накопленная частота, M | Частость, m' % | Накопленная частость, M' |
|--|------------|------------------------|----------------|--------------------------|
| (0.872, 1.672]                                 | 3657       | 119293                 | 3,0565         | 99,7033                  |
| (-4.722, -3.923]                               | 178        | 119471                 | 0,1488         | 99,8521                  |
| (1.672, 2.471]                                 | 174        | 119645                 | 0,1454         | 99,9975                  |
| (-5.53, -4.722]                                | 3          | 119648                 | 0,0025         | 100                      |

Так как интегралы и плотности вероятности логарифмически нормального закона распределения не табулированы, теоретическая плотность распределения вероятности для содержаний меди в блочной модели определяется по формуле 2.7:

$$f(Grade) = \frac{e^{-\left(\frac{\ln Grade + 0,59}{1,15}\right)^2}}{Grade \cdot 1,07 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (2.7)$$

Зная закон распределения содержаний, можно выявить диапазон наиболее вероятных значений, которые могут быть присущи блокам на нижележащих горизонтах и не были изучены при эксплуатационной доразведке сложноструктурного рудного месторождения. Вероятность попадания содержания в диапазон  $\pm \sigma$  от среднего определяется по формуле 2.8:

$$P(Grade(min) = 0,002 > Grade \geq Grade(max) = 1,24) = 0,88 \quad (2.8)$$

С целью определения близости эмпирического распределения логарифмов содержаний меди с блочной модели к теоретическому дополнительно проводится построение теоретических кривых и их сопоставление с эмпирическими данными.

В общем случае метод сопоставления теоретического и эмпирического распределения определен математиками. В рамках выполнения исследования принадлежности эмпирического распределения логарифмически нормальному закону распределения проведены расчеты и установлено, что частоты содержаний меди в блочной модели близки к их вероятностям.

В данном случае используется критерий согласия А.Н. Колмогорова. С помощью данного критерия согласия можно сделать вывод о принадлежности двух выборок одной совокупности и одному виду распределения. Максимум отклонения

эмпирической функции распределения от теоретической подчиняется закону  $k\lambda$ . Величину  $\lambda$  определяют по формуле 2.9:

$$\lambda = D_{max} \cdot \sqrt{n} \quad (2.9)$$

где  $n$  – величина эмпирической выборки;

$D_{max}$  – максимальная разность накопленных частот эмпирического и теоретического распределений.

В случае если расчетное значение  $\lambda$  больше, чем  $\lambda_k$ , то эмпирическое распределение не соответствует теоретическому. Максимальная разность частот составила  $D_{max} = -0,4533$ .

По формуле 2.9 определяется значение  $\lambda$ :

$$\lambda = 0,4533 \cdot \sqrt{119648} = 1,56$$

В данном случае расчетное значение  $\lambda$  принимает значение меньше, чем  $\lambda_k = 1,63$  для уровня значимости в 1%. Это говорит о том, что формула логарифмически нормального закона распределения для эмпирического ряда содержаний в блочной модели соответствует теоретическому распределению логарифмов содержания меди в блочных моделях.

Также данный тезис подтверждается многими исследованиями, доказавшими подчинение распределений содержаний в массиве логарифмически нормальному закону распределения.

В таблице 2.2 представлены результаты расчёта теоретической частоты значений содержания меди в руде.

Таблица 2.2 – Результаты расчёта теоретической частоты значений содержания меди в руде (составлено автором)

| Интервалы измерения логарифмов содержаний меди | Частота, m | Накопленная частота, M | Частость, m' % | Накопленная частость, M' | Частота для теоретического распределения, mt | Частость для теоретического распределения. mt' % | m' – mt'  |
|--|------------|------------------------|----------------|--------------------------|--|--|-----------|
| (-2.218, -1.419]                               | 39729      | 39729                  | 33,2049        | 33,2049                  | 13863  | 11,59  | 0,21615   |
| (-1.419, -0.62]                                | 23283      | 63012                  | 19,4596        | 52,6645                  | 31771  | 26,55  | -0,0709   |
| (-3.018, -2.218]                               | 22857      | 85869                  | 19,1035        | 71,768                   | 6354   | 5,31   | 0,13794   |
| (-3.817, -3.018]                               | 13410      | 99279                  | 11,2079        | 82,9759                  | 745  | 0,62   | 0,10588   |
| (-0.62, 0.179]                                 | 12318      | 111597                 | 10,2952        | 93,2711                  | 66565  | 55,63  | -0,45335  |
| (-4.616, -3.817]                               | 4039       | 115636                 | 3,3757         | 96,6468                  | 280  | 0,23   | 0,03146   |
| (0.179, 0.978]                                 | 3657       | 119293                 | 3,0565         | 99,7033                  | 0  | 0  | 0,03056   |
| (-5.415, -4.616]                               | 178        | 119471                 | 0,1488         | 99,8521                  | 56   | 0,05   | 0,00099   |
| (0.978, 1.778]                                 | 174        | 119645                 | 0,1454         | 99,9975                  | 3  | 0  | 0,00145   |
| (-6.224, -5.415]                               | 3          | 119648                 | 0,0025         | 100                      | 11   | 0,01   | -0,000075 |

### 2.3 Прогнозирование цен на медную руду при проектировании карьеров

Цены на рынках минерального сырья являются определяющим фактором при определении границ конечных карьеров. При проектировании карьеров в качестве исходных данных, как правило, используются дискретные значения цен без учета вероятностного характера и их динамики [44].

При увеличении цен на рынке минерального сырья появляется возможность увеличения границ карьера. Спрос и предложение являются функцией цены на минеральное сырье и оказывают влияние на определение производительности карьера по руде [44].

Одним из способов прогнозирования является определение средних цен с учётом индексов инфляции. Экспертные оценки изменения цен во времени могут проводиться на основе цены производителей или индекса инфляции. Индексы инфляции имеют относительную информацию. В оцениваемый год значение индекса принимается за 100, а в последующие годы определяются относительно этого значения [43, 44, 50].

Цена минерального сырья с учетом инфляции может быть определена из выражения 2.10:

$$C_x = C_y \frac{I_x}{I_y} , \quad (2.10)$$

где  $C_x, C_y$  – цена минерального сырья соответственно в год X и Y;

$I_x, I_y$  – индекс цен соответственно в год X и Y.

Для прогнозирования цен на минеральное сырье возможно использовать находящиеся в свободном доступе экспертные оценки по изменению индексов инфляции, с учетом ситуации на рынках минерального сырья. В профессиональном сообществе получил распространение способ оценки на основе определения цен с движущимися средними. Для прогнозирования изменения цен на минеральное сырье целесообразно применение временных серий, с установленными на несколько лет средними значениями. Как показали результаты исследования рынков минерального сырья, периоды ценовых изменений чередуются примерно

через 5 лет, поэтому вычисления движущихся средних значений следует осуществлять за 5-летние отрезки времени [44].

Одним из способов определения цен при проектировании карьеров является применение диаграмм эксплуатационных затрат. Использование базы данных по эксплуатационным затратам карьеров-аналогов позволяет выявить значение граничной цены, обеспечивающей только экономическую выживаемость карьера, что является достаточно трудоёмким процессом, требующим поддержания и постоянного обновления массива баз данных. Результаты анализа изменения цен на медь за 45-летний период представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Данные об изменении цен на медь за 45-летний период (по данным LME)

| Интервал изменения, % | Количество изменений | Частота изменений, лет |
|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 1                     | 2                    | 3                      |
| более 40              | 2                    | 22,5                   |
| от 40 до 30           | 3                    | 15                     |
| от 30 до 20           | 5                    | 9                      |
| от 20 до 10           | 15                   | 3                      |
| от 10 до 0            | 22                   | 2,04                   |
| от 0 до -10           | 24                   | 1,87                   |
| от -10 до -20         | 17                   | 2,65                   |
| менее -20             | 4                    | 11,25                  |

Частота изменений цен ( $m_p$ ) характеризует периодичность изменений в рассматриваемый период времени (2.11):

$$m_p = \frac{N}{n_i}, \quad (2.11)$$

где  $N$  – продолжительность оценки, лет;

$n_i$  – количество изменений в рассматриваемый период времени.

Анализ данных, приведённых в таблице 2.3, позволяет сделать вывод, что изменения цен на рынке минерального сырья можно прогнозировать с частотой, представленной в столбце 3 [44].

Прогнозирование цен на рынке минерального сырья является многофакторной системной задачей. Однако финансовые аналитики и эксперты за годы наблюдений за рынком установили некоторые закономерности изменения цен

и предложили математические инструменты для их идентификации [17, 34, 42, 47, 48, 66].

Одним из способов оценки ситуации на рынках минерального сырья является установление тренда в изменении цен. Такие тренды могут быть восходящими и нисходящими.

На ранних стадиях проектирования карьеров целесообразно проводить анализ рынка по экспоненциальному взвешенному скользящему среднему – преобразование простого скользящего среднего во временном ряду, где наибольший вес имеют последние значения, а наименьший вес – предыдущие.

Для обоснования границ карьеров предлагается рассмотреть два сценария: *пессимистичный и оптимистичный*.

*Пессимистичный сценарий* реализуется в случае, если цена на медь достигает уровня пятилетнего минимума. *Оптимистичный сценарий* характеризуется ростом цены, но в качестве возможного значения принимается прогнозная цена, определённая методом Хольта-Винтерса. Данный метод позволяет оценить временной ряд при помощи экспоненциального скользящего среднего, а также с учетом тренда.

На рисунке 2.7 представлен график изменения во времени цен на медь. В данном случае пессимистичный вариант достигается при цене на медь в примерно 93 тыс. руб. за тонну, оптимистичный вариант – в диапазоне от 178 тыс. руб. за тонну [42, 8].

Таким образом, использование инструментов математической статистики в анализе данных блочной модели месторождений, оценке и прогнозировании развития трендов изменения цен на рынке минерального сырья, позволяет снижать негативное воздействие стохастического характера исходных геологических и экономических данных на принимаемые проектные решения по границам карьера [42, 48].

Пессимистичный сценарий реализуется в случае, если цена на медь достигает уровня пятилетнего минимума. Оптимистичный сценарий характеризуется ростом цены, но в качестве возможного значения принимается прогнозная цена по методу

Хольта-Винтерса. Текущие максимумы не рекомендуется принимать из-за высокой вероятности снижения цены от этой отметки [38, 44].

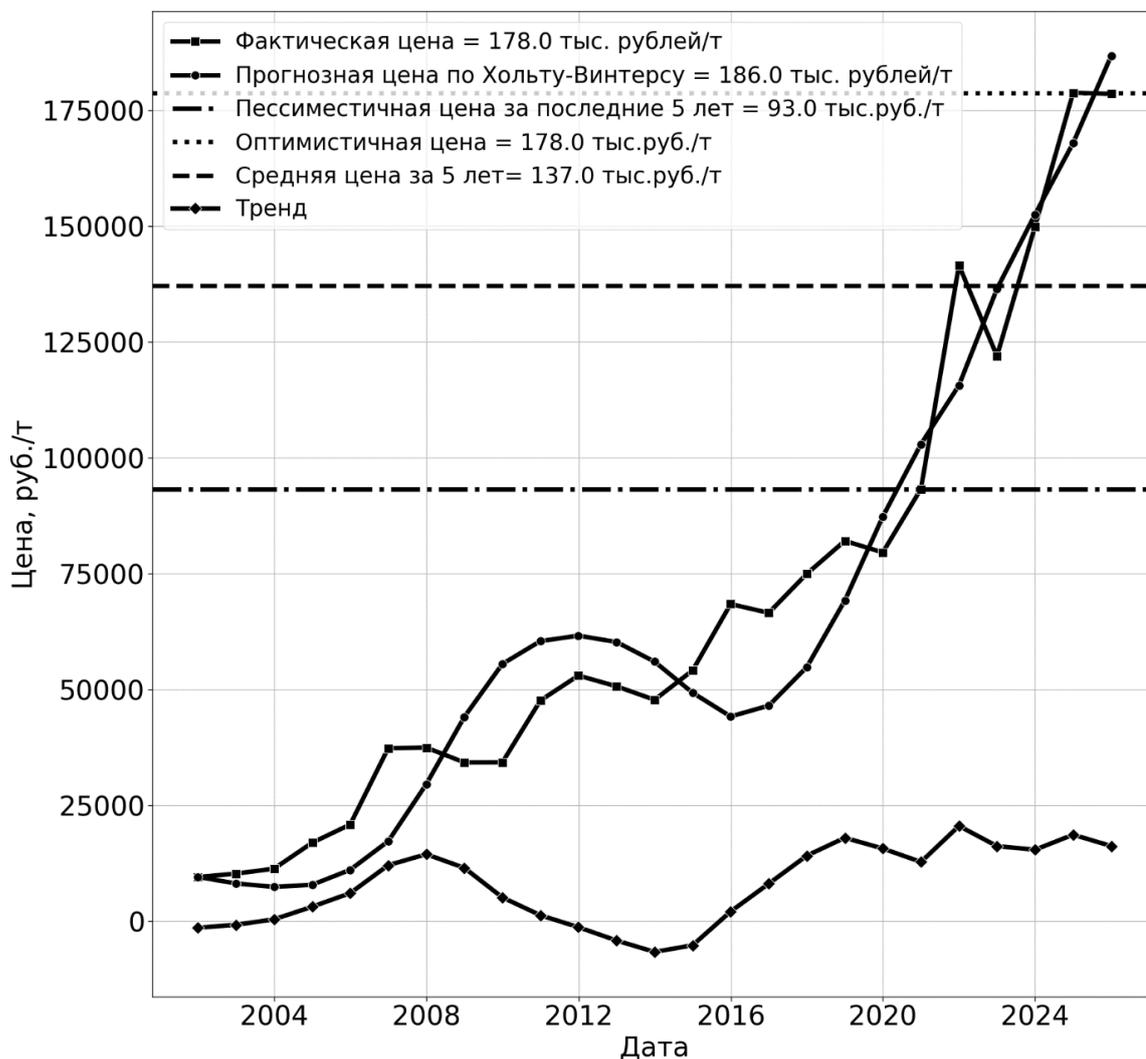


Рисунок 2.7 – График изменения во времени цен на медь (составлено автором)

## 2.4 Выводы по Главе 2

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для своевременного реагирования на изменение внешних экономических или геологических данных необходима разработка набора сценариев развития событий в будущем и выявление наиболее вероятного сценария.

2. Выявление наиболее вероятного сценария на последующие периоды работы системы-карьер позволит заблаговременно произвести корректировки технического проекта и подготовить комплекс мероприятий для реализации наиболее вероятного сценария без значительных задержек по времени.

3. В рамках реализации наиболее вероятного сценария выявлен закон распределения содержаний полезных компонентов в добываемой руде с целью определения диапазона вероятных значений содержаний до проведения эксплуатационной доразведки месторождения:

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

4. В рамках анализа рынка минерального сырья выявлен диапазон цен, характеризующий границу пессимистичного и оптимистичного сценариев. Цена на минеральное сырье для пессимистичного сценария составляет 93 тыс. руб./т, цена для оптимистичного сценария – 178 тыс. руб./т.

## **ГЛАВА 3 ОБОСНОВАНИЕ СИТУАТИВНО-АДАПТИВНОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ГЛУБОКИХ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ**

### **3.1 Обоснование метода определения бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде**

Под рабочей зоной карьера понимается пространство, в котором осуществляются вскрышные и добычные работы на уступах, находящихся в одновременной отработке и характеризующихся соразмерным развитием горных работ. Рабочая зона представляет собой перемещающуюся и изменяющуюся во времени поверхность борта карьера, в пределах которой осуществляются работы по подготовке и извлечению горной массы.

