



Применение цифровых двойников для повышения операционной эффективности предприятий добывающих отраслей

В.А. Свадковский¹¹ АО «ХК Эволюция» (Москва, Россия)

Аннотация

В статье рассматривается влияние цифровых двойников на бизнес-процессы горнодобывающих предприятий. Горнодобывающие предприятия могут оптимизировать свои операционные процессы, начиная от вскрыши и добычи и заканчивая обогащением и транспортировкой. Моделируя различные сценарии, выявляя узкие места и принимая обоснованные решения, компании могут повысить эффективность использования ресурсов, сократить время простоя, увеличить производительность и таким образом оказать положительное влияние на свою операционную эффективность. Стратегии предиктивного обслуживания, реализуемые с помощью цифровых двойников, способствуют повышению эффективности за счет минимизации непредвиденных поломок оборудования и максимизации времени безотказной работы.

Ключевыми технологическими эффектами от использования цифровых двойников в горнодобывающей отрасли, оказывающими влияние на операционную эффективность предприятия, являются: увеличение объема выхода товарной продукции после обогащения угля и рост коэффициента выхода на линию производительности горнодобывающей техники. Эти эффекты приводят к улучшению операционной эффективности горнодобывающего предприятия, увеличивая такие показатели, как EBITDA и остаток денежных средств на конец периода. Данное влияние на операционную эффективность наступает как за счет роста объемов товарной продукции и увеличения эффективности производственных процессов, так и за счет сокращения постоянных и эксплуатационных расходов предприятия.

Автором разработан метод оценки влияния использования технологии цифровых двойников на горнодобывающие предприятия. По результатам опроса выявлен ряд ключевых производственных процессов с ожидаемым эффектом от внедрения цифрового двойника.

В результате проведенного эмпирического исследования ожидаемый прирост EBITDA от внедрения цифрового двойника составил 28%, фактический прирост EBITDA за исследуемый период – 21%. Ожидаемый прирост свободных денежных средств на конец периода составил 593 млн руб. (+130%), фактический прирост свободных денежных средств за исследуемый период – 441 млн руб. (+96%).

Внедрение цифровых двойников на горнодобывающих предприятиях продемонстрировало большой потенциал для повышения операционной эффективности и решения сложных задач, стоящих перед отраслью.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая трансформация, бизнес-процессы, операционная эффективность, цифровые технологии.

Для цитирования:

Свадковский В.А. (2023). Применение цифровых двойников для повышения операционной эффективности предприятий добывающих отраслей. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 14(3): 292–311. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-3-292-311.

The use of Digital Twins to improve the operational efficiency in the extractive industries

V.A. Svadkovsky¹¹ 'HC Evolution' JSC (Moscow, Russia)

Abstract

The article examines the impact of Digital Twins on the business processes of mining companies. Mining companies can optimise their operations, from stripping and mining to enrichment and transportation. By modelling different scenarios, identifying bottlenecks and making informed decisions, companies can improve resource efficiency, reduce downtime and increase productivity, making a positive impact on their operational efficiency. Predictive maintenance strategies implemented with the help of Digital Twins help increase efficiency by minimising unexpected equipment failures and maximising uptime.

The main technological effects of the use of Digital Twins in the mining industry, which affect the operational efficiency of the company, are: (1) an increase in the volume of output of commercial products after coal enrichment; (2) an increase in the coefficient of output to the production line of mining equipment.

These effects lead to an improvement in the operating efficiency of the mining company, which increases indicators such as EBITDA and cash balance at the end of the period. This impact on operating efficiency is achieved by increasing the volume of commercial products, improving the efficiency of production processes, and by reducing the fixed and operating costs of the business.

In order to assess the impact of the use of Digital Twin technology on mining companies, a methodology has been developed to assess the impact of the use of Digital Twin technology on mining companies. According to the results of the survey, a number of key production processes have been identified where the introduction of a Digital Twin is expected to have an impact.

As a result of the empirical study, the expected increase in EBITDA from the implementation of the Digital Twin was 28%, the actual increase in EBITDA over the study period was 21%. The expected increase in free cash at the end of the period was + 593 million rubles (+130%), the actual increase in free cash for the period under study was 441 million rubles (+96%).

The introduction of Digital Twins in mining companies has shown great potential for improving operational efficiency and solving complex challenges facing the industry.

Keywords: Digital Twin, digital transformation, business processes, operational efficiency, digital technologies.

For citation:

Svadkovsky V.A. (2023). The use of Digital Twins to improve the operational efficiency in the extractive industries. *Strategic Decisions and Risk Management*, 14(3): 292-311. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-3-292-311. (In Russ.)

应用数字孪生提高采矿行业企业的运营效率

Svadkovsky V.A.¹

¹ 'Evolution' 控股集团(俄罗斯, 莫斯科)

简介

文章探讨了数字孪生对采矿企业业务流程的影响。采矿企业可以从开采和采矿开始，一直到选矿和运输，优化其运营流程。通过建模不同场景，识别瓶颈并做出合理决策，企业可以提高资源利用效率，缩短停工时间，提高生产力，从而对其运营效率产生积极影响。通过数字孪生实施的预测性维护策略有助于提高效率，通过最小化设备意外故障和最大化无故障运行时间来实现。

数字孪生在采矿业中对企业运营效率产生影响的**关键技术效应**包括：在煤炭精矿化后增加产品产量和提高采矿设备生产线性性能系数。这些效应导致了采矿企业运营效率的改善，增加了EBITDA和期末现金余额等指标。这种对运营效率的影响是通过增加产品产量和提高生产过程效率以及减少企业固定和运营成本实现的。

作者开发了一种评估数字孪生技术对采矿企业影响的方法。根据调查结果，确定了一系列关键生产流程，并预期了数字孪生技术的实施效果。

根据进行的实证研究，预期的数字孪生技术引入带来的EBITDA增长率为28%，而实际上研究期间的EBITDA增长率为21%。预期期末自由现金余额增长为5.93亿卢布（增长130%），而实际上研究期间的自由现金余额增长为4.41亿卢布（增长96%）。

数字孪生技术在采矿企业的应用展示了提高运营效率和解决行业复杂问题的巨大潜力。

关键词：数字孪生、数字化转型、业务流程、运营效率、数字技术。

引用文本:

Svadkovsky V.A. (2023). 应用数字孪生提高采矿行业企业的运营效率. 战略决策和风险管理, 14 (3): 292-311. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-3-292-311. (俄文.)

