

УДК 622.831:330.131.7:338.45

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Мусинский Н.А.¹, аспирант, 1 курсНаучный руководитель: Пластинин А.В.¹, д.э.н., профессор¹Северный (Арктический) Федеральный Университет им. М.В. Ломоносова
г. Архангельск

Аннотация

В статье анализируются существующие подходы к классификации геомеханических рисков и методы их экономической оценки в горнодобывающей отрасли. Цель исследования – разработать теоретические основы классификации геомеханических рисков с учетом экономических последствий и предложить подходы к их количественной оценке. По результатам проведенного анализа показано, что геомеханические риски существенно влияют на безопасность и эффективность горнодобывающих проектов, что требует выделения их в отдельную категорию риска. Обоснована необходимость интеграции инженерных методов оценки геомеханических процессов с экономическими инструментами анализа рисков, предложена систематизация геомеханических рисков с позиции влияния на экономические показатели предприятий.

In the article, existing approaches to the classification of geomechanical risks and methods of their economic evaluation in the mining industry are analyzed. The aim of the study is to develop theoretical foundations for classifying geomechanical risks taking into account their economic consequences and to propose approaches to their quantitative assessment. The analysis shows that geomechanical risks significantly affect the safety and efficiency of mining projects, which requires treating them as a separate risk category. The necessity of integrating engineering methods of geomechanical process assessment with economic risk analysis tools is substantiated, and a systematization of geomechanical risks from the perspective of their impact on the economic performance of enterprises is proposed.

Ключевые слова

Геомеханические риски, классификация рисков, экономическая оценка, горнодобывающая промышленность, управление рисками, инвестиционные проекты.

Geomechanical risks, risk classification, economic evaluation, mining industry, risk management, mining projects.

Введение

Развитие горнодобывающей промышленности в последние десятилетия характеризуется вовлечением в отработку все более сложных по горно-геологическим условиям запасов полезных ископаемых. На ранних стадиях освоения минерально-сырьевой базы в эксплуатацию, как правило, вводятся наиболее благоприятные по условиям добычи участки месторождений,

характеризующиеся относительно низкими капитальными и эксплуатационными затратами. По мере их отработки возникает необходимость вовлечения в разработку запасов с менее благоприятными геологическими и горнотехническими условиями, ранее считавшихся экономически неэффективными или некондиционными [1].

Это приводит к увеличению глубины ведения горных работ, ухудшению горно-геологических условий отработки, росту масштаба горнодобывающих комплексов, что напрямую влияет на устойчивое развитие горнодобывающей отрасли России, за счет сложности достижения безубыточности предприятий [2], [3]. Перечисленные факторы приводят к неизбежному повышению роли геомеханических процессов, определяющих устойчивость подземных горных выработок, подземных сооружений и бортов карьеров. Нарушение устойчивости массива горных пород может приводить к катастрофическим обрушениям, неконтролируемым деформациям и другим опасным геомеханическим явлениям, которые зачастую сопровождаются остановкой производственных процессов, повреждением оборудования и инфраструктуры, и, как следствие, к значительным экономическим потерям [4].

Практика функционирования горнодобывающих предприятий по всему миру показывает, что геомеханические риски являются одной из наиболее существенных причин аварийных ситуаций и снижения эффективности эксплуатации горнодобывающих предприятий [5], [6].

Экономические последствия подобных событий проявляются в прямых затратах на ликвидацию последствий аварий, восстановление инфраструктуры и проведение дополнительных горнотехнических мероприятий, а также в косвенных потерях, связанных с простоем оборудования, снижением объемов добычи и ухудшением инвестиционных показателей проектов [7].

Важно отметить, что геомеханическое обоснование безопасных горнотехнических параметров отработки запасов также показывает, насколько производительным будет процесс добычи, какую долю промышленных запасов стоит отнести к потерям, а какую ввести в эксплуатацию. К таким параметрам относятся габариты общешахтных и эксплуатационных целиков – нетронутых частей массива горных пород, включающих запасы полезное ископаемое.

В научной литературе представлены различные подходы к классификации производственных, технологических и инвестиционных рисков, а также методы оценки геомеханического состояния породных массивов [8–14]. Однако интеграция инженерных методов оценки геомеханических процессов с экономическими инструментами анализа рисков и инвестиционной эффективности проектов в настоящее время остаётся недостаточно разработанной [11]. На практике геомеханические риски либо учитываются инженерно, но не переводятся в язык экономических последствий и инвестиционных решений, либо учитываются в финансово-инвестиционных моделях слишком грубо, без привязки к реальным геомеханическим факторам. В результате предприятия и инвесторы принимают решения при систематически неполной оценке риска.

