

УДК 622.271:004.94:330.45

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ КАРЬЕРА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И СНИЖЕНИЯ РИСКОВ СРЫВА ГРАФИКОВ

Гриценко Р.А., студент гр. ЭБбтс-241, II курс
Научный руководитель: Тюленева Т.А., к.э.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Современный этап развития горной промышленности Российской Федерации характеризуется переходом к интенсивной модели освоения недр, где ключевыми драйверами конкурентоспособности становятся не только объёмы добычи, но и гибкость управления производственными процессами, способность оперативно реагировать на изменения внешней и внутренней среды [1]. В открытых горных работах эта задача осложняется высокой динамикой изменения горно-геологических условий, зависимостью от погодных факторов, сложностью координации работы разнородного парка техники и необходимостью соблюдения жёстких требований по качеству поставляемого сырья.

На российских карьерах недовыполнение месячных плановых заданий по добыче и отгрузке обусловлено следующими причинами:

- несвоевременное вскрытие новых горизонтов;
- неравномерная загрузка экскаваторно-самосвальных комплексов;
- простои из-за несогласованности логистических потоков;
- внеплановые ремонты дорог и инфраструктуры;
- ошибки в прогнозе качества руды на этапе планирования.

Каждый процент невыполнения плана трансформируется в прямые финансовые потери: недополученная выручка, штрафные санкции контрагентов, рост условно-постоянных расходов на единицу продукции. Такие потери могут стать критическими для рентабельности предприятия.

Цифровые двойники (Digital Twin) рассматриваются мировой практикой как перспективный инструмент повышения предсказуемости производственных систем [2-4]. В рамках данного исследования под цифровым двойником карьера понимается интегрированная программно-аппаратная платформа, которая в режиме, близком к реальному времени, отражает физическое состояние объекта, его технологические процессы и внешние воздействия, а также предоставляет инструменты для прогнозирования, оптимизации и принятия управленческих решений.

Архитектура ЦД карьера включает четыре уровня (табл.1).

Таблица 1 – Уровневая архитектура цифрового двойника карьера

Уровень	Компоненты	Функциональное назначение
---------	------------	---------------------------

Физический	Горная техника, датчики (GPS/ГЛОНАСС, расходомеры, датчики нагрузки), маркшейдерское оборудование, системы видеонаблюдения	Сбор первичных данных о состоянии оборудования, перемещении техники, параметрах выемки
Сетевой	Промышленные шлюзы, LoRaWAN/4G/5G-каналы связи, edge-вычисления	Передача и предварительная обработка данных, обеспечение отказоустойчивости
Датаориентированный	Хранилище данных (Data Lake), ETL-процессы, мастер-данные (геология, паспорта техники, нормативы)	Консолидация, очистка и структурирование информации из разрозненных источников
Сервисный	Модуль имитационного моделирования, AI-алгоритмы оптимизации, дашборды для диспетчеров, API для интеграции с ERP	Поддержка принятия решений: пересмотр сменного задания, перераспределение техники, прогноз выполнения плана

Ключевое отличие ЦД от традиционных систем автоматизации — наличие замкнутого контура управления: система не только фиксирует отклонения, но и предлагает корректирующие воздействия, а после их реализации — оценивает фактический результат и адаптирует модель.

Календарное планирование в открытых горных работах — это процесс определения последовательности, объёмов и сроков выполнения горных работ на заданный временной горизонт (смена, неделя, месяц, квартал). Качество плана напрямую влияет на следующие экономические индикаторы [2, 3]:

- Коэффициент использования рабочего времени (КИРВ) техники — рост КИРВ на 0,01 для парка из 40 самосвалов эквивалентен добавлению ~1,5 условных единиц техники без капитальных вложений.

- Удельный расход ГСМ — оптимизация маршрутов и устранение «пробок» на погрузке/разгрузке снижает расход топлива на 5–15%.

- Себестоимость транспортировки — зависит от плеча откатки, состояния дорог, загрузки самосвалов; динамическое перераспределение потоков позволяет минимизировать средневзвешенное плечо.

