УДК 338.23 + 504.3.054

EDN WPGCOE

Экологический риск-менеджмент в горнодобывающей промышленности: теоретические основы и стандарты

М.Ю. Букарев

Новосибирский государственный технический университет, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия

E-mail: bukarev.matvei.99@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены теоретические основы экологического риск-менеджмента в контексте горнодобывающей промышленности, осуществляющей открытую разработку месторождений полезных ископаемых. Представлена концепция экологического риска как вероятности возникновения негативных событий, приводящих к ущербу окружающей среде и экономическим потерям. Проанализированы специфические источники экологических угроз при карьерной добыче: загрязнение водных ресурсов, атмосферные выбросы, нарушение земель и образование отвалов вскрышных пород. Детально рассмотрены методы количественной и качественной оценки экологических рисков, включая статистические методы, матричный анализ, экспертные оценки и геоинформационное моделирование. Особое внимание уделено требованиям международного стандарта ISO 14001:2015, закрепляющего риск-ориентированный подход к управлению экологической безопасностью. Описаны фундаментальные принципы построения системы риск-менеджмента: предупреждения, сбалансированного риска и приемлемого риска. Представленная математическая модель количественной оценки рисков позволяет определять величину экологического риска как сумму произведений вероятностей негативных событий на ожидаемый ущерб. Результаты исследования формируют теоретическую базу для разработки практических методологий управления экологическими рисками на горнодобывающих предприятиях.

Ключевые слова: экологический риск-менеджмент, горнодобывающая промышленность, открытая разработка, ISO 14001, методы оценки рисков, экологическая безопасность.

Environmental risk management in the mining industry: theoretical foundations and standards

M.Yu. Bukarev

Novosibirsk State Technical University, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia

E-mail: bukarev.matvei.99@mail.ru

Abstract. The theoretical foundations of environmental risk management in the context of the mining industry carrying out open-pit mining of mineral deposits are considered. The concept of environmental risk as the probability of negative events leading to environmental damage and economic losses is presented. Specific sources of environmental threats in quarry mining are analyzed: water pollution, atmospheric emissions, land disturbance and formation of overburden dumps. Methods of quantitative and qualitative assessment of environmental risks are examined in detail, including statistical methods, matrix analysis, expert assessments and geoinformation modeling. Particular attention is paid to the requirements of the international standard ISO 14001:2015, which establishes a risk-based approach to environmental safety management. Fundamental principles of building a risk management system are described: prevention, balanced risk and acceptable risk. The presented mathematical model for quantitative risk assessment allows determining the magnitude of environmental risk as the sum of products of probabilities of negative events and expected damage. The research results form a theoretical basis for developing practical methodologies for managing environmental risks at mining enterprises.

Keywords: environmental risk management, mining industry, open-pit mining, ISO 14001, risk assessment methods, environmental safety.

1. Введение

Горнодобывающая промышленность представляет собой один из важнейших секторов мировой экономики, обеспечивающий добычу минерального сырья для различных отраслей промышленности. Открытая разработка месторождений, включающая карьерную добычу руды, является наиболее распространенным способом извлечения полезных ископаемых благодаря своей экономической эффективности и технологической доступности. Однако данный метод добычи характеризуется значительным негативным воздействием на окружающую среду, что делает вопросы экологической безопасности критически важными для устойчивого развития отрасли [1].

Современные горнодобывающие предприятия сталкиваются с возрастающими требованиями со стороны регуляторных органов, инвесторов и общественности в отношении минимизации экологического воздействия. В условиях ужесточения природоохранного законодательства и повышения общественной осведомленности об экологических проблемах, предприятия вынуждены разрабатывать и внедрять эффективные системы управления экологическими рисками [2]. Это требует глубокого понимания теоретических основ риск-менеджмента и применения современных стандартов экологической безопасности.

Целью настоящей работы является систематизация теоретических основ экологического риск-менеджмента в горнодобывающей промышленности, анализ существующих методов оценки экологических рисков и рассмотрение требований международных стандартов, прежде всего ISO 14001, к построению систем управления экологической безопасностью на предприятиях, осуществляющих открытую разработку месторождений.

2. Концептуальные основы экологического риска в горнодобывающей промышленности

2.1. Определение и сущность экологического риска

Экологический риск в контексте горнодобывающей деятельности представляет собой многоаспектную категорию, включающую как вероятностные, так и последственные компоненты. С научной точки зрения, экологический риск определяется как вероятность возникновения негативных событий или процессов, приводящих к нанесению ущерба

окружающей среде, здоровью населения и экосистемам, а также связанных с этим экономических потерь и социальных последствий [3].