Введение

Управление современным добывающим предприятием является сложной задачей, требующей применения различных методов и инструментов для достижения поставленных целей и сокращения издержек. Современные тенденции в развитии производства предполагают глубокие изменения в условиях функционирования предприятий, таких как широкое внедрение новых технологий и программного обеспечения, повышение затрат на труд и материальные ресурсы, необходимость быстрой перестройки производственных процессов для замены номенклатуры продукции и постоянное усиление конкурентной борьбы. Эти факторы требуют, чтобы бизнес-процессы предприятия были гибкими и способными адаптироваться к изменяющимся условиям, не ухудшая свою производительность.

Концепция цифровых двойников может быть полезной для предприятия в решении описанных задач. Стоит отметить, что цифровые двойники могут использоваться не только для воплощения физических объектов в цифровой форме, но также для проведения анализа, планирования, прогнозирования и моделирования без необходимости использования физических объектов.

Использование технологии цифровых двойников может привести к изменению устаревших технологических и организационных схем в отраслях добычи, что, в свою очередь, может повысить эффективность работы, увеличить производительность, улучшить безопасность, снизить затраты и ограничить негативное воздействие на окружающую среду.

Кроме того, данные в режиме реального времени и аналитика, которые предоставляются цифровыми двойниками, могут улучшить процесс принятия решений на предприятии, позволяя выявлять закономерности и тенденции в его деятельности, принимать обоснованные решения и разрабатывать более эффективные стратегии.

Выводы и рекомендации, полученные в ходе исследования, могут быть применены в различных отраслях и секторах, которые проходят через схожие изменения в результате внедрения инновационных цифровых технологий. Таким образом, настоящая работа может внести свой вклад в общее поле цифровой трансформации и расширить понимание того, как технология цифрового двойника может быть использована для оценки увеличения операционной эффективности и устойчивости.

1. Обзор литературы

Технология цифровых двойников набирает популярность благодаря своей способности моделировать поведение и работу физических активов, процессов и систем в виртуальной среде. Эта технология позволяет компаниям анализировать и оптимизировать свою деятельность, снижать затраты и повышать эффективность.

Цифровой двойник – это виртуальная копия физического актива, процесса или системы, которая используется для моделирования его поведения и работы в виртуальной среде. Это комбинация физического и цифрового миров, где дан-

ные от физических активов и процессов собираются, анализируются и моделируются в цифровой среде.

Концепция цифровых двойников широко обсуждалась и исследовалась в последние годы. Однако общепринятого определения цифрового двойника не существует. Различные авторы представляют различные определения цифровых двойников, но многие из них имеют некоторые недостатки или ограничения.

Одно из самых ранних определений цифровых двойников было представлено М. Гривсом в работе «Виртуальная реальность и трансформация разработки продуктов» [Гривс, 2002]. Он определил цифрового двойника как «виртуальное представление физического продукта или процесса, используемое для понимания и прогнозирования эксплуатационных характеристик продукта или процесса». Это определение фокусируется на использовании цифровых двойников для разработки продукции и прогнозирования характеристик. С тех пор концепция развивалась, и цифровые двойники стали неотъемлемой частью индустрии 4.0, где принятие решений на основе данных и оптимизация являются ключевыми факторами успеха.

Другое определение цифровых двойников было предложено Национальным институтом стандартов и технологий (NIST, США) в публикации 2018 года «Таксономия и терминология киберфизических систем». NIST определяет цифрового двойника как «виртуальное представление физической системы или процесса, которое использует данные для обеспечения понимания, обучения и рассуждений». Это определение подчеркивает использование данных для обеспечения понимания и рассуждений, что важно для многих применений цифровых двойников. Однако в нем нет четкого определения цели использования цифрового двойника или его связи с физической системой, которую он представляет¹.

В 2018 году компания *Gartner* представила более полное определение цифровых двойников. Согласно ему, цифровой двойник – это «программное представление физического объекта или системы, которое имитирует его физические характеристики, поведение и динамику в виртуальной среде и может использоваться для анализа, прогнозирования, мониторинга и оптимизации»². Это определение включает в себя несколько важных аспектов цифровых двойников, таких как их программное представление, имитация физических характеристик и многократное использование. Однако в нем не рассматривается использование цифровых двойников для обучения или рассуждений, что является ключевым аспектом определения NIST.

В 2021 году авторы работы [Tao et al., 2019] представили более подробную классификацию цифровых двойников, выделив пять типов на основе их характеристик и функций: аналитические цифровые двойники, киберфизические цифровые двойники, гибридные цифровые двойники, цифровые двойники на основе физики и цифровые двойники, управляемые данными. Эта классификация обеспечивает более глубокое понимание различных типов цифровых двойников и их применения. Однако она может оказаться слишком сложной для некоторых пользователей и не учитывает цели

использования цифровых двойников или их связь с физическими системами.