В связи с этим возникает необходимость формирования теоретических и методических основ классификации геомеханических рисков с учётом их экономических последствий, а также разработки подходов к их количественной оценке в системе управления горнопромышленными предприятиями.

Целью настоящего исследования является анализ существующих подходов к классификации геомеханических рисков и рассмотрение методов их экономической оценки в контексте управления горнопромышленными объектами.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- проанализировать существующие подходы к классификации производственных и геомеханических рисков в горнодобывающей промышленности;
- рассмотреть инженерные методы оценки геомеханического состояния породных массивов;
- выявить особенности проявления геомеханических рисков в процессе эксплуатации горнопромышленных объектов;
- определить направления интеграции геомеханических и экономических методов оценки рисков.

Объектом исследования выступают горнопромышленные предприятия, функционирующие в условиях воздействия геомеханических факторов.

Предметом исследования являются организационно-экономические отношения, возникающие в процессе оценки и управления геомеханическими рисками на стадиях инвестирования и эксплуатации горнопромышленных объектов.

Количественное описание состояния массива горных пород

Геомеханические процессы являются неотъемлемой частью функционирования горнопромышленных объектов и обусловлены перераспределением напряженно-деформированного состояния породного массива в процессе ведения горных работ, когда равновесное состояние последнего нарушается. Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к нарушению естественного равновесия горного массива, что сопровождается изменением поля напряжений, возникновением деформаций и различными формами проявления горного давления.

Геомеханический риск горнопромышленного объекта — это вероятность возникновения обусловленных состоянием массива горных пород, параметрами выработок и технологией ведения работ неблагоприятных событий, способных вызвать прямые и косвенные экономические потери на стадиях инвестирования и эксплуатации. В отличие от традиционного инженерного подхода, ориентированного преимущественно на обеспечение безопасности горных работ, экономический подход предполагает рассмотрение геомеханических процессов как факторов неопределенности, способных оказывать влияние на эффективность реализации горнодобывающих проектов.

В научной и инженерной литературе существует значительное количество классификаций рисков, применяемых в горнодобывающей промышленности [8–15]. При этом большинство из них ориентированы на технологические, производственные или экологические аспекты функционирования предприятий. Геомеханические риски, как правило, рассматриваются в составе более широких групп производственных или техногенных рисков. В то же время специфика горного производства обуславливает необходимость выделения геомеханических рисков в самостоятельную категорию, поскольку именно состояние породного массива определяет устойчивость горных выработок, бортов карьеров и других элементов горнотехнической инфраструктуры.

Одним из наиболее распространенных подходов к классификации геомеханических рисков является их систематизация по видам проявления горного давления, возникающих в результате перераспределения напряжений в породном массиве [12]. В процессе ведения горных работ горное давление может проявляться в различных формах, приводящих к деформациям

или разрушению элементов горных сооружений. Для количественного определения риска наиболее удобно прибегнуть к количественной оценке геомеханического состояния массива горных пород.

Развитие методов оценки геомеханического состояния породного массива привело к формированию различных подходов к количественной характеристике устойчивости горных выработок и откосов. Ранние методы оценки устойчивости массива горных пород, основанных преимущественно на эмпирических наблюдениях и аналитических зависимостях, не учитывали интегральные показатели, объединяющие в себе физико-механические свойства пород, степень их трещиноватости, качество трещин, структурность массива и его напряженно-деформированное состояние, влияние обводненности [8], [15].

В конце прошлого столетия ключевым направлением развития геомеханики стало создание систем классификации качества породных массивов, позволяющих количественно оценивать их устойчивость и использовать полученные значения при горнотехнических систем, а также использовать эти данные в компьютерном моделировании. Наиболее широкое распространение в мировой практике получили системы Rock Mass Rating – RMR (и множественные её вариации), Q system, Geological Strength Index (GSI), а также их модификации, применяемые для условий подземных и открытых горных работ, и многие другие [16], [17], [18].

Использование интегральных показателей позволяет иметь обобщенную величину качества массива горных пород, которая характеризует устойчивость и вероятность возникновения аварий, а значит эти показатели удобнее связать с экономической составляющей принятия решений. Это особенно важно при проектировании параметров горных выработок, определении размеров целиков, выборе углов откосов карьеров и обосновании последовательности отработки запасов [4], [12], [17].

