

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

*На правах рукописи*

Шабалова Анна Евгеньевна



ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РИСКОВ ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Специальность 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика  
(экономика промышленности)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Научный руководитель:  
кандидат экономических наук, доцент  
Невская М.А.

Санкт-Петербург – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКОВ ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ</b> .....	10
1.1 Анализ современного технического состояния и экономических проблем горнорудной отрасли (на примере добычи калийных руд) .....	10
1.2 Особенности формирования и проявления рисков горнорудного предприятия (на примере добычи калийных руд) .....	23
1.3 Развитие технологического инструментария оценки рисков в современных условиях .....	28
1.4 Выводы по Главе 1 .....	36
<b>ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ</b> .....	38
2.1 Формирование и развитие концепции риска горнорудного предприятия .....	38
2.2 Анализ методических подходов к экономической оценке рисков .....	46
2.3 Анализ применяемого инструментария динамического моделирования для оценки рисков .....	51
2.4 Обоснование методического подхода к экономической оценке производственно-технологических рисков горнорудного предприятия.....	57
2.5 Выводы по Главе 2 .....	80
<b>ГЛАВА 3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ (НА ПРИМЕРЕ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА)</b> .....	83
3.1 Технико-экономические условия внедрения разработанных рекомендаций по экономической оценке производственно-технологического риска.....	83
3.2 Построение экономико-математической модели экономической оценки производственно-технологических рисков при эксплуатации конвейерной сети горнорудного предприятия .....	87

3.3 Экономическая оценка ущерба от наступления производственно-технологического риска на горнорудном предприятии .....	93
3.4. Экономическая оценка эффективности внедрения автоматизированной системы для снижения производственно-технологического риска.....	102
3.5 Выводы по Главе 3 .....	108
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>110</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>113</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Логические элементы работы имитационной модели в ПО AnyLogic .....</b>	<b>129</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты расчета вероятности риска остановки конвейера .....</b>	<b>132</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации .....</b>	<b>134</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Добыча минеральных ресурсов является основой развития отечественной экономики, обеспечивает ресурсами другие отрасли и участвует в создании налогооблагаемой базы для роста государственных доходов: вклад горнорудной промышленности во внутренний валовой продукт Российской Федерации оценивается в 12,4 %, при этом особое место в отрасли занимает добыча калийных солей, относящихся к стратегическим видам минеральных ресурсов.

Российская Федерация обладает уникальной сырьевой базой калийных солей и является одним из крупнейших экспортеров калийных удобрений, спрос на которые характеризуется устойчивым ростом на фоне ограниченного числа стран-производителей. Обстоятельства непреодолимой силы могут, однако, привести к нестабильности рыночной конъюнктуры, что определяет целесообразность поиска внутренних резервов для повышения эффективности деятельности российских предприятий по добыче калийных солей, в том числе, за счет совершенствования процесса добычи. В то же время особенности этого процесса: применение преимущественно шахтного способа добычи с камерной системой разработки и соответствующей унифицированной техникой, одновременное использование циклического и поточного транспорта – создают риски нарушения непрерывности, цикличности и ритмичности производственного процесса, приводящие к негативным экономическим последствиям для предприятия.

Развитие цифровых технологий приводит к формированию среды для активного внедрения методов имитационного моделирования на предприятиях калийной промышленности. Однако применение исключительно статических методов не позволяет оценивать факторы риска комплексно, с помощью детализированных технических расчетов, и учитывать их влияние на показатели экономической эффективности производства. Таким образом, повышается актуальность разработки метода экономической оценки рисков горнорудного предприятия, основанного на инструментарии динамического моделирования.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Исследование путей повышения экономической эффективности горнорудных предприятий отражены в работах Невской М.А., Пономаренко Т.В., Череповицына А.Е. Анализ особенностей добычи калийных солей, влияющих на эффективность деятельности горнорудного предприятия, представлен в работах Баряха А.А., Земскова А.Н., Зубова В.П., Кологривко А.А., Рыльниковой М.В., Токсарова В.Н., Шишлянникова Д.И. Теоретические и методологические основы оценки рисков горнорудных предприятий представлены в работах Галкиной Н.В., Дзагоевой М.Р., Соловьевой Н.В., Тереховой Е.А. и др.

Вопросы повышения эффективности хозяйственной деятельности за счет внедрения цифровых технологий рассмотрены в работах Жуковского Ю.Л., Мочаловой Л.А., Николайчук Л.А., Подкорытова В.Н., Трейман М.Г., Ansari F., Baryannis G., Rodic B., Rojek A. и др. Теоретические и практические результаты применения имитационного моделирования для повышения точности экономического прогнозирования результатов деятельности горнорудных предприятий проанализированы в трудах Жарова В.С., Лотова А.В., Ракаевой Т.Г., Cordova E., Pourander M., Snopkowski R.

Несмотря на существенное количество научных работ по теории рисков и их обработке, вопрос экономической оценки специфических производственно-технологических рисков в производственной деятельности горнорудных предприятий остается недостаточно разработанным.

**Предмет исследования** – факторы риска, методы и модели экономической оценки производственно-технологических рисков горнорудного предприятия.

**Объект исследования** – горнорудное предприятие по добыче калийных руд и его производственный процесс.

**Цель работы.** Совершенствование методики экономической оценки производственно-технологических рисков предприятия по добыче калийных руд.

**Идея работы** состоит в комплексном подходе к определению вероятностного ущерба от проявления специфических рисков, вызывающих нарушение непрерывности, цикличности и ритмичности производственного процесса, с использованием методов имитационного моделирования.

Поставленная в работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

1. Выявить условия и факторы, формирующие специфические производственно-технологические риски предприятий по добыче калийных руд.

2. Разработать методический подход к экономической оценке производственно-технологических рисков горнорудного предприятия с применением инструментария динамического моделирования.

3. Обосновать способ отбора факторов риска по типам производственных задач для экономической оценки ущерба от их проявления.

4. Разработать методику оптимизации параметров ведения горных работ, для снижения производственно-технологических рисков горнорудного предприятия и выполнить ее апробацию.

5. Предложить экономические меры по снижению производственно-технологических рисков горнорудного предприятия.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Установлена зависимость возникновения в процессе добычи на калийных рудниках специфических производственно-технологических рисков от несогласованности организационно-технических параметров ведения горных работ.

2. Предложен принцип группировки факторов производственно-технологических рисков горнорудного предприятия по типам производственных задач и основным признакам, позволяющим определять и выбирать параметры, характеризующие эти факторы для построения динамической модели.

3. Предложен комплексный подход к экономической оценке производственно-технологических рисков горнорудного предприятия, основанный на определении и оптимизации ключевого параметра риска.

4. Разработан алгоритм экономической оценки ущерба от проявления производственно-технологических рисков предприятия по добыче калийных руд с применением методов имитационного моделирования.

**Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 5.2.3. «Региональная и отраслевая экономика» и соответствует пункту 2 «Экономика промышленности», 2.2. Вопросы оценки и повышения эффективности хозяйственной деятельности на предприятиях и в отраслях промышленности.

**Теоретическая значимость работы** состоит в обосновании принципов, подходов и методов к идентификации и комплексной экономической оценке динамических производственно-технологических рисков с применением инструментария имитационного моделирования, а также в уточнении понятия «производственно-технологический риск».

**Практическая значимость работы** заключается в экономической оценке ущерба от проявления производственно-технологических рисков, с применением методов имитационного моделирования, позволяющего оптимизировать параметры производственного процесса при добыче калийных руд с применением методов имитационного моделирования. Результаты диссертационной работы использованы в производственной деятельности АО «Гипроцветмет» для повышения надежности принимаемых технических решений (акт внедрения от 14.01.2025) (приложение В).

**Методология и методы исследования.** Методологической основой диссертационного исследования послужили фундаментальные и прикладные исследования российских и зарубежных авторов в области оценки и управления рисками, анализа экономической эффективности горнорудных предприятий, цифровой трансформации экономики. В диссертации применялись методы и инструменты логического и структурного анализа, статистические методы обработки данных, методы математического, в том числе имитационного моделирования.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Обеспечение непрерывности, ритмичности и цикличности производственных процессов горнорудного предприятия обуславливает необходимость идентификации, анализа и оценки производственно-технологических рисков, под которыми понимаются события, вызванные

несогласованностью в основных и вспомогательных операциях, повлекшие за собой отклонение от плановых результатов деятельности.

2. Для учета динамической природы производственно-технологических рисков горнорудного предприятия необходимо определять организационно-технические параметры производственного процесса, характеризующие факторы риска, путем группировки их по типам производственных задач и выделенным признакам, таким как количество, свойства, расписание, размещение.

3. Экономическая оценка производственно-технологических рисков предприятий по добыче калийных руд с применением разработанного алгоритма позволяет определять значения вероятностного ущерба с помощью инструментария имитационного моделирования и разрабатывать меры по его снижению.

**Степень достоверности и апробация результатов работы** определяется соответствием методологии исследования основным положениям теории рисков; обработкой и анализом достаточного объема фактических данных по исследуемой проблеме, опубликованных в научной литературе и отчетах горнорудных компаний.

**Апробация диссертационного исследования.** За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

VIII Международная научно-практическая конференция «Интеллектуальная инженерная экономика и индустрия 5.0» (Intelligent engineering economics and industry 5.0 IEEE\_5.0 (INPROM) (27-30 апреля 2023 года, г. Санкт-Петербург).

Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (22-25 мая 2023 года, г. Санкт-Петербург).

Научная конференция студентов и молодых ученых Горного университета «Полезные ископаемые России и их освоение» (18-20 мая 2023 года, г. Санкт-Петербург).

Отраслевая конференция «ЦПТ-СПБ 2024» (20-21 июня 2024 года, г. Санкт-Петербург).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; обобщении отечественного и зарубежного опыта в области оценки рисков; обосновании применения имитационного моделирования; разработке метода исследования; построении и апробации экономико-математической модели оценки последствий рисков предприятия; обосновании затрат на снижение вероятности рисков; обработке полученных результатов.

### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах (пункты списка литературы № 28, 29, 30, 47, 95, 96), в том числе 2 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 международную базу данных и систему цитирования Scopus.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 3 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 129 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков и 20 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю – к.э.н., доценту Невской М.А., д.э.н., профессору Пономаренко Т.В., д.э.н., профессору Череповицыну А.Е., а также всему коллективу Центра цифровых технологий и кафедры организации и управления за помощь в подготовке диссертации.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКОВ ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

### 1.1 Анализ современного технического состояния и экономических проблем горнорудной отрасли (на примере добычи калийных руд)

**Состояние минерально-сырьевой базы калийных солей в Российской Федерации.** Крупнейшей сырьевой базой калийных солей обладают такие страны как Канада, Россия, Белоруссия и Китай, всего запасами обладают 20 стран. По различным оценкам, от 83,3 % до 90,9 % всех мировых запасов калийной соли сосредоточено на территории тройки лидеров – Канады, России и Белоруссии. При учете запасов категорий А + В + С1 рейтинг стран-лидеров по количеству потенциально извлекаемого эквивалента  $K_2O$  выглядит следующим образом:

- 1) Канада – 1,1 млрд тонн, ресурсы по некоторым оценкам могут превышать 65 млрд тонн, относительно пригодными для экономически целесообразной добычи могут считаться 4,5 млрд тонн;
- 2) Россия – 924,2 млн тонн, ресурсы составляют чуть более 35 млрд тонн;
- 3) Белоруссия – 540 млн тонн, ресурсы по различным оценкам составляют от 3,3 до 10,5 млрд тонн.

Согласно обновленному в 2022 году перечню, калийная соль является значимым для российской экономики стратегическим видом минерального сырья, наряду с нефтью, редкоземельными металлами, апатитовыми рудами, железными рудами, цинком и другими. В соответствии со Стратегией развития МСБ РФ по количеству и качеству балансовых запасов калийная соль относится к первой группе полезных ископаемых, то есть вне зависимости от сценария развития отечественной экономики, в перспективе до 2035 года потребности в хлористом калии должны быть удовлетворены [36, 37].

На месторождения хлоридного типа приходится 99,1 % отечественных запасов, то есть, практически вся калийная соль заключена в сильвинитовых и карналлитовых рудах. Из них на карналлит приходится около 1 %, а все остальное представлено сильвинитовыми залежами [31].

Добыча калийных солей в промышленных масштабах осуществляется на Верхнекамском месторождении, расположенном в Пермском крае, где сосредоточены 82,6 % отечественных запасов. Калийная залежь здесь состоит из серии продуктивных пластов, сложенных галогенными породами, например, каменная соль, сильвиниты, карналлитовые и карналлит-галитовые породы с примесями глинистых минералов, ангидрита, железистого доломита, целестина, барита, гипса, пирита и халькопирита [31]. Среднее содержание оксида калия составляет 17,16 %.

К разряду уникальных, с точки зрения химического состава, относятся запасы Непского месторождения в Иркутской области, отличающиеся высоким содержанием оксида калия в рудах: от 14,7 до 30,7 %. Высокое среднее содержание характерно для месторождений Прикаспийского калиеносного бассейна, где расположены Гремячинское и Ново-Гремячинское месторождения (Волгоградская область), Западно-Петриковское и Восточно-Петриковское месторождения (Саратовская область). Кроме этого, сырьевая база представлена Нивенским и Северо-Красноборским месторождениями в Калининградской области, Якшинским месторождением в Республике Коми.

Дополнительные инвестиции на капитальные затраты требуются не только на первоначальном этапе, когда необходимо создать всю недостающую в регионе инфраструктуру, но и на всем остальном сроке работы предприятия. Это связано с потребностью в модернизации основных средств, подверженных большему износу, чем в других отраслях, проведению капитальных работ по поддержанию исправной работы инфраструктуры, логистических потоков [1]. По этой причине выгодные, с точки зрения геологических условий залеганий полезного ископаемого, запасы Непского месторождения пока остаются в нераспределенном фонде. В то же самое время, в виду развитой инфраструктуры в регионе, Гремячинское месторождение Волгоградской области введено в промышленную эксплуатацию, хотя геологическое строение залежи здесь мене выгодное.

Отличительная особенность калийной промышленности состоит в том, что степень освоенности сырьевой базы очень низкая, в промышленной разработке

находятся только 5,5 % запасов, еще 21,2 % относятся к подготавливаемым к освоению и разведываемым объектам. В нераспределенном фонде недр находятся почти 13 млн тонн оксида калия, из которых 96,1 % приходится на участки Верхнекамского месторождения.

Причина преобладающей доли в нераспределенном фонде заключается в отсутствии спроса со стороны внутреннего или внешнего рынка на большие объемы калийных удобрений. Немаловажную роль играет тот факт, что из-за сложных горнотехнических условий и низкой развитости инфраструктуры в Иркутской области (где расположены руды с высоким содержанием), разработка месторождений требует крупных инвестиционных вложений и государственной поддержки. Следует отметить, что геологоразведочные работы ранних стадий в отрасли ведутся только за счет собственных средств недропользователей в экономически освоенных регионах, где уже эксплуатируются или подготавливаются к освоению новые объекты.

Добыча и переработка калийной соли осуществляется компаниями ПАО «Уралкалий», ООО «ЕвроХим – Усольский калийный комбинат», ООО «ЕвроХим – ВолгаКалий». На долю ПАО «Уралкалий» при этом приходится 70,4 % отечественной добычи оксида калия, на долю ООО «ЕвроХим – УКК» – 25,2 %, а на долю ООО «Еврохим – ВК» – 4,3 %.

Производственные активы ПАО «Уралкалий» представлены пятью рудниками, одной карналлитовой и шестью калийными фабриками. Все они расположены в городах Соликамск и Березники, добыча руды осуществляется на 7 участках Верхнекамского месторождения, компания подготавливает к вовлечению в разработку еще 3 участка, а также проводится геологическое изучение еще на 2 участках того же месторождения [4, 31, 67]. Добычей руд на Верхнекамском месторождении занимается и дочерняя компания АО «МХК «ЕвроХим», 2 участка здесь находятся в ведении ООО «ЕвроХим – УКК». Другая дочерняя компания, ООО «Еврохим – ВК», с 2021 года осуществляет горно-капитальные и горно-подготовительные проходческие работы на Гремячинском месторождении в Волгоградской области. Компания ведет строительство горно-обогажительного

комбината по добыче и обогащению калийных солей с планируемой мощностью 7,8 млн тонн руды в год [4, 67].

Интерес к развитию собственных источников сырья со стороны такой крупной химической компании, как ЕвроХим обусловлен повышением урожайности при применении комплексного удобрения, содержащего и хлористый калий, и фосфор и азот. У компании уже есть активы, обеспечивающие основное производство (комплексных минеральных удобрений) фосфорным и азотистым сырьем. Поэтому разработка новых калийных месторождений собственными силами позволит компании в долгосрочной перспективе повысить эффективность производства сложных минеральных удобрений, спрос на которые растет с сокращением площади пахотных земель на душу населения [55].

**Специфика добычи калийных солей.** Различные составляющие производственного процесса находятся в жесткой взаимосвязи друг с другом. Отсюда возникает потребность в грамотном планировании с целью синхронизации отдельных частей технологической цепочки и вспомогательных цехов [114].

С позиции организации производственного процесса и технологии добычи полезного ископаемого, месторождения традиционного классифицируют по группам: рудные и нерудные, месторождения угля и сланцев, нефтегазовые, торфяные, россыпные. Условия залегания, физико-механические свойства полезного ископаемого (и пустой породы) влияют на выбор методов добычи больше, чем его вид. Так, например, различий в технологии добычи золота из коренных и россыпных месторождений больше, чем при сравнении методов выемки апатитовых и железных руд [21].

Выпускаемым «продуктом» для горнодобывающего предприятия является полезное ископаемое, которое не поступает сразу на продажу, а доставляется на обогатительную фабрику, где подлежит дальнейшей переработке. Поэтому на эффективность деятельности предприятия также влияет качество планирования производительности обогатительной фабрики, организация транспортных путей, связывающих месторождение и первичную переработку.

Горно-химическое сырье (в том числе, соли, фосфориты, сера и др.), традиционно относят к рудным полезным ископаемым. Горное предприятие, осуществляющее подземную разработку месторождения в отведенном пределе, называется «рудником», а группа предприятий, в литературе обозначается совокупным названием «горнорудные предприятия».

Типичная форма залежи калийных солей - пластовая, для них характерно ограничение практически параллельными поверхностями, занимающими значительную площадь. По причине пластового залегания калийных солей, их добыча, с точки зрения организации технологического процесса, объединяет в себе характерные особенности разработки пологопадающих угольных месторождений и рудных месторождений [21]. Геологические особенности строения месторождений калийной соли напрямую влияют на организацию горных работ, а, следовательно, на себестоимость.

На основе анализа мировой практики добычи калийных и калийно-магниевых солей установлено, что наибольшее распространение получил подземный (шахтный) способ разработки с применением различных систем отработки месторождений. Подземная добыча применяется на 69 объектах, обеспечивая 85 % общемирового производства калийных удобрений [54]

Технологическая схема разработки калийных месторождений ключевых мировых производителей характеризуется высокой общностью. Для месторождений России, Канады и Белоруссии одинаково свойственен высокий риск затопления рудников в следствие прорыва водозащитной толщи, пластовое залегание, применение камерной или камерно-столбовой систем разработки. Однако, присутствуют и некоторые различия. Так, например, геологические условия залегания калийной залежи Старобинского месторождения (Республика Беларусь) позволяют вести отработку месторождения длинными столбами – такой способ позволяет использовать очистные комбайны более высокой производительности и поточные виды транспорта. Такая система разработки обеспечивает более равномерный и стабильный объем добычи [21]. В то же самое время, на российских месторождениях разработка длинными столбами невозможна

в силу геологических условий залегания пласта. Поэтому здесь предприятия вынуждены использовать большое количество техники с меньшей производительностью, что в конечном счете приводит к повышению рисков возникновения простоев транспортной техники [31].

Крупнейшее месторождение калийных солей Канады – Саскачеван – характеризуется большой глубиной залегания полезного ископаемого, а также высокой водоносностью и трещиноватостью слагающих пород, наличием аномальных зон-размывов, выщелачивания и обрушения. По этим причинам добыча солей на продуктивных пластах сопровождается высокими затратами на проведение геофизических исследований и трехмерной сейсморазведкой. Система разработки камерная с жестким поддержанием кровли. Для повышения экономической эффективности добычи в конце XX века здесь был разработан и внедрен метод подземного выщелачивания калийных солей для разработки пластов, залегающих на глубине до 2 км [2].

Немецкие калийные рудники также подвержены высокому риску затопления. Геологические условия позволяют использовать разнообразные варианты камерной системы, но с закладкой выработанного пространства. Проблема затопления решается путем ведения гидрогеологического мониторинга, применением методов наблюдения за оседанием земной поверхности, разработкой систем мероприятий для каждого калиеносного района [2].

В процессе освоения каменно-соляных и калийных месторождений сформированы общие принципы ведения горных работ, предусматривающие защиту выработанного пространства от воздействия подземных вод посредством формирования водонепроницаемой толщи пород между кровлей верхнего пласта и почвой нижнего водоносного горизонта [54]. Реализация данной технологии осуществляется через применение камерных систем разработки, параметры которых позволяют сохранять целостность водозащитной толщи на протяжении всего периода эксплуатации рудника.

Ключевые преимущества камерной системы разработки заключаются в следующих аспектах [54]:

- экономическая эффективность обусловлена минимальным объемом подготовительных работ;
- высокий уровень производительности труда достигается за счет комплексной механизации технологических процессов;
- оптимальная организация производственного процесса обеспечивается значительным объемом выработок (камер), что создает благоприятные условия для применения высокопроизводительного оборудования крупных габаритов;
- обеспечение безопасных условий труда: контроль состояния кровли выработок возможен даже при значительной высоте, устойчивость междукамерных целиков поддерживается соответствующими размерными характеристиками и применением закладки выработанного пространства;
- минимальное разубоживание полезного ископаемого и возможность его опробования, как в подготовительных, так и в очистных выработках;
- отсутствие технологических операций по принудительному управлению кровлей, что существенно снижает трудозатраты на крепление выработок [41].

Однако, несмотря на высокие технико-экономические показатели камерной системы разработки, следует отметить значительные потери запасов в целиках, достигающие 70 %, а также снижение содержания полезного компонента в добываемой руде вследствие валовой выемки всех слоев калийного пласта [16].

Технологический процесс добычи при камерной разработке калийных солей базируется на использовании проходческо-очистных комбайнов, бункеров-перегрузателей и самоходных вагонов. В некоторых случаях транспортировка отбитой руды осуществляется посредством телескопических конвейеров. Производительность добычных комплексов определяется техническими характеристиками указанного оборудования. Магистральные ленточные конвейеры, расположенные в главных транспортных выработках рудников, характеризуются высокой пропускной способностью и не являются ограничивающим фактором производительности горных участков [14].

Анализ производительности проходческо-очистных комбайнов показывает, что их эксплуатационная эффективность в составе комплекса лимитируется

производительностью транспортирующих машин – шахтных самоходных вагонов [111]. Исследование расчетных зависимостей демонстрирует, что производительность комбайнового комплекса находится в функциональной зависимости от расстояния доставки. На начальном этапе работы производительность соответствует техническим характеристикам комбайна, однако по мере увеличения расстояния наблюдается ее постепенное снижение, что обуславливает рост энергоемкости и, соответственно, себестоимости добычи, которая увеличивается с ростом глубины разработки.

Результаты экспертного опроса специалистов [15] указывают на наличие существенных резервов повышения эффективности деятельности предприятий по добыче калийных солей за счет совершенствования технологического оборудования и методов добычи, следовательно, изучение внутренних проблем отраслевых предприятий открывает хорошие перспективы повышения их результативности.

**Экономические проблемы добычи и реализации калийных солей.** Базовым документом по вопросам суверенитета нашей страны является Стратегия национальной безопасности, в соответствии с которой рациональное природопользование, в частности, относится к национальным интересам Российской Федерации.

Параллельно со Стратегией существует целый ряд руководящих документов, которые вместе позволяют планировать процессы, повышающие безопасность существования нашей страны. Одним из таких документов является Доктрина продовольственной безопасности, которая отражает точку зрения государства на необходимый минимум самообеспечения населения разными видами сельскохозяйственной продукции.

Эти два направления – рациональное природопользование и обеспеченность сельскохозяйственной продукцией – пересекаются в одной важной точке – производстве минеральных удобрений. Основным источником сырья для этого являются предприятия по добыче материально овеществленной формы каждого из трех химических элементов – калия, азота и фосфора.

Спрос на калийные соли формируется исходя из мировых тенденций развития сельского хозяйства и потребности в минеральных удобрениях. Отсюда прослеживается географическая дифференциация спроса в зависимости от условий ведения сельского хозяйства и структуры производства агропродукции в той или иной стране [45]. Около 95 % всего добываемого калия потребляется в производстве удобрений, в основном в форме хлористого калия, иногда сульфата и нитрата калия. Оставшиеся 5 % используются в форме химических соединений в стекольной, фармацевтической промышленности и др.

Структура производства калийной соли по странам незначительно отличается от представленного рейтинга обладателей сырьевой базы, с небольшой вариативностью в некоторые промежутки времени. На временной диаграмме с накоплением (рисунок 1) отражено производство по странам в тоннах эквивалента оксида калия.

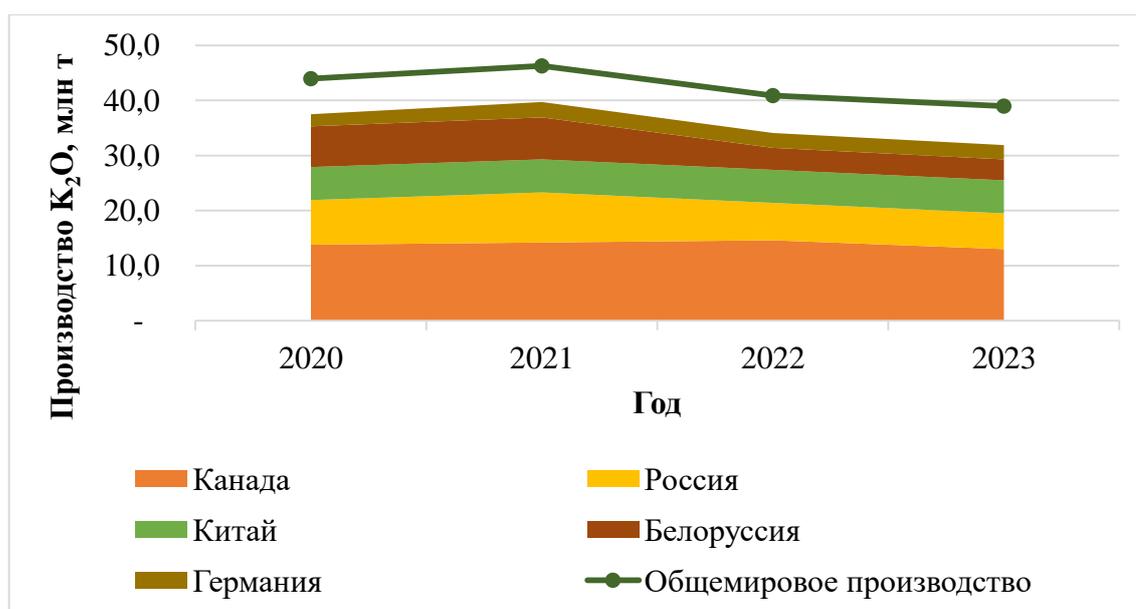


Рисунок 1 – Производство оксида калия по странам и миру в 2020–2023 гг.

(составлено автором на основе [119])

На основе приведенной диаграммы можно сделать вывод, что рынок калийных солей носит ярко выраженный олигополистический характер – на долю 5 крупнейших производителей приходится 81,8 % об всего мирового производства, при этом на долю 10 крупнейших – 98,7 %. Иными словами, практически вся добыча сосредоточена в руках 19 % участников рынка. При этом треть (33 %)

потребностей в калийной соли удовлетворяется за счет канадского производства и еще чуть больше четверти (26 %) за счет российского и белорусского производства (17 % и 10 % соответственно). С 2022 года в 5 раз увеличился объем добычи и производства в Лаосе, достигнув, таким образом, доли рынка, равной 3,5 %.

В результате введенных западными странами санкций против экспорта калийной соли из Белоруссии, ее доля в общем производстве сократилась на 42 %, выбывшие объемы частично были заменены канадским сырьем и лаосским, хотя в период с 2021 года наблюдается тенденция к временному общемировому сокращению производства.

Несмотря на то, что по признаку количества производителей рынок калийной соли является олигополистическим, особенности добывающей отрасли прямо влияют на формирование баланса между спросом и предложением. Изменение мировых объемов производства представлено на рисунке 2.

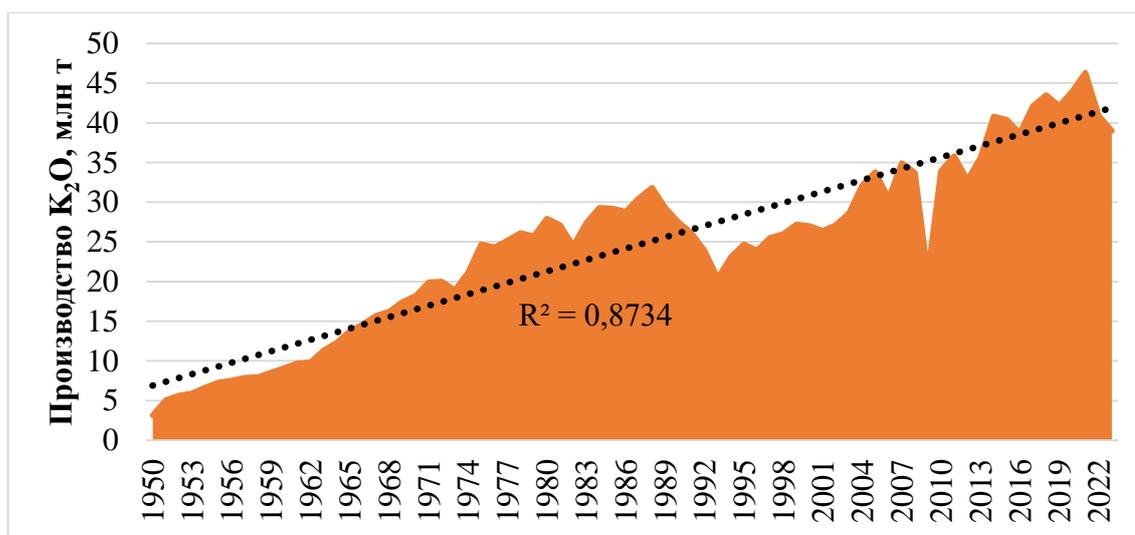


Рисунок 2 – Общемировое производство оксида калия с выводом тренда в 1950–2022 гг. (составлено автором на основе [119])

Анализируя данные графика (рисунок 3), можно прийти к выводу, что в долгосрочной перспективе отмечается увеличение спроса на калийную соль. Угол наклона линии тренда свидетельствует об устойчивом росте потребления калийных удобрений, обусловленном увеличением численности населения (по прогнозу ООН численность населения планеты преодолет 10 млрд после 2050 года), росте посевных площадей и развитием технологий интенсификации урожайности,

главным образом за счет увеличения расхода удобрений на гектар пахотных земель (рисунок 3).