Целесообразно при управлении формированием рабочей зоны рудного карьера принимать бортовое содержание как граничное, которое необходимо для определения места размещения добытой рудной массы. Поэтому на горнодобывающих предприятиях могут принимать несколько типов бортовых содержаний для определенного рудопотока или метода оценки запасов.

Для добытого рудного блока необходима компенсация эксплуатационных затрат на добычу, переработку и маркетинг. Содержание полезного компонента в руде, возмещающее затраты (кроме вскрыши), является безубыточным бортовым содержанием [42, 47, 48].

Внутренний борт следует использоваться для блоков с содержанием полезного компонента ниже безубыточного граничного, которые не добывались бы с учетом их собственной извлекаемой ценности.

Такие блоки добываются как вскрышные с целью получения доступа к нижележащим рудным горизонтам. Эксплуатационные затраты на извлечение этих блоков компенсируются за счёт извлекаемой ценности рудных блоков на нижележащих горизонтах.

Оценка извлекаемого блока с содержанием полезного компонента ниже безубыточного граничного не должна учитывать затраты на добычу, поэтому бортовое содержание в руде для них может быть меньше, чем основное.

Бортовое содержание полезных компонентов в руде изменяется во времени отработки месторождения. Оптимальная стратегия изменения во времени бортового содержания определяется обоснованной последовательностью добычи запасов руды. [42, 47, 48]

Применение блочной или каркасной модели месторождения в современных программных продуктах для проектирования карьеров позволяет выбрать оптимальный вариант последовательности отработки запасов руды [23, 29, 47, 48, 106].

Оценка вариантов развития рабочей зоны карьера должна базироваться на предварительных проектных решениях по выбору технологии ведения горных работ, системы разработки, способа вскрытия, типоразмерам горнотранспортного оборудования, способов обогащения рудной массы, для прогнозирования наиболее вероятного диапазона эксплуатационных затрат на горные работы и переработку руды.

При выборе стратегии развития рабочей зоны карьера целесообразно принимать в качестве исходных данных более высокие значения эксплуатационных затрат или более низкие значения цены на продукцию горнодобывающего предприятия в первоначальный период (горно-капитальные работы), а затем уменьшать эксплуатационные затраты или увеличивать цены на конечную продукцию. Таким образом, в первоначальный период будут поддерживаться высокие значения бортового содержания и извлекаемой ценности руды. В последующих периодах отработки будет достигаться более низкое бортовое содержание и извлекаемая ценность руды [47, 48].

От стратегии определения бортового содержания полезного компонента в руде в процессе отработки месторождения зависит производительность карьера по руде. Оптимальное бортовое содержание полезного компонента в руде не должно превышать на определённом этапе отработки месторождения значения БС для последующих этапов. В противном случае ранее оцененные блоки руды с низким содержанием полезного компонента будут относиться к вскрышной породе с отрицательными оценками к извлечению из недр.

В случае, если необходимо извлечь горную массу с низким содержанием полезного компонента для вскрытия нижележащих рудных блоков, целесообразно использовать более низкое бортовое содержание для оценки целесообразности переработки этих блоков. Такое низкое бортовое содержание руды является внутренним бортом, рассчитываемым без учёта затрат на добычные работы [42, 45, 46, 47, 48].

Оптимальное бортовое содержание будет меньше, чем предельное и будет уменьшаться во времени отработки, чтобы при достижении горными работами дна карьера, стать ему равным. Величина бортового содержания определяет объём запасов руды в контурах карьера и среднее содержание полезного компонента, является важным фактором, который следует обоснованно определять при выполнении проектной документации.

Бортовое содержание полезного компонента в руде при разделении горной массы между рудой и вскрышной породой (без учета вскрыши) (3.1):

$$\alpha_p = \frac{[(Z_d + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{кр}}) - (Z_b + Z_{\text{по}} + Z_{\text{ко}})]}{[\varepsilon \cdot (\text{Ц} - R)],} \quad (3.1)$$

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

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

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

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

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

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

$\varepsilon$  – извлечение полезного компонента из руды, %;

$\text{Ц}$  – цена конечного продукта на рынке минерального сырья, руб./т;

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

Бортовое содержание полезного компонента в руде с учетом вскрыши (3.2):

$$\alpha_p = \frac{[(Z_d + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{кр}}) + K_b \cdot (Z_b + Z_{\text{по}} + Z_{\text{ко}})]}{[\varepsilon \cdot (\text{Ц} - R)],} \quad (3.2)$$

где  $K_B$  – эксплуатационный коэффициент вскрыши, т/т.

Оптимизация бортового содержания полезного компонента в руде заключается в выполнении работ одновременно с непрерывным системным анализом полученных результатов и корректировкой на последующих этапах работы.

При проектировании и планировании развития горных работ принимается величина бортового содержания полезного компонента в руде, от которой зависят границы и глубина карьера, производственная мощность предприятия по переработке добытой руды, экономическая эффективность реализации проекта [46, 47, 48].

Оптимальное бортовое содержание является функцией чистого дисконтированного дохода от реализации проектных решений и подлежит периодическому пересмотру при корректировке планов развития горных работ, при геологической доразведке, при обновлении каркасной или блочной модели месторождения, при изменении технологии добычи и переработки, при изменении ситуации на сырьевом рынке.

Стохастические исходные геологические данные могут не подтверждаться в процессе отработки месторождения. Модель месторождения, разработанная на основе этих данных, прогнозируемые горно-геологические, горнотехнические параметры и показатели, как правило, существенно отличаются от реализованных в процессе отработки. Показатели производственной мощности карьера и перерабатывающего производства имеют риск недостижения проектных значений [42, 47, 48].

Рынки минерального сырья обладают волатильностью цен, спроса, что требует постоянного пересмотра значений бортового содержания полезного компонента в руде на всех этапах проектирования карьера.

Повышение бортового содержания позволяет улучшить финансово-экономические показатели отработки месторождения. Это приводит к уменьшению срока окупаемости капитальных вложений. Более высокие цены на рынке минерального сырья в отдельные периоды разработки месторождения

позволяют увеличить эксплуатационные затраты на вскрышные работы и коэффициент вскрыши для создания опережения по фронту вскрышных работ. Уменьшение бортового содержания полезного компонента в руде позволяет продлить срок отработки месторождения, решить ряд социальных вопросов: занятости, налогов, регионального развития.

Снижение бортового содержания позволяет обеспечить рациональное комплексное извлечение руд при открытой разработке месторождений.

При определении границ карьера и БС важно учитывать наиболее вероятные значения содержаний полезных компонентов в массиве. Это, как минимум, позволяет отслеживать, насколько принятое бортовое содержание соответствует наиболее вероятным значениям. В случае, если рассчитанное БС попадает в зону менее вероятных значений и затем будет использоваться при принятии проектных решений, то это может привести к необходимости корректировки [42, 47, 48].

Расчет бортового содержания полезного компонента в руде с учетом среднеэксплуатационного коэффициента вскрыши позволяет на стадии определения оптимальных границ карьеров учесть разноску бортов в результате проектирования способа вскрытия, размещения системы съездов и других внутрикарьерных коммуникаций.

В случае, если коэффициент вскрыши не учитывается в расчете на стадии оптимизации границ карьеров, то при проектировании системы съездов и других коммуникаций, границы карьера расширятся за счет увеличения объёмов удаляемой вскрышной породы до 1,5 раз [37, 42, 47, 48].

На рисунке 3.1 представлен график зависимости БС от цены на минеральное сырье. На рисунке 3.1 отображены значения БС с учетом коэффициента вскрыши и без него.

Минимальное бортовое содержание, рассчитанное за период от 2020 до 2025 года с учетом коэффициента вскрыши составляет 0,6%. Максимальное БС – 0,92%. Без учета коэффициента вскрыши, БС составило 0,3 % и 0,52 %, соответственно.

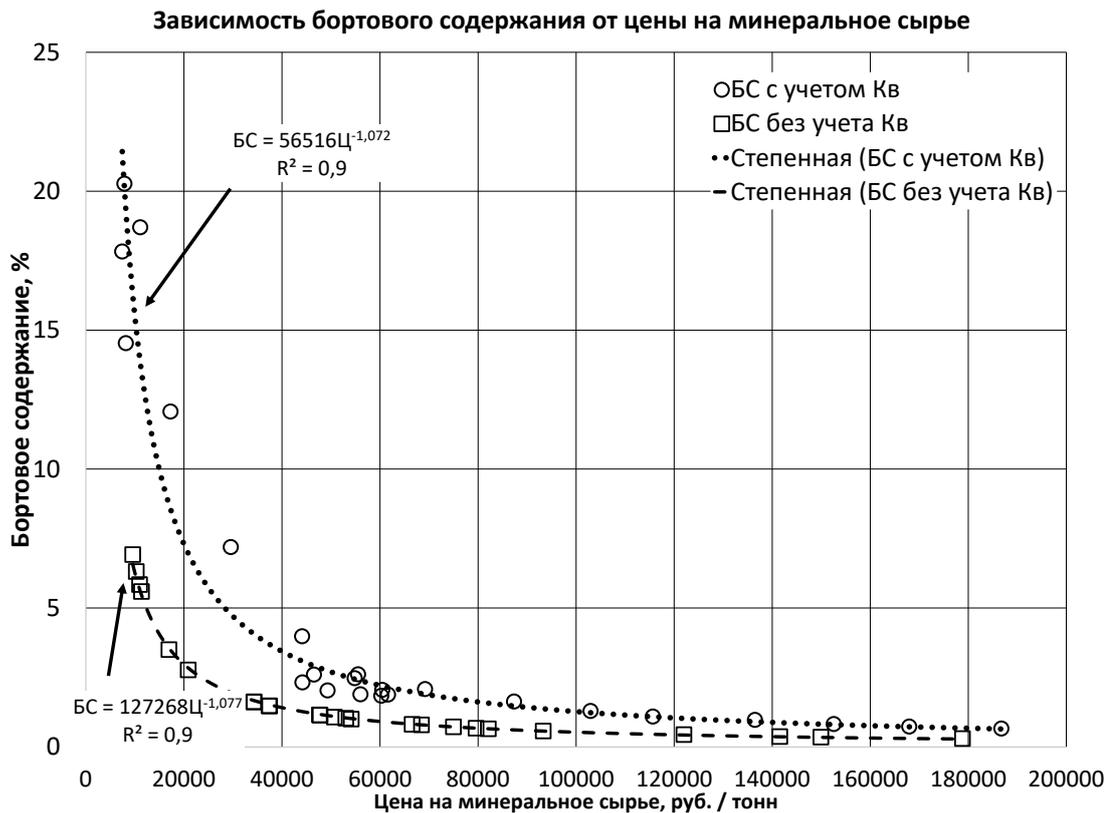


Рисунок 3.1 – График зависимости бортового содержания (БС) от цены на минеральное сырье (Ц) с учетом и без учета коэффициента вскрыши (Кв) (составлено автором)

Анализ данных, представленных на рисунке 3.1, показывает, что БС, рассчитанные с учетом и без учета коэффициента вскрыши существенно различаются. Также наблюдается увеличение разницы между двумя рассчитанными БС при ухудшении экономических условий реализации проекта.

Зная пространственную конфигурацию распределения содержаний полезного компонента в руде, представляется возможным скорректировать среднесрочный план развития горных работ для вовлечения в отработку новых горизонтов или увеличения фронта горных работ на уже отрабатываемых уступах.

Сценарный подход к формированию рабочей зоны карьеров при разработке рудных крутопадающих месторождений позволяет оценить максимальные и минимальные границы отработки в зависимости от принятого бортового содержания полезных компонентов в добываемой руде [42, 47, 48].

При реализации оптимистичного сценария ЧДД от реализации проекта стремится к максимуму, бортовое содержание полезных компонентов стремится к

минимальным значениям, что неизбежно приводит к расширению границ карьеров. Важно, что бортовое содержание не должно быть ниже тех значений, которые могут быть получены при современном уровне технического оснащения горнодобывающего предприятия. Прогнозирование максимальных границ карьеров позволяет недропользователю рационально использовать площадь горного отвода для расположения капитальных сооружений, оставляя пространство для будущего расширения границ карьеров без необходимости решать проблемы, связанные с деконструкцией и переносом сооружений [42, 47, 48].

При реализации пессимистичного сценария ЧДД проекта стремится к нулю, бортовое содержание полезных компонентов возрастает до максимальных значений, что приводит к уменьшению границ карьеров [42, 47, 48].

Технический проект карьера в современных условиях должен корректироваться, уточняться и адаптироваться к динамике рынков минерального сырья не менее одного раза в год для дальнейшей защиты плана развития горных работ, обеспечения экономической эффективности отработки месторождения, надёжности реализации проектных решений; для обеспечения рационального недропользования с точки зрения государства; обеспечения оптимальных социальных условий работы персонала [24, 42, 47, 48].

При определении прогнозных значений важно закладывать вероятность наступления пессимистичного сценария, когда блоки рудного тела не могут быть отработаны по экономическим причинам: извлекаемая ценность рудного блока стремится к ценности блока вскрышного. Необходимо учесть, что некоторые блоки частично или полностью не могут быть отработаны из-за технологических ограничений или по соображениям безопасности ведения горных работ [42, 47, 48].

Для снижения негативных последствий наступления пессимистичного сценария на стадии корректировки проекта необходимо, как минимум, в концептуальной форме прорабатывать пессимистичный сценарий развития рабочей зоны карьера.

Для корректировки модели необходимо оценивать результат прогноза по сравнению с фактически реализованным значением показателя. Для этого следует сформировать и ежегодно пополнять базу данных, содержащую прогнозные и фактические исходные данные.

Важно понимать, что окончательное решение, как правило, будет за лицом, принимающим решения (ЛПР), компетентным специалистом, экспертом, несущим ответственность за результат реализации проекта. Данные, полученные при реализации модели, являются лишь рекомендациями и предложены без учета множества других факторов, в том числе субъективных [42, 47, 48].

При увеличении рыночных цен на извлекаемые из руды полезные компоненты возможно увеличение издержек на производство, расширение границ карьеров, отработка зон месторождения с небольшим содержанием металла в руде.

Увеличение производительности карьера по руде при повышении граничного содержания полезного компонента приведет к увеличению годовой производительности по полезному компоненту. Наименьшее значение удельных эксплуатационных затрат с учетом амортизации относится к бортовому содержанию с самым низким значением, а без учета амортизации – с наибольшим. Снижение сроков окупаемости капитальных вложений при увеличении производительности карьера не всегда сопровождается ростом расходов.

При разработке сценариев формирования границ карьеров во время отработки месторождения в качестве исходных данных целесообразно использовать более высокие эксплуатационные затраты или низкие цены на конечный продукт, получаемый в результате работы горнодобывающей компании в первоначальный период освоения рудного месторождения. В последующие периоды необходимо снижать эксплуатационные затраты или принимать более высокие цены на конечную продукцию горнодобывающего предприятия.

При реализации такого сценария в первоначальный период отработки рудного месторождения для расчетов целесообразно использовать высокие значения бортового содержания и извлекаемой ценности минерального сырья, а на последующих этапах значения бортового содержания и извлекаемой ценности

следует снижать, обеспечивая эффективность реализации проектных решений. Рациональными вариантами проектных решений по определению границ карьеров являются те, которые менее зависимы от волатильности цен и спроса на рынке минерального сырья, позволяют вносить оперативные корректировки в проектную документацию и технологию разработки месторождения.