Специфика экологических рисков в горнодобывающей промышленности определяется масштабностью воздействия на природные компоненты, длительным периодом восстановления нарушенных территорий и кумулятивным характером негативных эффектов. В отличие от многих других видов промышленной деятельности, открытая разработка месторождений оказывает комплексное воздействие на все компоненты окружающей среды: атмосферу, гидросферу, литосферу и биосферу [4].

2.2. Источники экологических рисков при открытой разработке месторождений

Открытая разработка месторождений полезных ископаемых характеризуется специфическим набором экологических рисков, обусловленных технологией добычи и переработки руды. Основные источники экологических угроз включают [5]:

Нарушение геологической среды и ландшафтов. Карьерная добыча предполагает изъятие значительных объемов горных пород, что приводит к формированию техногенных форм рельефа – карьерных выемок глубиной до нескольких сотен метров и площадью в десятки квадратных километров. Данные изменения носят необратимый характер и коренным образом трансформируют природные ландшафты.

Загрязнение атмосферного воздуха. Основными источниками атмосферного загрязнения выступают пылевые выбросы при буровзрывных работах, транспортировке руды и пустой породы, а также выбросы вредных газов (оксидов азота, углерода, серы) от работы горнотранспортного оборудования. Пылевое загрязнение может распространяться на значительные расстояния от места добычи, оказывая негативное влияние на прилегающие территории.

Загрязнение водных ресурсов. Технологические процессы горнодобывающих предприятий связаны с использованием значительных объемов воды и образованием загрязненных стоков. Особую опасность представляют карьерные и дренажные воды, содержащие тяжелые металлы и другие токсичные компоненты. Фильтрация загрязненных вод из хвостохранилищ и отстойников может привести к загрязнению грунтовых и поверхностных водных объектов.

Нарушение гидрологического режима. Формирование глубоких карьерных выемок нарушает естественный водный баланс территории, приводя к изменению направлений грунтового стока, иссушению прилегающих территорий или, напротив, их подтоплению.

Образование отходов горнодобывающего производства. Отвалы вскрышных и вмещающих пород, хвосты обогащения занимают обширные площади и представляют собой потенциальные источники пылевого загрязнения, выщелачивания токсичных компонентов и эрозионных процессов.

3. Методы оценки экологических рисков

3.1. Классификация методов оценки рисков

Современная теория риск-менеджмента предлагает широкий спектр методов для оценки экологических рисков, которые могут быть классифицированы на количественные, качественные и комбинированные подходы. Выбор конкретного метода зависит от доступности данных, масштаба оценки, требуемой точности результатов и ресурсов, которыми располагает предприятие [6].

3.2. Количественные методы оценки

Статистические методы базируются на анализе исторических данных о частоте возникновения неблагоприятных экологических событий и величине причиненного ими ущерба. Применяются функции распределения вероятностей (нормальное, логнормальное, распределение Вейбулла) для определения риска загрязнения компонентов окружающей среды. Статистический подход позволяет проводить ранжирование источников загрязнения по степени их опасности и определять приоритетные направления природоохранной деятельности [7].

Основная формула для расчета экологического риска при множественных источниках угроз имеет вид:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P_{ij} \cdot U_i \quad (1)$$

где R – величина экологического риска;

P_{ij} – вероятность получения ущерба U_i при наступлении события j-го типа;

U_i – величина ущерба i-го типа (в стоимостном или натуральном выражении);

n – количество видов ущербов;

m – количество типов событий.

Вероятностный анализ предполагает использование методов теории вероятностей для оценки риска реализации неблагоприятных сценариев. Применяются деревья событий и деревья отказов для моделирования причинно-следственных связей между технологическими нарушениями и экологическими последствиями.

Математическое моделирование включает разработку детерминированных и стохастических моделей распространения загрязняющих веществ в различных средах. Использование численных методов позволяет прогнозировать концентрации загрязнителей в атмосфере, водных объектах и почвах в зависимости от параметров источников выбросов и природно-климатических условий [8].