По определению, данному в [Боровков и др., 2018], цифровой двойник предприятия – это совокупность данных различных форм представления (чертежи, схемы, документация, исторические архивы, алгоритмы и программное обеспечение систем управления, сложные мультидисциплинарные математические модели с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям и физико-механическим процессам), описывающая динамическое поведение объекта и его компонентов во времени.

По мнению М.В. Самосудова, цифровой двойник предприятия – продукт цифровизации (цифровая копия) производственных процессов предприятия, помогающий оптимизировать деятельность и повысить ее эффективность [Самосудов, 2018].

Понятие «цифровой двойник предприятия» следует отличать от понятия «цифровой двойник изделия».

По определению Р.А. Исаева, цифровой двойник изделия – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [Исаев, 2023, с. 44].

В целом можно отметить, что понимание цифрового двойника довольно размыто. Исследование различных мнений и материалов позволило выделить ряд подходов к определению понятия «цифровой двойник» (табл. 1).

2. Понятие и классификация цифровых двойников

В целом существующие определения цифровых двойников имеют некоторые недостатки или ограничения. Некоторые из них фокусируются на конкретных аспектах цифровых двойников, таких как их использование для разработки продуктов или анализа данных, в то время как другие могут быть слишком сложными или расплывчатыми. Более точное и всеобъемлющее определение цифровых двойников должно включать следующие элементы:

- цифровой двойник – это программное представление физической системы или процесса [Karapetyan et al., 2020];
- цифровой двойник имитирует физические характеристики, поведение и динамику физической системы или процесса в виртуальной среде [Kritzing et al., 2018];
- цифровой двойник используется для анализа, прогнозирования, мониторинга, оптимизации, обучения или рассуждений [Merdan et al., 2022];
- цифровой двойник тесно связан с физической системой или процессом, который он представляет, и может обновляться данными от датчиков, устройств IoT или других источников [Barricelli et al., 2019].

Включая эти элементы, можно обеспечить более полное понимание того, что такое цифровой двойник и как он может быть использован в различных приложениях. Такое определение также позволяет гибко подходить к конкретным типам

¹ NIST Trustworthy and Responsible AI NIST AI 100-2e2023. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.100-2e2023.pdf>.

² Top 10 Strategic Technology Trends for 2018: Digital Twins. <https://www.gartner.com/en/documents/3867164>.

Таблица 1
Научные подходы к определению цифрового двойника
Table 1
Scientific approaches to defining a Digital Twin

Подход	Особенности и примеры определений
Общий подход	Цифровой двойник – это цифровая копия живой или неживой физической сущности. Соединяя физический и виртуальный мир, данные передаются, позволяя виртуальной сущности существовать одновременно с физической сущностью [Saddik, 2018]
Виртуальная модель	Цифровой двойник – это цифровая динамическая модель в виртуальном мире, полностью соответствующая ее физическому объекту в реальном мире, с возможностью имитации ее характеристик, поведения, жизненного цикла и производительности [Zhuang et al., 2018] Цифровой двойник – это моделирование производственной системы на основе имитационных правил в рамках прогнозирования и планирования производства; цифровое представление активного уникального продукта или уникальной системы «продукт – услуга», которая включает его выбранные характеристики, свойства, условия и поведение посредством моделей, информации, а также данные в рамках одной или нескольких фаз жизненного цикла [Stark, Damerau, 2018]
Средство обмена данными	Подход к определению делает акцент на необходимости обмена информацией между двумя пространствами посредством датчиков, моделей и исполнительных механизмов [Negri et al., 2017] Цифровой двойник – это виртуальное динамическое представление физической системы, которая подключена к ней на протяжении всего жизненного цикла для двунаправленного обмена данными [Trauer et al., 2020]
Элемент киберфизической системы	Цифровой двойник – это точная виртуальная копия физической системы, которая действительно представляет все ее функциональные возможности или является элементом киберфизической системы, представляет данные о производственной системе для сотрудников [Alam, Saddik, 2017]
Комплекс цифровых технологий	Цифровой двойник – комплекс цифровых технологий, которые используют подходы статистического анализа, машинного обучения, химии, физики, теории управления, теории надежности, теории массового обслуживания, численного моделирования, оптимизации
Функциональный подход	Цифровой двойник – это обучаемая система, состоящая из комплекса математических моделей разного уровня сложности, уточняемая по результатам натурных экспериментов, позволяющая получить первый натурный образец изделия, соответствующий требованиям технического задания, а также предсказывающая его поведение на всем жизненном цикле Цифровой двойник предполагает использование лучших доступных физических моделей, датчиков, исторических данных, чтобы точно отразить жизнь своего двойника – физического объекта [Glaessgen, Stargel, 2012] Цифровой двойник предназначен для отражения всех производственных дефектов и обновлений с учетом износа, вызванного эксплуатацией; имеет функции интеллектуального управления

Источник: составлено автором.

и функциям цифровых двойников, подчеркивая при этом их связь с физическими системами и процессами.

Суть цифровых двойников заключается в их способности воспроизводить поведение и работу физических активов и процессов в цифровой среде. Это позволяет компаниям анализировать и оптимизировать свою деятельность, снижать затраты и повышать эффективность. Цифровые двойники используют данные реального времени от датчиков, IoT-устройств и других источников для моделирования поведения и работы физических активов и процессов в виртуальной среде.