Корректировка проекта может сопровождаться значительными относительно ЧДД эксплуатационными и капитальными затратами, которые следует учитывать при разработке возможных сценариев формирования рабочей зоны карьеров в пространстве и времени. Несмотря на это, итоговая экономия, которой достигнет карьер к концу срока эксплуатации, не может значительно повлиять на ЧДД. Аналогичным образом складирование сырья с низким содержанием полезных компонентов в руде может повысить затраты на протяжении срока эксплуатации карьера, но полученные от переработки этих запасов доходы будут реализованы только к концу его срока эксплуатации. Поэтому, принимая проектное решение, не следует руководствоваться только максимальным увеличением чистого дисконтированного дохода [42, 47, 48].

### **3.2 Оценка факторов, влияющих на принятие проектных решений о границах карьеров с учетом изменения бортового содержания**

Определение оптимального бортового содержания является важной задачей при проектировании формирования рабочей зоны карьера. Для оконтуривания рудных тел и планирования их отработки, следует обосновать бортовое содержание полезного компонента в добываемой руде [24, 42, 47, 48]. При повышении цен на рынке минерального сырья целесообразно увеличение затрат на вскрышные работы, повышение текущего коэффициента вскрыши, создание резерва фронта добычных работ. Снижение бортового содержания в периоды восходящих ценовых трендов на рынке минерального сырья дает возможность увеличить срок разработки месторождения и обеспечить создание запаса минерального сырья для поддержания нормы доходности в периоды снижения цен [24, 28, 77, 85, 96].

Определение границ карьеров на конец отработки месторождения имеет большое значение, так как они определяют объём промышленных запасов руды и

вскрышных пород в контурах карьера. Конечные контуры карьера используются для расчетов производительности и срока эксплуатации карьеров. Контуры карьера влияют на выбор способа вскрытия, места заложения вскрывающих и подготовительных траншей, расположения объектов инфраструктуры, наземных коммуникаций.

Проектные контуры карьера можно разделить на следующие категории [42, 47, 48]:

- конечные;
- перспективные;
- промежуточные.

Конечные контуры – это проектные контуры карьера на конец отработки, которые должны быть достигнуты при завершении ведения горных работ. Такой вид границ должен определяться с высокой степенью точности.

Перспективные контуры – это такие границы карьера, до которых возможно производство открытых горных работ. Такие границы карьера определяются с меньшей степенью точности и претерпевают корректировки в течение развития горных работ.

Промежуточные контуры – границы, которые достигаются в определенный момент разработки месторождения, на определённом этапе.

В процессе реализации проекта контуры неоднократно пересматриваются с учётом изменения во времени параметров рабочей зоны карьера и многих горнотехнических и горно-геологических факторов. Достоверность проектных решений зависит от фактора времени. В случае, если сроки разработки месторождений карьерами составляют 12-15 лет, то контуры карьера определяются как перспективные или промежуточные.

Рационально при формировании границ рудного карьера принимать бортовое содержание как граничное в рудопотоке для определения места размещения добытого объёма руды. Поэтому на горном предприятии возможно принятие нескольких видов бортовых содержаний, каждый связан с конкретным потоком руды или способом определения запасов в недрах [42, 47, 48].

Для отработанного рудного блока должно выполняться правило: извлекаемая ценность этого блока должна компенсировать затраты на добычу, переработку и маркетинг. Содержание полезного компонента, компенсирующее затраты (кроме вскрыши) – это безубыточное граничное содержанием полезных компонентов [24, 42, 47, 48].

Внутренний борт используется для блоков, где содержание полезного компонента в руде будет меньше безубыточного. Эти блоки не могли бы быть отработаны из-за их небольшой ценности при извлечении. Соответственно, они извлекаются как вскрышные породы для того, чтобы обеспечить доступ к нижележащим блокам полезных ископаемых. Компенсация эксплуатационных затрат на добычу этих блоков происходит за счет ценности блоков, извлекаемых с нижележащих горизонтов. Оценка добычи подобных блоков с точки зрения экономики не должна учитывать эксплуатационные затраты на отработку, а значит, бортовое содержание полезных компонентов будет ниже, чем первоначальное основное [24, 42, 47, 48].

При определении величин бортового содержания следует учитывать фактор времени отработки месторождения. Оптимальная стратегия изменения во времени бортового содержания полезных компонентов определяется при проектировании и планировании развития горных работ.

Использование блочной модели месторождения в современных программных продуктах для проектирования карьеров позволяет выбрать оптимальный вариант последовательности отработки запасов руды.

Оценка вариантов развития рабочей зоны карьера должна базироваться на предварительных проектных решениях по выбору технологии производства открытых горных работ, параметрах и показателях принятой системы разработки, типоразмеров выемочно-погрузочного и транспортного парка, способа переработки и обогащения руды, для прогнозирования наиболее вероятного диапазона эксплуатационных затрат на проведение горных работ и обогащения руды [24, 42, 47, 48].

Оптимальное бортовое содержание в руде не должно на определённом этапе отработки месторождения быть больше значения бортового содержания для последующих этапов. В противном случае ранее оцененные блоки руды с низким содержанием могут определяться как вскрышные породы с отрицательными рекомендациями по извлечению из недр [24, 42, 47, 48].

Значение бортового содержания определяет объём запасов руды в контурах карьера и среднее содержание, является важным фактором, который следует обосновывать при планировании горных работ и проектировании карьеров [24, 42, 47, 48].

Одной из целей исследований по оптимизации бортового содержания является максимизация чистого дисконтированного дохода от реализации проекта отработки месторождения. Решение выбора бортового содержания должно иметь системный характер, учитывать ряд технико-экономических, взаимно влияющих факторов (технические, экономические, экологические, социальные и другие).

Соотношение между бортовым содержанием, производительностью горнодобывающего предприятия и перерабатывающего комплекса, а также затратами на добычу и переработку, рыночной стоимостью реализованной продукции и притоком денежных средств обуславливается изменением бортового содержания, следовательно, перед принятием проектных решений это соотношение следует проанализировать.

Уменьшение бортового содержания может повысить ЧДД, но при этом уменьшить общие доходы от продаж без учета дисконтирования. Увеличение бортового содержания влечет за собой размещение на складе низкосортного сырья, переработка которого была рентабельна. Поэтому целесообразно рассмотреть вариант складирования запасов сырья с более низким содержанием полезного компонента в руде для переработки впоследствии.

Удельная прибыль от переработки руды зависит от бортового содержания.

В случае, если при проектировании принято неоптимальное бортовое содержание, изменение запасов руды в контурах карьера может снизить удельную прибыль от переработки добываемой руды или увеличить убытки, которых можно

было бы избежать. Удельная прибыль от переработки руды с содержанием ценного компонента  $\alpha$  (3.3.):

$$P_y = \alpha_{cp} K_{II} (C - Z_{mm}) - (Z_{\delta} + Z_{II} + Z_K), \quad (3.3)$$

где  $\alpha_{cp}$  – среднее содержание полезного компонента в руде, %;

$K_{II}$  – коэффициент извлечения металла из руды, %;

$C$  – рыночная цена конечного продукта, руб./т;

$Z_{mm}$  – удельные затраты на транспортирование и маркетинг, руб./т;

$Z_{\delta}$  – удельные затраты на добычу руды, руб./т;

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

$Z_K$  – удельные косвенные и административные затраты, руб./т.

При последовательном решении проектных задач происходит приближение к результату в создании горнотехнической системы-карьер, с обоснованными оптимальными параметрами и показателями. Анализ результатов реализованных проектов показывает, что качество и надёжность работы горнотехнической системы при этом значительно повышается. Такое качество оценивается количеством отказов системы, возникающих в процессе горно-капитальных и горно-строительных работ, и показателями надёжности её работы.

При проектировании карьеров и планировании горных работ принимается решение по величине бортового содержания полезного компонента в руде, которая определяет параметры карьера, производственную мощность горно-перерабатывающего комплекса, величину ЧДД от реализации проекта. По завершении каждого этапа отработки месторождения, определения притока средств бортовое содержание подлежит пересмотру в проектной документации.

Бортовое содержание пересматривается также при корректировке планов развития горных работ, изменении геологических исходных стохастических данных в процессе эксплуатационной разведки, при обновлении модели месторождения, при изменении технологии добычи и переработки, системы разработки и способа вскрытия месторождения [24, 42, 47, 48].

Исходные проектные данные, технико-экономические показатели являются стохастическими, и существует вероятность их неподтверждения в результате

реализации проекта. Карьер, как горнотехническая система, является консервативным – принимаемые решения по параметрам и показателям системы разработки могут реализоваться с задержкой по времени. Для увеличения границ карьера при изменении проектного бортового содержания полезного компонента в руде необходимо обеспечить возможности формирования рабочей зоны с учётом закономерностей её развития.

Блочная или каркасная модель месторождения, разработанная на основе данных геологической разведки, фактические геологические, геотехнические свойства и технико-экономические показатели существенно отличаются от принятых на начальной стадии проектирования и требуют периодической корректировки во время реализации проекта.

Бортовые содержания должны регулярно пересматриваться в соответствии с динамикой рынков минерального сырья, волатильностью цен, эксплуатационных и капитальных затрат.

При увеличении бортового содержания можно достичь определённого повышения финансово-экономических показателей отработки месторождения. При этом увеличение бортового содержания сократит период окупаемости капитальных вложений и величину проектного риска.

Принятие решений об изменении бортового содержания неизбежно сопровождается внесением корректировок в технический проект и годовой план развития горных работ. Бортовое содержание определяется не как статичный параметр при обосновании ТЭО кондиций, а наоборот, как динамический параметр, подлежащий оптимизации и пересмотру в зависимости от конъюнктуры рынка минерального сырья и технологий добычи и переработки руды.

Важно при принятии решений о бортовом содержании полезных компонентов в руде и порядке формирования рабочей зоны глубоких карьеров учитывать комплексные проектные риски, которые включают в себя:

- рыночные риски – связанные с изменением этапов проектирования и разработки, изменением ситуации на рынке минерального сырья и в экономике

страны в целом. Это объективные риски, на которые лица, принимающие решения, могут повлиять незначительно;

- специфические риски – связанные с особенностями разработки месторождения в конкретных горнотехнических условиях, степенью геологической изученности конкретного месторождения.

Для количественного анализа риска инвестиционных проектов используют различные подходы анализа рисков. К наиболее распространенным из них относятся:

- метод корректировки нормы дисконта;
- метод достоверных эквивалентов (коэффициентов достоверности);
- анализ чувствительности критериев эффективности (чистый дисконтированный доход, внутренняя норма доходности и др.);
- метод сценариев;
- анализ вероятностных распределений потоков платежей;
- деревья решений;
- метод Монте-Карло (имитационное моделирование) и др.

Применение сценарного подхода целесообразно при соблюдении двух условий: число сценариев конечно и значения факторов дискретны. В ситуации, когда количество сценариев стремится к бесконечности и значения факторов непрерывны, рекомендуется использовать метод имитационного моделирования, известный, как метод Монте-Карло [24, 42, 47, 48].

Реализация метода моделирования Монте-Карло является весьма сложной задачей, которая решается с использованием специальных компьютерных программ. Конечным результатом такой реализации является распределение вероятностей получения ЧДД  $< 0$  – отрицательного значения чистого дисконтированного дохода, и математическое ожидание величины ущерба. Рыночные риски при проектировании и принятии решений учитываются математической прогнозной моделью, где предусматривается разработка стратегии формирования рабочей зоны карьеров в случае, когда прогнозное значение БС не может быть принято по объективным рыночным причинам. Для этого

предусматривается переход к тому сценарию, который отвечает актуальному состоянию рынка минерального сырья.

Управление специфическим риском может быть реализовано путем комбинации данных эксплуатационной доразведки месторождения и прогнозирования содержаний полезных компонентов в руде, основываясь на имеющихся данных и известном законе распределения содержаний в рудных телах [24-26]. Увеличение продолжительности отработки месторождения обеспечит рациональное недропользование, решение социальных проблем на региональном уровне (налоги, рабочие места, инфраструктура).

Для обеспечения оптимальных экономических показателей отработки месторождения и рациональной продолжительности эксплуатации карьера целесообразно в первоначальный период отработки принимать более высокое бортовое содержание, а затем постепенно уменьшать его в процессе разработки карьера, размещая часть добытой руды с более низким содержанием на складах для последующей переработки.

При оптимизации бортового содержания с использованием технико-экономической модели, по критерию максимум ЧДД, применяются ограничения на используемые в модели технико-экономические показатели (капитальные или эксплуатационные затраты, процентная ставка, цена), производительность перерабатывающего комплекса и карьера по руде, спрос и предложение.

Принятие решения об отнесении горной массы, извлекаемой в карьере, к вскрыше или руде целесообразно проводить, учитывая бортовое содержание, которое установлено по граничным затратам, при которых эксплуатационные затраты покрываются за счет реализации руды с граничным содержанием полезных компонентов.

### **3.3 Анализ чувствительности и выявление наиболее значимых факторов при расчете ЧДД и БС**

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. Данный анализ является одним из инструментов анализа и управления рисками при реализации инвестиционных проектов в горнодобывающей области.

Для снижения рисков при реализации проекта необходимо установить, какие параметры могут критически повлиять на технико-экономические показатели работы горно-обогатительного комплекса. Знание этих факторов позволяет снизить неопределенность при планировании горных работ, в частности, при формировании рабочей зоны глубоких рудных карьеров.

Одним из технико-экономических параметров, определяющих размеры рабочей зоны глубоких рудных карьеров, является бортовое содержание. В контексте исследования БС – это показатель, позволяющий разделить горную массу на вскрышные породы и руду [19, 24].

При определении границ карьеров с помощью различных программных средств, как правило, большое значение имеет величина БС, позволяющая оценить изменение объемов вскрышных и добычных работ.

Целью данного исследования является анализ чувствительности и выявление группы параметров с наибольшей степенью влияния на БС и ЧДД.

В рамках исследования поставлены следующие задачи:

1. Анализ чувствительности параметров БС.
2. Анализ чувствительности параметров ЧДД.
3. Анализ эластичности параметров БС и ЧДД.
4. Выявление факторов, в меньшей, средней и большей степени влияющих на БС и ЧДД.

Метод исследований включает два основных блока: проведение моделирования методом Монте-Карло для расчета БС; проведение моделирования методом Монте-Карло для расчета ЧДД.

Анализ чувствительности БС проводится при поочередном изменении параметров (3.4):

$$\alpha_p = \frac{[(Z_d + Z_{п.р} + Z_{кос.р}) + K_B \cdot (Z_{вск} + Z_{п.п} + Z_{кос.п})]}{[\varepsilon \cdot (Ц - R)]} \quad (3.4)$$

где  $Z_d$ ,  $Z_{п.р}$ ,  $Z_{вск}$ ,  $Z_{п.п}$  – текущие удельные эксплуатационные затраты соответственно на добычу, на переработку руды, на вскрышу, на переработку горной породы, руб./т;

$Z_{кос.р}$ ,  $Z_{кос.п}$  – косвенные удельные затраты соответственно на добычу и переработку руды, на удаление и переработку горной породы, руб./т;

$\varepsilon$  – извлечение полезного компонента из руды, %;

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

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

$K_B$  – эксплуатационный коэффициент вскрыши, т/т.

Целью анализа чувствительности ЧДД является проверка степени влияния БС на технико-экономические показатели работы карьера. Как правило, БС имеет значительное влияние на технико-экономические показатели работы системы-карьер, однако необходимо выразить эту зависимость численно, используя в качестве объекта анализа преобразованную формулу расчета ЧДД.

