Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Юсупходжаев Окилхон Зафар угли
Менеджер проектов компании SmartGeo
okilkhon@smartgeo.uz
+99894-501-11-11
https://doi.org/10.5281/zenodo.21506296

Аннотация: В статье рассматривается проблема совершенствования экономического механизма внедрения технологии «цифровой двойник» (Digital Twin) на горно-металлургических предприятиях. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности добычи и переработки полезных ископаемых в условиях истощения легкодоступных запасов и роста операционных затрат. Цель работы — обосновать подходы к формированию и оптимизации экономического механизма, обеспечивающего экономическую целесообразность цифровизации месторождений. В процессе исследования использованы методы системного и структурно-функционального анализа, моделирования дисконтированных денежных потоков (DCF) и оценки рисков. Определена структура затрат и эффектов от внедрения цифрового двойника. Установлено, что применение сквозного цифрового моделирования снижает операционные расходы (OPEX) на 8–15% за счет оптимизации буровзрывных работ и логистики, а также сокращает внеплановые простои оборудования на 20–30%. Разработана финансово-экономическая модель, учитывающая специфику горнодобывающей отрасли и позволившая сформировать алгоритм распределения капитальных затрат (CAPEX) по фазам жизненного цикла проекта. Результаты исследования могут быть использованы руководящими структурами горно-металлургических компаний при оценке эффективности инвестиций в цифровые технологии.
Ключевые слова: Цифровой двойник месторождения, горно-металлургическое предприятие, экономический механизм, капитальные затраты, операционные расходы, окупаемость инвестиций, цифровизация, оптимизация процессов.

Введение

Горно-металлургическая отрасль представляет собой базовый сектор мировой экономики, характеризующийся высокой капиталоемкостью, длительным инвестиционным циклом и традиционно сложными горно-геологическими условиями. На современном этапе предприятия отрасли сталкиваются с системными вызовами: снижением содержания полезных компонентов в руде, усложнением условий добычи, ростом стоимости энергоносителей и ужесточением экологических стандартов [1]. В данных обстоятельствах традиционные методы управления производственными процессами исчерпывают свой потенциал роста эффективности.

Одним из ключевых направлений трансформации горной промышленности становится цифровизация, а именно создание цифровых двойников месторождений (Digital Twins). Цифровой двойник представляет собой многомерную динамическую модель горно-геологического объекта и связанных с ним производственных процессов, синхронизированную с реальным предприятием в режиме реального времени посредством датчиков и систем промышленного интернета вещей (IIoT) [2].

Несмотря на очевидные технологические преимущества, внедрение таких систем сталкивается с экономическими барьерами. Высокие первоначальные капитальные вложения

(CAPEX), продолжительный период интеграции и неопределенность сроков окупаемости требуют формирования совершенствованного экономического механизма. Необходима методология, способная увязать технологические эффекты внедрения цифрового двойника с финансовыми показателями деятельности горно-металлургического предприятия.

Методология

Исследование базируется на принципах системного анализа, теории инвестиционного менеджмента и методах оценки экономической эффективности сложных технологических систем. Для формирования экономического механизма использовалась классификация затрат и доходов, возникающих на всех этапах жизненного цикла цифрового двойника: от этапа проектирования и геологоразведки до эксплуатации и ликвидации месторождения [3].

Оценка экономической эффективности основана на методе дисконтированных денежных потоков (Discounted Cash Flow, DCF) с определением традиционных показателей: чистого дисконтированного дохода (NPV), внутренней нормы доходности (IRR) и дисконтированного срока окупаемости (DPBP) [4]:

$$NPV=\sum_{t=0}^{N}\frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

где CF_t — чистый денежный поток в период времени t, r — ставка дисконтирования, отражающая средневзвешенную стоимость капитала (WACC) с учетом отраслевых рисков, N — горизонт планирования.

В рамках моделирования структура финансового потока CF_t формируется как разница между приростными доходами (ΔR_t), экономией на операционных затратах ($\Delta OPEX_t$) и суммарными капитальными и операционными затратами на поддержание системы ($CAPEX_t+OPEX_t^{DT}$):

$$CF_t=(\Delta R_t+\Delta OPEX_t)\cdot(1-T)+Amort_t\cdot T-CAPEX_t-OPEX_t^{DT}$$

где T — ставка налога на прибыль, $Amort_t$ — амортизационные отчисления по объектам цифровой инфраструктуры.