Существует несколько видов классификации цифровых двойников в зависимости от используемых критериев. Некоторые из наиболее распространенных:

- 1) на основе области применения, в которой они используются. Например, существуют цифровые двойники для производства, здравоохранения, финансов и транспорта [Arenkov et al., 2019];
- 2) по уровню детализации. Некоторые цифровые двойники предоставляют высокоуровневый обзор системы, в то время как другие – подробную информацию об отдельных компонентах и процессах [Barticelli et al., 2019];
- 3) на основе источника данных, которые они используют. Некоторые цифровые двойники используют данные от датчиков и других физических источников, другие – от компьютерных систем и других цифровых источников [Bao, 2020];
- 4) по уровню сложности. Некоторые цифровые двойники относительно просты и моделируют только несколько компонентов или процессов, другие очень сложны и моделируют целые системы [Grieves, Vickers, 2017].

Также цифровых двойников классифицируют по уровню зрелости (табл. 2).

Рассмотрим каждый уровень более подробно.

Первый уровень – доцифровой двойник, или предшественник цифрового двойника. Высокоточная модель, которая создается до появления цифровой тени физического объекта. Также в научной литературе можно встретить название «цифровой двойник на стадии проектирования».

Второй уровень – классический цифровой двойник. Появляется на этапе, когда уже сформирована пара «физический объект – цифровой двойник», и на основе цифровой тени уточняется модель цифрового двойника.

Третий уровень – адаптивный цифровой двойник. Модели, которые используются на этом уровне цифрового двойника, постоянно обновляются в режиме реального времени на основе данных, передаваемых с физического объекта. Такой цифровой двойник уже имеет свойство планировать в режиме реального времени и принимать решения во время операции или технического обслуживания.

Четвертый уровень – умный цифровой двойник. Дополнительно к характеристикам цифрового двойника третьего уровня на четвертом добавляется способность машинного обучения, то есть такой цифровой двойник может распознавать объекты и шаблоны, встречающиеся в информационной среде. Это означает, что цифровой двойник уже обладает достаточной степенью автономности, чтобы анализировать данные о производительности, работоспособности и обслуживании физического объекта более детально.

Таким образом, цифровые двойники – это инструмент, который может помочь предприятиям повысить эффективность, производительность и прибыльность. Создавая виртуальные модели физических систем, предприятия могут оптимизировать свои процессы, прогнозировать будущие результаты и определять области для улучшения. Понимая

Таблица 2
Классификация цифровых двойников по уровню зрелости
Table 2
Maturity level classification of Digital Twins

Уровень	Уровень сложности модели	Физический объект	Получение данных от физического двойника
1. Доцифровой двойник	Виртуальная модель с акцентом на технологию / снижение технических рисков	Не существует	Невозможно применить
2. Цифровой двойник	Виртуальная модель физического объекта	Существует	Техническое состояние, производительность, обновление, техническое обслуживание
3. Адаптивный цифровой двойник	Виртуальная модель физического объекта с адаптивным интерфейсом	Существует	Техническое состояние, производительность, обновление, техническое обслуживание; обновление данных в реальном времени
4. Умный цифровой двойник	Виртуальная модель физического объекта с адаптивным интерфейсом и обучением	Существует	Техническое состояние, производительность, обновление, техническое обслуживание; обновление в режиме пакетных обновлений

Источник: составлено автором.

различные типы и классификации цифровых двойников, предприятия могут выбрать подход, который лучше всего соответствует их потребностям, и получить максимальные преимущества от этой мощной технологии.

Стоит отметить, что 1 января 2022 года в Российской Федерации введен в действие первый в мире национальный стандарт в области цифровых двойников – ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения», который вносит определенность в терминологию и конкретизирует технические требования к решениям данного класса. В нем прямо указано: «Цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями»³.

Подведем итог и разграничим определение термина «цифровой двойник» на рис. 1.

Таким образом, формирование термина продолжается, и цифровой двойник не изжил характеристики предтермина. К тому же определение цифрового двойника может меняться по мере смены технологий.



Источник: составлено автором.

³ ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75810.pdf?ysclid=lte5z-2k0n4828230466>.

ки длинных лав, который позволяет операторам отслеживать работу оборудования в режиме реального времени и прогнозировать необходимость технического обслуживания⁴.

Цифровые двойники также могут использоваться для оптимизации планирования и проектирования шахт. Создавая цифровой двойник шахтного участка, операторы могут моделировать различные сценарии и оценивать влияние различных факторов на горные работы. Это поможет выявить неэффективность и возможности для улучшения, а также оптимизировать использование оборудования и минимизировать отходы. Например, компания *Martek*, занимающаяся разработкой программного обеспечения для горнодобывающей промышленности, предлагает решение с помощью цифрового двойника, которое позволяет планировать и проектировать шахты в 3D⁵.

Цифровые двойники могут также использоваться для мониторинга окружающей среды в угледобывающей промышленности. Создав цифрового двойника шахтного участка, операторы могут контролировать качество воздуха и воды, отслеживать воздействие горных работ на окружающую среду и планировать мероприятия по восстановлению. Это поможет обеспечить соблюдение экологических норм и повысить устойчивость предприятия. Например, консалтинговая компания *GHD* разработала цифровой двойник угольной шахты в Австралии, который позволяет отслеживать экологические факторы в режиме реального времени⁶.

Цифровые двойники также могут использоваться для управления безопасностью в угледобывающей промышленности. Создавая цифрового двойника шахтного участка, операторы могут моделировать потенциальные риски безопасности и оценивать эффективность протоколов безопасности. Это поможет выявить области для улучшения и повысить безопасность работников. Например, инженерно-технологическая компания *Sandvik* разработала цифровой двойник подземной шахты, который позволяет операторам оценивать риски безопасности и планировать протоколы безопасности⁷.