В качестве исходных данных принимаются значения, приведенные в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры для расчета БС при анализе чувствительности (составлено автором)

| Показатель    | Размерность | Среднее значение | Величина прироста |
|---------------|-------------|------------------|-------------------|
| $Z_d$         | тыс. руб./т | 6                | 1 %               |
| $Z_{п.р}$     | тыс. руб./т | 8                | 1 %               |
| $Z_{вск}$     | тыс. руб./т | 9                | 1 %               |
| $Z_{п.п}$     | тыс. руб./т | 6                | 1 %               |
| $Z_{кос.р}$   | тыс. руб./т | 3                | 1 %               |
| $Z_{кос.п}$   | тыс. руб./т | 2                | 1 %               |
| $\varepsilon$ | %           | 65               | 1 %               |
| $Ц$           | тыс. руб./т | 79               | 1 %               |
| $R$           | тыс. руб./т | 2                | 1 %               |
| $K_B$         | т/т         | 2.2              | 1 %               |

Стандартно величина ЧДД определяется по формуле (3.5)

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T_u} K \cdot (1+E)^t, \quad (3.5)$$

Разность между экономическими эффектами и затратами может быть переопределена по формуле 3.6:

$$(R_t - Z_t) = A_p \cdot (Ц - C), \quad (3.6)$$

Эксплуатационные затраты на добычу полезного ископаемого определяются по формуле 3.7:

$$Z_d = Z_{Д} + Z_{П.Р} + Z_{КОС.Р}, \quad (3.7)$$

Эксплуатационные затраты на проведение вскрышных работ определяются по формуле 3.8:

$$Z_e = Z_{ВСК} + Z_{П.П} + Z_{КОС.П}, \quad (3.8)$$

Таким образом, себестоимость выемки блока руды может быть определена по формуле 3.9:

$$C = Z_d + K_B \cdot Z_e, \quad (3.9)$$

Таким образом, функция бортового содержания может быть выражена через формулу 3.10:

$$\alpha_p = \frac{C}{[\varepsilon \cdot (Ц - R)]} \quad (3.10)$$

Тогда себестоимость может быть выражена по формуле 3.11:

$$C = \alpha_p \cdot \varepsilon (Ц - R), \quad (3.11)$$

Таким образом, ЧДД, с учётом формул 3.6 – 3.11, может быть выражено следующим образом (формула 3.12):

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T A_p \cdot (Ц - \alpha_p \cdot \varepsilon (Ц - R)) \frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T_u} K \cdot (1+E)^t, \quad (3.12)$$

где  $R_t$  – эффекты, достигаемые на  $t$ -ом шаге расчета;

$Z_t$  – затраты на  $t$ -ом шаге расчета;

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

$Ц$  – цена руды, руб./т;

$E$  – ставка дисконтирования, %;

$K$  – начальные капиталовложения, млн. руб.;

$K_B$  – эксплуатационный коэффициент вскрыши, т/т;

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

$t$  – шаг расчета, принимаемый равным одному году работы карьера.

Исходные данные для проведения анализа чувствительности приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры для расчета ЧДД при проведении анализа чувствительности (составлено автором)

| Показатель    | Размерность | Среднее значение                     | Величина прироста                    |
|---------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Ц             | тыс. руб./т | 79                                   | 1 %                                  |
| $\alpha_p$    | %           | Согласно расчетам БС при изменении Ц | Согласно расчетам БС при изменении Ц |
| $\varepsilon$ | %           | 65                                   | 1 %                                  |
| R             | тыс. руб./т | 2                                    | 1 %                                  |
| K             | млн.руб.    | 1600                                 | 1 %                                  |
| E             | %           | 12                                   | 1 %                                  |
| $A_p$         | млн.т/год   | 1,7                                  | 1 %                                  |

Для проведения моделирования изменения БС и ЧДД была создана база исходных данных с изменением каждого из параметров по 100 раз.

Для оценки степени влияния параметров расчета на конечный результат используется формула расчета эластичности параметров [79] (формула 3.13):

$$\varepsilon = \frac{100}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta y_i \cdot x_i}{\Delta x_i \cdot y_i} \quad (3.13)$$

где  $n$  – число точек рассматриваемых вариантов аргумента;

$y_i$  – значение функции в  $i$ -й точке;

$\Delta y_i$  – приращение функции в  $i$ -й точке;

$x_i$  – значение аргумента в  $i$ -й точке;

$\Delta x_i$  – приращение аргумента в  $i$ -й точке.

Для получения графика зависимости изменения БС от поочередного изменения параметров расчета производится моделирование методом Монте-Карло. Для упрощения расчетов цикл ограничивается до 100 итераций [19].

На рисунке 3.2 представлен график зависимости изменения БС от изменения параметров расчета.

Результаты проведения анализа эластичности приведены на рисунке 3.3.

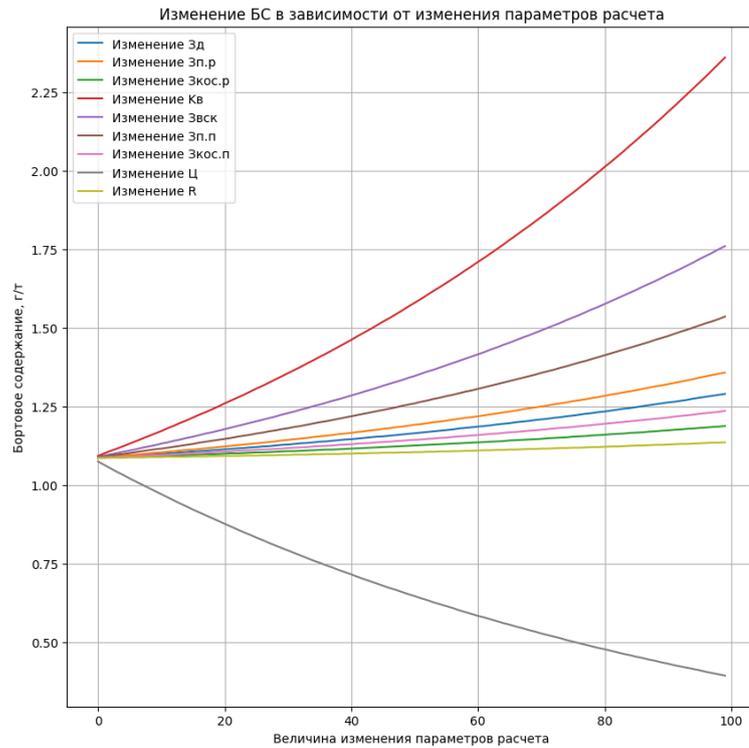


Рисунок 3.2 - График зависимости изменения БС от поочередного изменения параметров расчета (составлено автором)

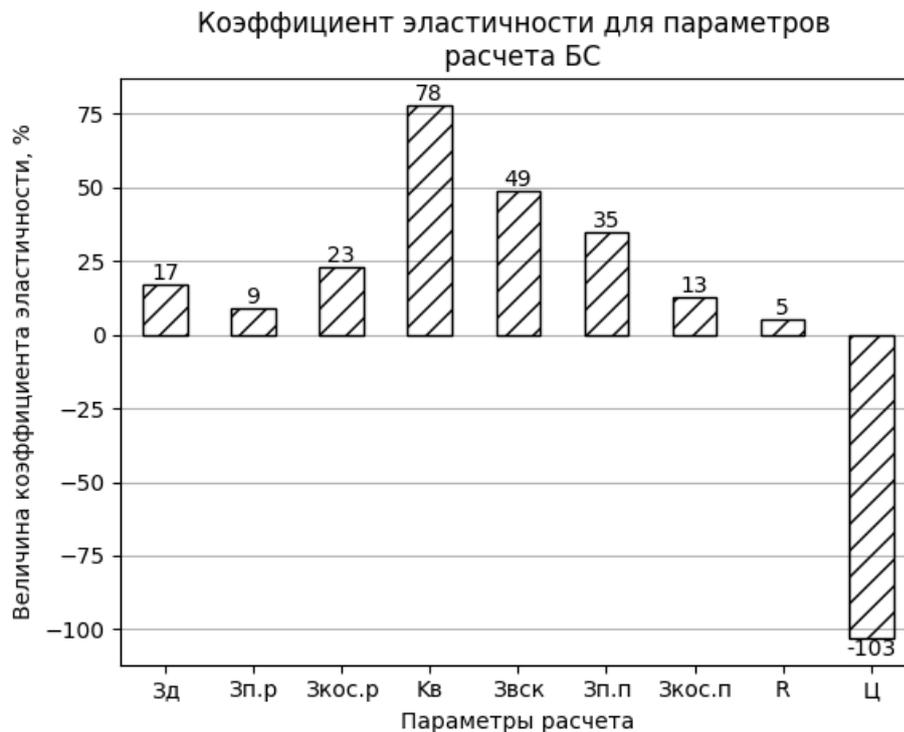


Рисунок 3.3 – Гистограмма результатов определения коэффициента эластичности для параметров расчета БС (составлено автором)

В ходе анализа эластичности выявлены группы факторов, влияющих на БС (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Группы факторов, влияющих на БС (составлено автором)

| Степень влияния на БС | Параметр расчета   |
|-----------------------|--|
| Низкая                | Текущие удельные эксплуатационные затраты на добычу ( $Z_d$ )<br>Текущие удельные эксплуатационные затраты на переработку руды ( $Z_{п.р}$ )<br>Косвенные удельные затраты на добычу и переработку руды ( $Z_{кос.р}$ )<br>Удельные затраты на маркетинг ( $R$ ) |
| Средняя               | Текущие удельные эксплуатационные затраты на вскрышу ( $Z_{вск}$ )<br>Текущие удельные эксплуатационные затраты на переработку породы ( $Z_{п.п}$ )<br>Косвенные удельные затраты на удаление и переработку породы ( $Z_{кос.п}$ )                               |
| Высокая               | Коэффициент вскрыши ( $K_v$ )<br>Цена конечного продукта на рынке минерального сырья ( $\Pi$ )   |

На рисунке 3.4 представлен график зависимости изменения ЧДД от параметров расчёта.

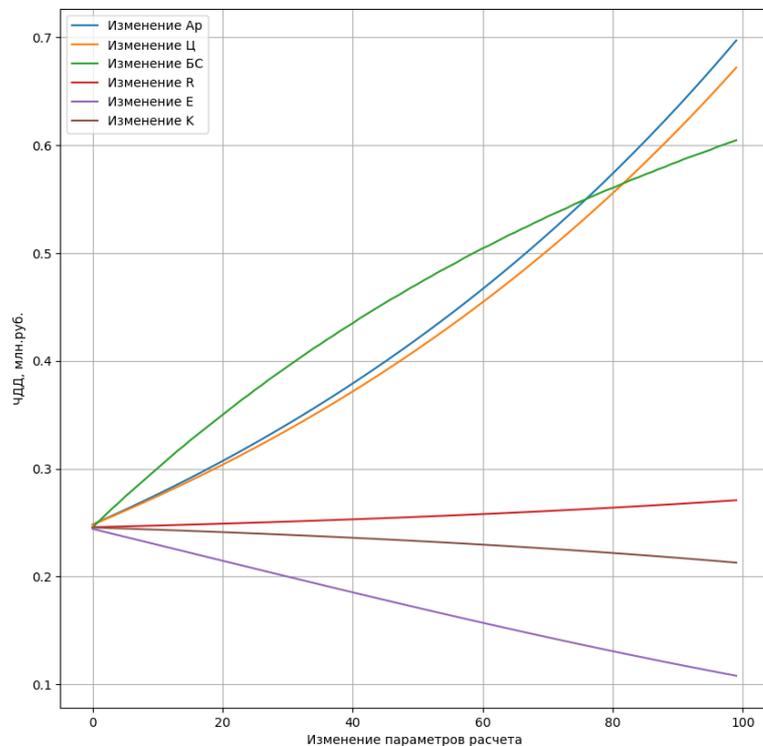


Рисунок 3.4 – График зависимости изменения ЧДД от поочередного изменения параметров расчета (составлено автором)

Результаты анализа коэффициента эластичности параметров расчета ЧДД представлены на рисунке 3.5.

В ходе анализа чувствительности БС и ЧДД выявлено, что на технико-экономические показатели работы системы карьер в наибольшей мере влияют следующие факторы: цена на конечный продукт, бортовое содержание, коэффициент извлечения и коэффициент вскрыши [19].

Доказано, что БС имеет высокую степень влияния на ЧДД. Это говорит о том, что БС 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, в частности на ЧДД.

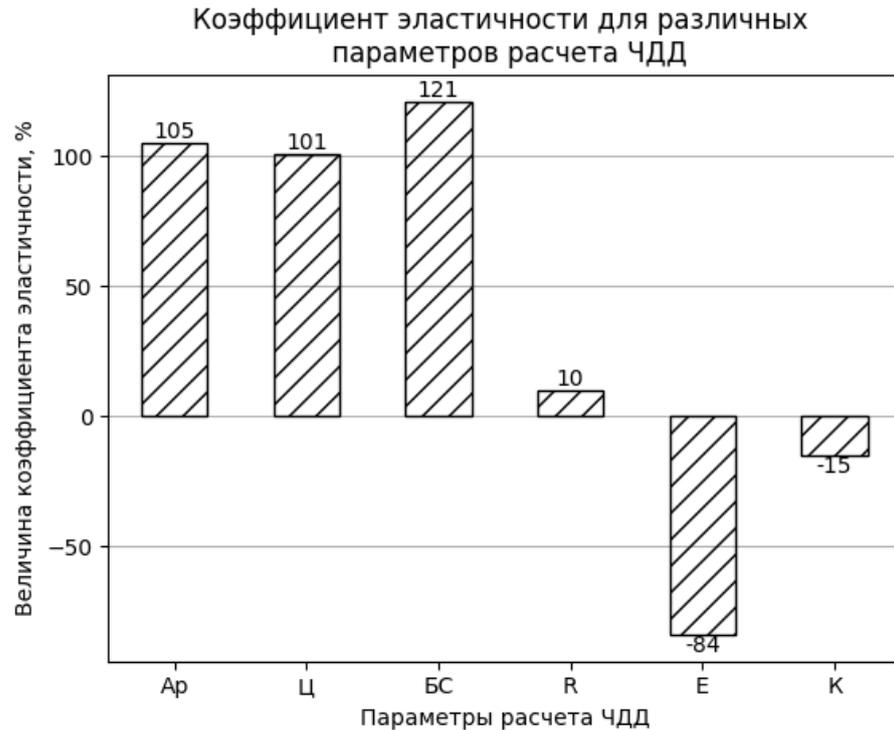


Рисунок 3.5 – Гистограмма результатов расчета коэффициента эластичности для параметров расчета ЧДД (составлено автором)

Используя метод экспертных оценок, полученные данные разбиваются на категории по степени влияния на ЧДД (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Категории факторов, влияющих на ЧДД (составлено автором)

| Степень влияния на ЧДД | Параметр расчета                   |
|------------------------|------------------------------------|
| Низкая                 | Затраты на маркетинг (R)           |
|                        | Начальные капиталовложения (К)     |
| Средняя                | Ставка дисконтирования (E)         |
| Высокая                | Производительность (Ар)            |
|                        | Цена (Ц)                           |
|                        | Бортовое содержание ( $\alpha_p$ ) |

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. Это позволит в ходе реализации проекта отслеживать текущее

положение проекта относительно двух сценариев, с целью выявления негативных трендов и их нивелирования на ранних стадиях. Также это позволит разработать план организационно-технических мероприятий на случай наступления пессимистичного сценария и избежать негативных последствий или, как минимум, снизить их влияние на технико-экономические показатели работы глубоких рудных карьеров [19, 20, 39].

### **3.4 Оценка надёжности принимаемых организационно-технических и проектных решений**

Принимаемые решения по управлению горным производством должны обеспечивать рентабельность предприятия в течение всего времени его функционирования, и поэтому они должны обладать определенной устойчивостью к изменениям внешних условий. Планирование основывается на различных прогнозных оценках перспективного развития ситуации на рынке минерального сырья, изменениях факторов, связанных с деятельностью горного предприятия. Точность таких прогнозов относительна.