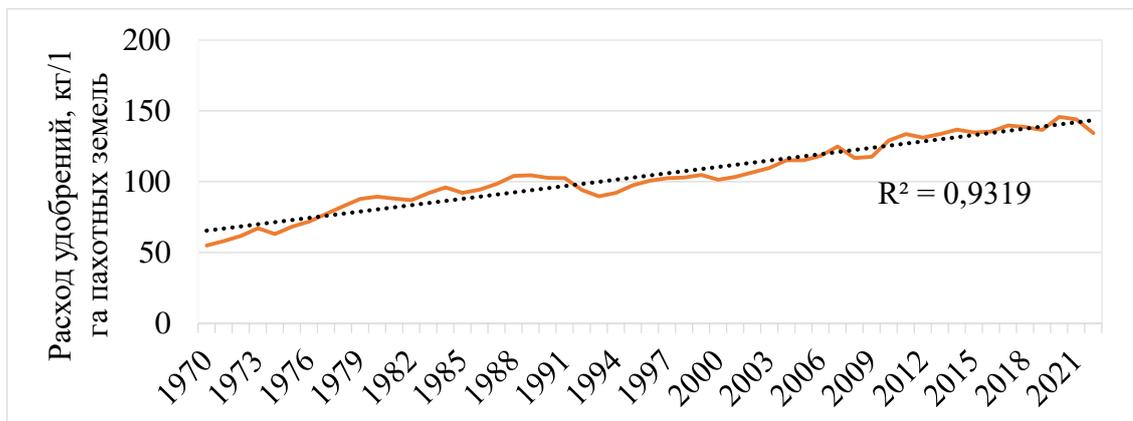


Рисунок 3 – Средний по миру расход удобрений на гектар пахотных земель в 1970–2022 гг. (составлено автором на основе [119])

Если в долгосрочной перспективе наблюдается тенденция к росту потребления калийных удобрений, то в средне- и краткосрочной отмечается подверженность спроса цикличности и волатильности по политическим причинам. Так, например, начало перестроечного процесса в Советском Союзе привело к сокращению предложения и падению добычи калия в период 1988–1993 гг., в результате чего объемы калийных удобрений сократились на 36 %, а мировое производство достигло минимума на отметке 20,4 млн тонн (рисунок 3). Последующее наращение было прервано мировым финансовым кризисом 2008–2009 гг., что привело к падению производства до 20,8 млн тонн.

Период 2013–2021 гг. характеризовался устойчивым ростом мирового производства калийных удобрений, повлекшим за собой снижение цен на удобрения и сельскохозяйственную продукцию. В результате пандемии COVID-19, а также, после введения в 2022 году санкций в отношении экспорта сельскохозяйственных удобрений из России и Белоруссии, предложение на рынке сократилось, что привело к закономерному росту цен и активизации инвестиционной деятельности со стороны конкурентов. В перспективе до 2030 года наращивание сырьевой базы и увеличение производственных мощностей планируют производители из Канады, Бразилии, Эфиопии, Эритреи и США [45].

После 2028 года планируется начать эксплуатацию новых рудников по добыче калийной соли в Беларуси, Бразилии, Испании, Канаде, Марокко и Эфиопии [119].

По оценкам IFA, МС мировое производство калийных удобрений продолжит увеличиваться и достигнет 76,0 млн тонн к 2028 году. Большая часть прироста будет приходиться на введение в разработку новых рудников и проектов по расширению производства в Лаосе и России [119].

Большая часть произведенного хлористого калия поступает на экспорт. На протяжении последних лет на долю внутреннего потребления приходилось 13-23 %. К ключевым регионам-потребителям относятся Белгородская, Брянская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская области, Ставропольский край и Республика Татарстан. На рисунке 4 отражена динамика изменения объемов экспорта в 2015–2023 гг.



\*Данные взяты из открытых источников и носят приблизительный характер

Рисунок 4 – Производство и экспорт калийных удобрений в 2015–2023 гг.

(составлено автором на основе [32])

К основным потребителям российских удобрений относятся страны Латинской Америки (главным образом, Бразилия), а также Индия и Китай. В 2022 году после введения санкций со стороны недружественных стран, объем мировых поставок резко сократился из-за ограничений, наложенных на поставки из России и Белоруссии. Однако уже в 2023 году в результате изменения логистических маршрутов и перенаправления потока поставок на азиатский рынок

общий объем производства увеличился. Предварительные оценки итогов 2024 года показывают, что благоприятная рыночная конъюнктура, а также восстановление объемов поставок на экспорт способствуют увеличению спроса. Вместе с тем, ввиду того, что на фоне неопределенности с поставками, возникшими на рубеже 2022–2023 гг., Бразилия и Китай сформировали излишек, осевший на складах, что привело к сдержанным оценкам объем их импорта в 2024 году и снижению спотовой цены.

Добывающая отрасль сильно подвержена геополитическим рискам, нестабильность рынков сбыта, угроза санкций — все это порождает волатильность цен на готовую продукцию. Такая природа конъюнктуры рынка при отсутствии гибкости в деятельности отрасли формирует потребность создания механизмов, способствующих быстрой адаптации производственного процесса к новым условиям.

Российская Федерация обладает уникальной сырьевой базой калийных солей, является одним из крупнейших экспортеров минеральных, в том числе калийных, удобрений.

Специфика технологий добычи калийных солей предприятиями отрасли состоит в широком применении камерной системы разработки и соответствующей ей унифицированной техники, включающей проходческо-очистные комбайны, бункеры-перегрузатели и самоходные вагоны, позволяющие обеспечить высокий уровень механизации и безопасности работ. В то же время, при данной системе разработки, в целиках теряется до 70 % балансовых запасов, а сам процесс характеризуется высокой энергоемкостью, которая увеличивается с глубиной отработки.

Нестабильность рыночной конъюнктуры обуславливает целесообразность повышения эффективности деятельности российских компаний путем усовершенствования различных частей производственного процесса. Ожидаемое вовлечение в разработку новых месторождений и участков калийной соли создает предпосылки поиска методов повышения качества управленческих решений за счет поиска внутренних резервов и оптимизации производственного процесса.

## **1.2 Особенности формирования и проявления рисков горнорудного предприятия (на примере добычи калийных руд)**

Ключевая особенность горнорудных предприятий – наличие природного или горно-геологического риска. Под ним понимается риск недооценки или переоценки запасов месторождения и, как следствие, неверное определение производственной мощности горного предприятия и ожидаемых экономических показателей освоения и эксплуатации месторождения [27]. Особенности горнорудного предприятия определяются факторами, влияющими на организацию производственного процесса, и одновременно источниками риска, которые проявляются в недостижении запланированных производственных результатов, например, в снижении (по сравнению с планом) объемов добычи вследствие образования «узких мест» в технологической цепочке, увеличения продолжительности простоев оборудования. Планирование горных работ на калийных месторождениях и экономическая эффективность применяемых решений также зависят от природно-геологических и технико-технологических факторов [13].

Анализ возможных путей повышения эффективности хозяйственной деятельности через оценку и снижение рисков следует начинать с определения влияния на результаты хозяйственной деятельности предприятия факторов, свойственных только горнорудным предприятиям.

Среди основных факторов, влияющих на формирование рисков в калийных рудниках, можно выделить следующие группы: горно-геологические, горнотехнические, природно-климатические, гидрологические, однако проявление этих факторов для различных предприятий будет неодинаково.

*Горно-геологические факторы* определяются природными свойствами недр: мощностью пласта, углом падения пласта, глубиной залегания продуктивных пластов, складчатостью пластов, содержанием полезных компонентов, составом и свойствами вмещающих пород, обводненностью месторождения и др. Условия залегания, физико-механические свойства полезного ископаемого (и пустой породы) влияют на выбор методов добычи больше, чем его вид [21].

Сырьевая база калийной соли Российской Федерации обладает значительным потенциалом. Однако, так же как и со многими другими полезными ископаемыми, здесь наблюдается тенденция к ухудшению качества запасов, которое проявляется, в частности, в виде роста глубины отработки на новых месторождениях в России (например, на Гремячинском месторождении отмечается глубина залегания калийных пластов 1200 м а категория сложности – VII, тогда как на Верхнекамском она достигала 140–420 м, категория сложности I–VII) [38].

Такая глубина влияет на применяемый метод закладки выработанного пространства, то есть добавляет дополнительный этап в производственном процессе, влияющий на логистические процессы в руднике [14].

Увеличение глубины горных работ приводит к росту затрат на транспортировку руды. Сокращение логистических издержек может достигаться путем разработки новых технологических схем выемки. Комбинированные схемы выемки, использование комбайнов избирательного действия позволяют использовать пустую породу для закладки отработанного пространства камеры без транспортировки всей отбитой горной массы на поверхность. Внедрение новых схем выемки требует комплексного анализа изменений производственного процесса с расчетом их экономической целесообразности. Вместе с тем, подобные решения позволяют снизить потери руды через вовлечение в отработку целиков.

С увеличением глубины изменяется и морфология соляных пластов, которая становится сложнее за счет наличия складчатости, фактурных осложнений, пережимов и изменений углов наклона. По причине наличия таких осложнений в строении и залегании рудного тела растут затраты на геофизические работы, необходимые для обнаружения мест, опасных для жизни и здоровья горнорабочих [38]. Такая проблема в большей степени свойственна глубокозалегающим месторождениям, как например, Гремячинское.

На протяжении длительного времени промышленная добыча калийной соли осуществлялась только на Верхнекамском месторождении. Расширение объемов производства достигалось за счет вовлечения новых пластов и разработки новых горизонтов. С развитием и удешевлением геофизических методов сложилась

ситуация, при которой проблема неопределенности запасов (геологический риск) для российской калийной промышленности стала не такой существенной, как для других объектов [35].

*К горнотехническим факторам* относятся: механические свойства полезных ископаемых и вмещающих пород, несущая способность грунтов, способы разрушения массива, способы выдачи руды и т.д. [19].

В ходе сложившейся мировой практики до 85 % калийной соли добывается подземным способом с различными системами разработки [55].

В российской практике чаще применяют камерную систему с оставлением межкамерных целиков и последующей закладкой выемочного пространства [31].

Характерной чертой камерной системы разработки является низкий коэффициент извлечения. Потери руды на месторождениях калийной соли достигают 75 % погашаемых запасов [31]. Повышение коэффициента извлечения руды может быть достигнуто путем применения камерной системы с оставлением податливых целиков, которые по истечению заданного периода времени разрушаются. Это трудоемкий и сложный процесс, требующий особого подхода к организации горных работ, который в условиях высокой волатильности цен может оказаться экономически нецелесообразным [2].

На калийных месторождениях коэффициент крепости пород – низкий, находится в пределах от 2 до 4 [21]. По причине невысокой крепости осуществление буровзрывных работ для разрыхления породы невозможно, вместо них применяются проходческо-очистные комбайны. Производительность добычи на калийных месторождениях напрямую зависит от характеристик комбайнов, доступности запасных частей, горюче-смазочных материалов, сложности технического обслуживания и ремонта, устойчивости машины к агрессивной среде в горной выработке.

Технология извлечения калийных руд очень схожа с отработкой угольных месторождений. Однако, из-за геологических особенностей калийных руд, в частности, характерного для них свойства водорастворимости, степень механизации производственного процесса здесь ниже, чем на угольных

месторождениях. Это выражается в используемом виде горных машин: добыча угля осуществляется с применением поточного транспорта, в то время как для калийных руд необходимо сочетание и цикличного, и поточного транспорта. Циклический транспорт характеризуется наличием холостого хода, на калийных месторождениях он представлен самоходным вагоном, осуществляющим доставку отбитой горной массы от комбайна до перегружателя. Сочетание циклического и поточного транспорта неизменно приводит к нарушению непрерывности процесса и появления технического простоя [1]. Отсюда возникает потребность в качественном планировании с целью синхронизации отдельных частей технологической цепочки и вспомогательных цехов [114].

Практика эксплуатации иностранных комбайнов на калийных месторождениях показывает, что особенности их конструкции обеспечивают хорошие показатели надежности приводов. Однако по некоторым параметрам они значительно уступают комбайнам российского и белорусского производства, поскольку недостаточно приспособлены к геологическим условиям Верхнекамского и Старобинского месторождений. Цена на зарубежные комбайны в 2–3 выше, заправка гидросистем требует специализированных жидкостей. Эти и ряд других недостатков привели к тому, что при разработке калийных месторождений используется по большей части техника отечественного производства.

*Природно-климатические факторы.* Крупнейшие месторождения калийных солей расположены на территориях с умеренно-континентальным и континентальным климатом. Особенностью таких зон является избыточное увлажнение территории из-за того, что количество осадков превышает испарение. Поверхностное складирование отходов добычи водорастворимых пород в таких климатических условиях приводит к проникновению рассолов в поверхностные и подземные воды. Это меняет их химический состав и может привести к нанесению ущерба окружающей среде [35].

*Гидрологические факторы.* Наиболее критичная проблема для калийных рудников связана с нарушением водозащитной толщи и последующим

затоплением. Применение камерной системы разработки обосновано тем, что при ней обеспечивается поддержание водозащитной толщи без нарушения ее сплошности на протяжении всего периода эксплуатации рудника. Тем не менее, аварийные ситуации для калийных рудников не редкость, на Верхнекамском месторождении за практически столетнюю добычу произошли 3 крупномасштабные аварии [20]. Так, например, в 1986 году в результате затопления Третьего Березниковского калийного рудника были безвозвратно потеряны 300 млн тонн извлекаемых запасов, всю работающее оборудование и сооружения, а суммарный ущерб составил более 300 млн рублей в ценах 1981 года [54]. Обеспечение непрерывного мониторинга целостности водозащитной толщи с помощью современных геофизических, геомеханических и гидрогеологических методов является одним из ключевых факторов обеспечения эффективности добычи калийной соли. По различным оценкам, стоимость калийного сырья, необходимого для производства тонны удобрения, составляет от 1 до 6 долларов [15]. С учетом текущих спотовых цен, которые в течение 2023–2024 гг. колебались в пределах от 300 до 500 долларов за тонну, можно заключить, что затраты на добычу исходного сырья занимают небольшую долю (около 1 %) в конечной себестоимости удобрения. Основная добавочная стоимость приходится на этап обогащения руды и транспортировку готовой продукции. Особенно это характерно для российской калийной промышленности, ориентированной на экспорт удобрений. Удаленность производственных площадок от экспортных терминалов составляет от 3200 до 8190 км, в то время как, аналогичные показатели для канадской, белорусской и немецкой промышленности составляют от 85 до 1700 км [15].

Таким образом, можно заключить, что комплекс геологических особенностей строения и залегания калийных солей определяет вид принимаемых технологических решений по организации горных работ, а, следовательно, влияет на формирование рисков. Сочетание невысокой крепости, водорастворимости и пластового залегания обуславливает применение камерной или столбовой системы разработки, использование циклического и поточного транспорта в рамках одного

производственного процесса. Проявление рисков событий здесь в большей степени связано с затоплением рудников в результате нарушения сплошности водозащитной толщи, загрязнением грунтовых и подземных вод солесодержащими отходами, а также влиянием технологических простоев на показатели производительности из-за особенностей организации работ в части применяемого транспорта.

### **1.3 Развитие технологического инструментария оценки рисков в современных условиях**

В последние годы в научной среде наблюдается повышенный интерес к включению цифровых технологий в процесс оценки рисков горнорудных предприятий. Развитие цифровых технологий также привело к появлению новых инструментов, на основе которых становится возможным расширить границы применения методики снижения неопределенности в производственном процессе.

Цифровые технологии позволяют проводить имитационное моделирование технологических процессов, собирать и обрабатывать большое количество информации, повышать точность существующих методов планирования и качество прогнозов [51]. Отсюда растет интерес к методикам, позволяющим решать задачи большей размерности, проводить исследования большого числа вариантов решения задачи с помощью вычислительной техники и специализированного программного обеспечения [53].

По данным Росстат за 2017–2021 гг. затраты на внедрение цифровых технологий в производственную деятельность увеличились на 43 %. Растут затраты на приобретение, собственную разработку и внедрение цифровых решений и в добывающем секторе: на начало 2022 года они составили 55 млрд рублей, что на 23 % выше аналогичного показателя за 2017 год. Об увеличении интереса к внедрению в производственные процессы цифровых технологий свидетельствует рост числа специалистов в этой области. С 2017 года их количество увеличилось на 19 % до 731 тысячи человек [44].

По данным Росстата 498 отечественных организаций имеют в своем распоряжении специализированные программные продукты, предназначенные для математического и имитационного моделирования. Подобного рода обеспечение относят к классу средств обработки и визуализации массивов данных. К этому разделу также относят средства обработки и анализа геологических и геофизических данных, Больших данных, средства управления информационными ресурсами и основными данными (ECM, MDM). По суммарному количеству продуктов в этом классе, которыми пользуются в своей деятельности отечественные организации, математическое и имитационное моделирование занимает долю равную 10 % [44]. Такой показатель свидетельствует о распространенности использования этих методов для обработки входных данных.

Отечественные добывающие компании последние несколько лет начали проявлять активный интерес к цифровизации своих технологических процессов. Комплексное внедрение цифровых технологий было осуществлено компанией ООО «Еврохим – ВК» на Гремячинском месторождении калийных солей. В связи с тем, что добыча началась совсем недавно (с 2019 года), здесь стало возможным интегрировать систему критериев контроля бизнес-процессов на ранних этапах разработки. В результате было достигнуто сокращение продолжительности производственного цикла и увеличение среднесуточного объема добычи на 26 %. В перспективных планах компании находится внедрение удаленного управления комбайнами и полный вывод людей из рабочей зоны [108].

Усложнение исходных параметров горно-геологических систем при организации горных работ способствует формированию потребности в разработке новых методик оценки эффективности. Ведущая роль здесь принадлежит включению цифровых технологий в разрезе становления нового технологического уклада. Цифровизация производственного процесса способствует качественному развитию добывающей отрасли [49].

Вместе с тем внедрение цифровых технологий в производственный процесс происходит недостаточно обоснованно [33, 47, 128]. Готовые цифровые решения наслаиваются поверх существующей технологической цепочки без ее

качественной трансформации, вследствие чего не достигается результата – повышения экономической эффективности предприятия [109]. На сегодняшний день добывающие предприятия накопили большие массивы данных, касающиеся различных аспектов производственного процесса, однако, методик, позволяющих с низкими трудозатратами анализировать большие объемы сырых значений, недостаточно [57].

Сами понятия «цифровизация», «цифровая экономика» напрямую связаны с концепцией развития под названием «Индустрия 4.0» и становлением нового технологического уклада [11]. Некоторые авторы считают стартом четвертой промышленной революции развитие технологий машинного обучения, искусственного интеллекта, распространение элементов киберфизических систем в промышленности, создание виртуальных копий физических процессов [42, 99].

К элементам цифровых технологий относят использование компьютеризированных или цифровых устройств, методов и систем, оцифрованных данных, призванных снизить затраты, повысить производительность и эффективность предприятий [105].

Инновационное развитие добывающих предприятий связано с переводом горной промышленности в категорию высокотехнологичных отраслей благодаря внедрению современных цифровых технологий [85]. К таким технологиям относятся беспилотные роботизированные комплексы горного и карьерного оборудования, цифровая телеметрия потока, интернет вещей (межмашинные коммуникации), цифровые 3D-клоны горных и карьерных машин, коммуникации), цифровые 3D-клоны инженерных объектов и искусственный интеллект в обработке больших массивов инженерной, финансовой, экономической и управленческой информации [85]. В научной литературе встречается понятие «Mining 4.0», под которым понимают совокупность цифровых технологий применяемых для трансформации добывающего процесса горных предприятий, по аналогии с термином «Индустрия 4.0». Конечная цель построения такой системы заключается в создании полностью автоматизированной шахты, где добыча

ведется без непосредственного участия человека, который выполняет роль оператора технологического процесса [71].

M. Wang и др. при помощи контент-анализа определили перечень цифровых технологий, наиболее востребованных в минерально-сырьевом секторе: устройства радиочастотной идентификации (RFID); системы глобального позиционирования (GPS); интернет вещей (IOT); географические информационные системы; датчики; дополненная реальность (AR); виртуальная реальность (VR); фотограмметрия; лазерное сканирование; искусственный интеллект (ИИ); 3D-печать; робототехника; Большие данные; блокчейн; математическое и имитационное моделирование [121].

Aaron Young предлагает распределить наиболее популярные цифровые технологии в горной отрасли по трем кластерам: данные, связь, принятие решений. Автор дает определение кластеру «Принятие решений» как аналитическому процессу, в котором участвуют как люди, так и технологии. К этой группе автор относит специфические методы аналитики данных, обучение персонала, математическое и имитационное моделирование. Исследование А. Young позволяет лучше понять структуру и взаимодействие между отдельными компонентами цифровой трансформации, специфичную именно для горнодобывающей отрасли [124].

Коллектив авторов Mudan Wang, Cynthia Changxin Wang отмечает, что цифровые технологии оказывают ключевое влияние на рост производительности труда в отрасли. Согласно исследованию, перечисленные технологии наилучшим образом применяются для анализа и учета рисков, управления цепочкой поставок, а также защиты обмена информацией [121].

По мнению E. Kagan, E. Goosen, цифровизация технологических процессов горного предприятия способствует большей интеграции внешней среды предприятия во внутреннюю. В доказательство данного тезиса авторы приводят примеры удачных совместных разработок добывающих компаний с предприятиями смежных, преимущественно наукоемких, отраслей. Одновременно с этим авторы приходят к заключению, что российский горнодобывающий сектор,

представленный в основном вертикально интегрированными компаниями, пока находится на раннем этапе цифровой зрелости, поскольку внедрение цифровых технологий здесь ограничивается запуском пилотных проектов [78].

Kai Smith, Samad Sepasgozar затрагивают вопрос государственного регулирования и финансовой поддержки горнорудных предприятий на примере Австралии. Авторы настаивают на разработке государственных стандартов, регулирующих цифровую трансформацию отрасли, введении налоговых льгот при внедрении инноваций и проведении НИОКР.

В статье подчеркивается важность государственного надзора за повышением квалификации работников, поскольку цифровизация неизменно приведет к изменению структуры рынка труда, а значит, к увеличению безработицы [112]. С проблемой недостаточности стандартизации при внедрении интеллектуальных технологий, обеспечивающих повышение безопасности сотрудников, пишут и Shirong Ge, Fei-Yue Wang [120]. Они соглашаются с Kai Smith, Samad Sepasgozar, что государство должно проявлять большую инициативу в осуществлении контроля над качеством безопасности рабочих.

Коллектив авторов Abdullah Aziz, Olov Schelén, Ulf Bodin, придерживается мнения, что горнодобывающая отрасль по природе своей консервативна и слабо реагирует на внедрение цифровизации из-за инфраструктурных ограничений в области связи, управления данными, хранения и обмена информацией. В их трудах анализируется текущее состояние информационных технологий в отрасли и обозначается проблема, появившаяся из-за технологического разнообразия различных систем и устройств, предлагаемых разными поставщиками, что препятствует совместимости, распространению данных и безопасному обмену информацией между программными комплексами.

Исследованиям, посвященным анализу применимости интернета вещей, уделяется много внимания в научной среде. Например, авторы Fatemeh Molaei, Elham Rahimi, Hossein Siavoshi оценивают преимущества умного автоматизированного рудника в области обеспечения безопасности работников, управления активами, снижения простоев. Ученые приходят к заключению, что

добывающая отрасль слабо адаптируется к цифровым технологиям. По их мнению, на данный момент развития техники и технологии, создание интегрированной полностью автоматизированной системы «умного рудника» является для предприятий непосильной задачей. Авторы связывают такое положение дел с инфраструктурными ограничениями в области связи, управления данными и их хранения, а также большим доверием со стороны персонала к старым, проверенным методам работы [92].

Труды Uwe König, Herbert Pöllmann сфокусированы на внедрении цифровизации в процесс минералогического мониторинга с целью повышения эффективности анализа и контроля добываемого сырья. Использование модернизированной системы мониторинга открывает возможности по более точечному осуществлению обогащения руды, ведущему к повышению коэффициента извлечения полезного компонента [83]. Работа A. Atkins посвящена улучшению обеспечения совета директоров информацией о наиболее существенных геотехнических и операционных рисках в добывающей промышленности. Его исследование предлагает методику объединения административного персонала по управлению рисками и инженерных специалистов, понимающих тонкости технологического процесса и его компонентов, при помощи цифровых технологий, а именно интеллектуального анализа данных [52].

Коллектив авторов Bumchoong Kim, Kyoungkeun Yoo разрабатывает стратегии цифровой трансформации в добывающем секторе. При этом они формируют перечень технологий, которые могут быть применимы на всех этапах жизненного цикла проекта. При разведке планируется оцифровать рудные тела, чтобы улучшить идентификацию полезного ископаемого, использовать программное обеспечение для геокартирования с искусственным интеллектом для обнаружения ранее неизвестных рудных тел. В процессе проектирования предлагается применять интеллектуальную автоматизацию и оптимизацию, чтобы использовать технические узкие места и сквозной анализ последующих транзакций или улучшить процесс принятия решений в режиме реального времени. В процессе

отработки месторождения полезных ископаемых считается эффективным создать имитационную модель (цифровую тень процесса), чтобы быстро идентифицировать слабые места и сократить простои. В процессе технического обслуживания предпринимаются шаги по внедрению системы продления срока обслуживания и сокращения трудозатрат. На стадии организации продаж предлагается внедрить моделирование для автоматизации контрактов, оптимизации цен и прогнозирования поведения покупателей за счет сочетания искусственного интеллекта и технологии блокчейн [82].

В работе Igor Temkin, Alexander Myaskov, Sergey Deryabin анализируются методы унификации разнородной, связанной с функционированием горнотранспортного оборудования информации, которая становится доступной для анализа в рамках современных систем управления технологическими операциями на карьерах. Наиболее подробно рассмотрены принципы интеграции информации при построении динамических 3D-моделей элементов инфраструктуры и технологических систем с использованием больших массивов телеметрических данных. Авторы приходят к выводу, что для решения задач координации действий и управления согласованным движением автономных транспортных объектов успешно применяется широкий спектр методов предиктивной аналитики и машинного обучения. Предлагается подход к моделированию процессов открытых горных работ, заключающийся в формализации всего технологического комплекса на три агентные системы, которые определяются как: техническая мобильная, инфраструктурно-технологическая и геоструктурная. Полученные модели позволяют сформулировать конкретные рекомендации для повышения эффективности работы на добывающем предприятии за счет оптимизации горнотранспортной структуры [116].

Ряд ученых считают конечной целью цифровой трансформации создание полного цифрового двойника, виртуальной копии производственного процесса, связанной с физическими объектами и управляющей процессом на основе предиктивной аналитики. Авторы S. Deryabin, I. Temkin в своей статье формулируют принципы разработки платформенных решений для интеграции

важнейших функциональных элементов, обеспечивающих выполнение технологических процессов полного производственного цикла. Предложенный перечень принципов призван облегчить реализацию технологий цифрового двойника транспортно-технологического процесса добычи руды [61]. О роли технологий цифрового двойника, математического моделирования в добыче полезных ископаемых посвящена работа Р. Love, J. Matthews. Здесь анализируется, каким образом можно совместить разрозненные информационные технологии в единую систему, наподобие цифрового двойника, для повышения конкурентоспособности производимой продукции. В заключении авторы приходят к выводу, что влияние цифровых технологий на осуществление деятельности добывающего предприятия можно разделить на три категории: автоматизация, расширение и трансформация. По их мнению, создание структур и процессов управления, которые можно использовать для измерения (например, качественного и количественного) и управления ожидаемыми выгодами от цифровых инвестиций, должно быть приоритетом для организации [88].

Подавляющее большинство работ о роли цифровых технологий в будущем развитии минерально-сырьевого сектора декларирует, что затраты на проведение НИОКР и внедрение инноваций в области цифровизации оправданы повышением производительности работ, достигаемой за счет преимуществ этих технологий. David Humphreys, впрочем, приводит доказательства того, что с 2000-х годов темпы роста производительности в добывающей отрасли начали замедляться, что связано с цикличностью производительности.

Таким образом, можно сделать вывод, что в последнее десятилетие наблюдается устойчивая тенденция к цифровизации производственного процесса горнорудных предприятий, что подтверждается международной и отечественной практиками. За период 2017–2021 гг. затраты на внедрение цифровых технологий в производственную деятельность российских предприятий увеличились на 43 %, а в добывающем секторе – на 23 % (до 55 млрд рублей).

Несмотря на очевидные преимущества цифровизации и значительные инвестиции в этот процесс, горнодобывающая отрасль сталкивается с комплексом

проблем, требующих системного решения для достижения качественного перехода на новый технологический уровень [28, 47, 98]. Ключевая проблема связана с тем, что, несмотря на наличие инвестиций и рост числа специалистов в области цифровых технологий (увеличение на 19 % до 731 тыс. человек), внедрение цифровых решений часто происходит поверхностно, без качественной трансформации существующих технологических цепочек.

Основные направления цифровизации охватывают следующие аспекты производственного процесса: геологический мониторинг, геокартирование с применением ИИ, интеллектуальную автоматизацию, создание имитационных моделей и цифровых двойников, системы предиктивной аналитики. Перспективными направлениями развития многие авторы считают создание полностью автоматизированных производств (умных рудников), однако на текущий момент это остается недостижимой задачей для большинства предприятий. В настоящее время высокую эффективность демонстрирует внедрение удаленного мониторинга и управления техникой и машинами на новых месторождениях.

#### **1.4 Выводы по Главе 1**

1. Российская Федерация обладает уникальной сырьевой базой калийных солей, относящихся к стратегическим видам минерального сырья, от которого зависит продовольственная безопасность страны. Выявлено, что при высокой обеспеченности запасами, степень освоенности сырьевой базы очень низкая. Это связано с отсутствием спроса на большие объемы калийных удобрений на внутреннем и внешнем рынках, сложностью условий добычи и значительных объемах инвестиций в инфраструктуру регионов с высококачественными запасами калийных руд. Поэтому перспективное направление повышения эффективности хозяйственной деятельности калийных предприятий находится в области совершенствования производственного процесса добычи.

2. Специфика технологии добычи калийных солей состоит в широком применении камерной системы разработки и соответствующей ей техники (проходческо-очистные комбайны, бункеры-перегрузатели и самоходные вагоны),

позволяющей обеспечить высокий уровень механизации и безопасности работ. Кроме того, характерной особенностью добычи калийных солей является применение одновременно и циклического, и поточного видов транспорта. В процессе их эксплуатации возникают технические простои, т.е. нарушаются принципы организации производственного процесса: непрерывность, цикличность и ритмичность из-за влияния организационно-технических факторов, которые не всегда могут быть выявлены при помощи традиционных, статических, методов.

4. Развитие цифровых технологий, опыт использования которых в горной отрасли (в частности при добыче калийных руд) показал их высокую эффективность, формирует предпосылки совершенствования методов оценки рисков путем включения современного инструментария анализа большого числа данных, характеризующих условия разработки участков недр и организационно-технические факторы, влияющие на результаты производственной деятельности предприятия. Современная парадигма имитационного моделирования, сформировавшаяся под влиянием развития цифровых технологий, определяет имитационную модель как виртуальный прототип производственного процесса, воспроизводящий весь набор последовательных операций с помощью специализированного программного продукта.