3.3. Качественные методы оценки

Матричные методы представляют собой наиболее распространенный инструмент качественной оценки рисков, основанный на двухкомпонентном анализе: вероятности возникновения опасного события и тяжести его последствий. Каждый компонент оценивается по шкале (обычно от 1 до 5 баллов), а величина риска определяется как произведение этих показателей. Результаты представляются в виде матрицы риска, где каждая ячейка соответствует определенному уровню риска – от незначительного до критического [9].

Преимуществами матричного подхода являются:

- Простота применения и понятность результатов для различных заинтересованных сторон;
- Возможность быстрой оценки большого числа рисков;
- Наглядность представления результатов;
- Эффективность при недостатке количественных данных.

Экспертные методы применяются в ситуациях, когда отсутствуют статистические данные или невозможно количественно измерить параметры риска. К экспертным методам относятся:

Метод Дельфи – многоступенчатая процедура сбора и обработки мнений экспертов с применением анонимного опроса и обратной связи. Метод позволяет достичь консенсуса в оценке рисков при существенных расхождениях в первоначальных экспертных суждениях.

SWOT-анализ – инструмент стратегической оценки, выявляющий сильные и слабые стороны системы экологического управления предприятия, а также возможности и угрозы внешней среды.

Сценарный анализ – метод разработки альтернативных вариантов развития ситуации при различных комбинациях факторов риска. Позволяет оценить устойчивость системы к различным неблагоприятным воздействиям [1].

3.4. Геоинформационные системы в оценке экологических рисков

Использование геоинформационных систем (ГИС) и методов пространственного анализа представляет собой современный подход к комплексной оценке экологических рисков. ГИС-технологии позволяют:

- Визуализировать пространственное распределение источников экологических угроз;
- Проводить анализ зон потенциального воздействия;
- Оценивать уязвимость природных компонентов и социальных объектов;
- Моделировать распространение загрязняющих веществ с учетом рельефа местности;
- Интегрировать различные типы данных (картографические, статистические, результаты мониторинга). [2]

Применение ГИС-технологий особенно эффективно при оценке рисков на крупных горнодобывающих предприятиях с обширной территорией воздействия.

4. Международные стандарты экологического менеджмента

4.1. Система стандартов ISO 14000

Международная организация по стандартизации (ISO) разработала серию стандартов ISO 14000, определяющих требования к системам экологического менеджмента на предприятиях различных отраслей. Центральное место в этой серии занимает стандарт ISO 14001, устанавливающий общие требования к построению, внедрению, поддержанию и постоянному совершенствованию системы экологического менеджмента [10].

4.2. Риск-ориентированный подход ISO 14001:2015

Версия стандарта ISO 14001, принятая в 2015 году, ознаменовала переход к риск-ориентированному подходу в экологическом менеджменте. Ключевые требования стандарта включают:

Идентификация рисков и возможностей. Организация должна определять риски и возможности, связанные с ее экологическими аспектами, требованиями соблюдения обязательств и другими вопросами, которые могут повлиять на способность системы экологического менеджмента достигать намеченных результатов.

Проактивное управление. В отличие от реактивного подхода, направленного на устранение последствий, риск-ориентированная модель предполагает упреждающее выявление потенциальных угроз и разработку превентивных мер.

Интеграция в бизнес-процессы. Управление экологическими рисками должно быть интегрировано в общую систему управления предприятием и процессы принятия стратегических решений.

Постоянное улучшение. Система управления экологическими рисками рассматривается как динамический процесс, требующий регулярного пересмотра и совершенствования на основе результатов мониторинга и аудита [6].

4.3. Принципы построения системы экологического риск-менеджмента

Эффективная система управления экологическими рисками на горнодобывающих предприятиях должна базироваться на следующих фундаментальных принципах:

Принцип предупреждения предполагает приоритет превентивных мер над корректирующими действиями. На этапе проектирования горнодобывающих объектов и разработки технологических процессов должны рассматриваться альтернативные варианты с минимальным воздействием на окружающую среду. Применяются наилучшие доступные технологии (НДТ), позволяющие снизить экологическую нагрузку [3].

Принцип сбалансированного риска учитывает необходимость достижения баланса между техногенным воздействием на окружающую среду и реализацией комплекса мероприятий по снижению степени опасности. Признается, что полное устранение экологических рисков в горнодобывающей промышленности практически невозможно,

поэтому задача состоит в оптимизации соотношения между уровнем риска и затратами на его минимизацию.