Более низкий уровень надёжности планирования реализации проектов горнодобывающих предприятий объясняется следующими причинами:

1. Горно-геологические исходные данные носят стохастический характер. Уменьшение неопределённости, вызванной этими данными, может быть достигнуто проведением детальной разведки. Однако это связано с ростом затрат на геологоразведочные работы. Суммарные затраты на начальную разведку и последующие возможные ущербы от неподтверждения запасов должны быть минимальными.

2. Недостаточно квалифицированное проведение экспертиз проектной документации.

3. Ошибки в прогнозировании ситуаций на сырьевых рынках, финансовых рынках, общеполитической ситуации.

4. Отсутствие системы проверки устойчивости показателей реализации проекта в случае изменений внешних условий.

«Наиболее предпочтительными вариантами проектных решений являются те,

которые легче адаптируются к возможным изменениям внешней среды. Адаптируемость и величина одноименных затрат у разных вариантов проекта может быть различной. Более предпочтительными могут оказаться проекты и их варианты даже с более высокими прямыми издержками, но с небольшими адаптационными затратами, т.е. решения с большими возможностями гибкой подстройки к изменяющимся внешним условиям» [45].

Надежность реализации принимаемых решений резко снижается с увеличением периода прогнозирования. Делать реалистичные прогнозы более чем на 15 лет нецелесообразно. Обычно план отработки глубокого рудного карьера не делают на все время его существования, а это, как правило, больше 20 лет; правильнее ограничить расчеты периодом отработки одного-двух этапов.

Оценку чувствительности расчетного эффекта к различного рода отклонениям исходных данных, принятых для первоначального расчета, можно осуществить с помощью вариантов сценариев осуществления проекта в более неблагоприятных условиях, или предполагая изменение технологических характеристик оборудования, количественных, качественных и геометрических параметров рудных залежей, цен на полезное ископаемое, затраты и т.д. Важно определить границу зоны эффективности реализации проекта и разработать организационные рекомендации и возможные сценарии. «Рациональное распределение объемов вскрышных работ по периодам разработки, уменьшение первоначального объема горно-капитальных работ позволяют снизить общие затраты на разработку месторождения на 10 - 15%. Вместе с тем способ разработки месторождения этапами вызывает необходимость дополнительных затрат на формирование и последующую расконсервацию временно нерабочего борта» [44, 79].

Переход к еще одному шагу разработки карьера активизирует потребность выполнения его перестройки. Поэтому нужно тщательно исследовать алгоритм организационных работ, сохраняющий определенную производственную мощность предприятия.

Сценарии ситуации на рынке минерального сырья целесообразно оценивать

с использованием стандартной марковской цепи для анализа тренда изменения цены. Марковская цепь для анализа тренда представляет собой стационарное распределение вероятностей, выраженное в виде матрицы состояний (3.14):

$$P(\text{trend}) = \begin{Bmatrix} 0,52 & 0,48 \\ 0,6 & 0,4 \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

Визуализация данного распределение выполнена на рисунке 3.6. Данные для формирования стационарного распределения извлекаются из анализа рынка минерального сырья методом Хольта-Винтерса (см. раздел 2.3).

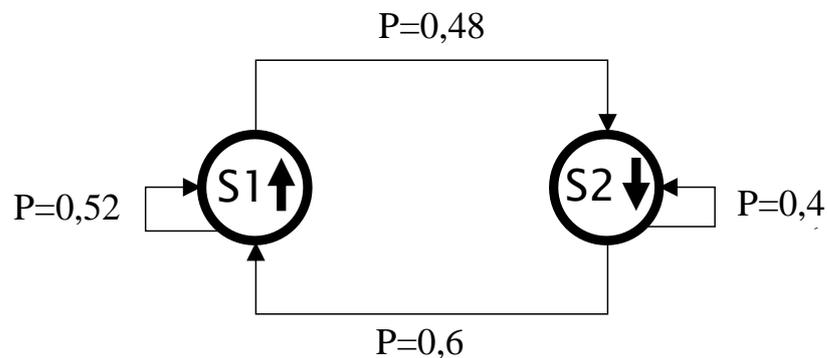


Рисунок 3.6 – Марковская цепь изменения тренда изменения цен на рынке минерального сырья (S1 – состояние, характеризующееся восходящим трендом, S2 – состояние, характеризующееся нисходящим трендом) (составлено автором)

На рисунке 3.6 показаны вероятностей перехода системы из одного состояние в другое. Как видно, если текущее состояние S1, то вероятность перехода системы в это же состояние равняется 0,52, при этом вероятность перехода из S1 в S2 равняется 0,48. Если текущее состояние S2, то вероятность перехода системы в это же состояние составит 0,4, а вероятность перехода из S2 в S1 составит 0,6. На базе анализа марковской цепи по рынку минерального сырья можно принимать дальнейшие проектные решения по формированию рабочей зоны глубоких рудных карьеров для сценария падения или повышения цен. Вероятность перехода из одного состояние в другое можно охарактеризовать надежностью принимаемых проектных решений.

Сценарий развития горных работ и прогнозирование ситуации на рынке минерального сырья на примере падения цены на рынке минерального сырья представлен на блок-схеме (рисунок 3.7).

При понижении цен на рынке сырья, для целесообразной отработки месторождения, необходимо снизить капитальные и эксплуатационные затраты, уменьшить производительность, изменить систему разработки или временно законсервировать работу предприятия до более позитивных внешних условий. А также снизить текущий коэффициент вскрыши.



Рисунок 3.7 – Блок-схема прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья при падении цен на сырье (составлено автором)

Сценарий развития горных работ и прогнозирование ситуации на рынке минерального сырья на примере повышения цены на рынке минерального сырья представлен на блок-схеме (рисунок 3.8). При повышении цен на рынке минерального сырья необходимо увеличивать производительность карьера, капитальные и эксплуатационные затраты, вовлечь в отработку блоки горной массы, которые по экономическим причинам были временно законсервированы при падении цен на рынке минерального сырья (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Блок-схема прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья при повышении цен на сырье (составлено автором)

### 3.5 Выводы по Главе 3

1. Бортовое содержание полезных компонентов в добываемой руде должно учитывать текущие эксплуатационные затраты на добычу, вскрышу и переработку добываемого минерального сырья, а также текущий коэффициент вскрыши, что позволит на этапе построения экономически целесообразной оболочки карьера учесть разнос бортов при проектировании схемы вскрытия, проходке вскрывающих полутраншей и системы капитальных съездов.

2. Принятие решений об оптимальном бортовом содержании неизбежно сопровождается рыночными и специфическими рисками, которые могут быть нивелированы путем моделирования различных сценариев развития внешних условий реализации проекта методом Монте-Карло, для возможности своевременного и оперативного реагирования на изменение внешних факторов и разработки комплекса мероприятий для формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров при реализации наиболее вероятного сценария.

3. Анализ чувствительности ЧДД показал, что цена на конечный продукт, бортовое содержание полезного компонента в руде, 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 извлечения составляет 78 и - 103 % соответственно).

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

5. Для принятия проектных решений по формированию рабочей зоны глубоких рудных карьеров и оценки надежности проектных решений целесообразно использовать стационарное распределение, характерное для марковского процесса изменения тренда цен на рынке минерального сырья.

## ГЛАВА 4 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ НА ПРИМЕРЕ МЕДНОРУДНОГО КАРЬЕРА

### 4.1 Описание существующих проектных решений по границам карьера

Предлагаемые методы формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде целесообразно использовать в условиях разработки крутопадающих сложноструктурных рудных месторождений. Одним из таких месторождений является Михеевское, для горно-геологических и горно-технических условий которого описано применение разрабатываемых методов.

В данном разделе приведена краткая геологическая характеристика объекта и описание технологии отработки данного месторождения.

Михеевское месторождение медно-порфировых руд входит в состав Михеевского рудного района Новониколаевско-Тарутинской рудной зоны. Новониколаевско-Тарутинская рудная зона локализована в пределах Катенинской грабен-синклинали, сформировавшейся в западном обрамлении Зауральского поднятия и ограниченной с запада Тарутинско-Джетыгаринским, а с востока – Новопокровским разломами. Катенинская грабен-синклиналь сложена вулканогенно-осадочными образованиями верхнего девона – нижнего карбона и эффузивами нижнего-среднего девона и нижнего карбона. Её протяженность, более 60 км.

Михеевское рудное поле протяженностью 20 км занимает треть длины Катенинской грабен-синклинали при ширине до 7 – 8 км. Для него характерна линейно-блоковая структура, созданная сетью разнонаправленных разломов, с развитием в блоках линейных складок меридионального простирания, осложненных сдвиговыми деформациями. Среди разломов выделяются системы нарушений меридионального направления (Новониколаевский разлом), северо-северо-восточного простирания (Михеевский, Западноульяновский разломы), диагональные и широтные.

Михеевское месторождение было прослежено по простиранию на 2900 м при ширине 200-500 м. Предполагалось, что основной магмо-рудолокализирующей

структурой является Михеевская тектоническая зона С-СВ простирания, крутопадающая на восток под углом 70-80° и определяющая локализацию дайковых и рудных тел. Было установлено, что оруденение большей частью приурочено к вулканитам и вулканогенно-осадочным породам, вмещающим малые тела гранитоидов, реже – к дайкам диоритов. На месторождении были выделены три обособленных штокверковых блока: Северный, Центральный и Южный, различающихся содержаниями полезных компонентов.

По сложности инженерно-геологических условий территория Михеевского месторождения медно-порфировых руд соответствует III категории. По сложности инженерно-геологических условий месторождение относится к типу 3б – месторождения средней категории: двухэтажное строение с преимущественным развитием дислоцированных, трещиноватых, с наличием зон дробления и выветривания скальных пород [33].

По условиям залегания, морфологии, степени выдержанности качества оруденения, характеру распределения содержаний меди и масштабу оруденения Михеевское месторождение отнесено ко 2-ой группе сложности геологического строения.

Согласно принятой технологии отработки месторождения вскрытие карьерного поля осуществляется капитальной внешней и внутренней траншеями, находящимися в северо-восточной части карьерной выемки, и последующей отработкой горизонтов. При этом производится разнос бортов карьера таким образом, чтобы существовала возможность вскрытия новых горизонтов без нарушения технологии ведения строительных работ.

Открытые горные работы ведутся по циклической технологии с буровзрывной подготовкой горной массы к выемке. Для обеспечения высоких темпов ведения горных работ предусматривается применение выемочно-погрузочного оборудования большой единичной мощности.

На вскрышных работах принята циклическая технология ведения работ, схемы комплексной механизации: экскаватор – автосамосвал и колесный погрузчик – автосамосвал.

Для подготовки скальной горной массы к выемке принят буровзрывной способ рыхления.

Углы откоса бортов карьера в конечном положении в целом по карьере составляют до 55-60°.

Высота рабочего уступа определена исходя из рабочих параметров выемочно-погрузочного оборудования, технологии отработки месторождения и свойств пород, слагающих месторождение, требований правил безопасности. Работа экскаваторов по развалу горной массы предусматривается продольными и поперечными заходками нормальной и минимальной ширины, в зависимости от горно-технологических условий на участке производства работ. Погрузчики осуществляют выемку - погрузку рыхлой вскрыши, окисленных и вторичных руд, а также, при необходимости, выполняют вспомогательные работы в рабочей зоне карьера.

Согласно принятым технологическим решениям, выемку горной массы погрузчики осуществляют слоями, соответственно высотой 5 и 7,5 м для 10- и 15-метровых уступов. Проектными решениями приняты следующие параметры системы разработки:

- высота рабочего уступа: по рыхлым породам 10 м; по скальным породам 15 м;
- угол рабочего уступа 60 – 75°;
- высота уступа при погашении 30 м;
- угол откоса уступа при погашении: по рыхлым породам – 40 – 50°; по скальным породам 60 – 70°;
- ширина предохранительной бермы 10 м;
- ширина рабочей площадки в рыхлых породах 57 м;
- минимальная ширина рабочей площадки в скальных породах (отработка поперечными заходками) 51,5 м;
- ширина рабочей площадки в скальных породах (отработка продольными заходками) 85 м;
- ширина двухполосной транспортной бермы 36 – 42 м;

- ширина однополосной транспортной бермы 22,5 м;
- ширина транспортной бермы с конвейерной трассой 20 м;
- руководящий уклон автодороги 80 %;
- длина активного фронта работ на 1 экскаватор 448 м.

Контур карьера в конце отработки проектом определен из условия вовлечения всех балансовых запасов в отработку. В контур карьера включены запасы окисленной руды и большая часть запасов первичной руды, также предусмотрена отработка всех запасов вторичной руды (забалансовая руда).

В границы карьерного поля входят запасы окисленных, рыхлых и первичных руд Михеевского месторождения, обрабатываемые Главным карьером с максимальной глубиной отработки до 260 м и обрабатываемые Южным карьером с максимальной глубиной отработки до гор. +115м. К балансовым относятся окисленные и первичные сульфидные руды, к забалансовым отнесены окисленные, рыхлые и первичные сульфидные руды.

Михеевское месторождение вскрыто четырьмя капитальными траншеями:

- две траншеи внутреннего заложения на восточном борту карьера используются для проезда автомобильного транспорта с гор. +250,0 м на отвал вскрышных пород и к складу окисленных руд;
- одна траншея внутреннего заложения используется для размещения рудного конвейера с гор. +220,0 м;
- одна траншея внешнего заложения является вспомогательной и обеспечивает проезд транспортных средств из карьера с гор. +220,0 м до промплощадки.

На восточном борту карьера на гор. +220,0 м и +250,0 м располагается площадка дробильно-конвейерного комплекса, используемого для дробления добытой руды и подачи ее на конвейер и далее на склад руды вблизи обогатительной фабрики.

Грузотранспортный доступ на рабочие площадки обеспечивается с использованием временных автомобильных съездов.

Вскрышные породы транспортируются на отвалы, расположенные к востоку от карьера. Попутно добываемые забалансовые окисленные руды складированы на площадке между обогатительной фабрикой и отвалом рыхлых вскрышных пород.

#### **4.2 Применение метода формирования рабочей зоны карьеров эффективным управлением бортовым содержанием для условий разработки полиметаллического месторождения**

Одной из задач исследования является разработка методов формирования рабочей зоны глубоких карьеров по разработке сложноструктурных рудных месторождений эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов в добываемой руде. Данный метод отличается от существующих технических решений, касающихся определения границ карьеров.

Область применения разрабатываемого метода в рамках исследования ограничивается сложноструктурными рудными крутопадающими месторождениями, которые обрабатываются глубокими карьерами. Стоит отметить, что данный метод также может быть применен при формировании границ карьеров по разработке рудных месторождений несложной структуры.

Идея предлагаемого метода заключается в определении наиболее вероятного сценария развития внешних условий реализации проекта в будущем, основываясь на изменении технико-экономических и геологических факторов. В качестве параметра оптимизации границ карьеров используется БС, которое определяет объемы вскрышных пород и полезного ископаемого, вовлекаемые в разработку на определенный период времени.

Разработанный метод может быть использован при проектировании границ карьеров Михеевского ГОКа и карьеров-аналогов. При разработке месторождения предлагается формировать рабочую зоны карьера в зависимости от текущей и прогнозной ситуации на рынке минерального сырья и геологической изученности месторождения.

Эффективность ситуативно-адаптивного метода формирования рабочей зоны карьеров управлением бортовым содержанием, с учетом стохастического характера исходных геологических и экономических данных, может быть оценена

в ретроспективном расчете бортового содержания полезных компонентов для современных горнотехнических и горно-геологических условий. В расчете производится допущение, что цена на 2025 год не известна [42, 47, 48].