Цифровые двойники также могут использоваться для обучения и моделирования в угледобывающей промышленности. Создавая цифрового двойника шахтного участка, операторы могут моделировать различные сценарии и обучать рабочих протоколам безопасности и рабочим процедурам. Это может повысить безопасность и эффективность, а также минимизировать время простоя и снизить затраты. Например, компания *Immersive Technologies*, занимающаяся разработкой технологий для горнодобывающей промышленности, предлагает решение цифрового двойника, которое позволяет проводить обучение и моделирование различных сценариев горных работ⁸.

Цифровые двойники предлагают целый ряд потенциальных применений в угледобывающей промышленности, включая мониторинг и обслуживание оборудования, плани-

рование и проектирование шахт, мониторинг окружающей среды, управление безопасностью, а также обучение и моделирование. Используя эти возможности, угледобывающие компании могут оптимизировать работу, снизить затраты, повысить безопасность и обеспечить устойчивое развитие.

В последние годы несколько угледобывающих компаний внедрили цифровых двойников в свою деятельность.

BHP Billiton, одна из крупнейших горнодобывающих компаний в мире, внедрила цифрового двойника на своем руднике Olympic Dam в Южной Австралии. Цифровой двойник включает в себя данные о работе шахты в режиме реального времени, включая оборудование и процессы, и используется для оптимизации производства, сокращения времени простоя и повышения безопасности. Цифровой двойник также позволяет *BHP Billiton* моделировать различные сценарии и проверять влияние изменений до их внедрения на реальной шахте. Это привело к значительному повышению производительности и безопасности, а также к снижению затрат⁹.

Компания *Rio Tinto* внедрила цифровых двойников на нескольких своих угледобывающих предприятиях. Одним из примеров является шахта Nail Creek в Квинсленде, Австралия, где цифровой двойник был использован для повышения эффективности работы обогатительной фабрики шахты. Цифровой двойник позволил *Rio Tinto* оптимизировать работу фабрики, сократить время простоя и повысить качество добываемого угля. Цифровой двойник также позволил *Rio Tinto* смоделировать различные сценарии и проверить влияние изменений до их внедрения на реальной фабрике¹⁰.

Peabody Energy, одна из крупнейших мировых угледобывающих компаний, внедрила цифровой двойник своей шахты North Antelope Rochelle в штате Вайоминг, США. Цифровой двойник включает данные в реальном времени об оборудовании, процессах и окружающей среде шахты и используется для оптимизации производства, сокращения времени простоя и повышения безопасности. Цифровой двойник также позволяет *Peabody Energy* моделировать различные сценарии и проверять влияние изменений до их внедрения на реальной шахте. Эта инновация привела к значительному повышению производительности и безопасности, а также к снижению затрат¹¹.

Glencore, многонациональная горнодобывающая компания, внедрила цифровых двойников на нескольких своих угледобывающих предприятиях. Одним из примеров является шахта Bulga в Новом Южном Уэльсе, Австралия, где цифровой двойник был использован для оптимизации производства на шахте и сокращения времени простоя. Цифровой двойник позволил компании *Glencore* смоделировать различные сценарии и проверить влияние изменений до их внедрения на реальной шахте, что привело к значительному повышению производительности и безопасности, а также к снижению затрат¹².

⁴ Mining technology. Цифровая трансформация Anglo American. 21.11.2019. <https://www.mining-technology.com/features/anglo-americans-digital-transformation/>.

⁵ Там же.

⁶ <https://www.ghd.com/en/expertise/digital/digital-intelligence>.

⁷ Mining technology... <https://www.mining-technology.com/features/anglo-americans-digital-transformation/>.

⁸ Там же.

⁹ Годовой отчет BHP Billiton за 2021 год. <https://www.bhp.com/media-and-insightsreports-and-presentations/annual-reports>.

¹⁰ Rio Tinto. Инновации в горнодобывающей промышленности. <https://www.riotinto.com/invest/capital-programs-and-projects/rio-tinto-innovation-in-mining>.

¹¹ Peabody Energy. Цифровой двойник. <https://www.peabodyenergy.com/sustainability/safety/d>.

¹² <https://www.glencore.com/publications>.

Anglo American, глобальная горнодобывающая компания, внедрила цифровых двойников на нескольких своих горнодобывающих предприятиях, включая угольные шахты. Одним из примеров является шахта Moranbah North в Квинсленде, Австралия, где цифровой двойник был использован для оптимизации вентиляционной системы шахты. Цифровой двойник позволил компании *Anglo American* смоделировать различные сценарии и проверить влияние изменений до их внедрения на реальной шахте, что значительно повысило безопасность и производительность¹³.

Приведенные выше примеры иллюстрируют преимущества внедрения цифровых двойников на угледобывающих предприятиях, которые включают в себя рост производительности, сокращение времени простоя, повышение безопасности и экономию затрат. Цифровые двойники также позволяют горнодобывающим компаниям моделировать различные сценарии и проверять влияние изменений до их внедрения на реальной шахте, что снижает риск дорогостоящих ошибок.