## **ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

### **2.1 Формирование и развитие концепции риска горнорудного предприятия**

Важным элементом разработки методического подхода является изучение эволюции рассматриваемого процесса, а также основного изучаемого понятия. Анализ изменений в подходах к пониманию терминов «риск» и «экономическая оценка рисков» играет важную роль при разработке общей методики. Изучение существующих на сегодняшний день подходов требуется для обоснования необходимости разработки нового в связи с появлением современных инструментов оценки рисков, а также для учета специфики рисков горнорудных предприятий, их источников и факторов.

Согласно исследованию А.С. Коновалова, эволюция понимания сущности экономического риска состоит из последовательной смены трех концепций: классической, неоклассической и информационно-поведенческой. Классическая концепция определяет риск как материальный ущерб, который может быть нанесен в результате принятия того или иного экономического решения [22]. Данное определение опирается на положения теории вероятности и сравнивает риск с математическим ожиданием потерь, которые могут сопутствовать осуществлению хозяйственной деятельности.

Неоклассическая концепция риска сформировалась под влиянием исследований Ф.Х. Найта и Дж. М. Кейнса. Данное исследование ориентировано на применение положений этой концепции, согласно которой риск – это событие, которое произойдет с некоторой вероятностью, и в случае наступления приведет к отклонению от поставленной цели [22]. Информационно-поведенческая концепция базируется на проблеме выбора в условиях неопределенности через выявление факторов и механизмов, с помощью которых лицо, принимающее решение, обрабатывает информацию о процессе [22].

Экономическая оценка риска предусматривает выявление источников и факторов риска, а также определение возможных последствий наступления рискованной ситуации [10, 39].

Под источниками риска понимаются его первопричины, то есть такие события или ситуации, которые приводят к формированию риска. С практической точки зрения определение источников необходимо для поиска потенциальных рисков, ранее не выявленных, и того, откуда и как они могут проявиться [43].

Факторы риска – это конкретные условия, атрибуты или значения переменных, которые влияют на вероятность или тяжесть последствий. Фактор непременно обладает измеримостью, то есть можно количественно оценить степень его влияния на наступление рискованного события [39]. Устранение источника риска приводит к искоренению риска, в то время как изучение фактора позволяет снизить вероятность риска или тяжесть последствий [70].

При исследовании рисков горного предприятия, также требуется отдельно уточнить разницу между «риском» и «неопределенностью». Под неопределенностью понимается совокупность непрогнозируемых, стохастических событий, наступление которых невозможно предсказать [10, 39]. Она возникает в случае полного отсутствия достоверной информации о рассматриваемом событии, процессе или явлении. Неопределенность всегда связана с абсолютной случайностью, риск же создается определенными факторами от конкретных источников, которые могут быть заранее идентифицированы. Иными словами, неопределенность – это характеристика объективной реальности, которая существует вне зависимости от наличия или отсутствия экономических отношений [40]. В то время как риск всегда базируется на опыте, на анализе уже имеющейся информации, а значит, он может быть спрогнозирован и оценен.

В современной литературе много внимания уделено двойственной природе риска [39, 40]. Риск рассматривается не только как негативное событие, но и как возможность, ускоряющая достижение целей (например, колебания валютного курса могут привести как к снижению выручки, так и к увеличению [18]). Такой подход обусловлен динамической природой риска, связанной с неоднородностью

деятельности, приводящей к тому, что вероятность одних и тех же событий в разные периоды времени различна [10, 39].

Этот тезис подтверждает анализ эволюции понимания риска в добывающей отрасли. Изменение отношения к риску коррелирует с развитием методов ведения горных работ. Здесь можно выделить 5 временных периодов, на протяжении каждого из которых доминировали различные подходы к пониманию и системе измерения риска [10, 91, 118]:

1. Начало XX века. Риск отождествляется с физическими угрозами рабочим или (немногочисленному) оборудованию. Риск – это событие уже свершившееся; оценка связана с устранением последствий. Измеряемые показатели – количество травм, падение производительности, продолжительность простоев.

2. Середина XX века. Этот период характеризуется повышением механизации работ и появлением понятия безопасности труда. Поэтому риск больше связан с выходом из строя оборудования и последующим падением объемов производства. К измеряемым показателям добавляются инструктажи по технике безопасности.

3. Конец XX века. В этот период формируется осознание необходимости учета и измерения вреда, наносимого окружающей среде. К измеряемым показателям добавляется оценка воздействия на окружающую среду, учет затрат на работу с сообществами и на штрафы за несоблюдение законодательства.

4. Начало XXI века. Формируется концепция ESG (Экологическое, социальное и корпоративное управление), в которой стали учитывать климатические риски, права местного населения, социальную лицензию на деятельность, антикоррупционные процессы, прозрачность цепочек поставок. Управление таким количеством рисков носило ярко выраженный проактивный характер, который требовал действий ДО наступления рискованных событий.

5. Наши дни. Риск охватывает комплекс взаимосвязанных долгосрочных угроз, в том числе геополитическую нестабильность, технологические и логистические сбои. На фоне глобальной цифровизации появляется большой объем

данных, корректное использование которых с помощью специальных инструментов может значительно увеличить эффективность деятельности любой компании.

В представленной периодизации отражено, что находилось в фокусе понимания риска в различные моменты времени в зависимости от степени механизации производства. В других отраслях экономики ситуация может быть иной. Отсюда и отсутствие единой точки зрения в научной среде, поскольку авторы склонны анализировать риск с позиции собственной отраслевой специфики [39]. Это подтверждается большим количеством авторских определений термина «риск». Многие авторы солидарны во мнении, что риск — это сложное явление, находящееся в движении и развитии, сонаправленное с развитием техники и технологии [10].

Аналогичная ситуация наблюдается в вопросах классификации рисков, предназначенной для их систематизации на основании определенных признаков или критериев. В научной литературе приводятся различные признаки классификации рисков горнорудных предприятий: производственные, экологические, технологические, финансово-экономические и другие.

В таблице 1 предложено обобщение с некоторой долей упрощения тех групп рисков горнорудного предприятия, которые наиболее часто встречаются в различных источниках. Деление на риски, как иерархия внутри группы, довольно условно, поскольку все они взаимосвязаны между собой.

Таблица 1 – Классификации рисков горнорудного предприятия (составлено автором на основе [9, 10, 39, 43, 115, 122])

Группа рисков	Подгруппы рисков	Примеры
Производственные риски	Риски обеспечения безопасности; Техногенные риски; Логистические риски; Кадровые риски	Горные удары, утечки газа, поломки оборудования; Неисправность оборудования, неравномерность содержания полезного компонента; Задержки в поставках материалов; Нехватка рабочей силы, некомпетентность персонала

## Продолжение таблицы 1

Экологические риски	Риски загрязнения окружающей среды; Риски нарушения биоразнообразия; Климатические риски; Рекультивационные риски	Разлив токсичных отходов; Деградация экосистемы; Экстремальные погодные условия; Эрозия почвы вокруг заброшенных рудников
Финансово-экономические риски	Экономические риски; Рыночные риски; Регуляторные риски; Геополитические риски	Волатильность мировых цен; Изменения в налогообложении; Торговые войны; санкции
Социально-трудовые (общественные) риски	Риски противодействия со стороны общества; Риски, связанные с правами человека; Риски угрозы жизни и здоровью персонала; Риски, угрожающие культурному наследию	Протесты со стороны коренного населения; Трудовая эксплуатация, небезопасные условия труда; Профессиональные заболевания; Уничтожение археологического слоя
Технологические риски	Риски автоматизации; Риски организации производства; Риски кибербезопасности; Риски целостности данных; Инновационные риски	Сбои в работе автономных систем; Утечка данных; Ошибки в геологическом моделировании; Применение непроверенных технологий
Риски стадий жизненного цикла	Риски геологоразведочных работ; Риски в период разработки; Риски эксплуатационной стадии; Ликвидационные риски	Неопределенность запасов; Перерасход средств при строительстве рудника; Выход оборудования из строя; Недостаточное количество средств для вывода из эксплуатации и консервации
Отраслевые риски	Рыночные риски; Внутриотраслевые риски	Рост конкуренции; увеличение налоговой нагрузки; высокие барьеры «входа» в отрасль
Риски-ESG	Согласование рисков с факторами экологического, социального и управленческого характера (ESG), отражающими современные приоритеты устойчивого развития	Риски из экологической, социальной и управленческой групп: загрязнение окружающей среды, нарушение прав человека, коррупция

Как показывает анализ научных исследований, многие авторы выделяют группу рисков, источниками которых являются элементы производственного

процесса и звенья технологической цепочки (в случае горнорудного предприятия, добычи полезных ископаемых). Они носят названия «операционные риски», «технологические риски», «производственные риски». В англоязычной литературе также встречаются «industrial risks», «machines risks», «operation factors» [12, 63, 69, 91, 118].

В представленной обобщенной таблице в отдельную группу выделены «производственные риски» и отдельно «технологические риски». Производственные риски аккумулируют внутри себя угрозы основному производственному процессу, исходящие, в том числе, со стороны горно-геологических факторов и приводящие к простоям и остановкам процесса добычи полезных ископаемых. Технологические риски обусловлены факторами, оказывающими влияние на повышение производительности, улучшение и ускорение операций, из которых состоит производственный процесс. Иногда к технологическим относят риски, которые возникают в связи с внедрением новых технологий или изменением текущей технологической цепочки.

Производственные риски включают угрозы основному процессу добычи, вызывающие остановку производственного процесса. Понятие производственного риска тесно связано с понятием производственного процесса, под которым понимают комплекс взаимодействия предметов труда, средств труда и человеческого труда с целью получения готовой продукции. Данная группа рисков связана с исключительно негативными событиями, происходящими в процессе деятельности и имеющими «единоразовый» характер, источниками которых могут быть как внутренние факторы (ошибки персонала, выход оборудования из строя и т.д.), так и внешние (задержки в поставках сырья, влияние геологических условий и т.д.). Причины наступления производственного риска связаны с нарушениями или ошибками, которые происходят из-за неправильного «поведения» факторов производства (средств и предметов труда, персонала) и влияния внешних условий (например, горно-геологических). Такой риск может наступить как внутри основного процесса, так и внутри вспомогательных или обслуживающих процессов.

Технологические риски носят системный характер, причины их возникновения связаны с несовершенствами организации производства, они могут происходить с определенной интенсивностью: не будет устранен источник – пока не будут внесены изменения в технологию. Технологические риски отражают двойственную природу риска, поскольку возникают внутри технологического процесса и могут проявляться не только как негативные события, но и как возможности. Например, в случае добычи калийных солей, метод закладки выработанного пространства, зависящий от крепости пород, с одной стороны, может привести к отставанию от календарного плана, а с другой стороны, благодаря вовлечению пустой породы, может привести к снижению затрат на транспортировку.

Развитие инструментария динамического моделирования, появление новых методов сбора и обработки разнородных наборов данных позволяет комплексно учитывать причины нарушения нормального функционирования производственного процесса, обусловленные как горно-геологическими условиями, так и зависящими от них особенностями применяемых технологий и оборудования. С помощью обработки большего количества данных отпадает необходимость сложной декомпозиции производственного процесса на технологический (основной), вспомогательный и обслуживающий для выявления места и причины риска. Целесообразнее становится представление всего производственного процесса как набора основных и вспомогательных операций, осуществляемых исполнителями при помощи определенных средств и предметов труда. В рамках анализа рисков, приводящих к нарушениям в достижении целей производства, можно одновременно учитывать как «поведение» факторов производства, так и технологическую схему.

Отсюда, для обозначения анализируемой группы выбран термин «производственно-технологический риск». Под ним понимается вероятностное событие, вызванное несогласованностью в основных и вспомогательных операциях, повлекшее за собой отклонение от плановых результатов деятельности.

Наступление производственно-технологического риска выражается в длительной или кратковременной задержке хода проведения работ, следствием которого являются нарушения непрерывности, ритмичности или цикличности производственного процесса.

Проведение экономической оценки рисков для выявления внутренних резервов повышения эффективности операционной деятельности не является типичным. Традиционно эта методология используется для анализа и снижения неопределенности при долгосрочном прогнозировании, например, при подготовке инвестиционного проекта, когда количество достоверной информации о процессе ограничено. В таком случае определение факторов риска носит обобщенный и субъективный характер. При краткосрочном планировании, когда стоит цель предотвращения отклонения от целевых операционных показателей, ситуация противоположная, следовательно, становится целесообразным принять в качестве факторов риска конкретные параметры производственного процесса.

На рисунке 5 отражена общая схема взаимосвязи составляющих риска и его последствий.

В литературе разделяют риски на две группы по возможности влияния на них – управляемые и неуправляемые [9, 12]. В случае горной отрасли к неуправляемым или недиверсифицируемым (то есть тем, на которые сложно повлиять) рискам будет относиться еще комплекс климатических, горно-геологических рисков, волатильность цен на мировом рынке по политическим причинам. Несмотря на то, что производственно-технологические риски горного предприятия относятся к диверсифицируемой группе, технические решения, разрабатываемые в проектной документации, изначально опираются на неопределенность данных о геологическом строении рудного тела. Поэтому, от качества проработки технологической составляющей проекта зависит способность предприятия адаптироваться к проявлению специфических системных рисков горной отрасли.



Рисунок 5 – Взаимосвязь элементов и последствий производственно-технологического риска (составлено автором)

Таким образом, можно констатировать, что все рисковые ситуации имеют динамический характер – то есть вероятность их наступления в разное время различается. В связи с этим является очевидным тот факт, что в управлении рисками требуется использовать инструменты и методики, воспринимающие производственные процессы как динамическую систему. Такие подходы позволят точнее локализовать периоды наивысшей вероятности наступления рисков, а значит, позволят улучшить планирование и повысить качество принимаемых управленческих решений.

## 2.2 Анализ методических подходов к экономической оценке рисков

Система оценки рисков включает в себя множество алгоритмов и методов, предназначенных для их выявления, анализа и снижения в различных отраслях. Оценка рисков необходима для повышения устойчивости и адаптируемости организации для достижения производственных показателей [25]. Методики оценки рисков широко представлены в литературе, ниже приведен общий анализ тенденций изменений в подходах к оценке рисков, отмечены ключевые векторы изменения инструментария, применяемого в рамках принятой методологии.

Анализ источников литературы показывает, что подавляющее большинство предприятий минерально-сырьевого комплекса придерживаются общей методологии оценки рисков, изложенной в стандарте ISO 31000:2018 (в российской практике ИСО 31000-2019 Менеджмент риска. Принципы и руководство) [46, 70]. Согласно этому стандарту, оценка рисков – один из ключевых этапов процесса управления рисками, который включает анализ среды, оценку риска, обработку риска, мониторинг и пересмотр, обмен информацией и консультирование, документирование и отчетность [8].

Оценка риска, согласно стандарту, состоит из трех этапов: идентификация риска, анализ риска, сравнительная оценка риска [7].

Поскольку применяемый ГОСТ представляет собой перевод зарубежного стандарта, при толковании терминов могут быть расхождения. Этап оценки рисков в оригинальном стандарте носит название «assessment». Согласно определению Оксфордского словаря, данный термин используется для обозначения «суждения или мнения о ком-либо/чем-либо, которое было очень тщательно обдумано». Определение «risk assessment» в словаре построено на перечислении этапов, изложенных в стандарте ISO, то есть содержит качественное описание изучаемого явления или процесса. В то же время в русском языке слово «оценка» употребляется в двух значениях: первое значение близко по смыслу употреблению слова в английском языке, а второе – связано с «процессом оценивания, определения количественных и качественных параметров».

Это расхождение получило свое отражение в научной литературе: одни авторы под «оценкой риска» понимают комплекс действий по идентификации, анализу, качественному и количественному описанию риска, другие включают в «оценку риска» только его количественную характеристику. В данной работе автор придерживается первой позиции, согласно которой качественное описание риска должно осуществляться на этапе анализа, а определение количественных характеристик риска – на этапе «сравнительная оценка риска».

Стандарт определяет назначения этапов следующим образом [6]:

1. Идентификация риска: распознавание потенциальных рисков и оценка их влияния на цели предприятия или проекта.
2. Количественный и качественный анализ: количественные методы используют статистический инструментарий для измерения вероятности и воздействия рисков, в то время как качественные методы сосредоточены на субъективных оценках для определения приоритетности рисков на основе их значимости.
3. Обработка риска: эффективное управление рисками предполагает разработку стратегий по минимизации выявленных рисков. Это может включать в

себя уклонение, передачу, принятие или снижение риска с помощью различных дополнительных средств контроля.

4. Непрерывный мониторинг: постоянная оценка рисков на протяжении всего жизненного цикла проекта обеспечивает своевременное выявление новых рисков и управление ими, повышая общую устойчивость проекта.

Стандарт ISO 31000:2018 представляет собой надежную основу для управления рисками, многие исследователи отмечают, что его внедрение может оказаться чересчур сложным, потребовать значительных организационных изменений и удержать предприятия от полного внедрения этих методов [58]. Одновременно с этим стандарт хоть и обеспечивает структурированный подход к управлению рисками, не учитывает (и не может учесть) специфику отдельных отраслей, а фиксированное соблюдение требований может препятствовать адаптации предприятия в быстро меняющихся условиях [43].

В процессе исследования выполнен анализ работ, предлагающих улучшения стандартной методики с целью отразить некоторые специфические проявления горнорудной отрасли. Результаты анализа представлены в таблице 2.

Несмотря на то, что перечисленные рекомендации и методики улучшения стандартного алгоритма оценки рисков важны при поиске путей повышения эффективности деятельности горнорудных предприятий, по мнению все большего числа исследователей, динамичный характер развития горных работ может привести к возникновению непредвиденных проблем, которые традиционные методы управления рисками не могут решить в полной мере, что требует более адаптивных и инновационных подходов.

Таблица 2 – Анализ методик экономической оценки риска горнорудных предприятий (составлено автором на основе [10, 25, 39, 46, 70])

Авторы	Содержание	Преимущества	Недостатки
Логинова И.О.	Методика предусматривает <i>комплексную оценку риска</i> , объединяющую два взаимосвязанных аспекта: расчет степени риска по каждому фактору и <i>расчет интегрального показателя степени риска</i>	Автором уточнена классификация рисков, на базе которой разработаны и ранжированы рискообразующие факторы	Ранг и вес рискообразующих факторов учитывают общую специфику промышленных предприятий, но не отражают различия внутри отраслей промышленности
Соловьева Н.В.	Методика предназначена для оценки рисков и возможностей проводить на основе <i>структурно-логической модели факторов</i> , разделенных на 5 групп	Методика позволяет взаимоувязать факторы внешней, и внутренней среды предприятия	Методика применима для оценки рисков на стратегическом уровне
Галкина Н.В., Кравчук И.Л., Смолин А.В., Перятинский А.Ю.	<i>Риск представляет собой баланс между доходами и расходами в процессе создания и реализации проекта</i> горных работ, при котором взаимодействие всех уровней персонала – от владельцев до рабочих – направлено на одновременное улучшение ключевых параметров производства: уровня безопасности, объемов выпуска продукции и экономической эффективности	Классификация факторов производственного риска разработана для каждой группы персонала по критерию выгод и ущерба, а вероятность риска рассчитывается как результат слаженности действий. Методика учитывает дуальную природу риска	Слабое разграничение операций, относящихся к основному производству и вспомогательному, факторы риска носят общий характер и не всегда могут быть оценены количественно

Продолжение таблицы 2

<p>Дзагоева М.Р., Цховребов А.Р., Комаева Л.Э.</p>	<p><i>Методика основана на составлении карты рисков, общее значение риска рассчитывается через определение значений четырех критериев оценки: критерий вероятности события, критерий скорости нарастания риска, критерий продолжительности риска, критерий воздействия риска</i></p>	<p>Составление карты рисков в различные периоды времени позволяет учесть динамику изменения рисков, в том числе под влиянием негативных и позитивных событий</p>	<p>Границы приемлемости риска носят субъективный характер, методика не предполагает пофакторный анализ риска, достаточным является расчет соотношения вероятности и затрат на снижение риска</p>
<p>Черный К.А., Файнбург Е.А., Розенфельд Е.А.</p>	<p><i>Методика вербально-балльной оценки, позволяющая получить количественное выражение риска на основе таблицы риска</i></p>	<p>Оценка не требует больших трудоемких расчетов и позволяет получить точечное значение вероятностного ущерба</p>	<p>Методика апробирована на примере риска утраты трудоспособности, присвоение баллов происходит экспертным методом и поэтому субъективно</p>

## **2.3 Анализ применяемого инструментария динамического моделирования для оценки рисков**

Имитационное моделирование, которое считается частным случаем математического моделирования, традиционно относят к методам количественной оценки риска [40]. Однако современная парадигма имитационного моделирования, воплощенная в концепции цифрового двойника [104], позволяет повысить эффективность оценки рисков на всех этапах стандартного алгоритма. Для этого необходимо воспроизвести производственный процесс (или его часть) в том виде, в котором он существует в действительности, но с набором ограничений. Эффективным методом проверки адекватности результатов моделирования считается проведение физического эксперимента с учебной установкой в лабораторных условиях [76]. Проведение натуральных экспериментов для целей оценки рисков затруднено по экономическим или технологическим причинам. Воспроизводство производственного процесса в виртуальном виде и анализ его изменения с течением времени представляется наиболее рациональным способом оценки рисков, когда информации об особенностях функционирования системы может быть недостаточно.

В научной литературе представлено большое количество работ, посвященных анализу источников риска, преодоления рискованных ситуаций, оценке потенциальных последствий с помощью математического моделирования. Так, например, в работе Hongshuo Gong, A. Moradi Afrapoli, H. Askari-Nasab проведена оценка рисков при внедрении инновационного метода добычи полезных ископаемых – the near-face stockpile (NFS, дословный перевод «метод складирования породы в забое») [72]. Путем моделирования процесса и его последующей оптимизации авторами было доказано, что применение NFS позволяет увеличить объем добычи на 5,06 %.

Оценке перегруженности вывоза отработанной горной массы при планировании подземных горных работ посвящено исследование Gabriel País Cerna и др [59]. Решение проблемы также было разработано на основе имитационной модели. Непосредственно анализ точности расчета NPV проекта с учетом его

рисковой составляющей на примере фосфатного рудника проведен в работах Ahmed Kamel, Mohamed Elwageeh и др. [79], а также Kamran Mostafaei и др. [93]. Оценка скрытых опасностей и раннее предупреждение рисков ситуаций с помощью имитации процесса в виртуальном виде произведено в работе Dejun Miao на примере шахты Люкси [90]. Здесь были идентифицированы 23 потенциальных источника риска. Динамическому моделированию возможных рисков ситуаций с их последующей оптимизацией посвящены работы Janusz Rusek [107], Jairo Romero Huerta [75]. Обеспечение должного уровня безопасности труда представлено в трудах Chunlu Jiang [77], Yachao Xiong [123], Min Hao [73], Shuang Li [87].

Анализ литературы, посвященной включению инструментов имитационного моделирования в производственный процесс, позволил выделить следующие практические области его применения для повышения экономической эффективности производства и свести данные в таблицу 3.

Таблица 3 – Практическое применение имитационного моделирования в научной литературе (составлено автором)

Области применения	Авторы разработок
Выявление и анализ источников риска	Казаков [19], E. Cordova [60]
Формирование наиболее эффективной проектной команды	F. Ansari, P. Holda, M. Khorbrehc [50]
Управление цепочками поставок	G. Baryannis [56], T. Rakaeva, P. Plekhov [102], Е.И. Казакова, В.Н. Павлыш [81]
Прогнозирование поломок оборудования	A. Bakhtizin, G. Beklaryan, V. Makarov [89], D. Lechevalier [86]
Повышение качества управленческой оценки	P. Zhang, N. Lia, M [125]. Зубрыкина [17], Y. Zhang [126]
Прогнозирование изменений цены и спроса	A. Aghaie [48], M. Riddle [103], Жаров В.С. [127]
Оптимизация параметров технологического процесса	Ф. Непша, Ф.С. Воронин, А.С. Ливен [94], A. Pinheiro [97], М.В. Кулешов [23], Ю.Л. Жуковский, Н.А. Королев, Я.М. Малькова [129]
Снижение вредных выбросов	A. Shestakov [110], J. Raimbault, J. Broere [101]

Функционал имитационных моделей, особенно в части возможностей проведения многокритериальных экспериментов, позволяет развивать научные исследования в области применения имитационного моделирования в качестве инструмента поддержки принятия управленческого решения. Большинство работ, затрагивающих повышение эффективности горнорудных предприятий путем оптимизации производственного процесса, посвящены решению конкретных, узких производственных задач с помощью методов имитационного моделирования. Особую популярность имитационное моделирование получило при управлении логистическими рисками: например, при проектировании горнодобывающего предприятия планирование сетей цепочек поставок играет большую роль в связи с удаленностью и труднодоступностью промышленных объектов, отдельное внимание уделяется составлению расписания на добычных участках в целях обеспечения непрерывности производства.

На основе анализа литературы в области практического применения имитационных моделей выявлены три ключевых направления моделирования производственного процесса горного предприятия в зависимости от конечной цели имитации. Сформулированы задачи, решаемые при помощи моделирования, а также выводы по каждой группе (таблица 4).

Таблица 4 – Обобщенные области применения имитационного моделирования при оценке рисков (составлено автором на основе [30])

Цель имитации	Решаемые задачи	Преимущества
Применение методов имитационного моделирования для принятия управленческого решения	Оптимизация трудовых ресурсов (административного персонала). Оперативное реагирование на изменения во внешней и внутренней среде. Административный персонал лучше понимает устройство производственной системы. Заблаговременная подготовка мероприятий в случае наступления рисков ситуации. Ускорение принятия управленческого решения.	Применение, в основном, в операционной деятельности. На стадии проектирования идентификация новых, ранее не заметных рисков ситуаций. Поиск и сокращение просчетов в проектных решениях. Снижение риска нерационального расширения управленческого аппарата. Сокращение времени принятия управленческого решения.

## Продолжение таблицы 4

Применение методов имитационного моделирования для оптимизации производственного процесса	Решение задач оптимизации одновременно по нескольким параметрам моделируемого объекта (системы). Анализ нелинейных зависимостей внутри производственной системы. Уточнение показателей экономической эффективности проекта. Уточнение технических параметров проекта.	Подтверждение достоверности проектных решений в рамках одной модели. Определение основных источников риска, связанных как с внутренними, так и с внешними факторами. Разработка плана по смягчению последствий наступления рисков ситуации путем проведения сценарного анализа влияния изменений наиболее подверженных риску параметров на результирующие показатели.
Применение методов имитационного моделирования для оптимизации логистики	Оптимизация управления основными средствами предприятия. Повышение производительности труда. Сокращение простоев и потерь рабочего времени.	Оценка устойчивости системы при наступлении рисков ситуации. Подбор оптимальной системы логистических потоков за счет многовариантного сценарного анализа. Оперативное изменение логистических потоков в случае наступления рисков ситуации.

Реализация технических решений внутри имитационной модели делает возможным идентификацию ранее не замеченных рисков за счет визуального отображения производственного процесса в виде интерактивного видеоряда. Изменение значений факторов моделируемой системы, то есть, по сути, сценарный анализ, позволяет оценить устойчивость системы к изменениям внешней и внутренней среды. К тому же, сценарный анализ, проведенный на основе имитационной модели, охватывает сразу несколько параметров производственного процесса, что делает его эффективнее стандартного анализа чувствительности. Административно-управленческий персонал, в распоряжении которого находится имитационная модель, имеет возможность в короткие сроки оценить влияние мероприятий по преодолению рисков ситуации на показатели эффективности предприятия.

После того, как шаги по построению и верификации модели пройдены, начинается идентификация рисков по имитационной модели и анализ

чувствительности рисков параметров на результат (доход или затраты) по сценарному анализу.

На основе полученных выводов составляется обновленная таблица рисков, и уточняются показатели экономической эффективности проекта. Последним этапом разрабатывается перечень мероприятий административного характера в случае наступления рисков ситуации при помощи многокритериального сценарного анализа, проведенного на основе имитационной модели.

Таким образом, повышается точность экономического планирования и упрощается процесс принятия управленческого решения.

Имитационная модель является не столько упрощением реальности, сколько проекцией понимания производственного процесса разработчиком или линейным менеджером, формирующим техническое задание. Поэтому многие научные проблемы, связанные с применением этого метода для оценки рисков горнорудного предприятия, так или иначе, вытекают из субъективности восприятия моделируемой системы. Частично указанная проблема решается при проведении верификации и валидации модели, однако даже самая совершенная имитация не будет учитывать форс-мажорные обстоятельства, стихийные бедствия, а также другие проявления систематического риска.

Имитационное моделирование требует высоких вычислительных мощностей для получения результата, похожего на реальность. Эта потребность возникает из-за роста входных данных для моделирования, создавая проблемы с емкостью, связанные с получением, передачей данных из одного места в другое, их хранением и анализом. Таким образом, требуются альтернативные средства передачи данных для поддержки Больших данных, производимых имитационными моделями [65].

Потребность в больших вычислительных мощностях, в конечном итоге, влияет на общую стоимость внедрения цифрового решения.

Вместе с тем, пока не существует методики, позволяющей корректно оценить, насколько дороже стоит проект, для реализации которого привлекались возможности имитационного моделирования [66].

Несмотря на то, что на рынке наблюдается рост инвестиций в решения имитационного моделирования со стороны капиталоемких предприятий, научная литература отстает по вопросам составления методологий включения имитационного моделирования в алгоритм оценки рисков. Это, в свою очередь, отражается в затратах на внедрение методов имитационного моделирования в реальной практике: для каждого нового проекта приходится с нуля разрабатывать алгоритм создания модели, выбирать методику оптимизации параметров. Указанные проблемы также приводят к отсутствию на рынке достаточного числа компетентных специалистов, способных удовлетворить спрос на внедрение методов имитационного моделирования в производственную среду.

Такая ситуация, в свою очередь, приводит к еще большему удорожанию конечной модели [68]. Всегда присутствует риск того, что результаты, полученные по модели, могут не оправдаться в реальности. В научной литературе, в области математических методов моделирования, существует большое количество работ, посвященных описанию методик применения имитационного моделирования, однако среди них встречается множество спорных и противоречивых. Много нерешенных вопросов лежит в области отбора существенных факторов и проверки надежности модели. Зачастую модель, обладающую достаточной точностью для получения результата, совершенно невозможно верифицировать разумными трудозатратами ввиду огромного количества учтенных параметров. Это также влияет на конечную стоимость внедрения модели [74].

Отношение к методам имитационного моделирования сильно изменилось за последние 25 лет: в бизнес-среде к нему начинают все чаще обращаться для решения сложных, многофакторных задач. С другой стороны, даже в деловых кругах имитационное моделирование используют как дополнительный инструмент подтверждения аналитически рассчитанных результатов. По мнению ряда авторов, имитационное моделирование находится «между наукой и искусством» [3, 104, 106]. Это связано с отсутствием четкой методологии разработки модели и методов проверки релевантности моделей, которые бы обеспечивали обоснованное

соотношение трудозатрат на проверку и получаемого эффекта от внедрения имитационного моделирования на производстве.