Для подземной разработки месторождений наибольшее распространение получила система Q, основанная на учёте качества пород, состояния трещиноватости, условий водонасыщения и напряженного состояния массива. Значения показателя Q используются для выбора типа крепления, оценки устойчивости выработок и прогнозирования вероятности разрушения породного массива [17], [18].

При проектировании откосов и бортов карьеров широко применяются модифицированные классификационные показатели, включая Q-slope, SMR и другие методы, позволяющие учитывать особенности открытых горных работ и прогнозировать устойчивость уступов и бортов карьера с учетом геологического строения массива и условий его разгрузки [4], [19], [20].

Введение количественных показателей устойчивости породного массива позволило рассматривать геомеханические процессы не только как инженерную проблему, но и как источник неопределенности, способный оказывать влияние на экономические результаты функционирования горнопромышленных предприятий. Качество массива горных пород при определенных горнотехнических параметрах предприятия определяет устойчивость основных конструктивных элементов горнотехнических систем и напрямую влияет на размеры целиков, результирующие углы откоса бортов карьера, тип и параметры крепления горных выработок, порядок и систему разработки месторождения. Все эти параметры напрямую связаны с величинами капитальных и эксплуатационных затрат, прибыли и величине извлекаемых запасов полезного ископаемого [5], [11], [14].

Можно отметить, что влияние геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород, должно рассматриваться наравне с другими и быть ключевым из факторов риска

при проектировании и эксплуатации горнопромышленных объектов. Количественная оценка состояния массива на основе международно-признанных подходов к описанию качества горных пород предопределяет предпосылки для перехода к риск-ориентированному менеджменту, то есть имеет прямую связь с эффективностью принимаемых технических решений [8], [15], [16].

В связи с этим дальнейшее рассмотрение геомеханических рисков целесообразно проводить с использованием систем классификации породных массивов и показателей устойчивости, которые могут служить исходной основой для разработки методов экономической оценки геомеханических факторов.

Направления интеграции количественного состояния массива в экономическую модель принятия технических решений

Геомеханические риски в горнодобывающих проектах по своей природе являются инженерно-экономическими: механизм формируется в породном массиве (напряжения, трещиноватость, вода, технология ведения горных работ), а последствия реализуются через простои, потерю извлекаемых запасов, изменение контуров отработки и рост капитальных/эксплуатационных затрат. На статистике геотехнических событий открытых работ показано, что попытка оптимизировать параметры откосов без явной монетизации геотехнической неопределенности приводит к управленческому “разрыву” между инженерными расчетами и финансовыми решениями. [5].

Первый способ интеграции состояния массива в экономическую модель предприятия — построение вероятностной модели $PoF \times LoC$ (Probability of Failure $\times$ Loss of Consequence). Вероятность обрушения (PoF) целесообразно оценивать не только детерминистически через коэффициент запаса устойчивости (FoS – Factor of safety), но и с учетом вариативности входных параметров (прочность, трещиноватость, вода и т.д.), что в реальных проектах часто является главным источником неопределенности. Последствия аварий (LoC) рекомендуется раскладывать как минимум на четыре компонента: (1) прямые расходы на ликвидацию последствий аварии; (2) потери от простоя и нарушения графика ведения работ; (3) потери запасов (вынужденная консервативность параметров, “выполаживание” бортов, увеличение габаритов целиков); (4) расходы на мониторинг и управленческие процедуры. Такая декомпозиция согласуется с подходами, где геотехнический риск сопоставляется с экономическими драйверами добычи [5, 12].

Второй способ — сценарная интеграция геомеханических рисков в финансовую модель проекта. Для ключевых событий (крупные сдвиги горной массы в рамках борта; значимые конвергенции; отказ крепи/целиков; динамическое разрушение) формируются сценарии “базовый / неблагоприятный / аварийный” с заданными вероятностями и денежными последствиями. Далее рассчитывается ожидаемый NPV (ENPV) (чистый дисконтированный доход) как взвешенная сумма NPV по сценариям, либо вводятся корректировки в денежные потоки (сдвиги по времени, дополнительный CAPEX/OPEX [капитальные/эксплуатационные затраты], падение добычи). Это увязывает геомеханику с классическими методами инвестиционного анализа риска и позволяет перейти от “описания опасности” к “оценке влияния на показатели эффективности” [11, 14].