Цифровые двойники используются в различных бизнес-процессах угледобывающих компаний для повышения эффективности работы, снижения затрат и повышения безопасности. Некоторые из ключевых бизнес-процессов, в которых внедряются цифровые двойники, включают:

- геологоразведку – цифровые двойники могут использоваться для создания виртуальных моделей геологии района добычи, что помогает определить потенциальные месторождения полезных ископаемых и оптимизировать процессы разведки;
- проектирование и планирование разрезов и шахт – цифровые двойники могут быть использованы для создания виртуальных моделей участка добычи с целью оптимизации проектирования и планирования добычи. Сюда входит проектирование инфраструктуры, такой как дороги, линии электропередачи и водопроводы, а также планировка самой шахты;
- оптимизацию работы оборудования – цифровые двойники могут использоваться для создания виртуальных моделей горного оборудования, что позволяет операторам оптимизировать работу оборудования и минимизировать время простоя. Например, цифровые двойники могут использоваться для прогнозирования отказов оборудования до их возникновения, что позволяет заранее планировать техническое обслуживание;
- оптимизацию производства – цифровые двойники могут использоваться для создания виртуальных моделей производственного процесса, позволяя операторам оптимизировать поток и минимизировать отходы. Это включает в себя оптимизацию взрывных работ, погрузки, транспортировки и переработки;
- безопасность – цифровые двойники могут быть использованы для создания виртуальных моделей шахтной площадки, что позволяет операторам выявлять потенциальные угрозы безопасности и принимать меры по их снижению. Например, с помощью цифровых двойников можно моделировать аварийные сценарии, позволяя

операторам проверять планы реагирования на чрезвычайные ситуации в безопасной и контролируемой среде. Наибольший эффект на операционную эффективность угледобывающего предприятия оказывает оптимизация:

- предиктивного технического обслуживания спецтехники;
- транспортировки угля и горной массы;
- управления складами;
- проектирования участка добычи, что влечет к снижению коэффициента вскрыши;
- обогащения угля.

Цифровые двойники могут помочь предприятиям по добыче и переработке угля оптимизировать свои процессы, снизить затраты, повысить производительность и безопасность. Несмотря на то что использование цифровых двойников – сложный и трудоемкий процесс, их внедрение в производственные бизнес-процессы предпочтительно и эффективно, поскольку ожидаемый эффект от применения цифрового двойника более предсказуем.

4. Методология исследования

Ожидается, что внедрение цифрового двойника горнодобывающей компании даст целый ряд положительных эффектов, которые могут значительно повысить эффективность работы и общую производительность. Эти ожидаемые эффекты включают: увеличение объемов добычи, рост производительности техники и снижение издержек при производстве товарной продукции.

Для того чтобы оценить потенциальное влияние цифровых двойников на горнодобывающие предприятия, был проведен опрос с использованием методологии, выявляющей ключевые бизнес-процессы с точки зрения менеджмента активов и особенности разрезов.

Исследование состояло из нескольких этапов. Первый этап заключался в отборе горнодобывающих активов, которые уже используют цифровых двойников или рассматривают возможность их внедрения в будущем.

В выборку попали следующие компании: «Антрацит-ИнвестПроект», СУЭК, «ВоркутаУголь», «МелТЭК», «АмурУголь», «Новая Горная УК» («СибУглеМет»), «Берингпромуголь» и «КараканИнвест». Каждая из этих компаний осуществляет добычу открытым способом, что позволяет сделать допущение о сопоставимости полученных результатов опросов.

Следующим шагом было определение ключевых бизнес-процессов на этих активах, которые, по ожиданиям менеджмента, целесообразно совместить с цифровыми двойниками. Эти процессы включали вскрышные работы, бурение и взрывные работы, добычу, управление запасами, обогащение и переработку угля, а также транспортировку горной массы и угля.

Опрос также был направлен на определение конкретных способов, с помощью которых цифровые двойники должны оптимизировать эти бизнес-процессы. К ним относятся: геологоразведка, проектирование и планирование разреза,

¹³ Anglo American расширит использование цифровых двойников для оптимизации операций. <https://www.mining-technology.com/news/anglo-american-digital-twins-optimize-operations/>.

оптимизация работы оборудования, оптимизация производства и промышленная безопасность.

Для оценки ожидаемого влияния цифровых двойников на горнодобывающие предприятия опрос был сосредоточен на имеющихся/ожидаемых эффектах от внедрения и на выявлении ключевых производственных процессов (табл. 3).

В качестве объекта проведения опроса были выбраны сотрудники угледобывающих предприятий, таких как СУЭК, «АнтрацитИнвестПроект», «МелТэк», «СибУглеМет» и пр. (рис. 2). Каждый из респондентов занимает руководящую должность уровня заместителя генерального директора и выше и:

- имеет научный интерес в области цифровых технологий в сфере угледобычи;

- имеет представление или знает примеры использования применения цифровых двойников на горнодобывающих предприятиях;
- потенциально заинтересован в проведении тестирования цифровых двойников;
- имеет четкое представление о производственных процессах, осуществляемых на горнодобывающих предприятиях.

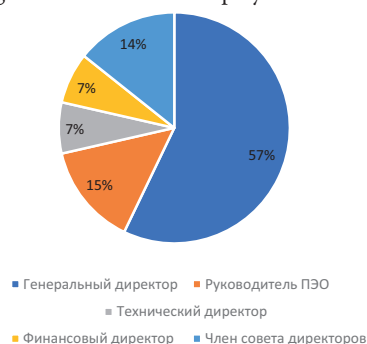
На основании проведенного исследования о влиянии цифровых двойников на угледобывающие компании можно сделать следующие выводы:

1. Ключевыми ограничивающими факторами, с точки зрения топ-менеджмента угледобывающих компаний, являются: трудности с приобретением горнодобывающего

Таблица 3
Форма опроса на горнодобывающем предприятии
Table 3
The survey form in the mining company