Принцип приемлемого риска основывается на концепции, что общество готово принять определенный уровень экологического риска при условии, что польза от деятельности превышает потенциальный ущерб, и остаточный риск находится в пределах социально и экологически допустимых значений. Для горнодобывающей промышленности международные стандарты рекомендуют, чтобы потенциальный экологический ущерб не превышал 2–3% от ключевых финансовых показателей предприятия [7].

Принцип системности требует рассмотрения экологических рисков во взаимосвязи с другими видами рисков (операционными, финансовыми, репутационными) и интеграции риск-менеджмента в общую систему корпоративного управления.

Принцип прозрачности и подотчетности предполагает открытое информирование заинтересованных сторон о выявленных экологических рисках, принимаемых мерах по их минимизации и результатах природоохранной деятельности.

5. Выводы

Теоретические основы экологического риск-менеджмента в горнодобывающей промышленности формируют научный базис для разработки практических методологий управления экологической безопасностью предприятий, осуществляющих открытую разработку месторождений. Анализ существующих подходов показывает, что эффективное управление экологическими рисками требует интегрированного применения количественных и качественных методов оценки.

Международный стандарт ISO 14001:2015 закрепляет риск-ориентированный подход как основу современного экологического менеджмента, предполагающий проактивное выявление потенциальных угроз и превентивное управление ими. Переход от реактивной модели реагирования на инциденты к систематическому управлению рисками позволяет предприятиям не только минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, но и повысить экономическую эффективность за счет сокращения штрафных санкций и оптимизации природоохранных затрат.

Специфика экологических рисков при открытой разработке месторождений – масштабность воздействия, длительность восстановительного периода и кумулятивный

характер негативных эффектов – требует применения комплексного подхода к оценке рисков. Статистические методы, матричный анализ, экспертные оценки и геоинформационное моделирование в совокупности обеспечивают объективную оценку вероятности и последствий реализации экологических угроз.

Фундаментальные принципы построения системы риск-менеджмента – предупреждения, сбалансированного риска, приемлемого риска, системности и прозрачности – создают методологическую основу для разработки конкретных процедур идентификации, оценки и минимизации экологических рисков на горнодобывающих предприятиях. Представленная математическая модель количественной оценки рисков позволяет определять величину потенциального экологического ущерба и обосновывать инвестиции в природоохранные мероприятия.

Дальнейшее развитие теоретических основ экологического риск-менеджмента должно быть направлено на совершенствование методов интеграции различных подходов к оценке рисков, разработку отраслевых стандартов для горнодобывающей промышленности и адаптацию международных требований к специфике национальных нормативно-правовых систем.

Список литературы

1. Орлова Л.Н. Экологический риск-менеджмент в практике экономической деятельности хозяйственных структур / Л.Н. Орлова // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2020. – № 2. – С. 45–58.
2. Григоренко О.В. Экологический риск-менеджмент предприятия в условиях перехода к устойчивому развитию / О.В. Григоренко, И.Г. Черненькая, Е.К. Ткаченко // Управление и учет. – 2022. – № 3. С. 112–125.
3. Куракина Н.И. Методы оценки экологических рисков на основе геоинформационных технологий / Н.И. Куракина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 8. – С. 67–74.
4. Пожарицкая И.М. Подходы к методике оценки экологического риска / И.М. Пожарицкая, О.А. Униятова // Экономика и управление. – 2005. – № 6. – С. 82–87.
5. Фоменко М.А. Алгоритм риск-менеджмента в обеспечении экологической безопасности населения / М.А. Фоменко // Журнал управления рисками и устойчивого развития. – 2022. – № 4. – С. 198–210.

6. Брыкалов С.М. Применение риск-ориентированного подхода при внедрении систем экологического менеджмента / С.М. Брыкалов // Журнал исследований по управлению. – 2022. – № 6. – С. 34–48.
7. Схаб Н.А. Идентификация и оценка экологических рисков компаний нефтегазового сервиса / Н.А. Схаб // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2019. – № 2. – С. 95–105.
8. Гуцул Т.А. Методика расчета экологических рисков / Т.А. Гуцул // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 5. – С. 118–126.
9. Овчинникова Т.И. Риск-ориентированный подход при оценке опасностей в горной промышленности / Т.И. Овчинникова, Е.П. Потоцкий, В.М. Фирсова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 199–208.
10. Гогоберидзе Г.Г. Оценка природных и техногенных рисков арктического берегового природопользования / Г.Г. Гогоберидзе // Экологическая безопасность. – 2025. – № 3. – С. 142–158.