Фактической базой исследования послужили данные производственно-финансовой отчетности крупных горно-металлургических предприятий, реализовавших пилотные проекты внедрения элементов цифрового карьера и цифровой шахты, а также обобщенные аналитические отчеты международных консалтинговых агентств (McKinsey, BCG, EY) за период 2018–2023 гг. [5], [6].

Результаты

Внедрение цифрового двойника месторождения изменяет структуру затрат и структуру формирования добавленной стоимости горнодобывающего предприятия. Анализ фактических данных внедрения технологических решений на базе цифровых двойников показывает совокупный экономический эффект по ключевым производственным переделам (табл. 1).

Таблица 1. Фактические показатели эффективности внедрения элементов цифрового двойника на горнодобывающих предприятиях

Производственный этап / Показатель	**Характер оптимизационного воздействия**	**Среднее изменение показателя**

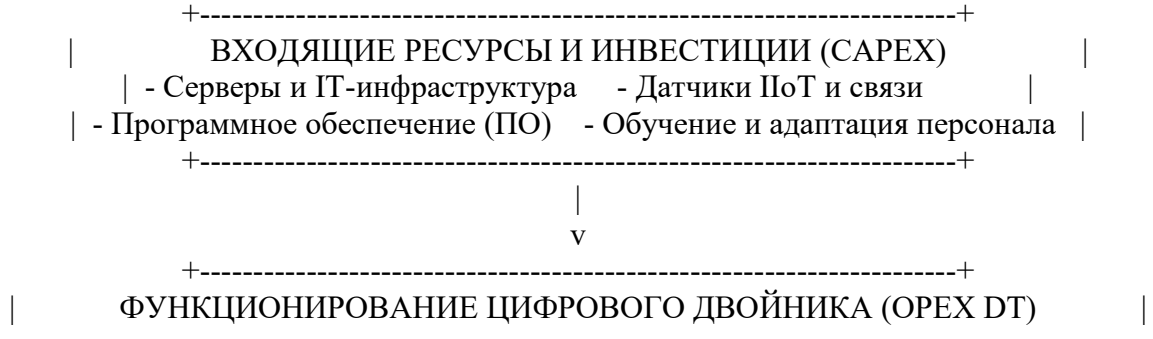
Производственный этап / Показатель	Характер оптимизационного воздействия	Среднее изменение показателя
Геологоразведка и доразведка	Уточнение границ рудных тел, оптимизация эксплуатационной разведки	Снижение затрат на бурение на 12–18%
Буровзрывные работы (БВР)	Точное моделирование гранулометрического состава, учет крепости пород	Сокращение расхода взрывчатых веществ на 7–10%
Выемка и транспортировка	Оптимизация маршрутов карьерного автотранспорта, диспетчеризация	Повышение производительности техники на 10–15%, экономия топлива на 5–8%
Обогатительный передел	Стабилизация качества рудопотока за счет шихтования	Увеличение извлечения полезного компонента на 1,5–3,0%
Техническое обслуживание (ТОиР)	Переход от регламентного обслуживания к обслуживанию по состоянию	Снижение внеплановых простоев оборудования на 20–30%