Вопрос	Ответ	Вопрос	Ответ
Ваше ФИО			Содержание ж-д инфраструктуры
Как называется ваша компания?			Перевозка продукции на склад ж-д станции
Ваша должность	Генеральный директор		Склад угля и отгрузка на ж-д станции
	Финансовый директор		Подача и уборка вагонов
	Руководитель ПЭО		Международная сертификация (SGS, INCOLAB)
	Технический директор		Управляющая компания, налог на имущество
	Член совета директоров		
Объемы добычи угля (тыс. т/год)	Другое		Разведка
	До 1000	Какой бизнес-процесс, на ваш взгляд, является ключевым для вашего актива?	Разработка
	1000–2000		Добыча
	2000–3500		Транспортировка
	3500–6500		Обогащение
	Свыше 6500		Складирование
Имеется ли у вас обогатительная фабрика?	Да/Нет		Маркетинг
Какие ограничивающие факторы влияют на вашу деятельность в наибольшей степени? (Можно выбрать несколько вариантов ответа)	Геология	Для каких процессов вы находите целесообразным применение цифровых двойников в первую очередь?	Геологоразведка
	Качество угля		Проектирование и планирование
	Территориальное расположение (сезонность)		Оптимизация работы оборудования
	Истощение запасов		Оптимизация производства
	Трудности с приобретением необходимого горнодобывающего оборудования		Промышленная безопасность
Себестоимость угля FCA (долл./т)	Рынки сбыта	Какие эффекты от внедрения вы ожидаете?	Снижение себестоимости за счет оптимизации переменных расходов
Применяете ли вы на своих месторождениях технологию цифровых двойников?	Да/Нет		Увеличение объемов добычи за счет роста производительности техники
Если нет, рассматриваете / рассматривали ли вы для себя такую возможность?	Да/Нет		Улучшение промышленной безопасности
Какие бизнес-процессы на вашем активе оказывают наибольшее влияние на себестоимость?	Вскрыша		Улучшение качества планирования и проектирования
	Буровзрывные работы	На сколько процентов, по вашим ожиданиям, увеличатся объемы добычи?	
	Добыча НДПИ	На сколько процентов, по вашим ожиданиям, уменьшится себестоимость товарной продукции?	
	Склад угля, дробление и отгрузка на разрезе. Обогащение	На сколько процентов, по вашим ожиданиям, вырастет годовая EBITDA проекта?	
	Содержание дорог	Комментарий	
	Содержание обособленных подразделений (складское хозяйство, бытовая инфраструктура)		
	Общепроизводственные		

Источник: составлено автором.

Рис. 2. Должности опрошенных сотрудников
Fig. 2. Positions of the employees interviewed

Источник: составлено автором.

оборудования, качество угля, геология и сезонность добычи (рис. 3).

Однако трудности с приобретением горнодобывающего оборудования являются конъюнктурной проблемой, обусловленной внешними макроэкономическими и геополитическими факторами по состоянию на 2022–2023 годы. В то же время качество угля, геология и территориальное расположение добычи относятся к постоянным факторам, влияющим на деятельность бизнеса.

2. Только два предприятия из опрошенных применяют цифровые двойники на своих разрезах: «ИнвестПроект» и СУЭК. При этом руководитель ПЭО «СУЭК» оставил комментарий: «Цифровой двойник применяется далеко не на всех месторождениях СУЭК ввиду того, что все месторождения достаточно старые и имеют инфраструктуру, построенную при СССР, на многих активах компании запасы близки к истощению. Цифровые двойники применялись только на тех участках, у которых имеется потенциал в долгосрочном развитии и имеется процесс обогащения».

Таким образом, можно сделать вывод о том, что, несмотря на ожидаемые улучшения от внедрения данной технологии, ее применяют исключительно в тех случаях, когда ожидают долгосрочный эффект от внедрения.

В подтверждение этой гипотезы выступает практика ООО «АнтрацитИнвестПроект». Главный технолог организации отмечает: «Цифровой двойник был внедрен относительно недавно, а компания активно наращивает объемы добычи и обучает производственный персонал. Далеко не на все процессы можно повлиять цифровым двойником. Однако, безусловно, в перспективе он позволит значительно снизить себестоимость добываемого угля, что будет особенно заметно при наращивании объемов добычи до 6,5 млн тонн в год. Было принято корректное решение начинать его внедрять на

этапе развития бизнеса, поскольку он помогает выявить узкие места в осуществляемых процессах и акцентирует на них внимание менеджмента, однако технологии потребуется еще два-три года, чтобы раскрыть свой потенциал».

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности внедрения цифрового двойника на этапе развития бизнеса, но в то же время этому инструменту требуется время для раскрытия своего потенциала и оказания существенного эффекта на бизнес-процессы компании.

3. Среди компаний, не использующих технологии цифровых двойников, мнения относительно целесообразности их внедрения разделились.

Менеджмент «АмурУгля», «КараканИнвеста» и «ВоркутаУгля» не считает, что внедрение цифровых двойников в их компаниях принесет существенный эффект.

«АмурУголь» и «КараканИнвест» не рассматривают возможность внедрения цифрового двойника ввиду того, что ведется добыча бурого угля, реализуемого на территории Российской Федерации, и разрезы имеют хорошую геологию, позволяющую добывать уголь с низким коэффициентом вскрыши, что обеспечивает низкую себестоимость.

«ВоркутаУголь» имеет добычу открытым способом менее 400 тыс. тонн угля в год, а основную добычу осуществляет в шахте «Комсомольская», которая является крупнейшей и самой глубокой со времен СССР. На ней цифровой двойник не применяется по тем же причинам, по которым СУЭК не внедрил цифровой двойник на всех своих участках.

В то же время «Новая Горная УК» («СибУглеМет»), «МелТЭК» и «Берингпромуголь» планируют внедрение цифрового двойника своих разрезов.