На первом шаге исследования генерируются сценарии на базе данных по ежемесячным ценам на минеральное сырье.

Наиболее вероятный сценарий находится в диапазоне (+, -) одного стандартного отклонения от среднего. За пределами диапазона – сценарий менее вероятный. Для разделения на оптимистичный и пессимистичный сценарии используется правило: если сценарий находится в диапазоне от минус одного отклонения до среднего – этот сценарий является оптимистичным. Наоборот, если сценарий находится справа от среднего – этот сценарий признается пессимистичным. Автором был оценен прогнозный сценарий на 2025 год. Для этого представим распределение бортовых содержаний полезных компонентов в виде гистограммы (рисунок 4.1).

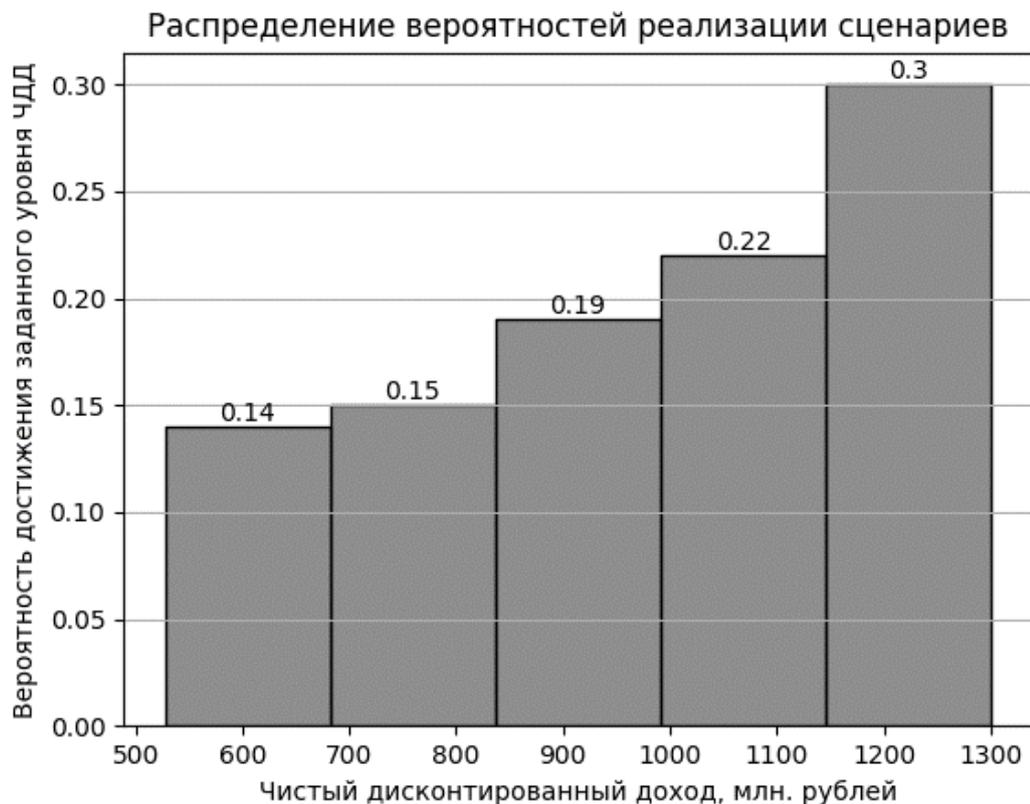


Рисунок 4.1 – Гистограмма распределения бортовых содержаний для определения принадлежности сценария (составлено автором)

Анализ данных, представленных на рисунке 4.2, позволяет сделать вывод, что прогнозный сценарий на 2025 год находится в диапазоне наиболее вероятных значений и является оптимистичным.

Также целесообразно представить на графике 4.2 данные, относящиеся к пессимистичному сценарию, основываясь на графике изменения цен на минеральное сырье. В данном случае пессимистичный сценарий может реализоваться при снижении цены на рынке минерального сырья на протяжении 5 лет.

С целью перманентной корректировки математической модели необходимо оценивать результаты прогноза по сравнению с фактическим значением. Для этого целесообразно сформировать и ежегодно пополнять базу данных, содержащую прогнозные и фактические исходные данные, что позволит корректировать прогнозную модель и получать наиболее достоверные данные.

Однако важно понимать, что последнее решение всегда будет за специалистом, экспертом, лицом, принимающим проектные решения. Данные, полученные при реализации математической прогнозной модели, являются лишь рекомендациями и предложены без учета множества других объективных и субъективных факторов.

Набор сценариев развития внешних условий реализации проекта: оптимистичный, прогнозный и пессимистичный – в дальнейшем может быть использован для решения оптимизационных задач по определению оптимальных границ карьеров.

Параметры сценариев определялись путем ретроспективного прогноза на 2025 год. Для чистоты эксперимента в прогнозную модель не закладывались поправочные коэффициенты, способные привести результат прогнозирования к значениям, максимально близким к фактическим [42, 47, 48].

Характеристики возможных реализуемых сценариев развития внешних условий реализации проекта приведены в таблице 4.1.

По результатам расчета бортового содержания для различных сценариев видно, что прогнозный и оптимистичный сценарии по значениям БС и цены на меднорудное сырье находятся практически на одном уровне.

Таблица 4.1 – Параметры пессимистичного, оптимистичного и прогнозного сценариев развития внешних условий реализации проекта (составлено автором)

| Вид сценария/<br>Параметр сценария         | Оптимистичный | Пессимистичный | Прогнозный |
|--|---------------|----------------|------------|
| Цена на минеральное сырье,<br>тыс. руб./т. | 178           | 93             | 186        |
| Бортовое содержание, %                     | 0,62          | 0,92           | 0,60       |

Разница в экономически оптимизированных оболочках карьеров для пессимистичного и оптимистичного сценариев может быть оценена по рисунку 4.2.

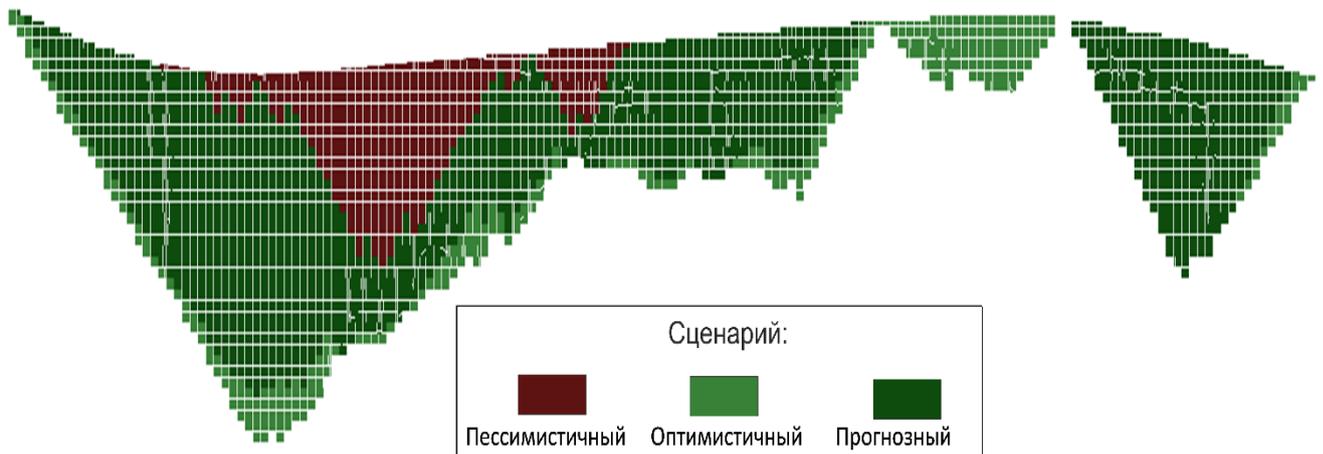


Рисунок 4.2 – Разница в объемах добываемой руды при реализации пессимистичного и прогнозного сценариев развития внешних условий реализации проекта (составлено автором)

Для визуализации контуров карьера для различных сценариев предлагается отстроить экономические оболочки карьера с заданными величинами затрат, цен на минеральное сырье и бортового содержания. Для этого используется оптимизационный алгоритм Лерча-Гроссмана, как метод, позволяющий отстроить оболочку карьера на основе трехмерной блочной модели [42, 47, 48].

Объемы горной массы для экономических оболочек после оптимизации приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сравнение тоннажа горной массы при различных сценариях развития внешних условий реализации проекта (составлено автором)

| Вид сценария/<br>Параметр сценария         | Оптимистичный | Пессимистичный | Прогнозный |
|--|---------------|----------------|------------|
| Цена на минеральное сырье,<br>тыс. руб./т. | 178           | 93             | 186        |
| Бортовое содержание, %                     | 0,62          | 0,92           | 0,60       |
| Тоннаж медной руды, тыс. т                 | 2 894,6       | 625,6          | 2 673,5    |

Результаты расчетов, приведенные в таблице 4.2, показывают, что тоннаж полезного ископаемого для прогнозного сценария лежит в диапазоне между пессимистичным и оптимистичным. Очевидно, что прогнозный сценарий лежит в области оптимистичного варианта, так как цена и тоннаж руды для прогнозного сценария по значениям находятся близко к значениям для оптимистичного сценария (рисунок 4.3).

Также по данным оболочкам определена отметка дна карьера для восточного участка месторождения (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Сравнение тоннажа горной массы при различных сценариях развития внешних условий реализации проекта для восточного участка месторождения (составлено автором)

| Сценарий       | Бортовое содержание, % | Абсолютная отметка дна<br>карьера, м |
|----------------|------------------------|--------------------------------------|
| Пессимистичный | 0,92                   | +180                                 |
| Оптимистичный  | 0,62                   | - 60                                 |
| Прогнозный     | 0,60                   | +15                                  |

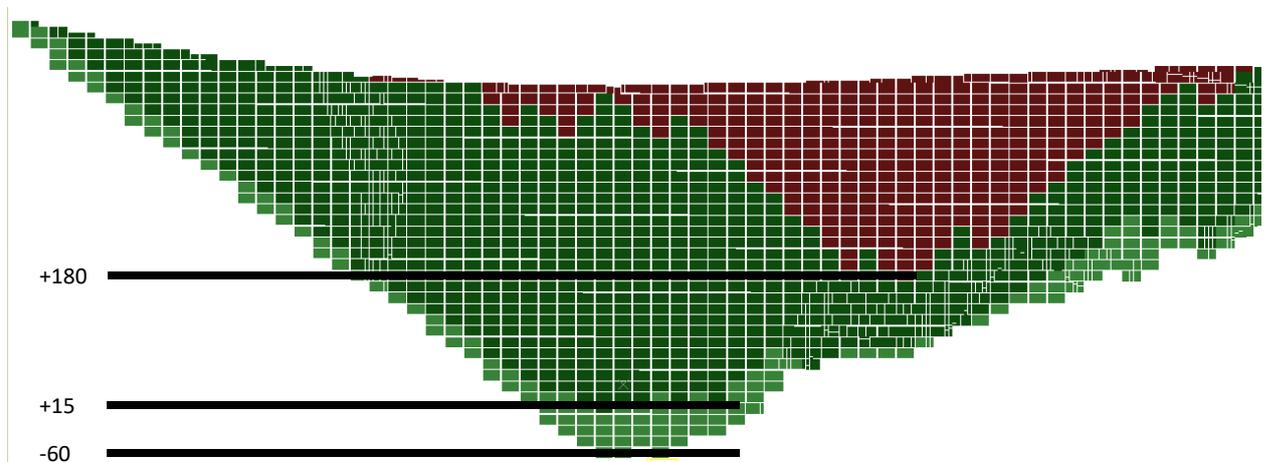
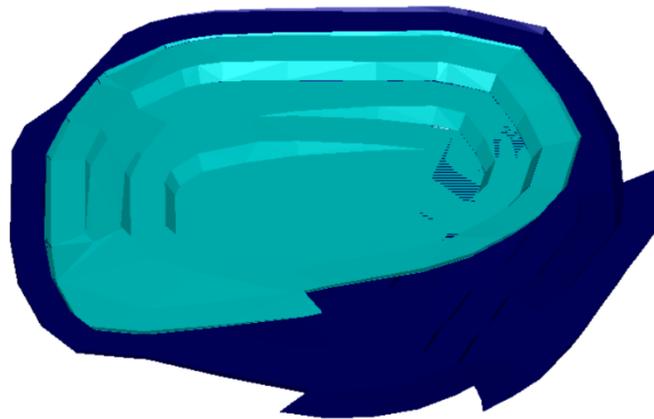


Рисунок 4.3 – Определение абсолютной отметки дна восточной части карьера (составлено автором)

По результатам расчетов и оптимизации границ карьеров рекомендуется разработать комплекс организационно-технических мероприятий для реализации прогнозного сценария. Рекомендуется проработать комплекс мероприятий на случай форс-мажорных обстоятельств, препятствующих реализации прогнозного сценария. При резком понижении цен на рынке минерального сырья прогнозный сценарий может быть не применим, тогда необходимо принимать решения по переходу на пессимистичный сценарий работы системы карьер на период кризиса.

По результатам оптимизации в рамках реализации прогнозного сценария можно выявить приоритетные направления развития рабочей зоны карьера на последующий период отработки карьера (рисунок 4.4).

а)



б)

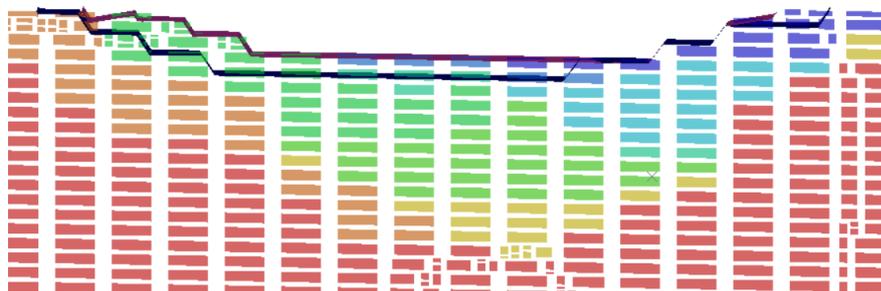


Рисунок 4.4 – Определение формы рабочей зоны с выявлением приоритетных направлений развития в плане и по глубине (а – модель развития рабочей зоны карьеров по простиранию и глубине, б – разрез модели развития рабочей зоны карьера) (составлено автором)

### 4.3 Оценка эффективности принимаемых проектных решений о границах карьера

Принимаемые решения по управлению горным производством должны обеспечивать рентабельность работы предприятия в течение всего времени его функционирования, и поэтому они должны обладать определенной устойчивостью к изменениям внешних условий. Планирование основывается на различных прогнозных оценках перспективного развития ситуации на рынке минерального сырья, изменениях факторов, связанных с деятельностью горного предприятия. Точность таких прогнозов относительна [42, 47, 48].

По результатам определения основных сценариев развития событий определяется экономическая эффективность принимаемых проектных решений.

Основным критерием оценки проекта является максимум чистого дисконтированного дохода. При условии, что ЧДД стремится к максимальным значениям, тогда проектное решение об изменении границ карьеров может быть рассмотрено и принято в корректировке технического проекта.

Для реализации расчета ЧДД принята ставка дисконтирования равная 15 %.

Оценка ЧДД в зависимости от принимаемых проектных решений о границах карьеров при реализации оптимистичного, пессимистичного или прогнозного сценариев отражена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчёта чистого дисконтированного дохода для различных сценариев развития внешних условий реализации проекта (составлено автором)

| Сценарий       | Пессимистичный | Оптимистичный | Прогнозный |
|----------------|----------------|---------------|------------|
| ЧДД, млн. руб. | 390            | 1178          | 1256       |

На рисунке 4.5 представлен график зависимости ЧДД от БС для различных сценариев развития внешних условий реализации проекта.