Таким образом, несмотря на значительный потенциал имитационного моделирования для повышения эффективности горнорудных предприятий, требуется дальнейшее развитие методологической базы и технологических решений для преодоления существующих ограничений и более широкого практического применения данного инструментария.

## **2.4 Обоснование методического подхода к экономической оценке производственно-технологических рисков горнорудного предприятия**

В работе предложены рекомендации по модернизации методики экономической оценки рисков, позволяющие выделить потери рабочего времени, приводящие к снижению эффективности операционной деятельности и определить экономически целесообразный способ снижения этих потерь. В качестве основы принята методика оценки рисков, изложенная в стандарте ISO 31000-2019 Менеджмент риска. Принципы и руководство [117].

### **2.4.1 Построение алгоритма экономической оценки производственно-технологических рисков на горнорудном предприятии**

Риск, как экономическую категорию, количественно можно оценить при помощи трех показателей:

1. Вероятность наступления рискованного события (P).
2. Ущерб от наступления рискованного события (D).
3. Затраты на преодоление риска (C).

Очевидно, что затраты на преодоление риска, то есть тот объем денежных средств, который необходимо потратить для того, чтобы минимизировать вероятность риска или ущерб от него, должен быть меньше, чем потенциальный вероятностный ущерб. В противном случае, проведение мероприятий по преодолению риска ведет к ухудшению результатов финансово-хозяйственной деятельности и не имеет экономического смысла. Математически, это можно выразить следующим образом (1):

$$\begin{cases} R(x_1, \dots, x_j) \rightarrow \min \\ C < pr_{base} \times D \end{cases}, \quad (1)$$

где  $R(x_1, \dots, x_j)$  – математическая модель, описывающая условия формирования риска;

$pr_{base}$  – вероятность наступления рискового события до реализации мероприятий по его обработке.

Исследование не затрагивает вопросы оценки рисков событий, последствия которых приводят к нанесению вреда жизни и здоровью человека или окружающей среде. В связи с жесткими требованиями в части охраны безопасности труда и норм экологической безопасности, предъявляемыми к проведению горных работ со стороны государства, дополнительный анализ соотношения затрат на снижение вероятности наступления таких рисков и потенциального ущерба кажется избыточным. Математически, это выражается следующим образом (2):

$$\lim_{d \rightarrow \infty} d \Rightarrow C \ll pr_{base} \times D \quad (2)$$

где  $d$  – величина ущерба от наступления рискового события, влекущего за собой урон жизни человека или окружающей среде.

Рекомендации, предложенные в работе, сконцентрированы на проведении стоимостной оценки производственно-технологических рисков. Она осуществляется путем построения экономико-математической модели и экспериментами с ней, в результате чего принимается решение о подготовке инвестиционного проекта, направленного на проведение дополнительных мероприятий по устранению оцененного риска.

На рисунке 6 представлен общий алгоритм оценки рисков с учетом рекомендаций, разработанных в исследовании. В зеленых кружках числами обозначена очередность этапов, ниже даны подробные пояснения к каждому.

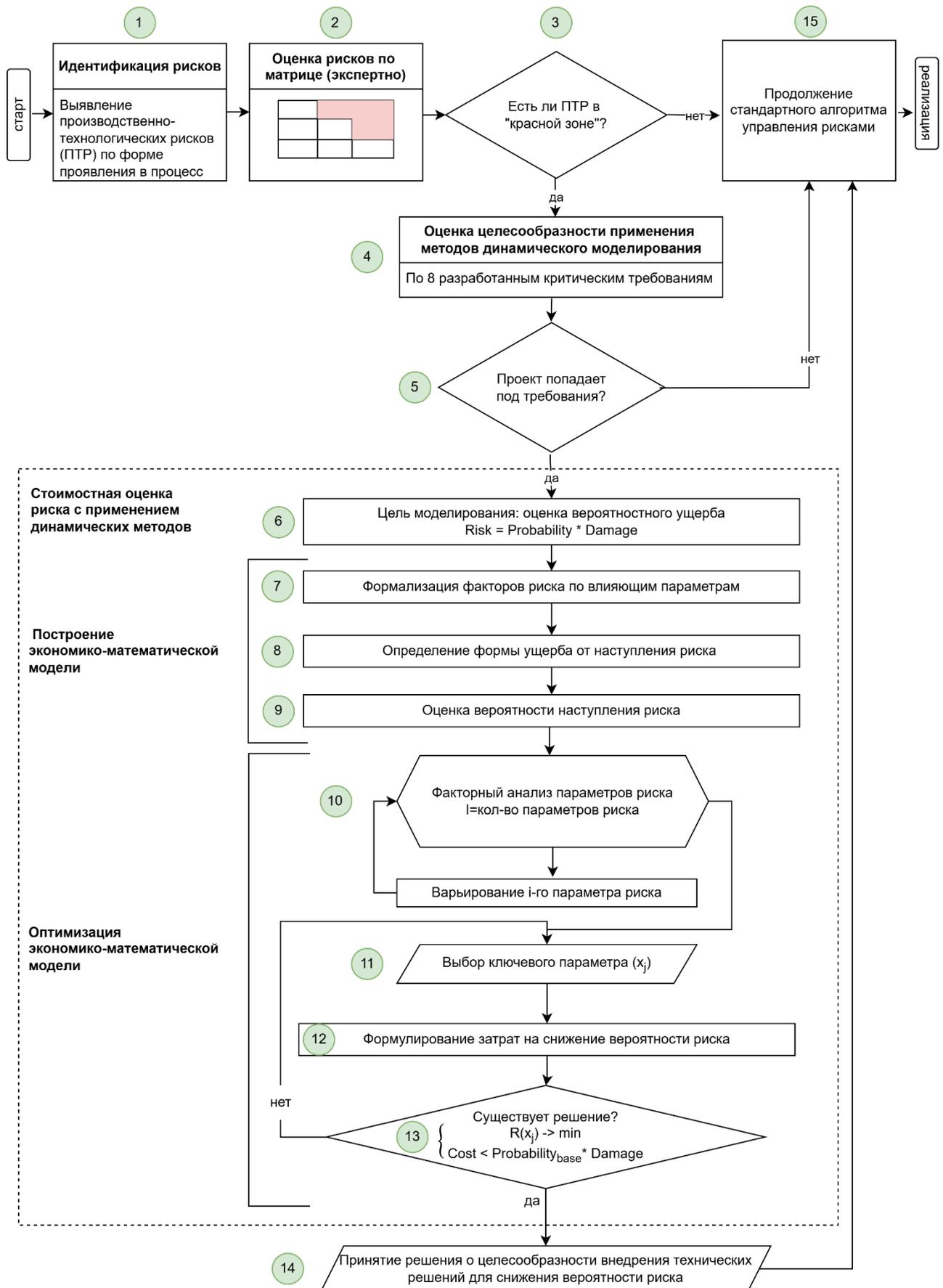


Рисунок 6 – Алгоритм экономической оценки производственно-технологических рисков (составлено автором)

**Этап 1. Идентификация рисков.** Комплексная система классификации рисков необходима для более точного их выявления и составления более эффективного плана мероприятий по снижению вероятности негативного события.

В ходе анализа выделены 8 классификаций рисков, возникающих в производственном процессе. Эти классификации представляют интерес выбором критерия классификации. Не менее важен анализ цели оценки рисков, то есть обоснование того, что является первопричиной необходимости снижения потенциального риска: повышение объемов добычи, сокращение продолжительности вспомогательных операций, повышение безопасности труда, снижение нагрузки на окружающую среду и т.д. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты контент-анализа классификаций рисков, связанных с процессом производства (составлено автором)

Признак классификации	Факторы рисков	Авторы
Вызовы производственного процесса	<i>Факторы</i> , влияющие на: – операционные вызовы; – вызовы в оценке трудовых ресурсов – вызовы в области предметов и средств труда; – вызовы в области охраны окружающей среды и корпоративной социальной ответственности.	P.C. Mishra, M.K. Mohanty [91]
Степень влияния на развитие проекта	<i>Группы факторов</i> риска: – трудовые; – организационные; – технологические.	N.I. Dlodhlu, J.H.C. Pretorius, C.J. Wyngaard [64]
Стадия производственного процесса	<i>Стадии</i> риска: – добыча; – переработка. Стадия анализируется инструментом «Железный треугольник» оценки проектов: – затраты; – качество; – время.	K.A. Suda, N.S.A. Rani, H.A. Rahman, W. Chen [115]

## Продолжение таблицы 5

Проблемная область	<p><i>Подгруппы проблем:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– общие проблемы (безопасность труда, влияние геологической неопределенности, информационное обеспечение);</li> <li>– машины и оборудование (надежность, ремонт, техническое обслуживание);</li> <li>– трудовые факторы (социальный риск, здоровье и безопасность);</li> <li>– окружающая среда (влияние природных факторов на процесс, влияние процесса на природу).</li> </ul>	A. Tubis, S. Werbinska-Wojciecowska, A. Wroblewski [118]
Оценка параметров	<p><i>Группы параметров:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– геотехнические;</li> <li>– минерального происхождения;</li> <li>– экономические;</li> <li>– безопасность и регулирование;</li> <li>– экологические.</li> </ul> <p>Источники риска в каждой группе подразделяются на:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– несистемные;</li> <li>– технические;</li> <li>– операционные.</li> </ul>	В.М. Заернюк, Ю.В. Забайкин, Б.М. Сейфуллаев [12]
Причины нарушений	<p>Фокус сделан на человеческий фактор:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– ошибки персонала;</li> <li>– недостаточная квалификация;</li> <li>– низкая дисциплина;</li> <li>– неудовлетворительная организация производственного процесса</li> </ul>	А.В. Галкин, А.В., Смолин, Е.М. Неволлина [69]
Глобальные вызовы	<p>Технологические <i>риски, обусловленные вызовами</i> цифровой трансформации:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– неблагоприятные последствия применения передовых технологий;</li> <li>– концентрация цифровой власти;</li> <li>– цифровое неравенство;</li> <li>– разрушение критической информационной инфраструктуры.</li> </ul>	World Economic Forum: Global Risks Report [122]
Воздействие на окружающую среду	<p><i>Источники</i> негативного влияния на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– планирование и осуществимость разработки;</li> </ul>	M. Deveci, E.A. Varouchakis, P.R. Brito-Parada и др. [62]

## Продолжение таблицы 5

Воздействие на окружающую среду	<ul style="list-style-type: none"> <li>– неоптимальная эксплуатация горного отвода;</li> <li>– неоптимальная эксплуатация земельного отвода,</li> <li>– практика горного дела;</li> <li>– безответственная добыча полезных ископаемых;</li> <li>– лицензия на деятельность.</li> </ul>	M. Deveci, E.A. Varouchakis, P.R. Brito-Parada и др. [62]
---------------------------------	--	---

Анализируя данные таблицы, можно заметить, что многие авторы отдают предпочтение источникам возникновения риска в качестве признака классификации. При этом некоторые авторы группируют источники в зависимости от этапа производства.

Для упрощения процесса идентификации и определения последствий риска предложена следующая группировка производственно-технологических рисков по форме проявления в производственном про:

- 1. Остановка движения по причине скопления руды или транспорта** – риски затора, которые приводят к нарушению ритмичности производства.
- 2. Простой машин или оборудования** – риски, которые приводят к нарушению непрерывности производства.
- 3. Увеличение продолжительности производственного цикла** – риски, которые приводят к нарушению цикличности.

Предложенная группировка отражает, в каком виде будет проявляться нарушение ритмичности, цикличности и непрерывности производственного процесса.

**Этапы 2–3. Качественная оценка рисков.** Качественная оценка рисков проводится экспертным методом путем построения таблицы рисков, которая широко применяется при их анализе. Выбор экспертов и методика составления таблицы рисков остается на усмотрение организации и в данной работе не рассматривается.

Если по результатам качественной оценки, риски, относящиеся к группе производственно-технологических, попали в правый верхний угол таблицы, то они представляют собой наибольшую угрозу для достижения целей проекта. В таком

случае, рационально рассмотреть возможность использования для дальнейшего анализа и обработки этого риска методы динамического моделирования.

**Этапы 4–5. Принятие решения о целесообразности применения методов динамического моделирования.** На текущий момент, исследования в области оценки экономической эффективности внедрения динамических моделей для решения производственных задач горного производства еще не получили должного развития. Тем не менее, анализ практики применения цифровых имитационных методов в горной промышленности позволил выявить набор особенностей и закономерностей, которые сопутствуют процессу поиска внутренних резервов повышения эффективности хозяйственной деятельности. Отсюда, были сформулированы следующие критические требования, наличие которых экономически оправдывает разработку динамической модели производственного процесса горнорудного предприятия при оценке производственно-технологических рисков:

1. В процессе присутствует нелинейное влияние стохастических факторов на результат [50].
2. Оценка сопряженных с этими факторами рисков затруднена или невозможна аналитическими методами [51].
3. Негативные последствия игнорирования рисков, а также шансы наступления рисковой ситуации высоки [99].
4. Производственный процесс недостаточно гибкий, преодолеть уже наступившую рисковую ситуацию затруднительно [113].
5. В ходе реализации проекта необходимо обеспечить равномерный выпуск продукции [56].
6. Необходимо изучить изменение поведения системы с течением времени, в том числе, оценить значения показателей в различные периоды времени [26, 60].
7. Необходимо оценить приемлемость управленческого решения при различных вариантах внешних условий [26].

8. Необходимо провести многокритериальный анализ чувствительности и оценить влияние на результат изменения нескольких показателей одновременно [26].

В том случае, если условия рассматриваемого проекта соответствуют 3 указанным требованиям и более, значит, проведение стоимостной оценки рисков с помощью методов динамического моделирования экономически оправдано.

#### **2.4.2 Методика отбора параметров риска по типам производственных задач для экономической оценки ущерба**

Стоимостная оценка риска включает расчет трех характеристик риска: вероятности, ущерба и затрат на преодоление, рассмотренные в предыдущем разделе. Применение динамического метода здесь будет заключаться в построении экономико-математической модели для получения временного ряда, характеризующего вероятность наступления рискованного события.

**Этап 6. Постановка цели моделирования.** Согласно схеме, предложенной в трудах А.В. Лотова, прикладное математическое исследование начинается с постановки цели моделирования [26]. В случае анализа производственно-технологических рисков, целью будет выступать расчет вероятностного ущерба, то есть получение оценочных значений вероятности события и ущерба от него (3):

$$D = pr_{base} * damage, \quad (3)$$

где *damage* – точечная оценка ущерба, полученная по результатам моделирования.

Качественное описание прикладной модели и стоимостную оценку риска можно схематично изобразить в виде «черного ящика» (рисунок 7).

1. Определение перечня исходных данных, достаточных для достижения цели моделирования. Соответствует этапу 7.
2. Определение формы ущерба и формулирование причинно-следственных связей между факторами (исходными данными) модели. Соответствует этапу 8.
3. Расчет результатов прикладной модели с получением расчетного значения вероятности наступления риска. Соответствует этапу 9.

4. Влияние на модель путем изменения исходных значений параметров. На этом этапе цель моделирования модифицируется и соответствует целевой функции с ограничением, представленной в формуле (1). Соответствует этапам 10–13.

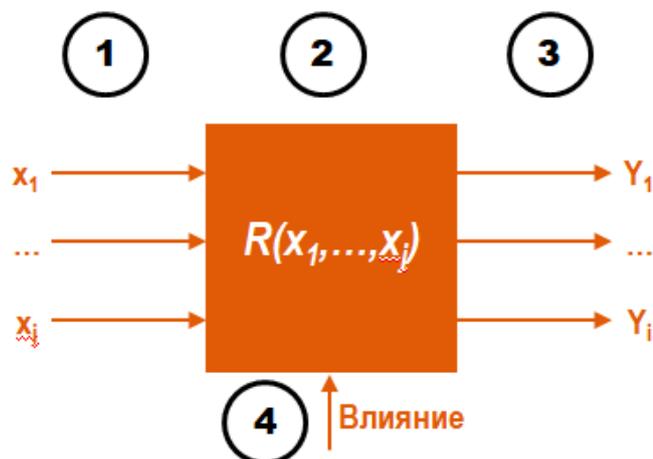


Рисунок 7 – Черный ящик, отображающий содержание качественного описания прикладной модели (составлено автором)

#### Этап 7. Формализация риска по влияющим параметрам.

Формализация риска заключается в определении такого минимально допустимого набора параметров, которые необходимо учесть в экономико-математической модели для достижения цели моделирования. Для этого необходимо заполнить таблицу влияющих параметров «Тип производственной задачи – вид влияния на производственный процесс». Формирование перечня параметров для построения экономико-математической модели производится на основе выявления факторов риска и включает две составляющих:

1. Отнесение фактора риска к группе (производственных задач).
2. Формализация факторов по четырем признакам для обоснования соответствующего параметра.

Поскольку цель данного этапа заключается в подготовке перечня факторов риска, влияющих на достижение плановых показателей, в исследовании разработана классификация факторов рисков по типам производственных задач.

Единого принятого определения производственной задачи в литературе нет. Можно сформулировать, что производственная задача решается путем реализации комплекса технических и технологических операций, направленных на устранение

возникших трудностей и обеспечение достижения поставленных производственных целей. При разработке классификации автор ориентировался на стандарты проектной деятельности и нормативно-правовые акты в части формулирования названий производственных задач [5, 34].

1. Классификация факторов производственно-технологических рисков по типам производственных задач, сформулированная автором, представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Классификация факторов производственно-технологических рисков по типам производственных задач (составлено автором)

№	Тип производственной задачи	Примеры факторов риска
1	Управление трудовыми ресурсами	Ошибки и несовершенства в планировании: – численности промышленно-производственного состава; – размера заработной платы; – режима работы предприятия.
2	Управление производственной и экологической безопасностью	Ошибки и несовершенства в планировании: – технических характеристик системы охраны атмосферного воздуха от загрязнений; – технических характеристик системы охраны подземных вод от истощения и загрязнения; – технических характеристик системы оценки шумового фактора; – технических характеристик системы складирования и утилизации отходов; – технических характеристик системы организации рекультивации земель.
3	Планирование технического обслуживания и ремонтов	Ошибки и несовершенства в планировании: – расписания технического обслуживания основного и вспомогательного оборудования; – расписания ремонтов основного и вспомогательного оборудования; – нормативного количества запасных частей и расходных материалов.

## Продолжение таблицы 6

4	Организация систем инженерно-технического обеспечения	Ошибки и несовершенства в планировании: – технических характеристик системы электроснабжения; – технических характеристик вентиляционной системы; – технических характеристик системы теплоснабжения; – технических характеристик системы водоотлива.
5	Организация выемочно-очистных работ	Ошибки и несовершенства в планировании: – технических характеристик выемочного оборудования; – технических характеристик вспомогательного оборудования; – распределения объемов горных работ по годам отработки; – параметров буровзрывных работ при очистных работах; – плеча откатки; – параметров оборудования, задействованного в транспортировке руды.
6	Организация подготовительных и капитальных работ	Ошибки и несовершенства в планировании: – схемы вскрытия; – технических характеристик оборудования, задействованного на горно-капитальных работах; – обеспечения устойчивости уступов/выработок; – параметры буровзрывных работ при проходческих работах; – плеча откатки.
7	Управление материально-техническим снабжением	Ошибки и несовершенства в планировании: – нормативных объемов горюче-смазочных материалов; – нормативных объемов товарно-материальных ценностей; – нормативных объемов во взрывчатом веществе.
8	Управление отвалообразованием и поддержанием выработанного пространства	Ошибки и несовершенства в планировании: – удаленности отвалов от месторождения; – технических показателей системы охраны отвалов; – габаритов отвала.

## Продолжение таблицы 6

9	Управление объектами наземного капитального строительства	Ошибки и несовершенства в планировании: <ul style="list-style-type: none"> <li>– параметров и расположения складов;</li> <li>– параметров и расположения административно-бытовых зданий;</li> <li>– параметров и расположения объектов для ремонта оборудования и техники;</li> <li>– параметров и расположения объектов инженерно-технического обеспечения;</li> <li>– параметров и расположения объектов охранного и пожарного назначения;</li> <li>– параметров и расположения внеплощадных объектов.</li> </ul>
---	---	---

Приведенная классификация – вариант систематизации, которая бы учитывала факторы риска в качестве параметров операционной деятельности добычи рудных полезных ископаемых. При этом параметр определен таким образом, чтобы его можно было оптимизировать, то есть подобрать такое его значение, которое бы обеспечивало максимальную экономически обоснованную производительность, без ущерба безопасности труда и окружающей среде.

Результаты исследований целого ряда авторов доказывают, что стоимость воздействия на риски, неучтенные на этапе планирования, растет с течением времени реализации проекта [84]. Эффект накопленной ошибки приводит к тому, что чем позже от старта реализации проекта наступает рисковая ситуация, тем дороже обойдется его устранение [80]. Отсюда можно построить кривую, отображающую изменение стоимости воздействия на риск в зависимости от срока реализации проекта (рисунок 8).

Перелом кривой, обозначенный на рисунке 8 пунктирной линией «а» соответствует времени выхода проекта на полную производственную мощность, поскольку именно в этот период становятся наиболее заметны ошибки в проектировании, связанные с количеством и техническими характеристиками основного оборудования, численностью персонала и т.д. Второй перелом кривой (обозначен пунктирной линией «б») соответствует периоду времени, когда запасы месторождения сокращаются, количество забоев уменьшается, бортовое содержание заметно ниже первоначального. Скорость «удорожания» преодоления

рисковой ситуации со временем снижется, поскольку большинство ошибок и просчетов в проектных решениях обнаруживаются в первые несколько лет реализации. К тому же персонал, задействованный в осуществлении проекта, на поздних сроках его жизни уже нарабатывает достаточное количество опыта, чтобы оперативно разрешить возникающие проблемы.

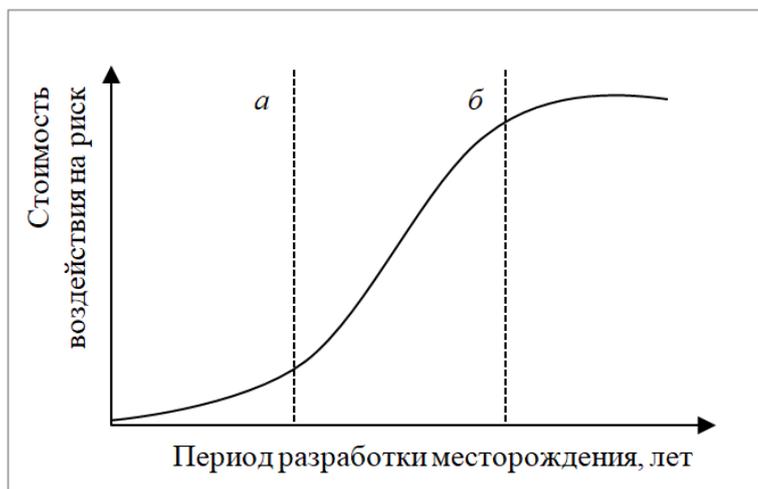


Рисунок 8 – Зависимость стоимости воздействия на риск от периода разработки месторождения (составлено автором на основе [73, 91])

Такой сложный объект как горнорудное предприятие требует комплексного подхода к организации горных работ. Тем не менее, нет гарантии того, что в ходе операционной деятельности не возникнет внештатной ситуации [24]. Последствия будут заключаться в отставании от календарного плана и недостижении заданных показателей добычи. Предложенная систематизация производственно-технологических рисков позволяет идентифицировать слабые места в выбранной технологии добычи горнорудного предприятия.

Сформулированные типы производственных задач охватывают как основное производство, так и вспомогательное. Несмотря на то, что эффективность функционирования предприятия зависит от грамотности проработки обоих направлений, затраты на устранение ошибок изменяются неодинаково. Ранжирование и систематизация производственных задач позволит точно выявить тот параметр производственного процесса, на который необходимо повлиять с целью повышения эффективности деятельности. Принимая во внимание корреляцию между стоимостью воздействия на риск и сроком реализации проекта,

представленную в научной литературе, производственные задачи распределяются по трем группам в зависимости от величины ущерба в случае допущения ошибок при организации производства:

1. Стоимость устранения ошибок велика и связана с основным производством (организация выемочно-очистных работ, организация подготовительных и капитальных работ, организация систем инженерно-технического обеспечения);

2. Стоимость устранения ошибок существенна и связана с вспомогательным производством (управление производственной и экологической безопасностью, управление отвалообразованием и поддержанием выработанного пространства, управление объектами капитального строительства);

3. Допустимо наличие неточностей, стоимость устранения невелика (управление трудовыми ресурсами, планирование технического обслуживания и ремонтов, управление материально-техническим снабжением).

Визуальное отображение групп производственных задач схематично изображено на рисунке 9.

На рисунке 9 пунктиром показана результирующая кривая, отражающая изменение стоимости воздействия на риски. Цифрами указаны кривые, отражающие соответствующую группу производственных задач. Суммарные затраты на обработку риска распределяются между выделенными группами неравномерно. Предполагается, что ущерб от наступления рисков из группы 1 наиболее высок и чем позднее станет заметно его проявление, тем больше денежных средств понадобится на устранение риска. Так, например, при разработке календарного плана может быть недоучтено влияние отработанного пространства на схему вентиляции рудника. Источником риска в таком случае будут несогласованности между результатами распределения объемов подготовительных и очистных горных работ по годам отработки (производственные задачи – организация выемочно-очистных работ и организация подготовительных и капитальных работ). Для устранения рисков ситуации придется устанавливать дополнительное оборудование, обеспечивающее приток

свежего воздуха или вносить изменения в календарный план. Оба варианта, очевидно, требуют больших вложений денежных средств и временных затрат.

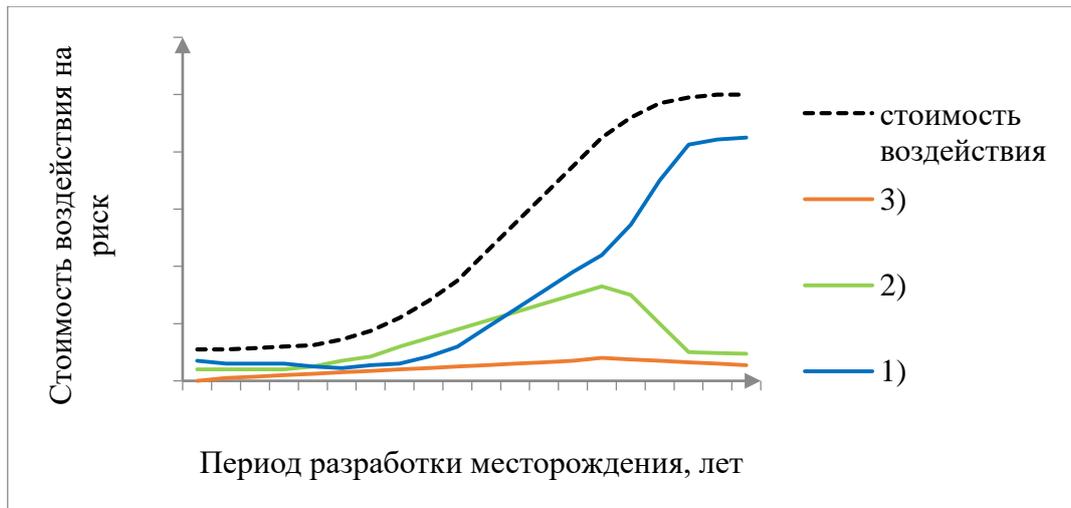


Рисунок 9 – Распределение стоимости воздействия на риск по группам типов производственных задач (составлено автором на основе [29])

Аналогичным образом изменяется кривая, отображающая изменение стоимости воздействия на риск, отмеченная на рисунке 9 под цифрой 2. Основное отличие заключается в том, что эта группа производственных задач связана с вспомогательным производством, поэтому затраты на обработку риска начинают снижаться к концу срока реализации проекта в связи с уменьшением объемов добычи. Кривая, обозначенная цифрой 3, была получена в результате вычитания из базовой кривой значений 2 и 3. Получен результат, который, в целом, соответствует прогнозируемому изменению затрат на обработку рисков третьей группы производственных задач.

Вид влияния параметра на достижение годовых целей (выход на заданную годовую производительность) можно отнести к одной из групп:

По виду влияния параметра на результаты операционной деятельности (например, достижение плановых объемов добычи) его можно отнести к одной из групп [96]:

1. Количественные параметры – отражают количество единиц техники, количество занятого процессом персонала, количество оборудования и т.д.

2. Параметры свойств – отражают производительность техники, продолжительность выполнения операции, скорость движения, габариты горных выработок, фонд оплаты труда персонала и т.д.

3. Параметры расписания – отражают режим работы предприятия, расписание взрывных работ, последовательность отработки камер на панели и т.д.

4. Параметры размещения – служат для выражения особенностей геометрии рудника, расположения горных выработок, расположения стоянок техники, расположения объектов капитального строительства, а также следующие за ними особенности логистики движения внутри предприятия.

Общий вид с примером формализации факторов по каждой производственной задаче представлен в Таблице 7. Количество параметров в каждом столбце, описывающих фактор риска, может быть любым, в примере представлено только по одному, но это не регламентируется и зависит от конкретного фактора.