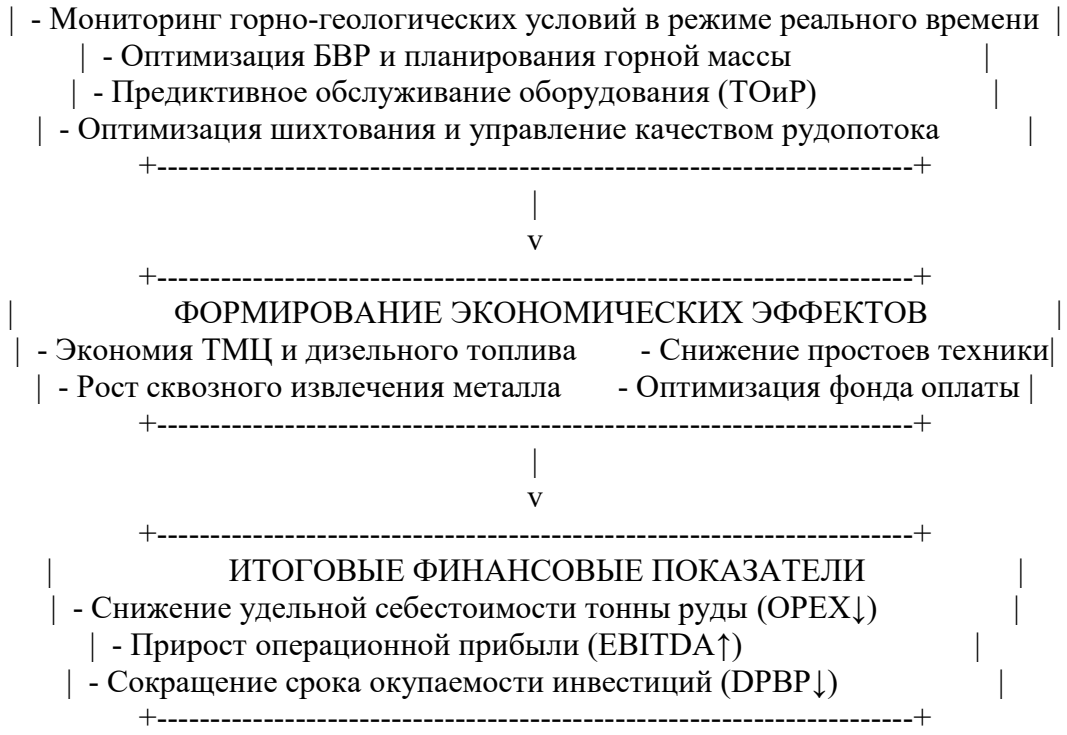
Источники данных: [7], [8], [9].

Совершенствование экономического механизма предполагает структурирование этапов финансирования и оценки эффектов на протяжении жизненного цикла цифрового двойника:

1. **Прединвестиционная фаза (Pre-CAPEX):** проведение аудита IT-инфраструктуры, оценка качества геологических данных, разработка концепции (Feasibility Study).
2. **Инвестиционная фаза (CAPEX):** закупка серверного оборудования, установка датчиков IIoT на горно-шахтное оборудование, приобретение и адаптация программного обеспечения, обучение персонала.
3. **Эксплуатационная фаза (OPEX & Value Capture):** поддержка работоспособности системы, актуализация геологических моделей, извлечение экономического эффекта за счет оптимизации процессов.

На рисунке представлена принципиальная схема экономического механизма внедрения цифрового двойника, отражающая взаимосвязь ресурсного обеспечения, производственных процессов и финансовых результатов.





На основе усредненных данных горно-обогатительного комбината производительностью 10 млн тонн руды в год проведен расчет эффективности проекта внедрения цифрового двойника. Капитальные затраты на внедрение составили 12,5 млн долл. США, ежегодные операционные затраты на подписку ПО и обслуживание инфраструктуры — 1,2 млн долл. США.

Расчет показал, что совокупный годовой эффект от снижения операционных издержек на добычу и транспортировку руды, а также увеличения извлечения на обогатительной фабрике составляет порядка 4,8 млн долл. США в год. При ставке дисконтирования 12% простой срок окупаемости проекта составляет 3,1 года, а дисконтированный срок окупаемости (DPBP) — 3,9 года [10].

Анализ и обсуждение

Полученные результаты свидетельствуют о высокой экономической целесообразности цифровизации горно-металлургического производства, однако реализация потенциала цифрового двойника ограничена рядом институциональных и организационно-экономических факторов.

Совершенствованный экономический механизм должен строиться на преодолении трех ключевых барьеров:

1. **Асимметрия информации и неопределенность данных.** На начальных этапах освоения месторождения точность геологических моделей не превышает 70–80%. Затраты на доразведку для создания высокоточного цифрового двойника должны соотноситься с вероятностным приростом дохода. Введение риск-премии в структуру WACC при расчете NPV позволяет корректно учитывать геологические и технологические риски [11].

2. **Оценка косвенных и синергетических эффектов.** Традиционные системы бухгалтерского и управленческого учета не всегда способны изолировать эффект от внедрения цифровых технологий от влияния внешних рыночных факторов (например, волатильности мировых цен на металлы). Для решения этой проблемы экономический механизм должен включать методику нормирования затрат и сравнения показателей «до и после» внедрения при фиксированных базовых макроэкономических параметрах [12].