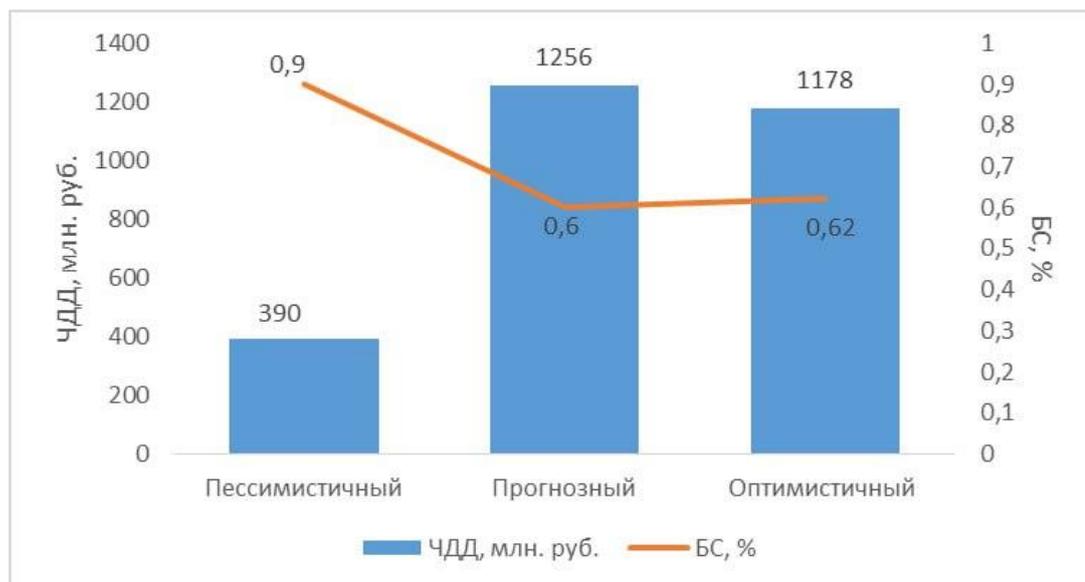


Рисунок 4.5 – График зависимости ЧДД от БС для различных сценариев развития внешних условий реализации проекта (составлено автором)

По результатам оптимизации и расчета ЧДД для трех сценариев можно сделать следующие выводы:

1. Прогнозный сценарий по значению ЧДД находится в пределах оптимистического, что дает возможность практически полной выемки руды в пределах горного отвода и установленной глубины карьера на конец отработки.
2. Пессимистичный сценарий имеет наименьшее ЧДД, что свидетельствует о повышенном риске реализации проекта в период падения цен на рынке минерального сырья.

#### 4.4 Выводы по Главе 4

1. По результатам расчетов и оптимизации границ карьеров рекомендуется разработать комплекс организационно-технических мероприятий для реализации прогнозного сценария. Следует проработать комплекс мероприятий на случай форс-мажорных обстоятельств, препятствующих реализации прогнозного сценария. При резком понижении цен на рынке минерального сырья прогнозный сценарий может быть не применим, и тогда необходимо принимать решения по переходу на пессимистичный сценарий работы системы-карьер на период кризиса.

2. Повышение эффективности проектных решений достигается за счет реализации прогнозного сценария развития рабочей зоны глубокого рудного

карьера характеризуется величиной бортового содержания, равной 0,6% и ЧДД, равного 1256 млн. рублей.

3. Анализ данных, представленных на рисунке 4.3, позволяет сделать вывод, что прогнозные показатели находятся в диапазоне наиболее вероятных значений и являются оптимистичными. Вероятность реализации прогнозного сценария формирования рабочей зоны для принятого уровня БС и цен на рынке минерального сырья составит 0,3, что на гистограмме распределения вероятностей достижения заданного уровня ЧДД является максимальным значением.

4. При реализации пессимистичного сценария ЧДД также будет больше нуля, что позволит вести отработку месторождения в кризисный период. Это позволит избежать временной консервации карьера и подготовить систему к реализации дальнейших прогнозных сценариев.

## 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 компонентов 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 характеризуется 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

|     |   |                                     |
|-----|---|-------------------------------------|
| LME | – | London metal                        |
| NPV | – | Net Present Value                   |
| ББС | – | Безубыточное бортовое содержание    |
| БС  | – | Бортовое содержание                 |
| ГКЗ | – | Государственная комиссия по запасам |
| ДК  | – | Динамические кондиции               |
| ЛПР | – | Лицо, принимающее решение           |
| ОФ  | – | Обогащительная фабрика              |
| ПО  | – | Программное обеспечение             |
| ТЭО | – | Технико-экономическое обоснование   |
| ЧДД | – | Чистый дисконтированный доход       |

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Агошков, М.И. Конструирование и расчеты систем и технологии разработки рудных месторождений. - М.: Наука, 1965. - 220 с.
2. Анистратов, Ю.И. Проектирование карьеров / Ю. И. Анистратов, К. Ю. Анистратов. - М.: Изд-во НПК "ГЕМОС Лимитед ", 2003. - 172 с.
3. Арсентьев, А.И., Холодняков, Г.А. Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений. М., Недра, 1994, 336 с.
4. Арсентьев, А.И. Законы формирования рабочей зоны карьера / А.И. Арсентьев. - Ленинград: Ленинградский горный ин-т., 1986. - 56 с
5. Арсентьев, А.И. Определение производительности и границ карьеров / А.И. Арсентьев. - Москва: Недра, 1970. - 320 с.
6. Артяева, М. А., Пономаренко, Т. В. Выбор стратегических альтернатив при развитии производственного потенциала в горно-металлургической компании //Управление экономическими системами: электронный научный журнал. - 2019. - №. 3. - С. 24-24.
7. Атаманова, Е.А. Теоретический подход к пространственному недропользованию: основные предпосылки //Журнал экономической теории. - 2015. - №. 1. - С. 162-165.
8. Беляков, Н.Н. Сравнение способов определения границ карьеров //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. - №. 1. - С. 222-230.
9. Беляков, Н.Н. Оценка границ карьеров с целью сокращения финансовых рынков // Горный информационно-аналитический бюллетень, - 2017. - № 6. - С. 22 - 31.
10. Билин, А.Л. Развитие методов определения границ карьеров в сложных горно-геологических условиях // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли - формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов. - 2014. - С. 76-84.

11. Борисов, Д.Ф. Уточнение методики определения границ открытых работ при конкретном проектировании // Записки Горного института. 1958. Т. 36 № 1. С. 93.
12. Брагин, В.И. Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания / В.И. Брагин, М.Ю. Харитонова, Н.А. Мацко // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 617-625.
13. Васильев, М.В. Влияние возрастающей глубины карьеров на эффективность горнорудного производства / М.В. Васильев // Горный журнал. 1983.-№ 1.-С.18-21.
14. Веницкий, К.Е., Трубецкой, К.Н. Определение границ открытых горных работ в сложных горнотехнических условиях // Горный журнал. - 1964. - № 6. - С. 14.
15. Гавришев, С.Е. Организационно-технологические методы повышения надежности и эффективности работы карьеров: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. -231 с.
16. Гавришев, С.Е. Интенсивность формирования рабочей зоны глубоких карьеров / С.Е. Гавришев, К.В. Бурмистров, А.А. Колонюк. - Магнитогорск: Издво Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, 2012. - 189 с.
17. Галкин, В. А. Теоретические основы и методы проектирования горнодобывающего предприятия как организационно-технологической системы / В. А. Галкин, А. Б. Килин, А. М. Макаров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2013. - № S4-11. - С. 3-16.
18. Гальянов, А. В. История горного дела. Геометрия недр : монография / А. В. Гальянов, В. А. Гордеев. - Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. - 272 с.
19. **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. – DOI: 10.21440/0536-1028-2025-1-29-38. – EDN: GPPMNU.

20. **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.

21. Зеленцов, Б. П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов / Б. П. Зеленцов. - Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2019. - 104 с.

22. Капустин, Н. Г. Диаграммный метод определения предельной глубины карьера // Горный журнал. - 1951. - №. 3. - С. 7-11.

23. Капутин, Ю.Е. Информационные технологии планирования горных работ (Для горных инженеров), СПб, Недра, 2004, 334 с.

24. Капутин, Ю.Е. Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ. СПб: Недра, 2017. 280 с.

25. Квитка, В.В., Фомин, С.И., Кава, П.Б. Способ оптимальной отработки контактной зоны руда - порода // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 165.

26. Коробов, С.Д. Анализ методов проектирования границ карьеров с использованием ЭВМ // Горный журнал. - 1981. - № 4. - С. 59-62.

27. Корнилков, С. В. Управление рабочей зоной действующих и проектируемых глубоких карьеров: специальность 05.15.03: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Корнилков Сергей Викторович. - Екатеринбург, 1997. - 35 с.

28. Малютин, Ю. А. Теория бортовых содержаний (часть 2) // Маркшейдерский вестник. - 2016. - №. 3. - С. 6-15.

29. Мванги, А.Д. Методы оптимизации предельных контуров карьеров / Мванги А.Д., Жианхуа А., Касомо Р.М., Инносэнт М.М. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, - 2020. - № 4. - С. 94 - 109.

30. Мельников, Н.В. Открытая разработка месторождений: Избр. труды/Н.В. Мельников. -М.: Наука, 1985.-280 с.

31. Мельников, Н. Н. Экономические аспекты освоения месторождений / Н. Н. Мельников, В. М. Бусырев ; Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук. - Апатиты : Кольский научный центр РАН, 2001. - 156 с.
32. Ожиганов, А.А. Теория автоматов: учеб. пособие / А.А. Ожиганов. - СПб.: НИУ ИТМО, 2013. - 84 с.
33. Протодьяконов, М.М., Чирков, С.Е. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. - М.: Наука, 1964. 67 с.
34. Резниченко, С.С. Особенности обоснования динамических разведочных и эксплуатационных кондиций / С.С.Резниченко, Н.М.Антипова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 11. С. 329-333.
35. Решетняк, С.П. Основные проблемы проектирования карьеров нового поколения // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 154.
36. Ржевский, В. В., Новожилов, М. Г., Юматов, Б. П. Научные основы проектирования карьеров // Москва, СССР: Недра. - 1971, с 92 - 93.
37. Стагурова, О. В. Алгоритм Лерча-Гроссмана в задаче определения границ карьера в его предельном положении / О. В. Стагурова // Недропользование XXI век. – 2010. – № 6. – С. 38-42.
38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619431 Российская Федерация. Программа для расчета бортового содержания при проектировании границ карьеров : № 2024616670 : заявл. 02.04.2024 : опубл. 23.04.2024 / С.И. Фомин, **А.С. Говоров** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 93 МБ.
39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613073 Российская Федерация. Программа для расчета чувствительности бортового содержания, чистого дисконтированного дохода и показателя эластичности параметров вычислений : заявл. 31.01.2025 : опубл. 07.02.2025 / С.И. Фомин, **А.С. Говоров**, Д.Д. Секерина ; заявитель Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 90 МБ.

40. Трубецкой, К.Н. Основы горного дела. Учебник / К.Н. Трубецкой, Ю.П. Галченко – Москва: изд-во Академический проспект, 2010. – 231 с.

41. Трубецкой, К.Н. Проектирование карьеров / К.Н. Трубецкой, Г.А. Краснянский, В.В. Хронин В.В. - Москва: изд-во Высшая школа, 2009. - 694 с.

42. 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 DOI: 10.21440/0536-1028-2023-5-70-78

43. Фомин, С.И. Определение бортового содержания полезного компонента в руде с учетом граничных затрат на открытую разработку месторождения / С.И. Фомин, В.Д. Левчук // Маркшейдерия и недропользование. - 2016. - №. 5. - С. 43-48.

44. Фомин, С.И. Обоснование методов оценки эффективности проектных решений при строительстве рудных карьеров: специальность 25.00.21 "Теоретические основы проектирования горно-технических систем" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Фомин Сергей Игоревич. – Санкт-Петербург, 2003. – 391 с. – EDN QDWKDP.

45. 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. DOI: 10.56195/20793332\_2024\_5\_60\_66.

46. 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. DOI: 10.26121/RON.2022.92.56.007.

47. 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. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_169.

48. 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. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_11\_0\_165

49. Фомин, С.И. Динамический метод оценки проектов карьеров / С.И. Фомин; под ред. д-ра тех. наук. проф. Г.А. Холоднякова [и др.]. - СанктПетербург: СПГГИ, 1995. - 125 с

50. Фомин, С.И. Оценка эффективности инвестирования открытой разработки сложноструктурных месторождений / С.И. Фомин, П.Б. Кава // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - № 5. - С. 312-316.

51. Холодняков, Г.А. Определение границ открытой разработки частично отработанных комплексных месторождений по расчетному эксплуатационному коэффициенту добычи / Холодняков Г.А., Обожин А.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень, - 2015. - № 5 - С. 140 - 142.

52. Холодняков, Г.А. Границы открытой разработки комплексных месторождений / Г.А. Холодняков. - Ленинград: ЛГИ им. Г.В. Плеханова, 1986. - 82 с.

53. Хохряков, В.С. Проектирование карьеров/В.С. Хохряков. М.: Недра, 1980.-336 с.

54. Хохряков, В. С. Новое в теории оптимизации проектирования открытых горных работ //Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2006. - №. 5. - С. 7-14.

55. Шпанский, О.В. Совершенствование методов проектирования границ и формирования рабочей зоны карьеров / Шпанский О.В., Арзуманян К.С., Ишкулова И.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень, - 2006. - №3 - С. 295 - 299.

56. Эпштейн, И.В. Повышение эффективности использования недр через сближение стандартов отчетности о запасах ГКЗ и НАЭН и реформирование закона "О недрах" // Горная промышленность. 2013. № 6 (112). С. 32.

57. Юматов, Б.П. Открытая разработка сложноструктурных месторождений цветных металлов [Текст] / Б. П. Юматов, Б. Н. Байков, В. П. Смирнов ; Под общ. ред. проф., д-ра техн. наук Б. П. Юматова. - Москва : Недра, 1973. - 192 с.

58. Яковлев, В.Л. Особенности методологического подхода к обоснованию стратегии освоения сложноструктурных месторождений на основе исследования переходных процессов. // Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера: ГИАБ- №7. - М.: Горная книга, 2015. - с. 22-35.

59. Ahmadi, M. R. Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model //Journal of Sustainable Mining. - 2018. - Т. 17. - №. 2. - С. 68-75. doi/10.46873/2300-3960.1123

60. Ahmadi, M. R., Shahabi R. S. Cutoff grade optimization in open pit mines using genetic algorithm //Resources Policy. - 2018. - Т. 55. - С. 184-191. doi./10.1016/j.resourpol.2017.11.016

61. Altuntov, F. K., Erkayaolu M. A New Approach to Optimize Ultimate Geometry of Open Pit Mines with Variable Overall Slope Angles //Natural Resources Research. - 2021. - С. 1-16. doi/10.1007/s11053-021-09911-8

62. Appianing, E. J. A., and Mireku-Gyimah, D. Open Pit Optimisation and Design: A Stepwise Approach // Ghana Mining Journal, - 2015. - Vol. 15. - № 2. - Pp. 27-35.