Таблица формализации заполняется экспертом и содержит элементы технического задания на разработку математической модели. С ее помощью определяется набор параметров производственного процесса, которые влияют на формирование рисков условий. Разделение параметров по столбцам «вид влияния» позволяет нормализовать их значения и привести к количественному показателю. Например, если в модели необходимо учесть особенности расположения в пространстве конвейерной сети, по которой осуществляется транспортировка руды из забоя на поверхность, то заполнение таблицы будет выглядеть следующим образом:

а) по конвейеру осуществляется транспортировка руды из очистного забоя, следовательно, его характеристики относятся к производственной задаче «организация выемочно-очистных работ»;

Таблица 7 – Пример заполнения таблицы формализации факторов риска по влияющим параметрам (составлено автором)

Производственная задача	Фактор	Количественные параметры	Параметры свойств	Параметры расписания	Параметры размещения
Управление трудовыми ресурсами	Недостаток рабочих	Количество рабочих в смене	Нормы выработки рабочего	Продолжительность рабочей смены	Расстояние от забоя до места отдыха
Планирование технического обслуживания и ремонтов	Ошибки в расписании ТОиР	Количество запасных частей для проведения ремонта	Расходы на проведение ремонта	Продолжительность планового ремонта	Расстояние от места поломки до ремонтного отдела
Управление материально-техническим снабжением	Ошибки в определении норматива ГСМ	Количество оборудования, потребляющего ГСМ	Расход ГСМ для одного оборудования	Расписание поставок ГСМ на предприятие	Расположение пунктов хранения ГСМ
Управление производственной и экологической безопасностью	Неточности в характеристиках системы пожарной безопасности	Количество установок пожаротушения	Эффективность обнаружения возгорания	Расписание проверок исправности установок пожаротушения	Удаленность от пожароопасных объектов
Управление отвалообразованием и поддержанием выработанного пространства	Неточности в выборе метода закладки	Количество выработок для закладки	Потребность в закладочной смеси	Продолжительность закладки пространства	Расстояние транспортировки и закладочного материала

Продолжение таблицы 7

Управление объектами капитального строительства	Ошибки в расположении контрольно-пропускного пункта	Количество турникетов	Пропускная способность контрольно-пропускного пункта	Интенсивность прихода сотрудников на смену	Расстояние до основных производственных объектов
Организация выемочно-очистных работ	Ошибки при выборе модели очистного комбайна	Количество очистных комбайнов	Производительность очистного комбайна	Эффективный фонд рабочего времени	Габариты очистного забоя
Организация подготовительных и капитальных работ	Ошибки при выборе модели буровой установки	Количество буровых установок	Производительность буровой установки	Периоды работы буровой установки	Ширина выработки
Организация систем инженерно-технического обеспечения	Неточности в системе электроснабжения	Количество электроприводов	Потребление электроэнергии в смену	Продолжительность потребления электроэнергии	Протяженность электрических сетей

б) количество отдельно-смонтированных участков (возможно, разной ширины) – количество конвейера (столбец «количество»);

в) скорость движения – значения записываются в столбец «свойства»;

г) расписание времени работы конвейера – продолжительность или период работы записываются в столбец «расписание»;

д) расположение каждого конвейера – записывается как длина, начальные или конечные координаты расположения в пространстве (X, Y, Z), ширина конвейерной ленты в столбец «размещение»;

Следует отметить:

а) В столбец «размещение» записываются те количественные характеристики, которые передают особенности расположения в пространстве и сложнее (более дорогостоящее) подлежат изменению. Например, ширина конвейерной ленты взаимосвязана с шириной выработки и сложна в замене (необходимо перестроить весь конвейер/изменить сечение выработки). Поэтому данный параметр попадает в столбец «размещение», а не «свойства»;

б) В первой итерации заполнения таблицы следует использовать только первичные параметры (скорость самоходного вагона, количество рабочих и т.д.). На второй итерации следует выявить, какие из первичных параметров можно «свернуть» во вторичные. Например, в первой итерации могут присутствовать параметры «сечение выработки» и «производительность комбайна за цикл». Если для целей моделирования необходимо рассчитать увеличение плеча откатки от цикла к циклу, то имеет смысл заменить эти два параметра одним производным от них «продвижение за цикл».

в) По мере анализа заполненной таблицы и составления причинно-следственных связей следует убирать из таблицы те параметры, которыми можно пренебречь или которые косвенно учитываются в значении других параметров, чтобы не перегружать модель.

**Этап 8. Определение последствий риска.** После идентификации риска и его факторов определяются последствия наступления рискованного события, необходимые для расчета величины ущерба – стоимостного выражения уровня

риска. Для выделенных видов рисков можно определить следующие формы последствий (таблица 8).

Таблица 8 – Последствия и ущерб от наступления производственно-технологических рисков (составлено автором)

Последствия	Ущерб
Отставание от календарного плана	Рост удельных затрат за счет увеличения доли условно-постоянных расходов на добычу Снижение стоимости добытой руды
Не используемые техника и оборудование	Стоимость избыточной техники, затраты на ее обслуживание
Нарушения в работе оборудования (неисправности, поломки)	Увеличение затрат на ремонт и техническое обслуживание
Причинение вреда жизни и здоровью работников	Расходы на оплату компенсаций физического и морального вреда работникам; судебные расходы,
Причинение вреда окружающей среде	Затраты на устранение и ликвидацию последствий загрязнения окружающей среде, оплата штрафов и компенсаций

На этом же этапе продолжается определение причинно-следственных связей между параметрами, начатое при заполнении таблицы формализации риска.

### **Этап 9. Оценка вероятности наступления рисковогó события.**

Использование динамических методов применяется, чтобы оценить изменение системы с течением времени. В случае оценки производственно-технологического риска такой подход позволяет получить некоторый временной ряд, отражающий значение результирующего показателя в различные моменты времени.

На данном этапе завершается построение экономико-математической модели и производится расчет ее выходных значений. На основе полученного временного ряда производится расчет вероятности наступления рисковогó события по общепринятой формуле (4):

$$\frac{\text{Число благоприятных (рисковых) исходов}}{\text{Общее число исходов}} \quad (4)$$

Числом благоприятных исходов здесь будет выступать количество значений во временном ряду, удовлетворяющих условиям формирования риска. Общим числом исходов чаще всего будет выступать размер временного ряда.

Результатом выполнения девяти предложенных этапов является получение количественной оценки вероятности наступления риска. Это может быть как точечная оценка, так и параметры, характеризующие закон распределения.

Преимуществом математической модели является то, что она позволяет получить результат проигрывания производственного процесса как с учетом последствий от риска, так и без них. Предложенный способ оценки вероятности предполагает моделирование без последствий. Добавление в модель условий формирования последствий, определенных на этапе 8, позволяет получить количественное выражение ущерба. Если обозначить результат базового моделирования без последствий (объем добычи, продолжительность операции и т.д.) через  $y_{base}$ , а результат с последствиями через  $y$ , то величина ущерба будет рассчитываться следующим образом (5), (6):

$$|y_{base} - y| = \Delta y, \quad (5)$$

$$\Delta y * P = damage, \quad (6)$$

где  $P$  – оцененная стоимость «единицы» последствия (стоимость тонны руды, стоимость часа простоя и т.д.).

### **2.4.3 Методика оптимизации параметров производственно-технологических рисков для снижения вероятности их наступления**

Последующие шаги при стоимостной оценке риска затрагивают, в том числе, и разработку мероприятий по снижению вероятности наступления события. Этапы, раскрытые в этом разделе, с одной стороны завершают расчет вероятностного ущерба, а с другой стороны служат основой для подготовки мероприятий, поэтому выделены в отдельный раздел работы.

#### **Этапы 10–11. Обоснование ключевого параметра и оптимизация модели.**

Глобальная цель стоимостной оценки риска, описанная в формуле (1), достигается путем поиска ключевого параметра риска и его последующей

оптимизацией. В таблице 9 представлены условные обозначения, необходимые для описания методики поиска и оптимизации ключевого фактора.

Таблица 9 – Условные обозначения (составлено автором)

№	Показатель	Обозначение
1	Вероятность рассматриваемого риска из общего набора выделенных производственно-технологических рисков	$R$
2	Перечень параметров рассматриваемого риска	$(x_1, \dots, x_j)$
3	Ключевой параметр, подлежащий оптимизации	$X^*$
4	Минимальная вероятность рассматриваемого риска	$R_{min}$

Поиск ключевого фактора риска осуществляется путем варьирования значений параметров риска в достижимом диапазоне. По итогам варьирования происходит оценка изменения значений во временном ряду, которые используются для расчета вероятности. Иными словами, происходит поиск высокой корреляции между значением параметра и вероятностью риска. Схема представлена на рисунке 10.

Оптимальным считается такое значение  $X^*$ , которое обеспечивает минимальную вероятность риска. После того, как оптимальное значение найдено, уточняется расчет ущерба от риска. Его количественное выражение представляет собой разницу между результатом деятельности в базовой модели и оптимизированной. Например, если ущерб выражался как отставание от календарного плана, то количественное его значение будет рассчитываться как разница между производительностью в итерации модели, где  $R_{min}$ , и производительностью в исходной модели.

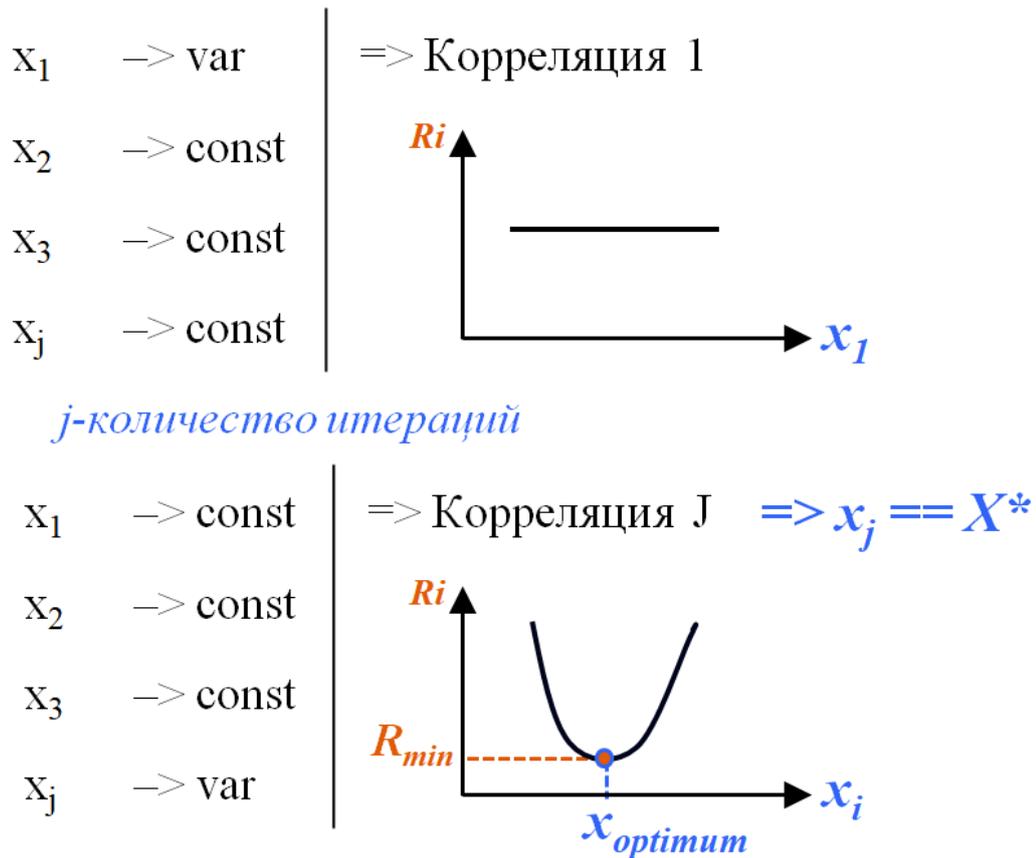


Рисунок 10 – Математическое отображение поиска и оптимизации ключевого параметра риска (составлено автором)

### Этап 12. Расчет затрат на снижение вероятности наступления риска.

В первую очередь, стоимость снижения вероятности риска будет состоять из затрат на приведение ключевого параметра ( $X^*$ ) к оптимальному значению. Сопутствующие затраты определяются с помощью экспертов.

Отсюда, целевая функция, общий вид которой описан в формуле (1), примет следующий вид (7):

$$\begin{cases} R(X^*) \rightarrow \min \\ C < pr_{base} \times D \end{cases} \quad (7)$$

Соответственно, решением целевой функции будет выступать такое значение  $X^*$ , при котором  $R(X^*)$  равно  $R_{min}$ .

### Этап 13. Поиск решения целевой функции.

После того, как сделан расчет вероятностного ущерба ( $D$ ), затрат на снижение вероятности ( $C$ ) и минимально достижимой вероятности риска ( $R_{min}$ ), производится проверка удовлетворения ограничения решению целевой функции. В случае, если решение не достижимо, а затраты превышают вероятностный ущерб,

рассматривается возможность выбора в пользу меньшего снижения вероятности с меньшими затратами. Если не существует такого варианта уменьшения вероятности, которое бы обеспечивало затраты меньше, чем ущерб, то следует рассмотреть возможность выбора иного ключевого параметра ( $X^*$ ).

#### **Этап 14. Принятие управленческого решения.**

Завершающим этапом стоимостной оценки производственно-технологического риска является подготовка управленческого решения о целесообразности внесения изменений в организацию работ, изменении параметров процесса или оценке возможности применения дополнительных мер по улучшению автоматизированной системы оценки технологическим процессом.

#### **Этап 15. Продолжение стандартного алгоритма оценки риска.**

После стоимостной оценки риска следует обработка риска и подготовка мероприятий по преодолению в соответствии с тем, какое решение было принято по итогам этапа 14.

**Контроль риска.** В случае организации процесса добычи контроль риска в первую очередь будет выражаться в расчете показателей экономической эффективности инвестиционного проекта по внедрению улучшений в производственный процесс.

Процесс управления рисками, частью которого является оценка рисков, итеративен и в случае, если граничные условия не были достигнуты, он повторяется вновь, начиная с идентификации рисков.

## **2.5 Выводы по Главе 2**

1. Установлено, что с развитием цифровых технологий, появлением новых высокопроизводительных инструментов стало возможным рассматривать основные и вспомогательные операции процесса добычи рудных полезных ископаемых не изолированно друг от друга, а комплексно учитывать причины нарушения нормального функционирования производственного процесса, обусловленные как природно-геологическими факторами, так и зависящими от них особенностями применяемых технологий и оборудования. Поэтому в работе введен термин «производственно-технологический риск», под которым понимается

вероятностное событие, вызванное несогласованностью в основных и вспомогательных операциях, повлекшее за собой отклонение от плановых технико-экономических показателей производственной деятельности предприятия.

2. Выявлена и обоснована логическая связь между источниками, факторами, и последствиями производственно-технологического риска для предприятий по добыче калийных солей: в качестве источника риска определена несогласованность основных и вспомогательных операций производственного процесса, приводящая к нарушению основных принципов организации производства: ритмичности, цикличности, непрерывности производственного процесса. В этой связи предложено учитывать следующие виды производственно-технологических рисков: остановка движения руды или транспорта, простой машин или оборудования, увеличение продолжительности производственного цикла.

3. Выявлено, что экономическая оценка рисков, которая проводится для определения возможности повышения эффективности производства при долгосрочном планировании, ориентирована на анализ и снижение неопределенности, когда объем информации о процессе ограничен. Применение методов оценки рисков в текущей деятельности позволяет предотвращать отклонения фактических значений от плановых технико-экономических показателей.

4. Установлено, что наличие разночтений в подходах к пониманию риска обусловлено тем, что он не является статичным и постоянным явлением. В этом выражается динамическая природа риска – вероятность его возникновения в разное время различается. Поэтому для оценки риска необходимо применять методы, воспринимающие операционную деятельность в качестве динамической системы.

5. Предложен подход, позволяющий оптимизировать параметры производственного процесса, снижая вероятность наступления рисков и минимизируя их последствия. Оценка стоимостного выражения риска включает расчет трех ключевых характеристик: вероятность наступления события, величина ущерба и затраты на преодоление риска. Цель применения предложенного подхода заключается в сокращении частоты производственных сбоев, оптимизации затрат

на обеспечение надежности технологических процессов, повышения точности планирования и прогнозирования результатов деятельности.

6. Обосновано применение динамического метода для оценки риска, который заключается в построении экономико-математической модели для получения временного ряда, характеризующего вероятность наступления рискованного события. Формирование перечня параметров для построения экономико-математической модели производится на основе выявления факторов риска по предложенной методике, включающей: отнесение каждого риска к группе производственных задач, формализацию фактора по таблице, обоснование ключевого параметра риска, оптимизацию его значения.

### **ГЛАВА 3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ (НА ПРИМЕРЕ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА)**

#### **3.1 Техничко-экономические условия внедрения разработанных рекомендаций по экономической оценке производственно-технологического риска**

Для подтверждения работы предлагаемой методики был рассмотрен проект оптимизации конвейерной сети в руднике, где ведется добыча калийной соли с применением камерной системы отработки.

Производственный процесс очистной выемки и транспортировки руды в руднике по добыче калийной соли представляет собой многоступенчатую технологическую цепочку, направленную на извлечение полезного ископаемого из массива породы и его доставку на поверхность для последующей переработки. Процесс начинается с работы проходческо-очистного комбайна, выполняющего непосредственную выемку руды, и завершается транспортировкой материала по конвейерной системе.

На первом этапе используется проходческо-очистной комбайн – высокотехнологичное оборудование, предназначенное для механического разрушения массива калийной соли. Комбайн оснащен режущим органом, выполненным в виде вращающегося барабана с установленными на нем резцами. В процессе работы режущий орган подводится к забою, где происходит фрезерование породы с заданной глубиной резания. Для обеспечения равномерности выемки и минимизации потерь руды комбайн перемещается вдоль линии забоя, осуществляя последовательное разрушение породы. Параметры работы комбайна (скорость движения, интенсивность резания) регулируются оператором с учетом геологических условий пласта и физико-механических свойств калийной соли.

После разрушения породы образовавшаяся рудная масса загружается в самоходный вагон, который является первым звеном транспортной системы внутри шахты. Самоходный вагон представляет собой специализированное подземное

транспортное средство, оснащенное системой загрузки и разгрузки. Вагоны обеспечивают доставку руды от забоя до бункера-перегрузателя, расположенного вблизи магистральных транспортных узлов. Применение самоходных вагонов позволяет оптимизировать процесс транспортировки за счет их мобильности и способности работать в условиях ограниченного пространства подземных горных выработок.

Затем руда из самоходного вагона выгружается в бункер-перегрузатель. Бункер-перегрузатель представляет собой специальное устройство, предназначенное для временного накопления и равномерной подачи руды на последующий участок транспортной системы. Он играет важную роль в обеспечении бесперебойной работы конвейерной линии, так как компенсирует возможные колебания объемов поступающей руды и предотвращает перегрузку оборудования. Бункеры-перегрузатели также могут быть оборудованы системами контроля загрузки и автоматического управления, что повышает эффективность транспортного процесса.

После прохождения через бункер-перегрузатель руда поступает в конвейерную систему, которая осуществляет дальнейшую транспортировку материала на значительные расстояния внутри шахты. Конвейеры, используемые на этом этапе, обычно имеют большую протяженность и оснащены системами автоматического контроля и управления. Это позволяет оптимизировать скорость транспортировки, минимизировать энергозатраты и обеспечить равномерную подачу руды на последующие технологические участки. В процессе транспортировки руда может проходить через промежуточные узлы, такие как перегрузочные пункты, где осуществляется перенаправление материала на другие конвейеры или дополнительные транспортные средства.

Заключительным этапом производственного процесса является подъем руды на поверхность, который осуществляется с помощью подъемных установок (шахтными скипами). После подъема руда направляется на обогатительную фабрику, где происходит ее дальнейшая переработка и подготовка к реализации.

Таким образом, процесс очистной выемки и транспортировки руды в руднике по добыче калийной соли характеризуется слаженной работой нескольких взаимосвязанных технологических элементов: проходческо-очистного комбайна, самоходного вагона, бункера-перегрузателя и конвейерной системы. Каждый из этих элементов выполняет свою функцию, обеспечивая непрерывность и эффективность добычи калийной соли в сложных горно-геологических условиях. Технологическая схема анализируемого процесса представлена на рисунке 11.

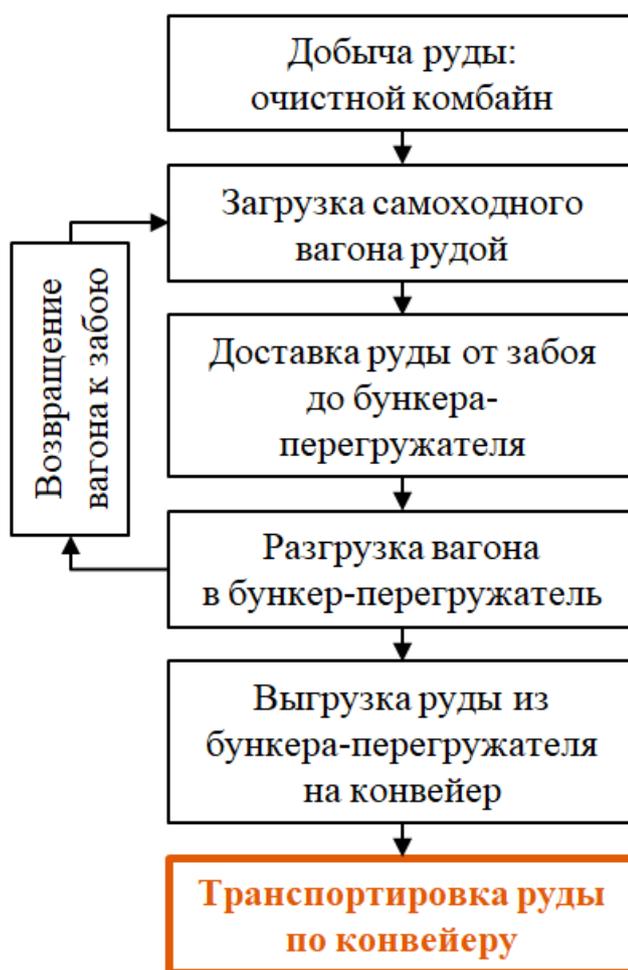


Рисунок 11 – Общая схема анализируемой части производственного процесса  
(составлено автором на основе [96])

В рассматриваемом варианте работа осуществляется одновременно в 8 забоях, в каждом из которых находится проходческо-очистной комбайн и самоходный вагон. С самоходного вагона руда попадает в бункер-перегрузатель, откуда равномерно подается на конвейер (рисунок 12).



Рисунок 12 – Моделируемый участок, вид сверху (составлено автором на основе данных [95])

Как показывают результаты замера хронометража рабочего времени, такие показатели как «скорость движения самоходного вагона» и «продолжительность погрузочно-разгрузочных работ» подвержены колебаниям и изменяются в определенном диапазоне, зафиксированном в результатах хронометража. Следовательно, время попадания руды на конвейер различается от забоя к забою и от цикла к циклу. Перед предприятием стоит задача определения максимально допустимой производительности бункера-перегрузателя, чтобы, с одной стороны, поднять руду на поверхность как можно быстрее, а, с другой стороны, не допустить аварийной остановки всей транспортной сети, которая происходит в случае одновременного прихода на узел пяти и более грузопотоков. Всего таких узлов на рассматриваемом участке сети шесть, они отмечены на рисунке 12 красными кружками с цифрой 6. Для ликвидации аварии вся система конвейеров выше аварийного узла останавливается до того момента, пока руда с него не будет поднята на поверхность.

### 3.2 Построение экономико-математической модели экономической оценки производственно-технологических рисков при эксплуатации конвейерной сети горнорудного предприятия

**Идентификация риска.** Согласно принятой классификации для данного предприятия возможен риск остановки движения по причине скопления грузопотоков – образование затора с последующей остановкой конвейерной сети.

По 6 из 8 предложенных критических требований, для решения поставленной задачи целесообразно создание имитационной модели. Анализ особенностей модели по выделенным критериям представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Оценка целесообразности создания модели по 6 критическим требованиям (составлено автором)

№	Критерий	Особенности процесса добычи
1	В процессе присутствует нелинейное влияние стохастических факторов на результат	Время погрузочно-разгрузочных работ, скорость самоходного вагона не идентична
2	Оценка сопряженных с этими стохастическими факторами рисков аналитическими методами затруднена или невозможна	8 забоев, в каждом из которых выгрузка руды на конвейер происходит не одновременно
3	Последствия игнорирования рисков, наступление рисков ситуации высоки	Скопление грузопотоков на узле приводит к остановке конвейера
4	Производственный процесс недостаточно гибкий, преодолеть уже наступившую рисковую ситуацию затруднительно	Единственный способ подъема руды на поверхность – конвейерная сеть
5	В ходе реализации процесса необходимо обеспечить равномерный выпуск продукции	Да, это важно для оптимизации логистики
6	Необходимо изучить изменение поведения системы с течением времени	Разовая остановка конвейера по причине затора приводит к большему количеству остановок

Ограничения, принятые в имитационной модели:

1. Условное время старта моделирования 01.01.2023. Единицы модельного времени – минуты.

2. В модели рассмотрен участок конвейерной сети, охватывающий 2 панели и главный конвейер, ведущий на поверхность.

3. Эксперимент проводится в рамках отработки 1 камеры, расположенной с конца каждого блокового конвейера, всего 8 камер. Полученные результаты по производительности рудника экстраполируются на остальные камеры панели.

4. Моделируется 1 рабочая смена продолжительностью 12 часов.

5. Анимация конвейерной сети задана с масштабом 1:5 для длины конвейера и камер, 1:1 для ширины ленты в целях удобства анализа визуальной составляющей. Разница в масштабе учтена в логической цепочке и на корректность результатов не влияет.

6. Верификация и валидация модели проведена на данных замера хронометража рабочего времени

**Формализация риска скопления грузопотоков.** В результате анализа производственного процесса, выделены факторы, от которых зависит продолжительность транспортировки руды. Следовательно, заполненная таблица формализации риска будет выглядеть так, как показано в Таблице 11.

Таблица 11 – Формализация риска остановки конвейера по типам производственных задач (составлено автором)

Производственная задача	Факторы риска	Количество	Свойства	Расписание	Размещение
Организация выемочно-очистных работ	Изменчивость плеча откатки по мере продвижения работ	Количество грузопотоков	–	Продолжительность смены	Продвижение комбайна за цикл
	Стохастический характер продолжительности цикла	Количество панелей Количество забоев Количество комбайнов Количество вагонов	Скорость движения вагона	Время начала нового цикла Продолжительность погрузочно-разгрузочных работ	–
	Вариативность скорости выгрузки руды на конвейер	Количество бункеров-перегрузателей	Масса руды за цикл Производительность бункера-перегрузателя	–	–
	Различия в продолжительности транспортировки руды с разных панелей	Количество конвейеров	Скорость конвейерной ленты	–	Длина конвейеров

В данном случае, как следует из таблицы 11, все источники попадают в одну производственную задачу. Это свидетельствует о том, что модель будет обладать низкой степенью детализации, но высокой точностью, поскольку не возникает сомнений в том, как связаны параметры между собой и как они влияют на процесс. В случае изменения экспертного мнения и потребности оценить смежные риски, например, влияние продолжительности межремонтного периода на потребное количество единиц техники, производственных задач может быть учтено больше одной. В целом, количество производственных задач, параметры которых участвуют в построении модели, не регламентируется и остается на усмотрение экспертов в зависимости от критичности выявленного риска и необходимости в его проработке.

**Формулирование ущерба и построение экономико-математической модели.** В условиях реализации данного проекта ущерб можно рассматривать как разницу между максимально возможным объемом транспортировки руды за смену и тем объемом, который будет перевезен с учетом остановок конвейера.

В ходе моделирования наибольший интерес представляет расчет таких выходных данных, как: продолжительность цикла с учетом увеличения плеча откатки, длина грузопотока в виде диапазона времени пересечения узкого места, количество столкновений 5 и более грузопотоков, производительность конвейерной сети. Эти данные представляют интерес, поскольку от их значений зависит расчет вероятности наступления рискованного события.

В таблице 12 представлены принятые условные обозначения выделенных параметров и выходных данных.

Таблица 12 – Условные обозначения параметров модели (составлено автором)

№	Параметр	Усл. об.	Значение
1	продолжительность смены, мин	$l$	720
2	номер забоя, комбайна, самоходного вагона	$i$	1..8
3	количество грузопотоков, количество циклов добычи	$j$	расчет

## Продолжение таблицы 12

4	продвижение комбайна за цикл, м	$x_1$	0,5
5	плечо откатки, м	$d$	расчет
6	время начала нового цикла, мин	$t^0$	1,6
7	скорость движения вагона, м/мин	$x_2$	$normal(0,51; 98,75)$
8	время погрузочно-разгрузочных работ, мин	$x_3$	$normal(0,21; 5,62)$
9	момент начала движения грузопотока по конвейеру, мин	$t^s$	расчет
10	масса руды, т	$x_4$	16
11	производительность бункера-перегрузателя, т/мин	$x_5$	6..20
12	момент окончания выгрузки потока на конвейер, мин	$t^e$	расчет
13	расположение конвейеров – учитывается как длина каждого из конвейеров, м	$x_6$	50..1135
14	скорость ленты, м/мин	$x_7$	189
15	количество грузопотоков при объединении	$n$	расчет
16	производительность конвейерной сети (без остановок), т	$a^b$	расчет
17	производительность конвейерной сети (с остановками), т	$a$	расчет
19	вероятность риска, %	$pr_{base}$	расчет

Чтобы упростить восприятие технологического процесса, сначала составим функциональную модель на примере добычи и транспортировки руды (до места объединения конвейеров) с одного забоя (рисунок 13).

В тот момент, когда заканчивается цикл добычи, то есть происходит расчет значения  $t_{ij}^s$ , значение переменной  $j_i$  увеличивается на единицу и начинается следующая итерация. Количество итераций, которые успевают начаться за рабочую смену (итоговое значение  $\sum j_i$ ), умноженное на  $x_4$  (масса руды за 1 цикл), соответствует сменной производительности добычи. Стоит отметить, что каждый последующий цикл длится дольше предыдущего, в связи с увеличением плеча откатки.

Нумерация грузопотоков сквозная внутри каждого забоя. То есть, например, 15 цикл работы комбайна внутри 3 забоя будет отражаться в вычислениях как индекс 3\_15 (номер забоя\_номер грузопотока).

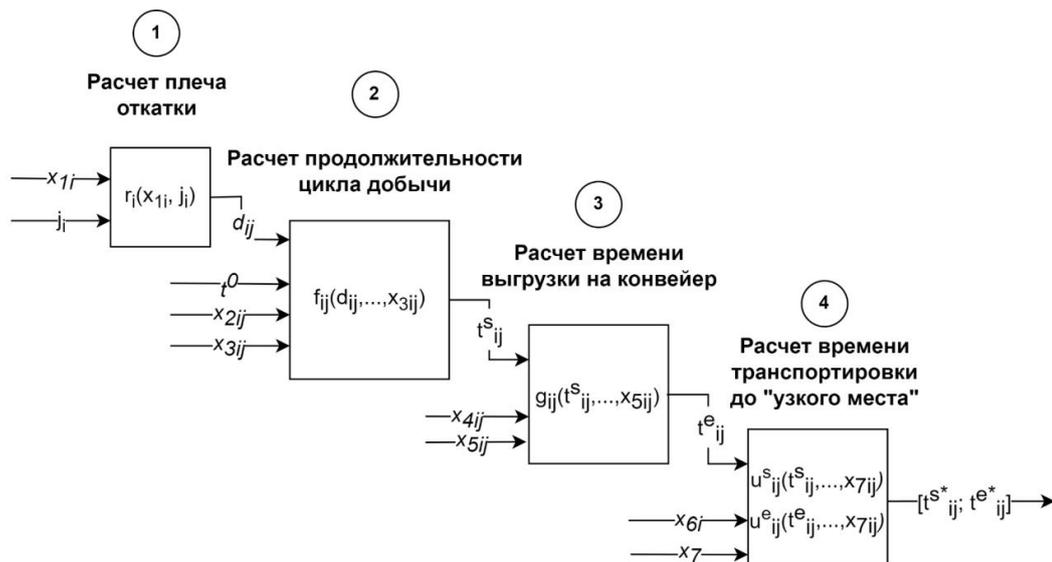


Рисунок 13 – Функциональная модель добычи и транспортировки руды на примере одного забоя (составлено автором)

Раскроем содержание функций, представленных на рисунке 13:

1. Расчет плеча откатки по формуле (8):

$$d_{ij}(x_{1i}, j_i) = x_{1i} * j_i \quad (8)$$

2. Расчет продолжительности цикла добычи по формуле (9), т.е. определение времени поступления руды в бункер. Примем, что движение грузопотока по конвейеру, после попадания руды в бункер, происходит мгновенно:

$$f_i(d_{ij}, \dots, x_{3ij}) = d_{ij}x_{2ij} + x_{3ij} + (t^0 * j_i) \quad (9)$$

3. Расчет времени окончания выгрузки грузопотока на конвейер по формуле (10):

$$g_i(t^s_{ij}, \dots, x_{5ij}) = \frac{x_{4ij}}{x_{5ij}} + t^s_{ij} \quad (10)$$

4. Расчет времени, затрачиваемого на транспортировку грузопотока до точки объединения конвейеров по формулам (11.1), (11.2):

$$u^s_{ij}(t^s_{ij}, \dots, x_{7ij}) = t^s_{ij} + \frac{x_{6i}}{x_7} \quad (11.1)$$

$$u^e_{ij}(t^e_{ij}, \dots, x_{7ij}) = t^e_{ij} + \frac{x_{6i}}{x_7} \quad (11.2)$$

В результате расчета, на выходе получаем  $j$ -ое количество диапазонов, каждый из которых показывает, в какой период времени (в течение рабочей смены) грузопоток будет преодолевать точку объединения конвейеров.