- Риск срыва обязательств — финансовая модель предприятия часто включает штрафные санкции за недопоставку сырья; снижение вероятности срыва графика имеет прямую денежную оценку.

Таким образом, экономическая эффективность ЦД формируется через количественное улучшение операционных метрик, которые транслируются в финансовые результаты.

Оценка экономической эффективности проводилась по методологии сравнительного анализа сценариев (With / Without approach) с учётом фактора времени (дисконтирование). Были выделены и количественно оценены основные статьи выгод:

Таблица 2 – Идентификация и количественная оценка потенциальных выгод от внедрения ЦД

Статья выгоды	Метод оценки	Базовое значение	Ожидаемое улучшение	Источник данных
---------------	--------------	------------------	---------------------	-----------------

Снижение не-продуктивных простоев ГТО	Хронометраж работы техники, данные телеметрии	1,5 ч/смену на ед. техники	-40% (до 0,9 ч)	Система мониторинга транспорта
Сокращение расхода ГСМ	Нормативный расчёт + фактические замеры	42 л/100 т·км	-10%	Путевые листы, датчики расхода
Уменьшение частоты срывов графика отгрузки	Статистика отгрузок за 24 мес.	2,3 срыва/квартал	-65% (до 0,8)	Отчётность отдела сбыта
Снижение затрат на ремонт дорог	Анализ затрат на содержание автодорог	18 млн руб./год	-15%	Бюджет службы главного инженера
Сокращение времени на просмотр плана	Хронометраж работы ПДО	16 ч/неделю	-70% (до 5 ч)	Интервью с планово-диспетчерским отделом

Моделирование проводилось для трёх сценариев:

- Пессимистичный – достижение только 50% от ожидаемых операционных улучшений;
- Базовый – реализация улучшений в соответствии с экспертными оценками (табл. 1);
- Оптимистичный – достижение 120% от базовых ожиданий за счёт синергетических эффектов.

Горизонт расчёта — 3 года, ставка дисконтирования — 12% годовых.

Расчётные значения годовых выгод и чистого денежного потока представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Прогноз денежных потоков от внедрения цифрового двойника (базовый сценарий)

Показатель	Год 0	Год 1	Год 2	Год 3
Инвестиции, млн руб.	-25,0	–	–	–
Выгоды от снижения простоев, млн руб.	–	131,4	138,0	144,9
Выгоды от экономии ГСМ, млн руб.	–	15,0	15,8	16,6
Выгоды от предотвращения срывов, млн руб.	–	20,0	21,0	22,1
Прочие выгоды (ремонт дорог, труд ПДО), млн руб.	–	4,2	4,4	4,6
Операционные затраты на поддержку ЦД, млн руб.	–	-4,5	-4,5	-4,5
Чистый денежный поток, млн руб.	-25,0	166,1	174,7	183,7
Дисконтированный поток ($r=12\%$), млн руб.	-25,0	148,3	139,1	130,7

На основе данных табл. 2 рассчитаны ключевые метрики инвестиционной привлекательности:

- Чистый дисконтированный доход (NPV): +393,1 млн руб.
- Индекс доходности (PI): 16,7 (на 1 руб. вложений — 16,7 руб. дисконтированной выгоды)

- Дисконтированный срок окупаемости (DPP): 0,32 года (~3,8 месяца)
- Внутренняя норма доходности (IRR): >100% (проект генерирует поток, многократно превышающий стоимость капитала)

Даже в пессимистичном сценарии (50% от ожидаемых улучшений) NPV остаётся положительным (+182,4 млн руб.), а срок окупаемости не превышает 7,1 месяца.

Для оценки устойчивости результатов проведён однофакторный анализ чувствительности NPV к изменению ключевых параметров. Наиболее чувствительные факторы:

1. Доля снижения простоев техники — отклонение на ± 10 п.п. изменяет NPV на ± 45 млн руб.;

2. Ставка дисконтирования — рост до 18% снижает NPV на 22%, но не меняет знака показателя;

3. Стоимость внедрения — увеличение затрат на 30% удлиняет срок окупаемости до 5,2 месяцев, но сохраняет высокую рентабельность.