3. **Перераспределение капитальных затрат.** Формирование цифрового двойника требует существенного смещения капитальных затрат на ранние стадии освоения месторождения (Pre-feasibility study). Это создает дополнительную нагрузку на денежные потоки проекта в периоды, когда предприятие еще не генерирует выручку. Для сглаживания данного эффекта целесообразно использование сервисных моделей финансирования (SaaS — Software as a Service, PaaS — Platform as a Service), трансформирующих часть CAPEX в текущие OPEX [13].

Сравнительный анализ показал, что предприятия, применяющие поэтапное внедрение цифрового двойника (от отдельного технологического узла, например, карьерного автотранспорта, к полному цифровому двойнику предприятия), снижают финансовый риск проекта на 35–40% по сравнению с компаниями, реализующими монолитное внедрение [14].

Заключение

Совершенствование экономического механизма внедрения цифрового двойника месторождения на горно-металлургических предприятиях выступает критически важным условием обеспечения их конкурентоспособности.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Цифровой двойник месторождения представляет собой не просто технологический инструмент, а объект системного инвестирования, формирующий экономический эффект на всех этапах производственного цикла за счет снижения себестоимости добычи и переработки руды.
2. Использование классических показателей оценки инвестиций без учета специфики горного производства приводит к искажению сроков окупаемости. Разработанный экономический механизм, учитывающий фазность затрат и рисковую составляющую, обеспечивает объективную оценку целесообразности инвестиций.
3. Поэтапное финансирование и переход к сервисным моделям (SaaS/PaaS) позволяют оптимизировать структуру CAPEX, сократить дисконтированный срок окупаемости до 3,5–4 лет и снизить финансовую нагрузку на предприятие на начальных этапах цифровой трансформации.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на разработку стандартизированных методик оценки нематериальных активов, возникающих в процессе накопления и обработки массивов технологических данных горнодобывающих предприятий.

Список использованной литературы

1. Баскаев Г. Г., Соколов И. В. Оценка экономической эффективности цифровой трансформации горных предприятий // Горный журнал. – 2021. – № 5. – С. 45–51.
2. Григорьев С. Н., Кутин А. А., Долгов В. А. Концепция создания цифровых двойников в производственных системах // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 2 (49). – С. 9–14.
3. Дмитриев А. Н. Экономический механизм управления инновационным развитием предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 483–491.
4. Жура А. В., Козлов А. В. Методические подходы к оценке эффективности инвестиций в цифровые технологии на предприятиях ГМК // Экономика в промышленности. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 298–307.
5. Игнатов Ю. М., Рыбаков А. В. Применение технологии «цифровой двойник» при разработке месторождений полезных ископаемых // Уголь. – 2020. – № 8. – С. 62–67.
6. Клочков В. В., Байбакова Е. Ю. Проблемы оценки экономической эффективности сквозных цифровых технологий в промышленности // Инновации. – 2021. – № 4 (270). – С. 34–42.
7. Ларичкин Ф. Д., Фадеев А. М., Череповицын А. Е. Экономика рационального использования недр в условиях цифровизации // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2022. – № 1 (75). – С. 77–88.

8. Мясков А. В., Темкин И. О. Цифровизация горного производства: экономические риски и технологические возможности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 112–124.
9. Пастихин Д. В., Семенов А. С. Оптимизация технологических процессов открытых горных работ на основе цифрового моделирования // Цветные металлы. – 2022. – № 6. – С. 18–25.
10. Петров И. В., Попов С. М. Формирование механизмов привлечения инвестиций в цифровые проекты горнодобывающих компаний // Финансовая экономика. – 2020. – № 3. – С. 182–186.
11. Сергеев И. Б., Лебедев А. М. Управление рисками инвестиционных проектов в горнодобывающей промышленности на основе цифровых технологий // Экономический анализ: теория и практика. – 2021. – Т. 20, № 9. – С. 1640–1658.
12. Череповицын А. Е., Кондрашева Н. К. Экономические аспекты внедрения наилучших доступных и цифровых технологий в горно-металлургическом комплексе // Цветные металлы. – 2021. – № 10. – С. 8–15.
13. Шестаков В. А., Гаврилов В. В. Оценка окупаемости затрат на создание цифровой инфраструктуры карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 145–156.
14. Юрасов А. Б. Экономическая модель трансформация процессов обслуживания и ремонта оборудования ГМК на базе IIoT // Экономические науки. – 2022. – № 207. – С. 91–97.