63. Araya, A. S. et al. The impact of equipment productivity and pushback width on the mine planning process //Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. - 2020. - Т. 120. - №. 10. - С. 599-607. doi/10.17159/2411-9717/1256/2020

64. Armstrong, M. et al. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty //Resources Policy. - 2021. - Т. 72. - С. 102086. doi/10.1016/j.resourpol.2021.102086

65. Baek, J. Uncertainty representation method for open-pit optimization results due to variation in mineral prices / Choi Y., and Park H.-s. // Minerals, - 2016. - Vol. 6. - No. 1. - P. 17. doi.org/10.3390/min6010017
66. Baloyi, V. D., Meyer, L. D. The development of a mining method selection model through a detailed assessment of multi-criteria decision methods //Results in Engineering. - 2020. - C. 100172. doi/10.1016/j.rineng.2020.100172
67. Blom, M., Pearce, A. R., Stuckey, P. J. Multi-objective short-term production scheduling for open-pit mines: a hierarchical decomposition-based algorithm //Engineering Optimization. - 2018. - T. 50. - №. 12. - C. 2143-2160. doi/10.1080/0305215X.2018.1429601
68. Burgarelli, H. R. et al. Direct block scheduling under marketing uncertainties //REM-International Engineering Journal. - 2018. - T. 71. - C. 275-280. doi/10.1590/0370-44672017710128
69. Canessa, G., Moreno E., Pagnoncelli B. K. The risk-averse ultimate pit problem //Optimization and Engineering. - 2021. - T. 22. - №. 4. - C. 2655-2678. DOI: 10.1007/s11081-020-09545-4
70. Chaves, L. S. et al. Analysis of the impacts of slope angle variation on slope stability and NPV via two different final pit definition techniques //REM-International Engineering Journal. - 2019. - T. 73. - C. 119-126. doi/10.1590/0370-44672019730011
71. Dimitrakopoulos, R. A stochastic optimization formulation for the transition from open pit to underground mining / Dimitrakopoulos R., James A.L. // Optimization and Engineering, - 2017. Vol. 18/ - № 3. - Pp 793 - 813. DOI 10.1007/s11081-017-9361-6
72. Erarslan, K., Celebi, N. A simulative model for optimum open pit design //CIM bulletin. - 2001. - T. 94. - №. 1055. - C. 59-68.
73. Esmail, R. et al. Optimized algorithm in mine production planning, mined material destination, and ultimate pit limit //Journal of Central South University. - 2018. - T. 25. - №. 6. - C. 1475-1488. doi/10.1007/s11771-018-3841-5
74. Fomin, S. I. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits //ARPN J. Eng. Appl. Sci. - 2020. - T. 15. - C. 1306-1311.

75. Gomaa, E. E., El-Nagdy, K. A., Arafat A. A. Fuzzy Logic-Based Analytic Hierarchy Process and Principal Component Analyses for Optimal Surface Mining Techniques //Journal of Petroleum and Mining Engineering. - 2021. - C. 1-10. DOI: 10.21608/jpme.2021.98758.1097
76. Guo, H. et al. Forecasting mining capital cost for open-pit mining projects based on artificial neural network approach //Resources Policy. - 2019. - C. 101474. doi/10.1016/j.resourpol.2019.101474
77. Hall, B.E. Cut-off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan. Victoria, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. 311 p.
78. Jelvez, E., Morales, N., Nancel-Penard, P. Open-pit mine production scheduling: Improvements to MineLib library problems //Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018. - Springer, Cham, 2019. - C. 223-232. DOI: 10.22044/jme.2017.6220.1439
79. Jodeiri, B., Dehghani, H., Sadeghi M. Ultimate Pit Limit Determination Using Flashlight Algorithm //International Journal of Mining and Geo-Engineering. - 2021. - T. 55. - №. 1. - C. 41-46. doi: 10.22059/IJMGE.2020.296120.594840
80. Khaboushan, A. S., Osanloo, M. Semi-symmetrical production scheduling of an orebody for optimizing the depth of transitioning from open pit to block caving //Resources Policy. - 2020. - T. 68. - C. 101700. doi/10.1016/j.resourpol.2020.101700
81. Khalokakaie, R. Incorporation of slope design into optimal pit design algorithms / Dowd P., and Fowell R. // Min. Technology. - 2000. - Vol. 109. - No. 2. - P. 70 - 76. DOI:10.1179/mnt.2000.109.2.70
82. Khalokakaie, R., Dowd, P. A., Fowell, R. J. Lerchs-Grossmann algorithm with variable slope angles //Mining Technology. - 2000. - T. 109. - №. 2. - C. 77-85.
83. King, B., Goycoolea, M., Newman, A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition //European journal of operational research. - 2017. - T. 257. - №. 1. - C. 297-309. doi/10.1016/j.ejor.2016.07.021
84. Krautkraemer, J. A. The cut-off grade and the theory of extraction //Canadian Journal of Economics. - 1988. - C. 146-160.

85. Lane, K.F. The Economic Definition of Ore: Cut-off Grades in Theory and Practice. Second edition. London: Mining Journal Books, 1997. 149 p.
86. Lane, K F Choosing the optimum cut-off grade, Colorado School of Mines Quarterly, 59(4): 811-829, 1964.
87. Liu, S. Q., Kozan, E. New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimisation problems //Expert Systems with Applications. - 2016. - T. 43. - C. 59-65. doi/10.1016/j.eswa.2015.08.044
88. Mortimer, G J, 1950. Grade control, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 59: 1-43.
89. Nancel-Penard, P., Morales, N. Optimizing pushback design considering minimum mining width for open pit strategic planning //Engineering Optimization. - 2021. - C. 1-15. doi/10.1080/0305215X.2021.1941919
90. Osanloo, M. et al. An uncertainty-based transition from open pit to underground mining //International Journal of Engineering. - 2019. - T. 32. - №. 8. - C. 1218-1224. doi: 10.5829/ije.2019.32.08b.19
91. Pana, M. T. The simulation approach to open pit design //APCOM SYMPOSIUM. - 1965. - T. 5. - C. 127-138.
92. Parra, A. et al. Open pit mine planning considering geomechanical fundamentals //International Journal of Mining, Reclamation and Environment. - 2018. - T. 32. - №. 4. - C. 221-238. DOI: 10.1080/17480930.2017.1278579
93. Petrov, D. V., Mikhelev, V. M., Petrova, E. V. Method for optimizing the shell of open pit mines based on parallel computing //Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing, 2021. - T. 1715. - №. 1. - C. 012070. Doi: 10.1088/1742-6596/1715/1/012070
94. Pierre, N.-P., Andres, P., Nelson, M. et al. Value-Optimal design of ramps in open pit mining. Archives of Mining Sciences, 2019, 64 (2), pp. 399-413. DOI 10.24425/ams.2019.128691
95. Poniewierski, J. Pseudoflow explained. A discussion of Deswik Pseudoflow Pit Optimization in comparison to Whittle LG Pit Optimization, - 2017. - P. 10.

96. Rendu, J.M. An introduction to cut-off grade estimation. Second edition. Englewood: Society form Mining. Metallurgy and Exploration, - 2014. 168 p.
97. ResearchGate: official site. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331752116\\_Pseudoflow\\_Method\\_for\\_Pit\\_Optimization](https://www.researchgate.net/publication/331752116_Pseudoflow_Method_for_Pit_Optimization) (Дата обращения: 24.06.2025)
98. Saleki, M., Kakaie, R., Ataei, M. Mathematical relationship between ultimate pit limits generated by discounted and undiscounted block value maximization in open pit mining //Journal of Sustainable Mining. - 2019. - Т. 18. - №. 2. - С. 94-99. doi/10.1016/j.jsm.2019.03.003
99. Samavati, M. et al. A new methodology for the open-pit mine production scheduling problem //Omega. - 2018. - Т. 81. - С. 169-182. DOI: 10.1016/j.omega.2017.10.008
100. Savolainen, J. Real options in metal mining project valuation: Review of literature //Resources Policy. - 2016. - Т. 50. - С. 49-65. doi/10.1016/j.resourpol.2016.08.007
101. Shahriar, A. P. K., Oraee, K., Bakhtavar, P. D. S. E. A Study on the Optimization Algorithms for Determining Open-Pit and Underground Mining Limits //Proceedings of 7th International Scientific Conference, SGEM. - 2007. - С. 308-34.
102. Tahernejad, M. M., Ataei, M., Khalokakaie, R. A practical approach to open-pit mine planning under price uncertainty using information gap decision theory //Journal of Mining and Environment. - 2018. - Т. 9. - №. 2. - С. 527-537. DOI: 10.22044/jme.2017.6220.1439
103. Talaie, M., Mousavi, A., Sayadi, A. R. Highest-Level Implementation of Push-Relabel Algorithm to Solve Ultimate Pit Limit Problem //Journal of Mining and Environment (JME). - 2021. - Т. 12. - №. 2. - С. 443-455. DOI:10.22044/jme.2021.10481.1999
104. Taylor, H. K. General background theory of cut-off grades //Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy. - 1972. - Т. 96. - №. 2. - С. 204-216.
105. Tolouei, K. et al. An optimisation approach for uncertainty-based long-term production scheduling in open-pit mines using meta-heuristic algorithms //International

Journal of Mining, Reclamation and Environment. - 2021. - T. 35. - №. 2. - C. 115-140  
doi/10.1080/17480930.2020.1773119

106. Whittle, D. Combined optimisation of an open-pit mine outline and the transition depth to underground mining / Brazil M., Grossman P. A., Rubinstein J. H., and Thomas D. A. // European J. of Operational Research, - 2018. - Vol. 268ю - No. 2. - P. 624 - 634. doi/10.1016/j.ejor.2018.02.005

**СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА*****РИСУНКИ***

Рисунок 1.1 – Схема последовательности выемки рудных блоков

Рисунок 1.2 - Последовательность расчетов при оптимизации границ карьеров алгоритмом Лерча-Гроссмана (Стагурова, 2010) [36]

Рисунок 1.3 – Максимальный набор связей, при котором достигается максимальная величина псевдопотока [94]

Рисунок 2.1 – Схема реализации стратегии определения границ карьеров

Рисунок 2.2 – Диаграмма состояний метода формирования рабочей зоны карьеров путем управления бортовым содержанием

Рисунок 2.3 – Схема реализации моделирования Монте-Карло и марковских цепей при определении наиболее вероятного сценария

Рисунок 2.4 – Схема реализации формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров

Рисунок 2.5 – Гистограмма распределения содержания меди в руде, добываемой в рудном карьере

Рисунок 2.6 – Гистограмма распределения логарифмов содержаний меди в блочной модели

Рисунок 2.7 – График изменения во времени цен на медь

Рисунок 3.1 – График зависимости БС от цены на минеральное сырье с учетом и без учета коэффициента вскрыши

Рисунок 3.2 - График зависимости изменения БС от поочередного изменения параметров расчета

Рисунок 3.3 – Гистограмма результатов определения коэффициента эластичности для параметров расчета БС

Рисунок 3.4 -- График зависимости изменения ЧДД от поочередного изменения параметров расчета

Рисунок 3.5 – Гистограмма результатов расчет коэффициента эластичности для параметров расчета ЧДД

Рисунок 3.6 – Марковская цепь изменения тренда изменения цен на рынке минерального сырья (S1 – состояние, характеризующееся восходящим трендом, S2 – состояние, характеризующееся нисходящим трендом)

Рисунок 3.7 – Блок-схема прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья при понижении цен на сырье

Рисунок 3.8 – Блок-схема прогнозирования ситуации на рынке минерального сырья при повышении цен на сырье

Рисунок 4.1 – Гистограмма распределения бортовых содержаний для определения принадлежности сценария

Рисунок 4.2 – Разница в объемах добываемой руды при реализации пессимистичного и прогнозного сценариев развития внешних условий реализации проекта

Рисунок 4.3 – Определение абсолютной отметки дна восточной части карьера

Рисунок 4.4 – Определение формы рабочей зоны с выявлением приоритетных направлений развития в плане и по глубине (а – модель развития рабочей зоны карьеров по простиранию и глубине, б – разрез модели развития рабочей зоны карьера)

Рисунок 4.5 – График зависимости ЧДД от БС для различных сценариев развития внешних условий реализации проекта

## ***ТАБЛИЦЫ***

Таблица 2.1 - Результаты анализа данных по содержаниям меди в блочной модели

Таблица 2.2 – Результаты расчёта теоретической частоты значений содержания меди в руде

Таблица 2.3 - Данные об изменении цен на медь за 45-летний период (по данным LME)

Таблица 3.1 – Параметры для расчета БС при анализе чувствительности

Таблица 3.2 – Параметры для расчета ЧДД при проведении анализа чувствительности

Таблица 3.3 – Группы факторов, влияющие на БС

Таблица 3.4 – Категории факторов, влияющих на ЧДД

Таблица 4.1 – Параметры пессимистичного, оптимистичного и прогнозного сценариев развития внешних условий реализации проекта

Таблица 4.2 – Сравнение тоннажа горной массы при различных сценариях развития внешних условий реализации проекта

Таблица 4.3 – Сравнение тоннажа горной массы при различных сценариях развития внешних условий реализации проекта для восточного участка месторождения

Таблица 4.4 – Результаты расчёта чистого дисконтированного дохода для различных сценариев развития внешних условий реализации проекта

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Акт внедрения



ГИПРОНЕРУД

акционерное общество  
по проектированию предприятий  
нерудной промышленности

Адрес: 191144, Россия, г. Санкт-Петербург,  
Старорусская ул., д. 5/3  
Тел: (812) 271-36-11  
Факс: (812) 274-07-82  
E-mail: gipronerud@mail.ru  
Сайт: www.gipronerud.ru

ИНН 7825661565, КПП 784201001  
р/счет 40702810555130140701  
Северо-Западный банк ПАО «Сбербанк» г. Санкт-Петербург,  
БИК 044030653, кор сч 3010181050000000653  
ОКПО 00283191, ОКВЭД 71.12

Утверждаю

Генеральный директор  
АО «Гипронеруд»  
Ларин Николай Сергеевич

Дата « 26 » нояб 2024

АКТ

о внедрении результатов  
кандидатской диссертации  
Говорова Алексея Сергеевича

по научной специальности 2.8.7 Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

специальная комиссия в составе: председатель Н.С. Ларин; члены комиссии: Е.А. Кукко, Бескровная А.Н., Рудакова Л.Г., составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование методов формирования рабочей зоны глубоких рудных карьеров эффективным управлением бортовым содержанием полезных компонентов», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности АО «Гипронеруд» при подготовке проектной документации на разработку Длинногорского месторождения в Приморском крае (лицензия ВЛВ 00655 ТЭ) в виде:

– Методики определения границ карьеров с учетом требований к качеству минерального сырья.

Использование указанных результатов позволяет:

– Повысить достоверность принятия решений при проектировании границ карьеров в условиях использования стохастических исходных геологических и технико-экономических данных.

Председатель комиссии

Генеральный директор

АО «Гипронеруд» Ларин Н.С. Ларин

Члены комиссии:

Начальник

горно-геологического сектора Кукко Е.А. Кукко

Начальник группы

горно-геологического сектора Бескровная А.Н. Бескровная

Инженер III кат.

горно-геологического сектора Рудакова Л.Г. Рудакова

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024619431

**Программа для расчета бортового содержания при проектировании границ карьеров**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Фомин Сергей Игоревич (RU), Говоров Алексей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2024616670

Дата поступления 02 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 апреля 2024 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025613073

**Программа для расчета чувствительности бортового содержания, чистого дисконтированного дохода и показателя эластичности параметров вычислений**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)**

Авторы: **Фомин Сергей Игоревич (RU), Говоров Алексей Сергеевич (RU), Секерина Дарья Денисовна (RU)**

Заявка № 2025611514

Дата поступления 31 января 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 февраля 2025 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью  
Сертификат: 0692e781063300e154d2401670b002026  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с: 18.02.2014 по: 03.10.2025

Ю.С. Зубов