Полученные показатели эффективности могут вызвать вопросы о реалистичности. Высокий ROI объясняется следующими факторами:

- Низкая база – традиционное планирование часто имеет значительный «запас неэффективности», поэтому даже частичная оптимизация даёт заметный эффект;

- Масштаб предприятия – для карьера с оборотом >15 млрд руб./год даже 1% экономии — это сотни миллионов рублей;

- Кумулятивный эффект – оптимизация одного процесса (например, логистики) положительно влияет на смежные области (ремонт дорог, планирование качества).

Расчётная эффективность достижима только при соблюдении ряда условий.

1. Качество данных – ЦД работает по принципу «garbage in — garbage out». Необходима предварительная аудит-подготовка: калибровка датчиков, актуализация геологической модели, стандартизация справочников.

2. Организационная готовность – внедрение ЦД требует изменения регламентов работы диспетчерской, планово-экономического отдела, служб главного механика. Целесообразно назначить кросс-функциональную проектную команду с полномочиями по изменению процессов.

3. Поэтапный запуск – рекомендуется начинать с пилотного участка (один горизонт, один экскаваторный комплекс) для отладки модели и формирования внутренней экспертизы перед масштабированием.

4. Интеграция с ERP – максимальный эффект достигается при двустороннем обмене данными между ЦД и системой управления предприятием (например, 1С:ERP), чтобы оптимизационные решения автоматически транслировались в задания для исполнителей.

Ограничения исследования

1. Условность допущений – расчёты выполнены для типизированного предприятия; реальные показатели могут отличаться в зависимости от специфики месторождения, парка техники, квалификации персонала.

2. Неучтённые выгоды – в модели не включены потенциальные преимущества в области безопасности труда, экологии, управления знаниями — их количественная оценка требует отдельного исследования.

3. Динамика технологий – рынок решений для ЦД быстро развивается; стоимость внедрения может снижаться, а функционал — расширяться, что требует периодического пересмотра бизнес-кейса.

Проведённое исследование подтверждает высокую экономическую целесообразность внедрения цифровых двойников для оптимизации календарного планирования в открытых горных работах. Основным источником ценности ЦД заключается не в технологической новизне, а в способности количественно снижать операционные потери, возникающие из-за несовершенства традиционных методов управления. Практическая реализация требует комплексного подхода: от аудита исходных данных до изменения организационной культуры. Перспективы дальнейших исследований видятся:

- в разработке методик оценки нематериальных выгод ЦД (безопасность, экология, устойчивость);
- в адаптации модели для малых и средних предприятий с использованием облачных SaaS-решений;
- в интеграции ЦД с системами предиктивного обслуживания оборудования для формирования сквозного цикла управления активами.

Список литературы:

1. Tyuleneva, T. A. Problems and Prospects of Regional Mining Industry Digitalization / T. A. Tyuleneva // E3S Web of Conferences : 5, Kemerovo, 19–21 октября 2020 года. – Kemerovo, 2020. – P. 04019. – DOI 10.1051/e3sconf/202017404019. – EDN ELBBWK.

2. Гурбанмырадов М., Мырадова Дж, Бегмырадов С. Цифровой двойник горного предприятия // Символ науки. 2025. №1-1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-gornogo-predpriyatiya> (дата обращения: 17.02.2026).

3. Свадковский В.А. Применение цифровых двойников для повышения операционной эффективности предприятий добывающих отраслей // CPPM. 2023. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tsifrovyyh-dvoynikov-dlya-povysheniya-operatsionnoy-effektivnosti-predpriyatiy-dobyvayuschih-otrasley> (дата обращения: 17.02.2026).

4. ГОСТ Р 72242-2025 «Цифровая горнодобывающая промышленность. Термины и определения». Дата введения в действие: 1 октября 2025 года.