Продублируем полученную модель для 8 забоев и запишем математически получение временного ряда, отражающего количество грузопотоков в «узком месте» в единицу времени рабочей смены (рисунок 14).

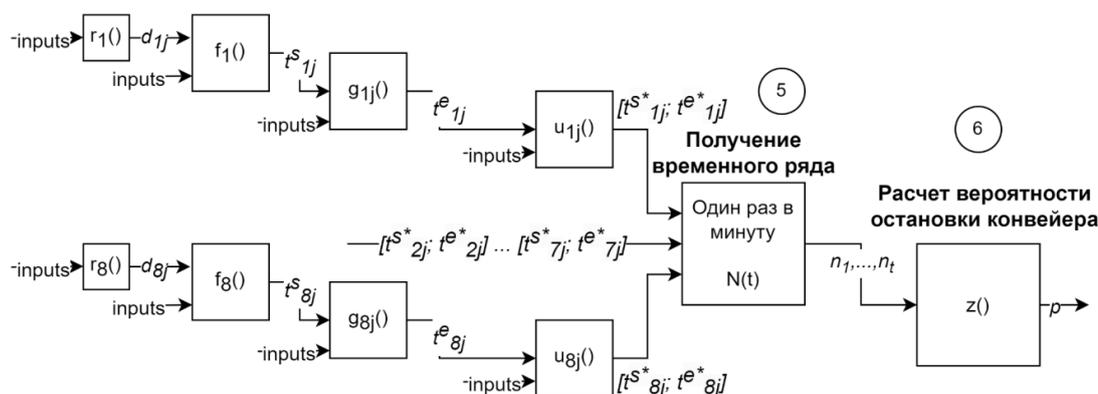


Рисунок 14 – Функциональная модель вероятности возникновения рисков ситуации – остановки конвейеров (составлено автором)

Раскроем содержание функций, представленных на рисунке 14:

5. Получение временного ряда  $N(t)$ : один раз в минуту фиксируется количество грузопотоков в «узком месте» по формуле (12):

$$N(t) = n_1, n_2, \dots, n_t \quad (12)$$

6. Расчет вероятности наступления рисков ситуации по формуле (13):

$$z(n_1, \dots, n_t) = \frac{\sum N(a) |_{n=5} + \sum N(a) |_{n=6} + \sum N(a) |_{n=7} + \sum N(a) |_{n=8}}{t} \quad (13)$$

В данной математической модели сделано допущение, что пересечение большого количества грузопотоков не приводит к остановке конвейера, а следовательно, не учитывается время, которое будет потрачено на устранение аварии. Это необходимо для того, чтобы в целом оценить, насколько вероятно такое событие, что грузопотоки будут пересекаться. Продолжительность остановок будет учтена в дальнейшем, при расчете потенциального ущерба при наступлении рисков ситуации.

### 3.3 Экономическая оценка ущерба от наступления производственно-технологического риска на горнорудном предприятии

**Оценка вероятности наступления рисков события.** В связи с тем, что скорости движения самоходного вагона, продолжительность погрузочно-разгрузочных работ подвержены колебаниям, время попадания руды на конвейер

различается от забоя к забою и от цикла к циклу. Поэтому, принимая во внимание наличие в математической модели стохастических величин, а также необходимость получения и анализа временного ряда, целесообразно провести вычисления путем построения человеко-машинной имитационной системы в программном продукте AnyLogic (приложение А).

Логическая блок-схема работы модели представлена на рисунке 15.

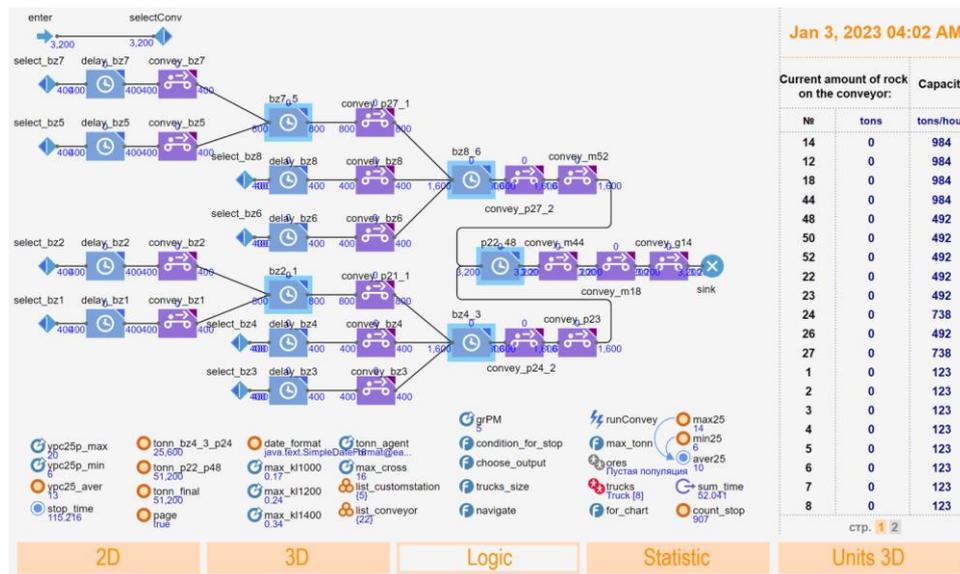


Рисунок 15 – Часть логической схемы, отвечающей за транспортировку руды (составлено автором)

Основная трудность расчета вероятности для данного проекта заключается в том, что производительность перегружателя – регулируемая. То есть, ее значение определяется и изменяется специалистами ситуационно, на месте. В рамках проверки проектных решений необходимо определить, подходит ли такая установка – с таким диапазоном производительности – для данного участка месторождения.

Для решения этой задачи был проведен имитационный эксперимент с описанной выше математической моделью. Значение производительности перегружателя выбирается по нормальному распределению, где в качестве математического ожидания выступает среднее арифметическое между максимальной и минимальной производительностью, а стандартное отклонение рассчитывается через правило трех сигм. Таким образом, в каждом эксперименте максимальное значение увеличивается, начиная от 6.6 т/мин и заканчивая

6..20 т/мин. Результаты экспериментов в графическом виде представлены на рисунке 16.

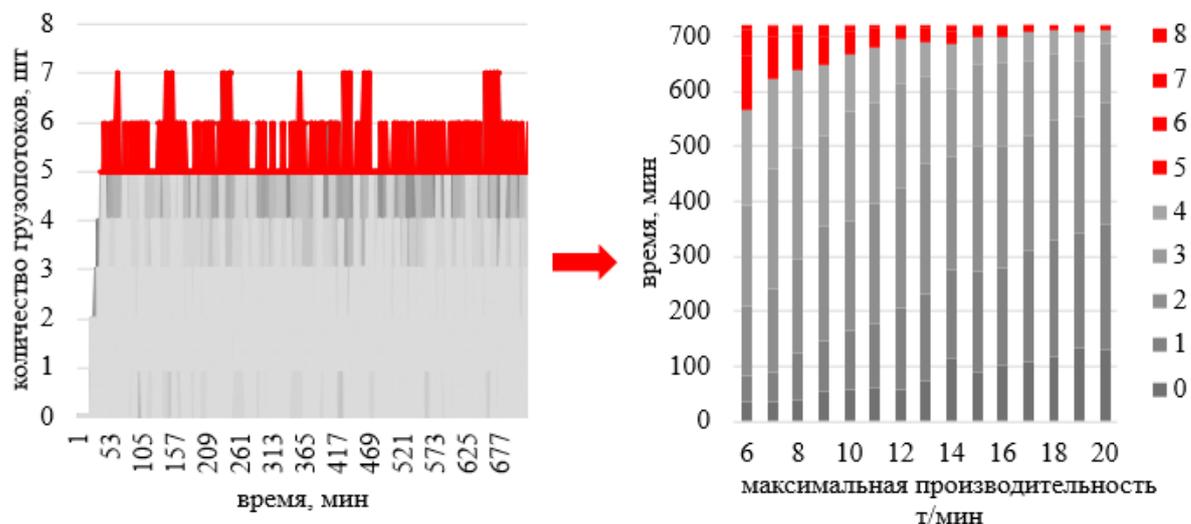


Рисунок 16 – Графическое отображение результатов имитационного эксперимента (составлено автором)

Слева на рисунке 16 показан график, отображающий полученные в ходе моделирования временные ряды (приложение Б), по интенсивности линий можно судить о количестве случаев, когда образовывалась возможность наступления риска (выделено красным). В правой части рисунка показан результат обработки временного ряда с помощью MS Excel. Здесь суммировано количество минут, в течение которых в узком месте находились один, два... и восемь грузопотоков. Можно заметить, что хоть ни в одном из случаев не наблюдалось пересечение 8 грузопотоков одновременно, тем не менее, вероятность остановки конвейера не нулевая. Приведем выгрузку результатов эксперимента в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты эксперимента по расчету вероятности остановки конвейера (составлено автором)

Макс. пр.	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\sum N(t) / n \geq 5$	154	97	82	72	54	39	26	32	34	21	21	13	8	13	10
$z(n_1..n_i), \%$	21,4	13,5	11,4	10,0	7,5	5,4	3,6	4,4	4,7	2,9	2,9	1,8	1,1	1,8	1,4

Как видно из данных, представленных в Таблице 13, с увеличением средней производительности перегружателя риск остановки конвейера снижается. Визуализируем результаты на графике (рисунок 17).

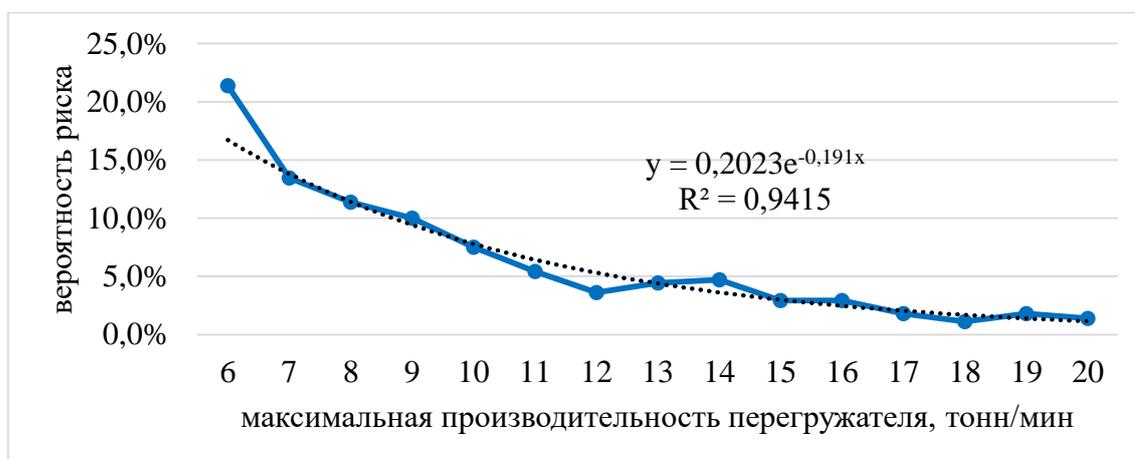


Рисунок 17 – График зависимости вероятности наступления рискованной ситуации от максимально допустимой производительности перегружателя (составлено автором)

Внешний вид кривой не вызывает сомнений в наличии экспоненциального «затухания» вероятности остановки конвейера при удержании более высокой производительности бункера. Построим линию тренда и проведем регрессионный анализ, в том числе проверку значимости уравнения и коэффициентов регрессии.

Получим, что вероятность остановки конвейера можно описать следующим законом распределения по формуле (14):

$$z(N(t)) = 0,53e^{-0,19x^5} \quad (14)$$

После того как проведен расчет вероятности наступления риска, целесообразно перейти к оценке потенциального ущерба от него.

В данном случае, ущербом будет выступать та масса руды, которую конвейерная сеть не успеет перевезти по причине остановки. Математически это можно описать следующим образом по формуле (15):

$$s(x_6, \dots, n_j) = \sum_{x_7}^{x_6^c} * n_j / n_{\geq 5} \quad (15)$$

Зададим остановку конвейера в имитационной модели и сформируем график по добытой и перевезенной массе руды (рисунок 18). В идеальных условиях (без

остановок) условная «задержка» на транспортировку (разница между добытой и перевезенной массой) составляет 5,5 %.

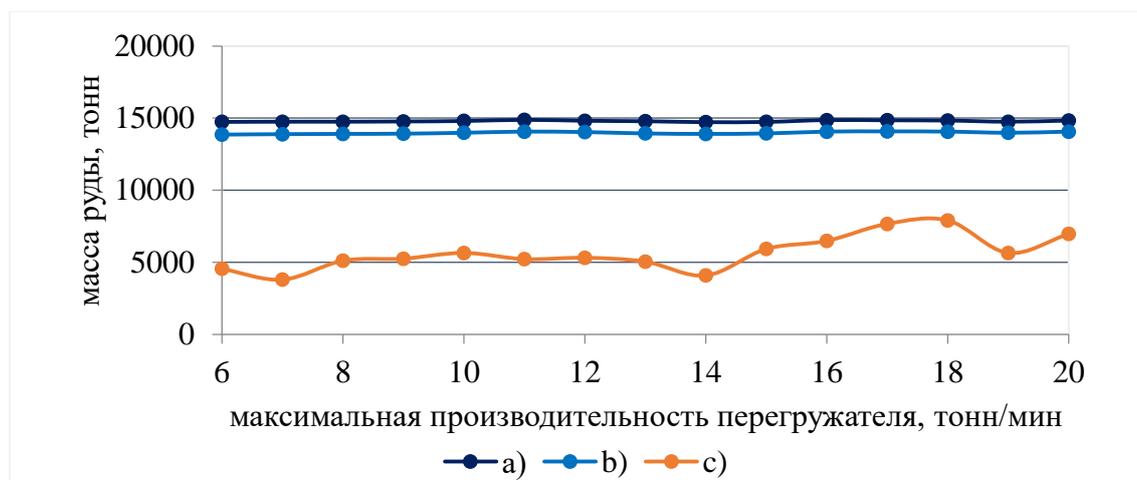


Рисунок 18 – Результаты расчета производительности рудника и конвейерной сети по имитационной модели: а) максимально возможная производительность рассматриваемой части рудника; б) масса руды, перевезенная по конвейеру в «идеальных условиях» (без остановок конвейера); в) масса руды, перевезенная по конвейеру при моделировании остановок конвейера (составлено автором)

Визуально оценивая результаты расчеты на графике (рисунок 18) можно заметить, что удержание производительности перегружателя на высоких значениях не дает высокой скорости транспортировки. Продолжительность остановки конвейера после наступления каждого рисковогго события зависит от количества столкнувшихся грузопотоков, которое изменяется от случая к случаю.

Для расчета последствий ( $\Delta a$ ) от наступления рисковогго случая рассчитывается процент снижения объемов перевозки руды ( $a_b$ ) при наличии остановок относительно моделирования при «идеальных условиях» ( $a$ ) (16):

$$\Delta a = 1 - \frac{a_b}{a} \quad (16)$$

Отсюда, стоимостная оценка риска (risk) выражается как произведение вероятности ( $pr_{base}$ ) на потери в мощности ( $\Delta a$ ) и на стоимость сырья (price) (17):

$$risk = price * \Delta a * pr_{base} \quad (17)$$

Данные для расчета и результат представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты оценки вероятности риска остановки конвейера (составлено автором)

Максимальная производительность, т/мин	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Добытая масса, т	14736	14752	14752	14768	14800	14880	14816	14784	14720	14736	14864	14848	14832	14752	14832
Транспортировка, т (без остановок)	13856	13888	13904	13920	13984	14064	14032	13936	13904	13936	14064	14080	14064	13984	14064
Транспортировка, т (с остановками)	4544	3792	5104	5248	5648	5216	5312	5040	4080	5920	6480	7664	7904	5648	6960
Потери при транспортировке, %	67	73	63	62	60	63	62	64	71	58	54	46	44	60	51
Вероятность риска (по распределению), %	16,72	13,81	11,41	9,42	7,79	6,43	5,31	4,39	3,63	3,00	2,48	2,04	1,69	1,40	1,15
Вероятностный ущерб, %	11,23	10,04	7,22	5,87	4,64	4,05	3,30	2,80	2,56	1,72	1,33	0,93	0,74	0,83	0,58

На рисунке 19 построен график распределения вероятностного ущерба, выраженного в виде потерь производительности. На основе полученных данных проведен регрессионный анализ, в том числе проведена оценка значимости уравнения и коэффициентов регрессии.

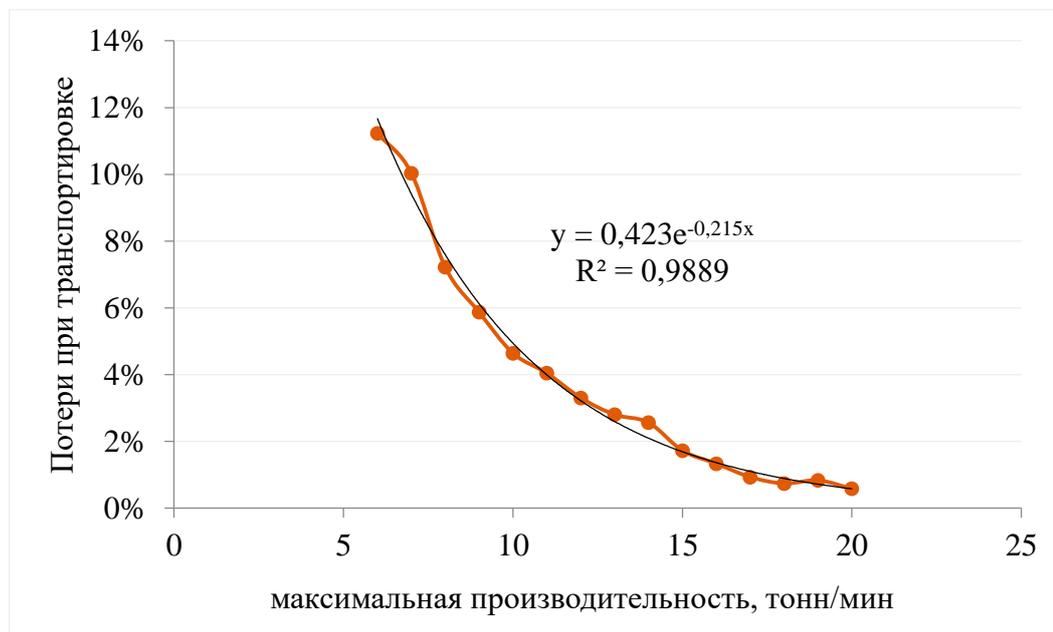


Рисунок 19 – График зависимости потерь производительности конвейерной сети от максимальной производительности перегружателя (составлено автором)

По графику на рисунке 19 можно заключить, что потенциальный ущерб от образования заторов на конвейере составит до 11,23 % снижения объемов транспортировки, которые «застрянут» в сети или в бункере-перегрузателе. При этом, чем дольше удерживается высокая скорость выгрузки руды на конвейер в течение рабочей смены, тем меньше последствия. Значит, вероятностный ущерб от наступления рискованной ситуации можно описать следующим законом распределения:

$$risk(x_5) = 0.42e^{-0,215x_5} \quad (18)$$

Исходя из формулы 11, можно заключить, что предприятию целесообразно рассмотреть возможность замены перегружателя на более производительный или внедрить автоматизированную систему управления, регуливающую скорость подачи руды на конвейер в режиме реального времени.

**Поиск и оптимизация ключевого параметра.** Наличие экспоненциальной зависимости при изменении максимальной производительности перегружателя

свидетельствует о том, что ключевым фактором для данного эксперимента будет являться именно этот параметр. Замена установки не рассматривается по технологическим причинам, поэтому предлагается внедрение автоматизированной системы управления.

Для повышения надежности эксперимента, время моделирования увеличивается и теперь охватывает не одну смену, а весь срок отработки и транспортировки одной камеры в каждом забое.

Автоматизация конвейерной сети заключается в добавлении в модель динамического регулирования производительности перегружателя: в момент выгрузки грузопотока на конвейер, рассчитывается время прохождения им узла и фиксируется в наборе данных. В период нахождения руды в перегружателе, расчетное время для этого грузопотока сравнивается со значениями в наборе данных. В случае обнаружения еще 5 и более грузопотоков, чье расчетное время лежит в одном диапазоне с анализируемым агентом, алгоритм подбирает такое значение скорости выгрузки, при котором вероятность столкновения минимальна. По завершении построения работоспособность алгоритма проверяется с помощью эксперимента варьирования параметров аналогичным образом, как и в базовом эксперименте. По итогам каждой итерации во внешний файл excel записываются время моделирования (количество часов, затраченное на отработку последней камеры и поднятие всей руды на поверхность), количество остановок, максимальная производительность перегружателя. Результаты представлены в графической форме с помощью интерфейса оптимизационного эксперимента (рисунок 20).

Исходя из графиков, можно заключить, что благодаря внедренному методу динамического регулирования производительности на каждой установленной УПС-25П удалось не допустить остановок конвейерной сети по причине затора.

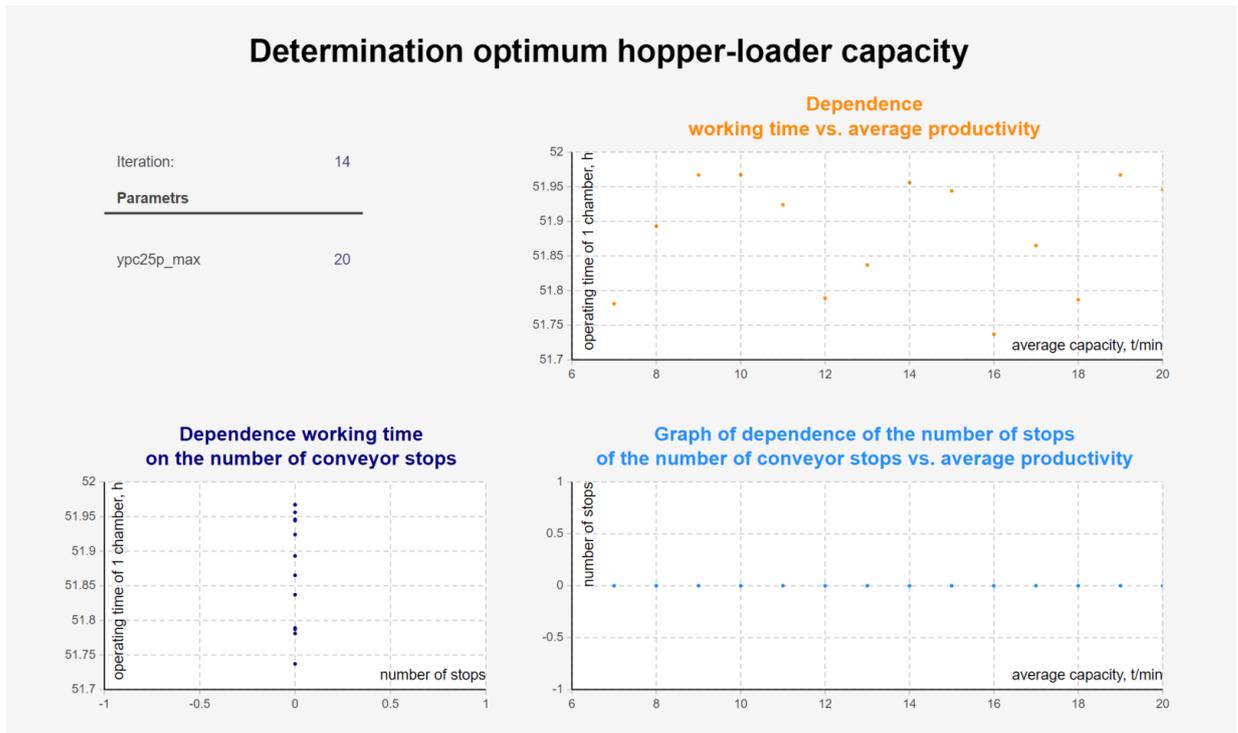


Рисунок 20 – Результаты оптимизационного эксперимента в интерфейсе AnyLogic  
(составлено автором)

Результаты эксперимента после обработки представлены на рисунке 21.



Рисунок 21 – Результаты варьирования параметра максимальной производительности бункера в оптимизационном эксперименте (составлено автором)

Результаты эксперимента показывают, что в случае отсутствия остановок конвейерной сети (благодаря системе динамического регулирования,

разработанного в модели), вне зависимости от установленного потолка производительности перегружателя, конечное время, затрачиваемое на отработку и поднятие на поверхность руды с 1 камеры, находится в диапазоне 51,7..52 часов. Минимальное значение в полученном ряду отличается от максимального менее чем на 1 %, что свидетельствует о надежности разработанного алгоритма. Действительно, если рассчитать аналитическим путем границы времени, необходимого для выгрузки руды с одного цикла на конвейер, то они будут равны 0,8..2,7 минут. От суммарного времени, необходимого на доставку руды к пункту назначения, это занимает 2..7 % (без динамического регулирования). То есть, при отсутствии условий для формирования рискового события, изменения средней производительности бункера в течение смены не оказывают влияния на плановые показатели объема перевезенной массы за рабочий день. Можно сделать вывод о корректности результатов.

#### **3.4. Экономическая оценка эффективности внедрения автоматизированной системы для снижения производственно-технологического риска**

**Формирование затрат на снижение вероятности риска.** Благодаря внедрению автоматизированной системы динамического регулирования производительности перегружателя становится возможным сократить простой конвейерной сети, а значит, снизить время, затрачиваемое на транспортировку руды. Экономическим эффектом здесь будет выступать стоимость реализации того объема руды, который ранее застревал в ходе транспортировки по конвейеру, а теперь, после внедрения системы, быстрее покидает рудник и поступает на дальнейшую переработку.

Для расчета массы потерь от простоя конвейерной сети используются результаты эксперимента из Таблицы 15. Полученные данные корректируются с учетом коэффициентов полученного экспоненциального закона распределения. В связи с тем, что расчет производился для различных значений средней производительности перегружателя (от 6 до 20 тонн в минуту), для полученных значений производится свертывание показателей. Объемы транспортировки в «идеальных условиях» без остановок показывают, что влияние средней

производительности установки не существенно, поэтому в качестве метода свертывания показателей применяется расчет среднего арифметического. Результаты представлены в таблице 15.

Моделирование работы проводилось для 12 часов непрерывной работы, то есть, на протяжении 2 рабочих смен. На калийных рудниках предусмотрен режим работы, состоящий из 4 смен продолжительностью 6 часов. При этом одна смена выделяется как ремонтная на проведение технического обслуживания оборудования и проверку исправности. Рабочих смен, когда идет непосредственно добыча в очистном забое предусмотрено 3 в сутки. Выходным днем для всего рудника считается воскресенье, то есть, предусмотрена 6-дневная рабочая неделя.

Таблица 15 – Расчет объемов предотвращенных потерь за счет внедрения системы (составлено автором)

Показатель	Значение для различной производительности перегружателя, тонн/мин															
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Св.
Добыча за 2 смены, тыс. т	14,74	14,75	14,75	14,77	14,80	14,88	14,82	14,78	14,72	14,74	14,86	14,85	14,83	14,75	14,83	14,79
Транспортировка (без остановок), тыс. т	13,86	13,89	13,90	13,92	13,98	14,06	14,03	13,94	13,90	13,94	14,06	14,08	14,06	13,98	14,06	13,98
Транспортировка (с остановками), тыс. т	4,54	3,79	5,10	5,25	5,65	5,22	5,31	5,04	4,08	5,92	6,48	7,66	7,90	5,65	6,96	5,64
Потери по причине простоя, тыс. т	9,31	10,10	8,80	8,67	8,34	8,85	8,72	8,90	9,82	8,02	7,58	6,42	6,16	8,34	7,10	8,34
Вероятность простоя (по распределению), %	16,7	13,8	11,4	9,4	7,8	6,4	5,3	4,4	3,6	3,0	2,5	2,1	1,7	1,4	1,1	6,04
Вероятностный ущерб, т	1557	1394	1004	817	649	569	463	391	356	240	188	131	104	116	82	537
Вероятностный ущерб как доля потерь, %	11,2	10,0	7,2	5,9	4,6	4,0	3,3	2,8	2,6	1,7	1,3	0,9	0,7	0,8	0,6	3,86
Скорректированная доля (по распределению), %	11,6	9,4	7,8	6,1	4,9	4,0	3,2	2,6	2,1	1,7	1,4	1,1	0,9	0,7	0,6	3,85
Скорректированные потери (по распределению), т	1613	1304	1053	850	689	559	450	360	290	234	191	154	124	100	81	537

Согласно данным из открытых источников, в том числе отчетов добывающих компаний, единица запасов сырья (калийной руды), необходимая для производства тонны удобрения, оценивается в диапазоне от 1 до 6 долларов. Цена хлористого калия на рынке составляет приблизительно 8 тыс. рублей за тонну. Принимая во внимание, что содержание KCl в руде в среднем по российским месторождениям составляет от 30–32 %, то стоимость тонны добытой руды можно принять на уровне 150 рублей [15].

Результаты расчета суммарного годового эффекта от предотвращения простоя конвейерной сети представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет годового эффекта от внедрения системы (составлено автором)

Показатель	Ед. изм.	Значение
Удельная стоимость калийной руды	руб/т	150
Количество рабочих смен в сутки	шт	3
Количество рабочих дней в году	шт	312
Количество рабочих смен в году	шт	936
Увеличение объемов транспортировки за две рабочие смены	т	537
Годовые потери по причине простоя конвейерной сети	тыс. руб	113 058

Данный эффект рассчитан с учетом допущения полной реализации возможного объема добываемого полезного ископаемого после предотвращения аварийных остановок.

Затраты на внедрение системы состоят из трех основных блоков: разработка имитационной модели, воспроизводящей процесс транспортировки, разработка алгоритма динамического управления, а также установка оборудования для автоматизации процесса. Расчет затрат представлен в Таблице 17.