Третий способ — оценка ценности информации (Value of Information, VoI) и экономически обоснованный выбор объема изысканий и мониторинга. При разработке месторождений полезных ископаемых всегда есть проблема ограниченности данных о массиве горных пород,

долю которой можно уменьшить, но не свести к нулю. В данном случае, неизбежно приходится опираться на инженерный опыт и суждения, а дополнительные данные изысканий уменьшают неопределенность, но повышают затраты на проведение этих изысканий. К ним можно отнести бурение разведочных скважин, проведение комплекса исследовательских работ по определению напряженно-деформированного состояния массива и его физико-механических свойств и т.д. Подход VoI предполагает сравнение ожидаемого «выигрыша» от снижения неопределенности (через уменьшение PoF, рост ENPV) и стоимости получения данных. На практическом уровне это почти повсеместно используется при открытых горных работах: мониторинг за сдвижением бортов и склонов отвалов фиксирует критическую скорость деформаций, выявляя опасные зоны, что фактически задает основу для создания реестра рисков и риск-ориентированного менеджмента, однако известны случаи, что организационные сбои приводили к тяжелым экономическим последствиям [5, 6].

Четвёртый способ состоит в экономической оптимизации программ мониторинга и адаптивного управления, то есть предполагает анализ соотношения затрат и выгод мониторинга. В рамках риск-ориентированного подхода мониторинг следует рассматривать как инвестицию в снижение ожидаемого ущерба и снижения доли неполноты информации: большие затраты на мониторинг оправданы лишь в том случае, если они позволяют уменьшить вероятность наступления неблагоприятного события или смягчить тяжесть его последствий благодаря заблаговременному предупреждению и введению оперативных ограничений горных работ. Для карьеров, разрабатываемых в скальных массивах, особо подчёркивается необходимость комплексного мониторинга, предусматривающего выявление опасных зон и учёт изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния массива, что ведет к изменению организации работ, если оно требуется [12].

Пятый способ — портфельный подход к геомеханическим рискам в группе активов. Для компаний, управляющих несколькими месторождениями/карьерами, рационально оценивать риски не изолированно, а как портфель: бюджет на изыскания, мониторинг и укрепление распределяется туда, где максимален вклад в снижение ожидаемого ущерба или рост ENPV. В литературе по рискам горных проектов подчеркивается, что неопределенность и риск неоднородны по стадиям жизненного цикла, а наибольшая «цена» ошибки часто приходится на раннюю эксплуатацию и период освоения проектных параметров [2, 12]

Практическая реализация интеграции в виде эмпирического исследования может быть организована поэтапно. Целесообразно унифицировать геомеханические входы через классификационные индексы RMR, Q, Q-slope, SMR как стандартизированные признаки качества массива, дополнив их расчетными показателями устойчивости (FoS, PoF) [16, 17, 19, 20].

Во-третьих, необходимо сформировать реестр событий и предвестников (деформации, инциденты, остановки) и связать их с управленческим учетом: прямые расходы, простой, перепроектирование, потери запасов. Во-четвертых, PoF оценивается по статистике/экспертной модели с обновлением по мониторингу, а LoC — по план-факт анализу и калькуляции затрат. Далее результаты интегрируются в сценарно-финансовую модель и по необходимости дополняются VoI-анализом для обоснования дополнительных работ и наблюдений [9, 13, 14].

Наконец, для повышения сопоставимости с инвестиционными решениями результаты интеграции следует выражать в управленческих метриках: снижение ожидаемого ущерба, рост ENPV, снижение разброса денежных потоков, а также обоснование «уровней приемлемости» риска (risk appetite) для разных стадий проекта и типов объектов [9, 15].

Обсуждение и выводы

Проведенный анализ показал, что в современной научной литературе существует значительное количество работ, посвященных как классификации рисков в горнодобывающей промышленности, так и методам оценки геомеханического состояния породных массивов. Однако большинство исследований рассматривает данные вопросы отдельно: инженерные методы ориентированы на обеспечение устойчивости горных выработок и безопасность ведения работ, тогда как экономические подходы направлены на оценку эффективности инвестиционных и производственных решений [8], [11], [14].