Таблица 17 – Расчет затрат на внедрение системы (составлено автором)

Показатель	Ед. изм.	Значение	
		на 1 забой	На 8 забоев
Разработка имитационной модели с оценкой риска	тыс. руб	3 200,00	3 200,00
Разработка алгоритма на базе имитационной модели	тыс. руб	1 600,00	1 600,00

*Продолжение таблицы 17*

Устройство управления (ПЛК – Контроллер)	тыс. руб	1 800,00	14 400,00
Преобразователь частоты 2 шт	тыс. руб	2 808,00	22 464,00
Взрывозащищенный шкаф	тыс. руб	465,28	3 722,24
Датчик измерения производительности	тыс. руб	148,20	1 185,60
Панель управления	тыс. руб	341,79	2734,32
Накладные расходы	тыс. руб	2 781,64	22 253,08
Затраты на монтаж и пуско-наладочные работы	тыс. руб	1 112,65	8901,23
Суммарные вложения на внедрение системы	тыс. руб	14 257,56	114 060,47
Затраты на ремонт и техническое обслуживание	тыс. руб	2 503,47	20 027,77

Ключевой элемент, необходимый для работы системы, – Программируемый логический контроллер (ПЛК), что соответствует коду ОКОВ 320.26.30.1 и является коммуникационной аппаратурой. То есть, он относится к четвертой амортизационной группе с установленным сроком полезного использования от 5 до 7 лет, что устанавливает горизонт планирования для данного проекта на уровне 5 лет.

В связи с тем, что данный проект носит весьма локальный характер, ставку дисконтирования можно принять на достаточно низком уровне 15 %. Результаты расчета представлены в Таблице 18.

Таблица 18 – Планирование денежного потока инвестиционного проекта (составлено автором)

Показатель	Ед. изм.	Период					
		0	1	2	3	4	5
Приток денежных средств	тыс. руб	0	113 057,65	113 057,65	113 057,65	113 057,65	113 057,65
Отток денежных средств	тыс. руб	114 060,47	20 027,77	20 027,77	20 027,77	20 027,77	20 027,77
Поток денежных средств	тыс. руб	- 114 060,47	93 029,88	93 029,88	93 029,88	93 029,88	93 029,88
Ставка дисконтирования	%	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %
Коэффициент дисконтирования	-	1	0,87	0,76	0,66	0,57	0,50
Дисконтированный денежный поток	тыс. руб	- 114 060,47	80 895,55	70 343,95	61 168,65	53 190,13	46 252,29
Дисконтированный денежный поток нарастающим итогом	тыс. руб	- 114 060,47	- 33 164,93	37 179,03	98 347,68	151 537,82	197 790,11

Расчет показателей экономической эффективности предложенной системы представлен в Таблице 19.

Таблица 19 – Показатели экономической эффективности проекта (составлено автором)

Показатель	Ед. изм.	Значение
NPV	тыс. руб	197 790,11
IRR	%	77 %
DPP	лет	1,41
PI	–	2,73

Таким образом, можно сделать вывод, что благодаря внедрению автоматизированной системы динамического регулирования производительности бункера-перегрузателя УПС25-П было достигнуто увеличение объемов транспортировки руды за счет снижения простоя конвейерной сети на 3,85 % в течение рабочей смены. Затраты на внедрение системы не превышают получаемого эффекта, а NPV проекта составляет 198 млн рублей.

Несмотря на перечисленные допущения, предложенная методика экономической оценки риска адекватна и может быть использована для повышения эффективности хозяйственной деятельности горнорудного предприятия.

### 3.5 Выводы по Главе 3

1. Установлено, что процесс очистной выемки на исследуемом предприятии представляет собой многоступенчатую технологическую цепочку, включающую: добычу руды очистным комбайном, погрузку руды в самоходный вагон и доставку ее от забоя до бункера-перегрузателя, разгрузку из вагона в бункер-перегрузатель с последующей выгрузкой руды на конвейер с дальнейшей транспортировкой и выдачей на поверхность. В рассматриваемом примере работа осуществляется одновременно в 8 очистных забоях.

2. Сформулирована производственная задача предприятия: определение максимально допустимой производительности бункера-перегрузателя с целью непрерывной выдачи руды на поверхность и недопущения аварийной остановки всей транспортной сети, которая происходит в случае одновременного прихода на узел пяти и более грузопотоков.

3. Для расчета вероятностного ущерба от выделенного риска обоснован набор организационно-технических параметров, включающий: продолжительность смены, номер забоя, комбайна, самоходного вагона, количество грузопотоков, количество циклов добычи, продвижение комбайна за цикл, плечо откатки, скорость движения вагона, продолжительность погрузочно-разгрузочных работ, масса руды, производительность бункера-перегрузателя, расположение конвейеров, скорость ленты.

4. С учетом особенностей рассматриваемого производственного процесса добычи: нелинейное влияние стохастических факторов на результат, сложность оценки сопряженных с этими факторов рисков аналитическими методами, значительность последствий наступления рисков, недостаточная гибкость производственный процесс, необходимость равномерного выпуска продукции – обоснована целесообразность построения имитационной модели.

5. На основе результатов моделирования была проведена стоимостная оценка риска остановки конвейера, ущерб от которого составляет 113 млн рублей в год, недопущение рисков ситуации обеспечивает рост скорости транспортировки на 3,85 % в сравнении с базовым вариантом.

6. В качестве меры воздействия на риск предложена установка автоматизированной системы динамического регулирования производительности бункера-перегрузателя. Внедрение такой системы позволило устранить вероятность остановки конвейера по причине скопления грузопотоков, при этом затраты на установку и обслуживание системы не превышают ущерб от риска, NPV проекта внедрения системы составил 197 млн. рублей при горизонте планирования 5 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается решение актуальной научной задачи по повышению экономической эффективности производственной деятельности горнорудного предприятия посредством идентификации, экономической оценки и разработки мероприятий по снижению производственно-технологического риска. По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выявлено, что при высокой обеспеченности запасами калийной руды в Российской Федерации, степень освоенности сырьевой базы очень низкая, что связано с отсутствием спроса на большие объемы калийных удобрений на внутреннем и внешнем рынках, сложностью условий добычи и значительных объемах инвестиций в инфраструктуру регионов с высококачественными запасами калийных руд. Поэтому перспективное направление повышения эффективности хозяйственной деятельности калийных предприятий связано с совершенствования производственного процесса добычи.

2. Выявлена специфика технологий добычи калийных солей предприятиями отрасли, состоящая в широком применении камерной системы разработки, а также одновременном применении циклического и поточного видов транспорта, в процессе эксплуатации которого возникают его скопления и простои оборудования из-за влияния организационно-технических факторов, слабо поддающихся оптимизации, в силу невозможности их выявления с помощью традиционных методов.

3. Установлено, что с развитие цифровых технологий появилась возможность комплексно рассматривать основные и вспомогательные операции процесса добычи, учитывать динамическую природу риска и оперировать большим числом входных данных, характеризующих условия разработки участка недр и организационно-технологические факторы, влияющие на результаты производственной деятельности предприятия.

4. Предложен, в целях данного исследования, термин «производственно-технологический риск», под которым понимается вероятностное событие,

вызванное несогласованностью в основных и вспомогательных операциях, повлекшее за собой отклонение от плановых технико-экономических показателей производственной деятельности предприятия.

5. Доказано, что основная задача оценки производственно-технологических рисков, заключается в проверке достижения ритмичности, цикличности, непрерывности процесса производства. Отсюда, источником риска выступает несогласованность в основных и вспомогательных операциях по количественным параметрам, характеристикам техники, продолжительности операций, расположение объектов в пространстве рудника.

6. Обосновано применение динамического метода для оценки риска, который заключается в построении экономико-математической модели для получения временного ряда, характеризующего вероятность наступления рискового события, и расчета величины ущерба.

7. Разработан методический подход, позволяющий оптимизировать параметры производственного процесса, для снижения вероятности наступления рисков и минимизации их последствий.

8. Разработана группировка производственно-технологических рисков по признаку – форма проявления в производственном процессе. Предложено проведение анализа факторов риска через их формализацию по принципу - «тип производственной задачи – характер влияния параметра на процесс».

9. На основании предложенного методического подхода для предприятия по добыче калийных руд:

- идентифицирован риск остановки конвейера и сформулирована производственная задача предприятия: определение максимально допустимой производительности бункера-перегрузжателя с целью непрерывной выдачи руды на поверхность и недопущения аварийной остановки всей транспортной сети;

- обоснован набор факторов производственно-технологического риска;

- с учетом особенностей рассматриваемого производственного процесса обосновано применение имитационной модели;

- выполнена экономическая оценка риска остановки конвейера, ущерб от которого составляет 113 млн. рублей в год;

- предложена установка автоматизированной системы динамического регулирования производительности бункера-перегрузателя, позволяющей получить экономический эффект в размере 197 млн рублей.

Дальнейшее направление исследования направлено на масштабирование предложенной методики экономической оценки производственно-технологических рисков для возможности применения на предприятиях, осуществляющих разработку рудных месторождений открытым способом. Модернизация группировки рисков по форме проявления, разработка рекомендаций по формулированию затрат на снижение вероятности риска позволять расширить применение методики таким образом, что с ее помощью стало возможным идентифицировать и обрабатывать ранее не замеченные риски уже на стадии подготовки проекта разработки рудного месторождения как подземным, так и открытым способом.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Агошков, М.И. Разработка рудных и нерудных месторождений / М.И. Агошков, С. С. Борисов, В. А. Боярский – М.: Недра, 1970. – 455 с.
2. Батури́н, Е.Н. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира / Е.Н. Батури́н, Е.А. Меньшикова, С.М. Блинов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 613.
3. Борщёв, А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Exponenta Pro: Математика в приложениях. – 2004. – Т. 3–4. – С. 38–47.
4. Годовой отчет ПАО «Уралкалий». – 2024. URL: [https://www.uralkali.com/ru/investors/reporting\\_and\\_disclosure/](https://www.uralkali.com/ru/investors/reporting_and_disclosure/) (дата обращения: 14.03.2025)
5. ГОСТ Р 27.101-2021 Надежность выполнения задания и управление непрерывностью деятельности / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2021 г. № 1103-ст. 2021.
6. ГОСТ Р 52806-2007. Менеджмент рисков проектов / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2007 г. N 422-ст. 2010.
7. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2019 г. N 1405-ст. 2020.
8. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска / Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 декабря 2019 г. N 1379-ст. 2020.
9. Двоглазов, С.И. Совершенствование системы идентификации рисков инвестиционных проектов в горнодобывающей отрасли / С.И. Двоглазов // Актуальные проблемы менеджмента, экономики и экономической безопасности : Сборник материалов II Международной научной конференции. – 2020. – С. 62–66.

10. Дзагоева, М.Р. Механизм комплексной оценки и управления рисками предприятий промышленности / М.Р. Дзагоева, А.Р. Цховребов, Л.Э. Комаева – М.: ИНФРА-М, 2024. – 120 с. — DOI 10.12737/2509

11. Еремеева, О.С. Промышленность, цифровая и циркулярная экономика: взаимодействие в целях обеспечения устойчивого социо-эколого-экономического развития / О.С. Еремеева, Л.А. Мочалова // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. – 2022. – Т. 6. – С. 29–51.

12. Заернюк, В.М. Особенности проявления рисков и неопределенности при реализации горных проектов / В.М. Заернюк, Ю.В. Забайкин, Б.М. Сейфуллаев // Kant. – 2017. – Т. № 3 (24). – С. 130–138.

13. Земсков, А.Н. Основные направления развития калийной промышленности в мире в настоящее время / А.Н. Земсков, Н.А. Липницкий, М.Ю. Лискова // Известия Тульского государственного университета: Науки о Земле. – 2024. – Т. 3. – С. 535–543.

14. Земсков, А.Н. Современные технологические и технические решения при ведении горных работ на калийных рудниках / А.Н. Земсков, М.Ю. Лискова, В.Б. Заалишвили, М.Ю. Шамрин // Известия Тульского государственного университета: Науки о земле. – 2022. – № 2. – С. 284–296.

15. Земсков, А. Н. Современные тенденции в развитии калийной промышленности в мире / А.Н. Земсков, Н.Г. Максимович, О.Ю. Мещерякова // Известия Тульского государственного университета: Науки о земле. – 2022. – С. 369–382.

16. Зубов, В.П. Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования / В.П. Зубов, Д.Г. Сокол // Записки Горного института. – 2023. – Т. 264. – С. 874–885.

17. Зубрыкина, М.В. Применение имитационного моделирования в экономическом прогнозировании деятельности угледобывающих предприятий // Стратегия предприятия в контексте повышения его конкурентоспособности. – 2021. – Т. 10. – С. 187–191.

18. Ильченко, Д.В. Основы применения концепции допустимого уровня риска в стратегическом и операционном управлении / Д.В. Ильченко, М.Г. Трейман // *Russian Economic Bulletin*. – 2024. – Т. 7. – № 5. – С. 292–298. – DOI: 10.58224/2658-5286-2024-7-5-292-298
19. Казаков, Б. П. Сравнительный анализ методов имитационного и аналитического моделирования в теплофизике горных выработок // *Горное эхо*. – 2020. – № 2. – С. 100–106. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.20
20. Ковалев, О.В. Обоснование рациональных технологий отработки IV горизонта в условиях Старобинского месторождения калийных солей / О.В. Ковалев, С.П. Мозер, И.Ю. Мозер, А.В. Лейсле // *Записки Горного института*. – 2011. – Т. 190. – С. 9.
21. Кологривко, А.А. Маркшейдерское дело. Подземные горные работы. – БНТУ, 2006. – 94 с.
22. Коновалов, А.С. Экономический риск как экономическая категория // *Вестник ВГУ: Экономика и управление*. – 2011. – Т. 1. – № 3. – С. 12–19.
23. Кулешов, М.В. Имитационное моделирование как метод оптимизации конвейерной системы / М.В. Кулешов, М.Н. Захаров // *В центре экономики*. – 2020. – Т. 2. – С. 6–11.
24. Куликова, Е.Ю. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений / Е.Ю. Куликова, А.Г. Полянкин, А. М. Потокина // *Записки Горного института*. – 2023. – № 264. – С. 895–905.
25. Логинова, И.О. Анализ концептуальных основ теории риска // *Сб. научных трудов НГТУ*. – 2004. – Т. 1. – № 35. – С. 115–122.
26. Лотов, А.В. Введение в экономико-математическое моделирование / под ред. Ходан Е.Ю. – М.: Наука, 1984.
27. Мананников, С.Д. Блочное моделирование месторождения полезных ископаемых на стадии проектирования горных работ / С. Д. Мананников, В. Д. Панфилов // *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. –

2022. – Т. 26. – С. 125–129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49554150> (дата обращения: 12.04.2025)

28. Невская, М.А. Повышение эффективности управления проектными рисками горнодобывающих предприятий с помощью инструментов имитационного моделирования / Невская М.А., **Шабалова А.Е.** // Интеллектуальная инженерная экономика и Индустрия 5.0 (ИНПРОМ): Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27–30 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 449-451.

29. Невская, М.А. Разработка классификации производственно-технологических рисков горных проектов по типам производственных задач / М. А. Невская, **А. Е. Шабалова** // Экономика, предпринимательство и право. – 2024. – Т. 14. – № 6. – С. 3033–3050. – DOI: 10.18334/epp.14.6.121068

30. Невская, М. А. Современные тенденции использования имитационного моделирования при управлении проектными рисками добывающих предприятий / М. А. Невская, **А. Е. Шабалова** // Социальные и экономические системы. – 2023. – Т. 3-1 (43). – С. 129–148.

31. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году / под ред. Д. Д. Тетенькина, Е. И. Петрова – М.: ФГБУ «ВИМС», 2023. – 640 с.

32. ООН Comtrade. URL: <https://comtradeplus.un.org/> (Дата обращения: 05/04/2025).

33. Подкорытов, В. Н. Анализ развития промышленности в условиях индустриально-информационной экономики / В. Н. Подкорытов, Л. А. Мочалова // Дискуссия. – 2024. – Т. 120(5). – С. 36–50.

34. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 (ред. от 28.12.2024) «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию». – URL: <http://pravo.gov.ru/>

35. Прокопчина, С. В. Моделирование социально-экономических систем в условиях неопределенности : Учебное пособие – практикум / С. В. Прокопчина,

Г. А. Щербаков, Ю.В. Ефимов – М.: Издательский дом «Научная библиотека», 2019. – 508 с.

36. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202208310002>.

37. Распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р «Об утверждении Стратегии развития минерально-сырьевой базы России до 2035 года». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201812280093>, 2018.

38. Рыльникова, М.В. Обоснование структуры и параметров логистической схемы подземного рудника при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей системами с закладкой выработанного пространства / М. В. Рыльникова, И. В. Яковлев, Е. М. Сахаров, Р. В. Бергер // Горная промышленность. – 2023. – Т. 2. – С. 134–139.

39. Соловьева, Н.В. Оценка и управление рисками предприятий химической промышленности. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2022. – 188 с.

40. Терехова, Е. А. Экономическая оценка рисков / Е. А. Терехова, Н. В. Мозолева – М.: РИО Российской таможенной академии, 2016. – 100 с.

41. Токсаров, В.Н. Обоснование параметров системы разработки на пятой юго-восточной панели рудника Усольского калийного комбината ООО «Еврохим» / В. Н. Токсаров, Я.Р. Костин // Master's Journal. – 2017. – Т. 2. – С. 56–62.

42. Трейман, М.Г. Бизнес-экосистемы в эпоху цифровых технологий / М. Г. Трейман, Я. Ян // Management Accounting. – 2022. – № 5. – С. 253–258. – DOI: 10.25806/uu5-12022253-258

43. Уродовских, В.Н. Управление рисками предприятия: учебное пособие / В. Н. Уродовских – М.: ИНФРА-М, 2024.

44. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. – Москва. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 10.03.2024).

45. Череповицын, А.Е. Разработка направлений диверсификации поставок минеральных удобрений на основе моделей прогнозирования рынков /

А. Е. Череповицын, Ф.О. Нарзидинов // *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. – 2024. – Т. 14. – № 10. – С. 5787–5800. – DOI: 10.18334/epp.14.10.121816

46. Черный, К.А. Методологические проблемы проведения оценки профессиональных рисков на горнорудных предприятиях и их решение / К. А. Черный, Г.З. Файнбург, Е.А. Розенфельд // *Недропользование*. – 2021. – Т. 21. – № 4. – С. 193–200. – DOI: 10.15593/2712-8008/2021.4.8

47. **Шабалова, А.Е.** Совершенствование методов управления проектными рисками горнодобывающих предприятий с применением имитационного моделирования / Шабалова А.Е. // *Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–27 мая 2023 года / Санкт-Петербургский горный университет. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 410-411.*

48. Aghaie, A. Simulation based optimization of a stochastic supply chain considering supplier disruption: An agent-based modeling and reinforcement learning / A. Aghaie, M. Hajian Heidary // *Scientia Iranica*. – 2018. – V. 26. – № 6. – P. 3780-3795. – DOI: 10.24200/sci.2018.20789

49. Alcácer, V. Industry 4.0 maturity follow-up inside an internal value chain: a case study / V. Alcácer, J. Rodrigues, H. Carvalho, V. Cruz-Machado // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – V. 119. – No 7–8. – P. 5035–5046. – DOI: 10.1007/s00170-021-08476-3

50. Ansari, F. A knowledge-based approach for representing jobholder profile toward optimal human-machine collaboration in cyber physical production systems / F. Ansari, P. Hold, M. Khobreh // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2020. – V. 28. – P. 87–106. – DOI: 10.1016/j.cirpj.2019.11.005

51. Ansari, R. Decision Support System for Analyzing Key Performance Indicators in Construction Projects Management / R. Ansari, A. Banihashemi Sayyid, T. Roohollah // *International Journal of Engineering*. – 2022. – V. 35. – No 5. – P. 865–874. – DOI: 10.5829/IJE.2022.35.05B.03

52. Atkins, A. Improving board assurance of technical and operational risks in mining / A. Atkins, M. Ritchie // Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk. – Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2019. – P. 97–110. – DOI: 10.36487/ACG\_rep/1905\_03\_Atkins

53. Aziz, A. A Study on Industrial IoT for the Mining Industry: Synthesized Architecture and Open Research Directions / A. Aziz, O. Schelén, U. Bodin // IoT. – 2020. – V. 1. – No 2. – P. 529–550. – DOI: 10.3390/iot1020029

54. Baryakh, A. A. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining / A. A. Baryakh, E.V. Smirnov, S.Y. Kvitkin, L.O. Tenison // Mining Industry Journal (Gornaya Promishlennost). – 2022. – No 1/2022. – P. 41–50. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50

55. Baryakh, A. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by longwall faces / A. Baryakh, S. Devyatkov, E. Denkevich // Journal of Mining Institute. – 2023. – V. 259. – P. 13–20. – DOI: 10.31897/PMI.2023.11

56. Baryannis, G. Supply chain risk management and artificial intelligence: state of the art and future research directions / G. Baryannis, S. Validi, S. Dani, G. Antoniou // International Journal of Production Research. – 2019. – V. 57. – No 7. – P. 2179–2202. – DOI: 10.1080/00207543.2018.1530476

57. Beloglazov, I. I. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry / I.I. Beloglazov, P.A. Petrov, V. Yu. Bazhin // Eurasian Mining. – 2020. – P. 50–54. – DOI: 10.17580/em.2020.02.12

58. Burova, E. The Cost Management of Innovative Products in an Industrial Enterprise Given the Risks in the Digital Economy / E. Burova, S. Grishunin, S. Suloeva, A. Stepanchuk // International Journal of Technology. – 2021. – V. 12. – No 7. – P. 1339. – DOI: 10.14716/ijtech.v12i7.5333

59. Cerna, G. P. Using Discrete Event Simulation to Muck Development Planning in Underground Mining / G.P. Cerna, J.C. González, A. Troncoso-Palacio, J. C. Hernandez // Procedia Computer Science. – 2023. – V. 220. – P. 916–921. – DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.125

60. Córdova, E. A structured key cost analysis methodology to identify value-contributing activities in mining projects: a case study of the Chuquicamata Underground Project / E. Córdova, V. Mobarec, E. Pizarro, A.R. Videla // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2018. – V. 118. – No 3. – P. 279–288. – DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n3a10

61. Deryabin, S. A. About some issues of developing Digital Twins for the intelligent process control in quarries / S.A. Deryabin, I.O. Temkin, S.V. Zykov // *Procedia Computer Science*. – 2020. – V. 176. – P. 3210–3216. – DOI: 10.1016/j.procs.2020.09.128

62. Deveci, M. Rough sets based Ordinal Priority Approach to evaluate sustainable development goals (SDGs) for sustainable mining / M. Deveci, P.R. Brito-Parada, D. Pamucar, E.A. Varouchakis // *Resources Policy*. – 2022. – V. 79. – P. 103049. – DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110220

63. Deveci, M. Evaluation of risks impeding sustainable mining using Fermatean fuzzy score function based SWARA method / M. Deveci, E. A. Varouchakis, P.R. Brito-Parada [et al.] // *Applied Soft Computing*. – 2023. – V. 139. – P. 110220. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103049

64. Dlodhlu, N. I. Risk evaluation in project management implementation: The case of infrastructural development projects / N.I. Dlodhlu, J.H.C. Pretorius, C.J. van Wyngaard // *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. – IEEE, 2017. – P. 1743–1747. – DOI: 10.1109/IEEM.2017.8290190

65. Dotsenko, E. Digital Modernization of the Russian Mining Sector in Accordance with the National Technology Initiative and Mining 4.0 / E. Dotsenko, N. Ezdina, N. Breider, S. Khouri // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – V. 278. – P. 03003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202127803003

66. Duan, Y. Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda / Y. Duan, J.S. Edwards, Y.K. Dwivedi // *International Journal of Information Management*. – 2019. – V. 48. – P. 63–71. – DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.021

67. Eurochem annual review 2023. URL: [https://www.eurochemgroup.com/wp-content/uploads/2024/06/eurochem\\_annual-review\\_2023.pdf](https://www.eurochemgroup.com/wp-content/uploads/2024/06/eurochem_annual-review_2023.pdf) (reference date: 02/03/2025).

68. Friederich, J. Process Mining for Dynamic Modeling of Smart Manufacturing Systems: Data Requirements / J. Friederich, G. Lugaresi, S. Lazarova-Molnar, A. Matta // *Procedia CIRP*. – 2022. – V. 107. – P. 546–551. – DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.023

69. Galkin, A. V. Industrial Risk Management as a Design Element of the Mine Safety System to Ensure the Reliability of its Operation / A.V. Galkin, A.V. Smolin, E. M. Nevolina // *Mining Industry Journal (Gornaya Promishlennost)*. – 2022. – No 1S/2022. – P. 86–94. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-86-94

70. Galkina, N.V. An approach to the economic assessment of production risk at a mining enterprise / N.V. Galkina, I.L. Kravchuk, A.V. Smolin, A.Y. Peryatinski // *NEWS of the Ural State Mining University*. – 2022. – V. 4. – P. 151–158. – DOI: 10.21440/2307-2091-2022-4-151-158

71. Ge, S. Making Standards for Smart Mining Operations: Intelligent Vehicles for Autonomous Mining Transportation / S. Ge, F.-Y. Wang, J. Yang [и др.] // *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. – 2022. – V. 7. – No 3. – P. 413–416. – DOI: 10.1109/TIV.2022.3197820

72. Gong, H. Integrated simulation and optimization framework for quantitative analysis of near-face stockpile mining / H. Gong, A. Moradi Afrapoli, H. Askari-Nasab // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2023. – V. 128. – P. 12–34. – DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105863

73. Hao, M. Hazard identification, risk assessment and management of industrial system: Process safety in mining industry / M. Hao, Y. Nie // *Safety Science*. – 2022. – V. 154. – P. 105863. – DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105863

74. Hazrathosseini, A. The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived / A. Hazrathosseini, A. Moradi Afrapoli // *Resources Policy*. – 2023. – V. 80. – P. 103155. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103155

75. Huerta, J. R. A dynamic simulation approach to support operational decision-making in underground mining / J.R. Huerta, R.S. Silva, G. De Tomi, A.L.M. Ayres da

Silva // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2022. – V. 115. – P. 102458. – DOI: 10.1016/j.simpat.2021.102458

76. Ivanov, S. Recording gear-type pump acoustic signals for assessing the hydraulic oil impurity level in a hydraulic excavator transmission / S. Ivanov, V. Knyazkina, A. Myakotnykh // E3S Web of Conferences. – 2021. – V. 326. – P. 00014. – DOI: 10.1051/e3sconf/202132600014

77. Jiang, C. Distribution, source and health risk assessment based on the Monte Carlo method of heavy metals in shallow groundwater in an area affected by mining activities, China / C. Jiang, Q. Zhao, L. Zheng [et al.] // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2021. – V. 224. – P. 112679. – DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112679

78. Kagan, E. S. Industry 4.0. and an upgrade of the business models of large mining companies / E.S. Kagan, E.V Goosen, E.O. Pakhomova, O.K. Goosen // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – V. 823. – No 1. – P. 012057. – DOI: 10.1088/1755-1315/823/1/012057

79. Kamel, A. Evaluation of mining projects subjected to economic uncertainties using the Monte Carlo simulation and the binomial tree method: Case study in a phosphate mine in Egypt / A. Kamel, M. Elwageeh, S. Bonduà, M. Elkarmoty // Resources Policy. – 2023. – V. 80. – P. 103266. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103266

80. Kantianis, D. Construction Project Crashing with Uncertain Correlated Normal and Crash Task Durations and Costs: An Integrated Stochastic Practical Approach / D. Kantianis // European Project Management Journal. – 2023. – V. 13. – No 1. – P. 3–22. – DOI: 10.56889/pdsd6032

81. Kazakova, E. Imitation Modeling of Commodity Streams in the Logistic Distribution System / E. Kazakova, V.N. Pavlysh // Ecology. Economy. Informatics. System analysis and mathematical modeling of ecological and economic systems. – 2020. – V. 1. – No 5. – P. 250–255. – DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-250-255

82. Kim, B. Digital Innovation in Mining Industries / B. Kim, K. Yoo // Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers. – 2021. – V. 58. – No 1. – P. 61–65. – DOI: 10.32390/ksmer.2021.58.1.061

83. König, U. Value of Mineralogical Monitoring for the Mining and Minerals Industry / U. König, H. Pöllmann // Minerals. – 2022. – V. 12. – No 7. – P. 902. – DOI: 10.3390/min12070902

84. Krishna, N. S. Scheduling Time and Cost by Integrating Quality and Risk in Construction Projects / N.S. Krishna, S.M. Renuka. – 2024. – P. 191–201. – DOI: 10.1007/978-981-99-6233-4\_18

85. Kumbhar, M. A digital twin based framework for detection, diagnosis, and improvement of throughput bottlenecks / M. Kumbhar, A.H.C. Ng, S. Bandaru // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – V. 66. – P. 92–106. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2022.11.016

86. Lechevalier, D. Simulating a virtual machining model in an agent-based model for advanced analytics / D. Lechevalier, S.-J. Shin, S. Rachuri [et al.] // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2019. – V. 30. – No 4. – P. 1937–1955. – DOI: 10.1007/s10845-017-1363-x

87. Li, S. Identifying coal mine safety production risk factors by employing text mining and Bayesian network techniques / S. Li, M. You, D. Li, J. Liu // Process Safety and Environmental Protection. – 2022. – V. 162. – P. 1067–1081. – DOI: 10.1016/j.psep.2022.04.054

88. Love, P. E. D. The ‘how’ of benefits management for digital technology: From engineering to asset management / P. E. D. Love, J. Matthews // Automation in Construction. – 2019. – V. 107. – P. 102930. – DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102930

89. Makarov, V. Developing digital twins for production enterprises / V. Makarov, A. Bakhtizin, G. Beklaryan // Business Informatics. – 2019. – V. 13. – No 4. – P. 7–16. – DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16

90. Miao, D. Research on coal mine hidden danger analysis and risk early warning technology based on data mining in China / D. Miao, Y. Lv, K. Yu [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – V. 171. – P. 1–17. – DOI: 10.1016/j.psep.2022.12.077

91. Mishra, P. C. A review of factors affecting mining operation / P. C. Mishra, M. K. Mohanty // *World Journal of Engineering*. – 2020. – V. 17. – No 3. – P. 457–472. – DOI: 10.1108/WJE-03-2019-0082

92. Molaei, F. A Comprehensive Review on Internet of Things (IoT) and its Implications in the Mining Industry / F. Molaei, E. Rahimi, H. Siavoshi [et al.] // *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2020. – V. 13. – No 3. – P. 499–515. – DOI: 10.3844/ajeassp.2020.499.515

93. Mostafaei, K. Risk management prediction of mining and industrial projects by support vector machine / K. Mostafaei, S. Maleki, M. Zamani Ahmad Mahmoudi, D. Knez // *Resources Policy*. – 2022. – V. 78. – P. 102819. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102819

94. Nepsha, F. Feasibility study of using cogeneration plants at Kuzbass coal mines / F. Nepsha, V. Voronin, A. Liven, A. Korneev // *Journal of Mining Institute*. – 2023. – V. 259. – P. 141–150. – DOI: 10.31897/PMI.2023.2

95. Nevskaya, M. Applications of simulation modeling in mining project risk management: criteria, algorithm, evaluation / M. Nevskaya, **A. Shabalova**, T. Kosovtseva, L. Nikolaychuk // *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. – 2024. – V. 8. – No 8. – P. 5375. – DOI: 10.24294/jipd.v8i8.5375

96. Nevskaya, M. Development of a Quantitative Assessment Algorithm for Operational Risks in Mining Engineering / M. Nevskaya, **A. Shabalova**, L. Nikolaichuk, N. Kirsanova // *Resources*. – 2025. – V. 14. – No 4. – P. 53. – DOI: 10.3390/resources14040053

97. Pinheiro, A. Emerging Global Trends in Urban Agriculture Research: A Scientometric Analysis of Peer-reviewed Journals / A. Pinheiro, M. Govind // *Journal of Scientometric Research*. – 2020. – V. 9. – No 2. – P. 163–173. – DOI: 10.5530/jscires.9.2.20

98. Ponomarenko, T. V. Complex use of mineral resources as a factor of the competitiveness of mining companies under the conditions of the global economy / T. V. Ponomarenko, M. A. Nevskaya, O. A. Marinina // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 9, No. 12. – P. 1215-1223. – EDN YSDGIE.

99. Pournader, M. Artificial intelligence applications in supply chain management / M. Pournader, H. Ghaderi, A. Hassanzadegan, B. Fahimnia // *International Journal of Production Economics*. – 2021. – V. 241. – P. 108250. – DOI: 10.1016/j.ijpe.2021.108250

100. Purnus, A. Correlation between Time and Cost in a Quantitative Risk Analysis of Construction Projects / A. Purnus, C.-N. Bodea // *Procedia Engineering*. – 2014. – V. 85. – P. 436–445. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.570

101. Raimbault, J. A spatial agent based model for simulating and optimizing networked eco-industrial systems / J. Raimbault, J. Broere, M. Somveille [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2020. – V. 155. – P. 104538. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104538

102. Rakaeva, T. G. Improvement of limestone quarry management efficiency using simulation model / T. G. Rakaeva, P. V. Plekhov, A. V. Zatonkiy // *Gornyi Zhurnal*. – 2019. – P. 39–43. – DOI: 10.17580/gzh.2019.12.08

103. Riddle, M. E. Agent-based modeling of supply disruptions in the global rare earths market / M. E. Riddle, E. Tatara, C. Olson [et al.] // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – V. 164. – P. 105193. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105193

104. Rodič, B. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm / B. Rodič // *Organizacija*. – 2017. – V. 50. – No 3. – P. 193–207. – DOI: 10.1515/orga-2017-0017

105. Rogers, W. P. Automation in the Mining Industry: Review of Technology, Systems, Human Factors, and Political Risk / W.P. Rogers, M.M. Kahraman, F.A. Drews [et al.] // *Mining, Metallurgy & Exploration*. – 2019. – V. 36. – No 4. – P. 607–631. – DOI: 10.1007/s42461-019-0094-2

106. Rojek, I. Modern methods in the field of machine modelling and simulation as a research and practical issue related to Industry 4.0 / I. Rojek, M. Macko, D. Mikołajewski [et al.] // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. – 2021. – P. 136717. – DOI: 10.24425/bpasts.2021.136717

107. Rusek, J. Score-based Bayesian belief network structure learning in damage risk modelling of mining areas building development / J. Rusek, K. Tajduś, K. Firek,

A. Jędrzejczyk // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 296. – P. 126528. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126528

108. Sakharov, E. M. Integrated digital transformation implemented in development of the Greymachinskoe potassium-magnesium salt deposit / E.M. Sakharov, R.V. Berger, M.V. Rylnikova // *Mining Industry Journal (Gornaya Promishlennost)*. – 2022. – No 5/2022. – P. 69–73. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-69-73

109. Shabalov, M. Yu. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector / M.Yu. Shabalov, Yu. L. Zhukovskiy, A.D. Buldysko [et al.] // *Energy Reports*. – 2021. – V. 7. – P. 2664–2680. – DOI: 10.1016/j.egy.2021.05.001

110. Shestakov, A. K. Automatic System for Detecting Visible Emissions in a Potroom of Aluminum Plant Based on Technical Vision and a Neural Network / A.K. Shestakov, P.A. Petrov, M.Yu. Nikolaev // *Metallurgist*. – 2023. – V. 66. – No 9–10. – P. 1308–1319. – DOI: 10.1007/s11015-023-01445-z

111. Shishlyannikov, D. I. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining / D.I. Shishlyannikov, S.L. Ivanov, I.E. Zvonarev, V.Yu. Zverev // *Mining informational and analytical bulletin*. – 2020. – No 9. – P. 116–124. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124

112. Smith, K. Governance, Standards and Regulation: What Construction and Mining Need to Commit to Industry 4.0 / K. Smith, S. Sepasgozar // *Buildings*. – 2022. – V. 12. – No 7. – P. 1064. – DOI: 10.3390/buildings12071064

113. Snopkowski, R. Method of the production cycle duration time modeling within hard coal longwall faces / Metoda probabilistycznego modelowania czasu trwania czynności cyklu produkcyjnego realizowanego w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego / R. Snopkowski, A. Napieraj // *Archives of Mining Sciences*. – 2012. – V. 57. – No 1. – P. 121–138. – DOI: 10.2478/v10267-012-0009-2

114. Stadnik, D. A. Improvement of methodical framework for autonomous scheduling of mining operations during underground mine design and planning / D.A. Stadnik, O. Z. Gabaraev, N.M. Stadnik, A.M. Tedeev // *Mining informational and*

analytical bulletin. – 2020. – No 11-1. – P. 189–201. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-189-201

115. Suda, A.K. A Review on Risks and Project Risks Management: Oil and Gas Industry / A.K. Suda, N.S.A. Rani, H. Abdul-Rahman, C. Wang // International Journal of Scientific and Engineering Research. – 2015. – V. 6. – No 8.

116. Temkin, I. Design of a Digital 3D Model of Transport-Technological Environment of Open-Pit Mines Based on the Common Use of Telemetric and Geospatial Information / I. Temkin, A. Myaskov, S. Deryabin [et al.] // Sensors. – 2021. – V. 21. – No 18. – P. 6277. – DOI: 10.3390/s21186277

117. The British Standards Institution. ISO 31000:2018 / The British Standards Institution. – Great Britain, 2018.

118. Tubis, A. Risk Assessment Methods in Mining Industry—A Systematic Review / A. Tubis, S. Werbińska-Wojciechowska, A. Wroblewski // Applied Sciences. – 2020. – V. 10. – No 15. – P. 5172. – DOI: 10.3390/app10155172

119. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2025 / U.S. Geological Survey. – Reston, 2025.

120. Wang, J. Research on coal mine safety management based on digital twin / J. Wang, Y. Huang, W. Zhai [et al.] // Heliyon. – 2023. – V. 9. – No 3. – P. e13608. – DOI: 10.24294/jipd.v8i8.6255

121. Wang, M. A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-Site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0 / M. Wang, C. C. Wang, S. Sepasgozar, S. Zlatanova // Buildings. – 2020. – V. 10. – No 11. – P. 204. – DOI: 10.3390/buildings10110204

122. World Economic Forum. The Global Risks Report 2023 <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2023/> (reference date: 13/04/2025).

123. Xiong, Y. Where risk, where capability? Building the emergency management capability structure of coal mining enterprises based on risk matching perspective / Y. Xiong, H. Qi, Z. Li, Q. Zhang // Resources Policy. – 2023. – V. 83. – P. 103695. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103695

124. Young, A. A Review of Digital Transformation in Mining / A. Young, P. Rogers // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2019. – V. 36. – No 4. – P. 683–699. – DOI: 10.1007/s42461-019-00103-w

125. Zhang, P. An agent-based modeling approach for understanding the effect of worker-management interactions on construction workers' safety-related behaviors / P. Zhang, N. Li, Z. Jiang [et al.] // Automation in Construction. – 2019. – V. 97. – P. 29–43. – DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.015

126. Zhang, Y. Advanced monitoring and simulation for underground gas storage risk management / Y. Zhang, C. M. Oldenburg, Q. Zhou [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 208. – P. 109763. – DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109763

127. Zharov, V. Digitalization as a tool for managing innovation-driven sustainable development in the Arctic industrial sector // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2025. – V. 28. – No 1. – P. 73–86. – DOI: 10.37614/2220-802X.1.2025.87.005

128. Zharov, V. Formation of an algorithm for managing innovative and technological development of industry // Drukerovskij Vestnik. – 2023. – No 1. – P. 36–45. – DOI: 10.17213/2312-6469-2023-1-36-45

129. Zhukovskiy, Y. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque / Y. Zhukovskiy, N. Korolev, Y. Malkova // Journal of Mining Institute. – 2022. – V. 256. – P. 686–700. – DOI: 10.31897/PMI.2022.91

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Логические элементы работы имитационной модели в ПО AnyLogic

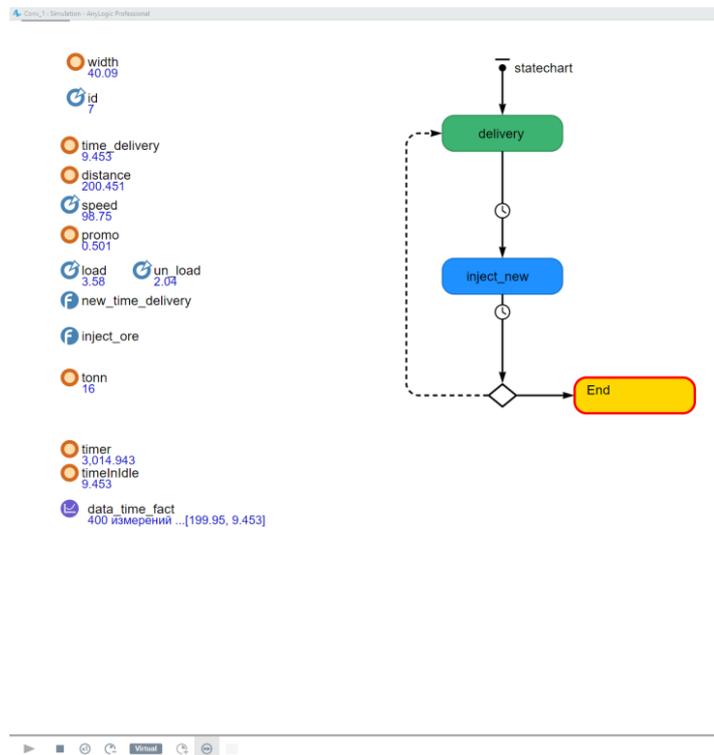


Рисунок А.1 – Реализация процесса очистной выемки с помощью агентного подхода в ПО AnyLogic

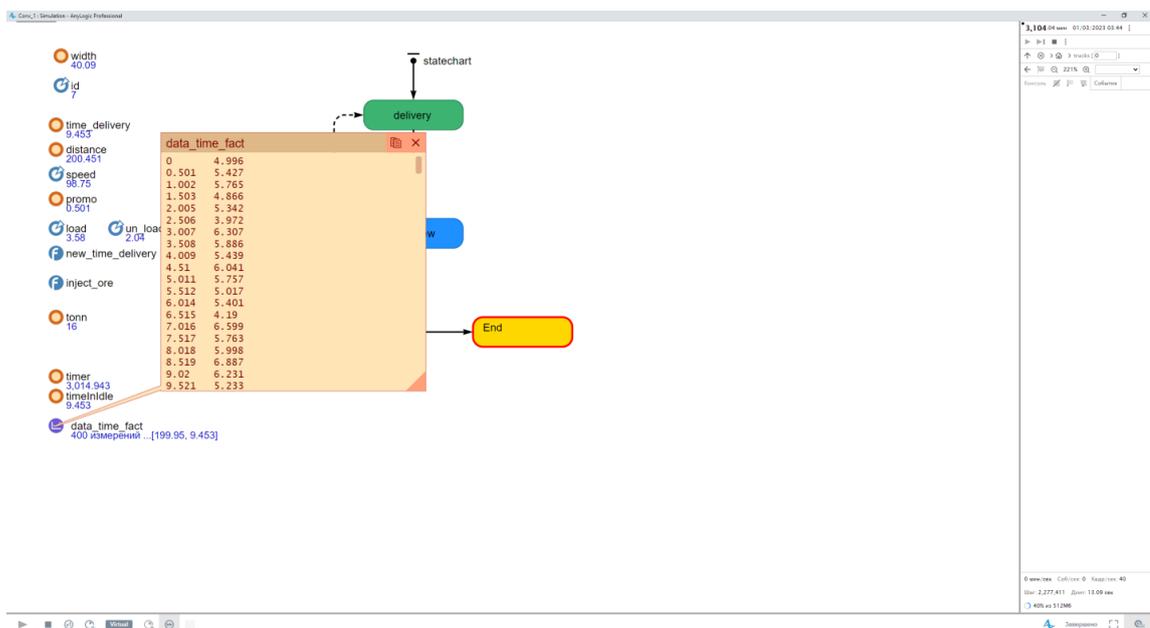


Рисунок А.2 – Реализация вывода данных по расчету плеча откатки и продолжительности цикла очистной выемки в ПО AnyLogic

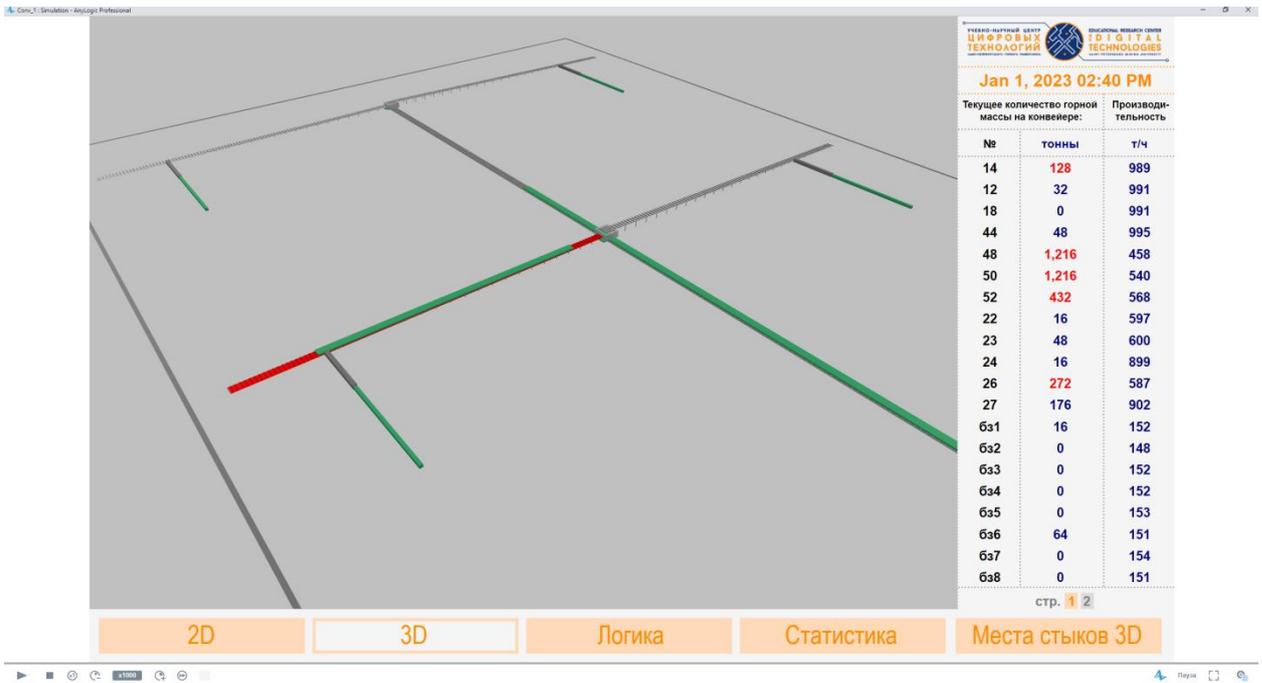


Рисунок А.3 – Часть визуального отображения работы конвейерной системы с выводом текущей статистики в ПО AnyLogic

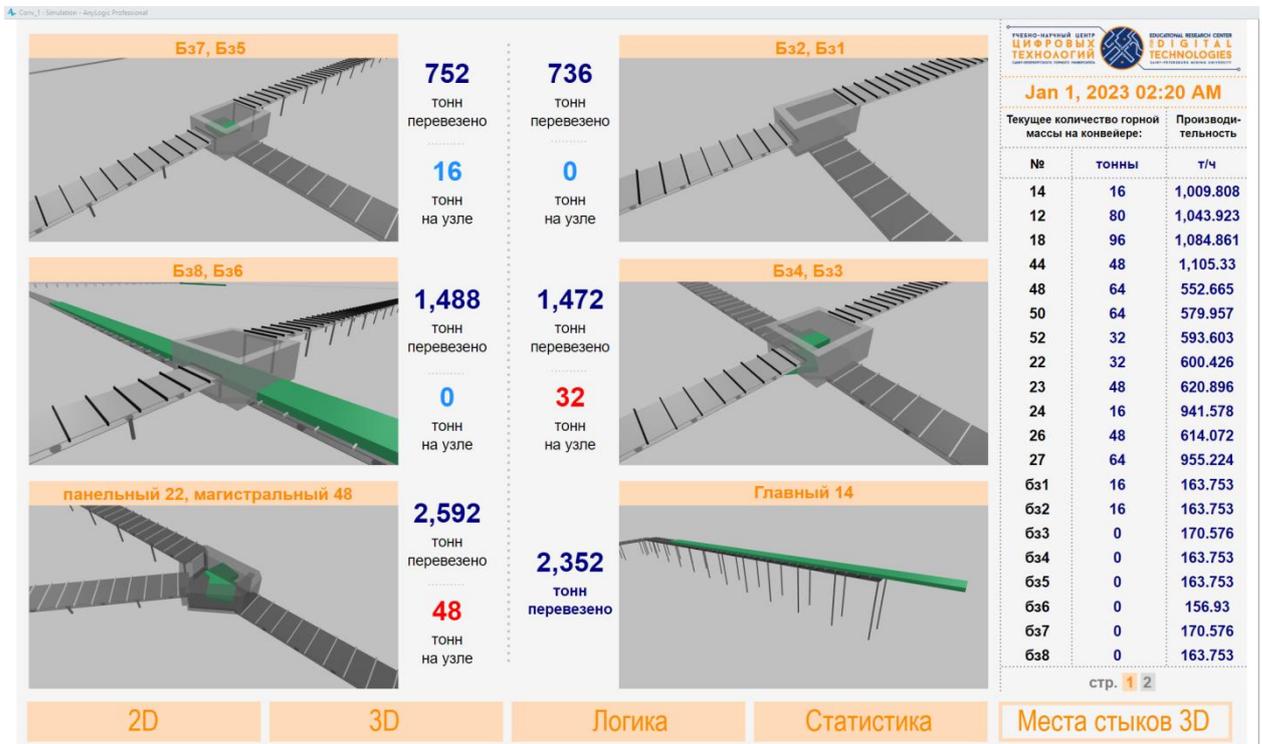


Рисунок А.4 – Анимация прохождения грузопотоков через места объединения конвейеров в ПО AnyLogic

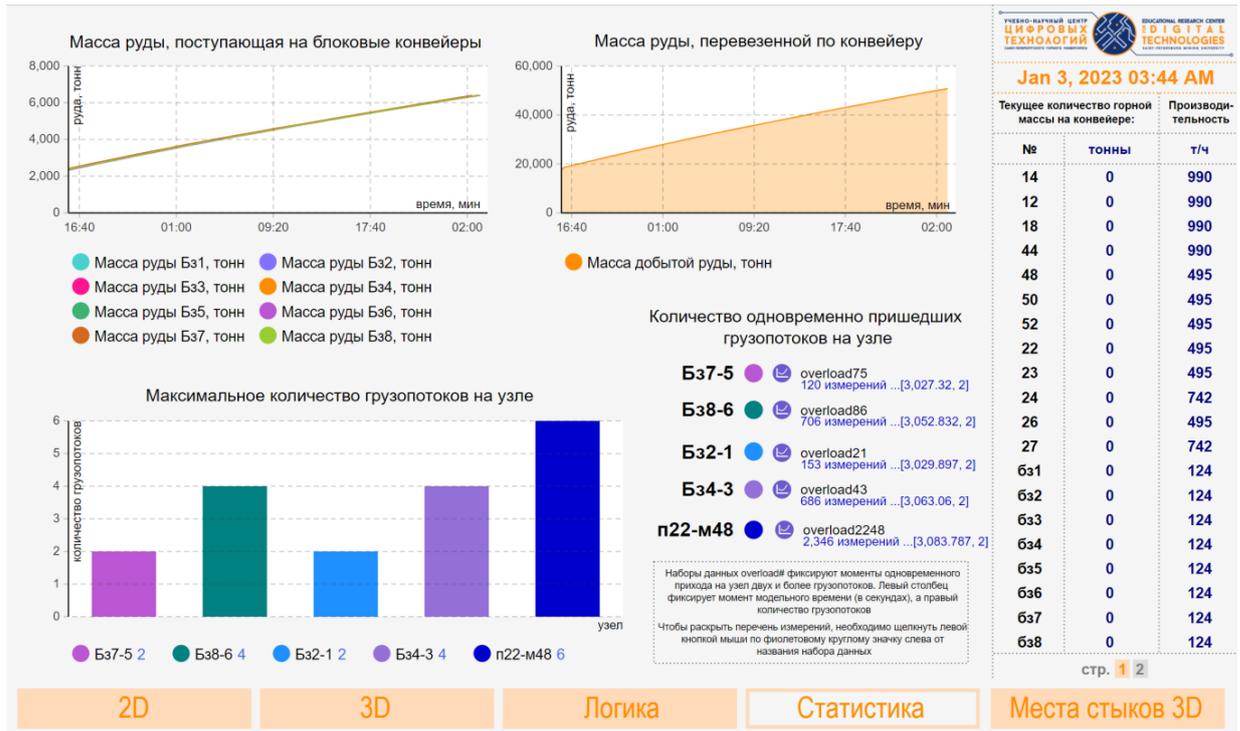


Рисунок А.5 – Вывод статистики по итогам моделирования в ПО AnyLogic

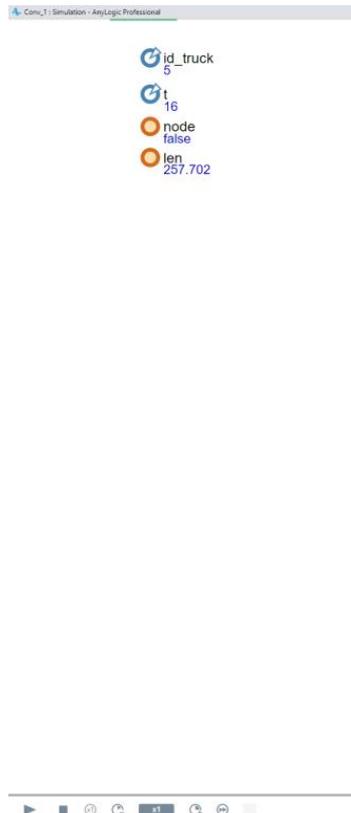


Рисунок А.6 – Логические элементы, отвечающие за моделирование грузопотока

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Результаты расчета вероятности риска остановки конвейера

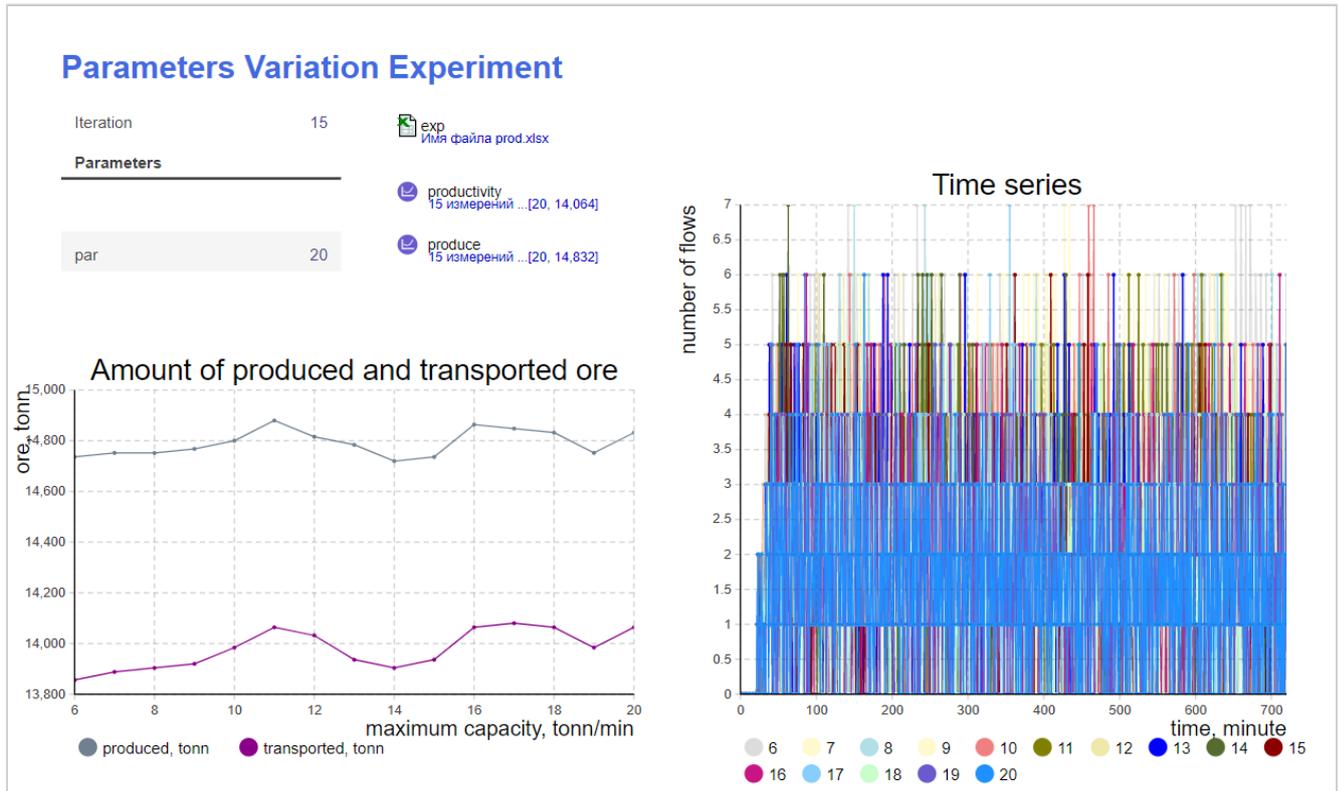


Рисунок Б.1 – Результат эксперимента по получению временных рядов количества грузопотоков в каждую минуту двух рабочих смен ПО AnyLogic

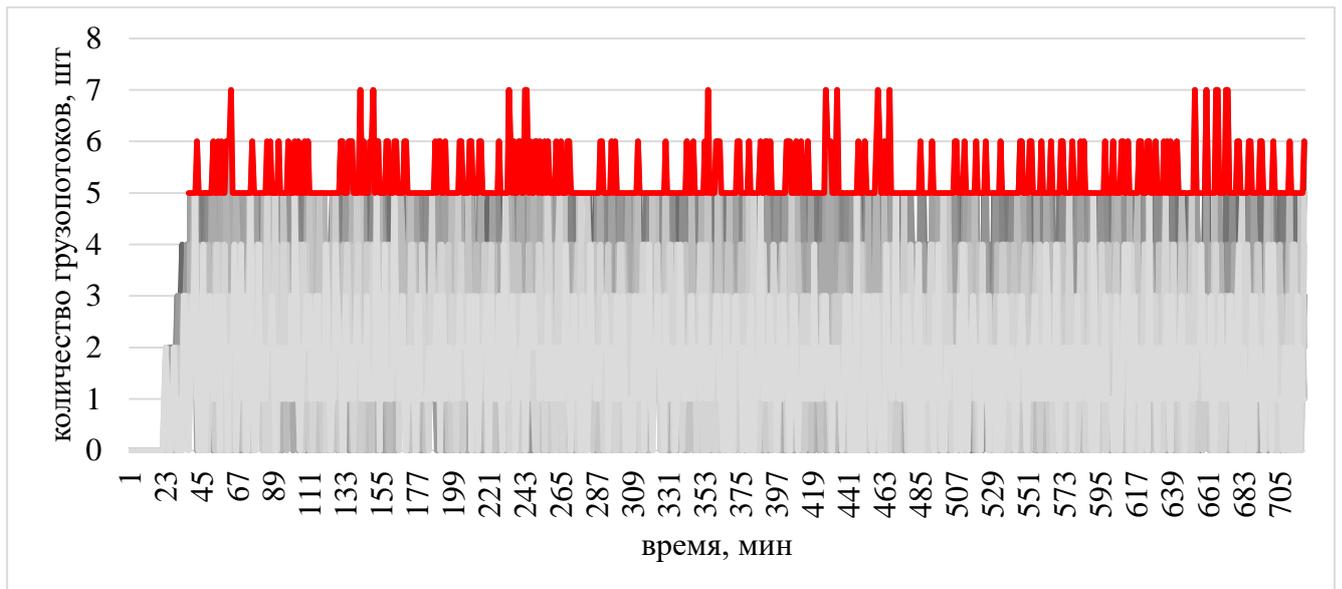


Рисунок Б.2 – Итог обработки результатов эксперимента в MS Excel

Таблица Б.1 – Первичная обработка временных рядов, полученных по результатам эксперимента

* **	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	35	34	39	53	57	61	56	73	114	89	103	109	117	134	131
1	48	56	84	93	107	118	149	157	162	184	177	202	213	209	225
2	127	152	172	207	201	215	218	238	205	228	221	206	217	210	224
3	183	217	202	165	197	185	190	157	123	148	149	138	120	102	105
4	173	164	141	130	104	102	81	63	82	50	49	52	45	52	25
5	97	76	66	52	43	33	24	25	22	18	19	11	8	12	9
6	49	19	13	20	9	6	2	7	11	3	2	1	0	1	1
7	8	2	3	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

\* Максимальная производительность бункера-перегрузателя, т/мин

\*\* Количество грузопотоков в месте объединения конвейеров

**ПРИЛОЖЕНИЕ В****Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации**

Утверждаю

Управляющий директор  
АО «Гипроцветмет»  
В.А. Тимохин

М.П.

Дата « 14 » января 2025 г.

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертации  
Шабаловой Анны Евгеньевны  
по научной специальности 5.2.3 «Региональная и отраслевая экономика»

Комиссия НТС в составе:

Председатель:

— Тимохин Вадим Анатольевич, управляющий директор;

Члены комиссии:

— Петрович Игорь Юрьевич, директор по металлургическому производству;

— Тозик Виктор Михайлович, заместитель директора по металлургическому производству

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Экономическая оценка производственно-технологических рисков горнорудного предприятия», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственной деятельности АО «Гипроцветмет» для оценки рисков, принимаемых технических решений по разработке месторождения с применением камерно-столбовой системы, в виде:

— математической модели поиска параметра, наиболее влияющего на вероятность незапланированной остановки при транспортировке руды.

Выписка из протокола заседания комиссии НТС АО «Гипроцветмет» №1 от 27.12.2025:

Использование указанных результатов при подготовке проекта разработки месторождения позволяет повысить надежность принимаемых технических решений, более полно описать используемую транспортную

схему и оптимизировать ее параметры, увеличив показатели эффективности проекта.

**Председатель комиссии:**

Управляющий директор



В.А. Тимохин

**Члены комиссии:**

Директор по металлургическому  
производству



И.Ю. Петрович

Заместитель директора по  
металлургическому производству



В.М. Тозик