Отсутствие единой методической базы, позволяющей напрямую связывать геомеханические параметры с экономическими показателями, приводит к тому, что при проектировании и эксплуатации горнопромышленных объектов геомеханические риски учитываются недостаточно полно. На практике, возможны ситуации, когда с инженерной точки зрения допустимые решения оказываются экономически неэффективными, либо наоборот, экономически оптимальные параметры ведения горных работ приводят к повышению вероятности аварийных ситуаций, ввиду неустойчивости массива или неполноты информации о нем [5], [12].

Использование систем классификации качества породных массивов и расчетных показателей устойчивости, вероятности обрушения создает предпосылки их дальнейшего полноценного включения в экономические модели. При этом важным направлением является переход от детерминистических расчетов к вероятностным методам, позволяющим учитывать неопределенность исходных данных и вариативность геологических условий, которые невозможно свести к нулю [8], [15].

Анализ существующих подходов показал необходимость разработки интегрированного подхода к оценке геомеханических рисков, состояния массива, основанного на совместном использовании инженерных и экономических методов анализа инвестиционных проектов в горнодобывающей отрасли, что особенно актуально при освоении новых месторождений.

Список литературы

1. JORC. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (JORC Code), 2012 Edition. 2012.
2. Rynnikova M. V. Conditions and principles for sustainable development of mining companies during a period of higher risks and global challenges // Russian Mining Industry. 2022. № 3. P. 69–73. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-69-73.
3. Цветкова А. Ю. Основные риски предприятий горнодобывающей и металлургической отраслей в современных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S4-4. С. 71–78.
4. Kolapo P., Oniyide G. O., Said K. O. et al. An Overview of Slope Failure in Mining Operations // Mining. 2022. Vol. 2. P. 350–384. DOI: 10.3390/mining2020019.
5. Jele R., Dunn M. J. Economic significance of geotechnical uncertainties in open pit mines // Mining Geomechanical Risk 2019: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk / ed. J. Wesseloo. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. P. 111–126. DOI: 10.36487/ACG_rep/1905_04_Jele.
6. Anggraeni W. P., Utomo D. P., Dwitya R., Musa R. H. Contributing Factors to Fatalities in Mining: Key Insights from Five Case Studies on Slope Stability Monitoring (white paper; на основе оригинальной работы “Lesson Learned from Five Case Studies...”). 2025.

7. Andrejchuk V. Collapse above the world's largest potash mine (Ural, Russia) // *International Journal of Speleology*. 2002. Vol. 31. No. 1. DOI: 10.5038/1827-806X.31.1.8.
8. Дейнеко А. В., Серова Е. А., Чунюк Д. Ю. Специфика количественного анализа геотехнического риска // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4–2. С. 369–373.
9. Куликова Е. Ю. Организационно-экономический механизм управления риском в городском подземном строительстве // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 6-1. С. 128–136. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-128-136.
10. Чунюк Д. Ю. Стратегия управления геотехническим риском // *Вестник МГСУ*. 2011. № 5. С. 151–154.
11. Заернюк В. М., Забайкин Ю. В., Сейфуллаев Б. М. Особенности проявления рисков и неопределенности при реализации горных проектов // *KANT*. 2017. № 3 (24). С. 130–138.
12. Яковлев В. Л., Яковлев А. В., Шимкив Е. С., Соколов В. В. Систематизация геомеханических рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров // *Проблемы недропользования*. 2025. № 3 (46). С. 95–106. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.095.
13. Серова Е. А., Чунюк Д. Ю. Качественный анализ составляющих геотехнического риска при строительстве подземных и заглубленных сооружений // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4–4. С. 136–143.
14. Франкевич Ж. А., Гагарина А. Ю. Анализ рисков инвестиционного проекта и методы их оценки // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 3. С. 183–192. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-3-0-183-192.
15. Шевкун В. В. Анализ существующих методик оценки геомеханических рисков в подземном строительстве и обоснование нового подхода // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2024. № 3(27). С. 97–106. DOI: 10.25686/2542-114X.2023.3.97.
16. Bieniawski Z. T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: Wiley, 1989. 251 p. ISBN 0471601721.
17. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // *Rock Mechanics*. 1974. Vol. 6. No. 4. P. 189–236. DOI: 10.1007/BF01239496.
18. Hoek E., Brown E. T. *Underground excavations in rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. 527 p.
19. Bar N., Barton N. The Q-slope method for rock slope engineering // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50. No. 12. P. 3307–3322. DOI: 10.1007/s00603-017-1305-0.
20. Romana M. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes // *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works (International Society for Rock Mechanics)*. 1985. P. 49–53.