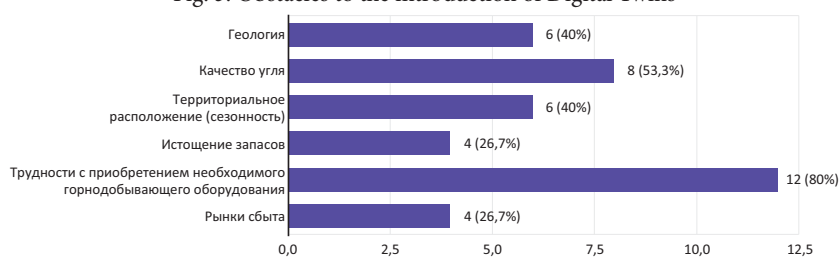
«Новая Горная УК» ожидает развитие нового угольного участка «Мрасский» с коксующимися углями, и рассматривается интеграция цифрового двойника для улучшения операционной эффективности. С точки зрения менеджмента имеются две ключевые проблемы, которые поможет решить внедрение цифрового двойника:

- новый участок совмещен с основным полем, которое будет истощено к концу 2023 года, что увеличивает расстояние транспортирования вскрыши и добычи;
- высокая степень самовоспламенения угля требует более качественной организации работы складов.

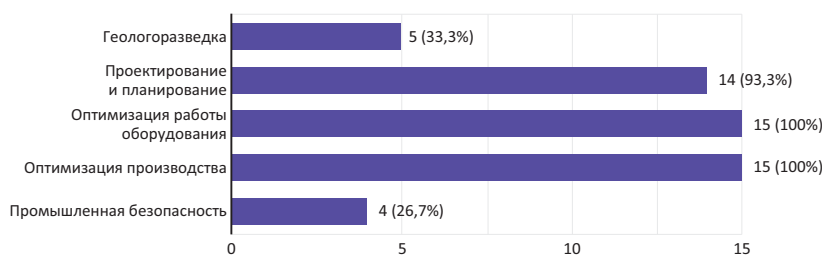
Внедрение технологии на работающих участках нецелесообразно ввиду истощения запасов основного поля в 2023 году и шахт – в 2025-м.

«МелТЭК» и «Берингпромуголь» рассматривают возможность внедрения цифрового двойника на работающих угледобывающих участках.

«МелТЭК» столкнулся с геологическими ограничениями, которые влекут за собой существенные капитальные расходы для подготовки разреза к добыче больших объемов. Мнение генерального директора компании: «Цифровой двойник мог бы увеличить производительность техники для осуществления вскрыши горной массы, в текущий момент коэффициент вскрыши около 12, что почти схоже с коэффициентом вскрыши при добыче с шахт». «МелТЭК» планирует развить свой актив до добычи 10

Рис. 3. Препятствия внедрения цифровых двойников
Fig. 3. Obstacles to the introduction of Digital Twins

Источник: составлено автором.

Рис. 4. Приоритетные сферы применения цифровых двойников
Fig. 4. Priority areas for the application of Digital Twins

Источник: составлено автором.

млн тонн угля в год и рассматривает цифровой двойник как вспомогательный инструмент для развития своего нового внутреннего инвестиционного проекта по аналогии с «Новой Горной УК».

«Берингпромуголь» тоже является инвестиционным проектом, который по результатам 2022 года вышел на объем добычи 1,2 млн тонн коксующегося и энергетического угля в год. К 2030 году актив планирует нарастить свой объем добычи до 6 млн тонн в год, однако у него совершенно другие потребности, в связи с которыми планируется интеграция цифрового двойника. Добыча ведется весь год, однако реализация осуществляется через сезонный порт, имеющий возможность осуществлять отгрузки угля исключительно в период летней навигации. Оптимизация автотранспортной логистики товарной продукции от разреза до порта позволит нарастить объемы реализации. Также потребуются интеграция цифрового двойника в порт в целях оптимизации отгрузок.

Таким образом, каждая компания учитывает свои особенности при выявлении необходимости интеграции цифрового двойника и, соответственно, ожидает различные эффекты от его внедрения. В то же время прослеживается логика, при которой менеджмент считает внедрение этой технологии на перспективных инвестиционных проектах с относительно высокой себестоимостью угля в текущий момент нецелесообразным ввиду недостаточной отложенности ключевых бизнес-процессов.

4. Ключевыми бизнес-процессами, в рамках которых целесообразно использование цифровых двойников, являются оптимизация работы оборудования и оптимизация производства (рис. 4).

При этом, по ожиданиям опрошенных, ключевые эффекты от внедрения цифрового двойника проявят себя в виде снижения себестоимости товарной продукции за счет оптимизации переменных расходов и увеличения объемов добычи без дополнительных капитальных вложений в спецтехнику, что в совокупности положительно отразится на операционной эффективности предприятия.

Проектирование и планирование добычи тоже является перспективным направлением для внедрения цифрового двойника, однако этот процесс оказывает меньший эффект на операционную эффективность горнодобывающего предприятия.

5. В ходе опроса менеджмент угледобывающих предприятий выделил в качестве ключевых и оказывающих наибольшее влияние на операционную эффективность угледобывающего предприятия такие процессы, как вскрыша, добыча, обогащение и перевозка угля и горной массы (рис. 5).

Цифровой двойник способен оказать влияние и повысить эффективность этих производственных процессов. В качестве доказательства этой гипотезы можно привести пример, предоставленный руководителем АО «АнтрацитИнвестПроект»: «Наибольший эффект цифровой двойник оказал за счет оптимизации транспортировки угля со склада разреза до склада ж-д (75 км), увеличив количество суточных автотранспортных рейсов с четырех до пяти за счет оптимизации маршрута и увеличив таким образом объемы отгрузки угля. Также цифровой двойник был интегрирован в процесс обогащения угля, практически исключив уголь средней фракции».

6. Все опрошенные компании ожидают значительное улучшение финансового результата за счет внедрения цифрового двойника в свою деятельность. Средняя экспертная оценка роста годовой EBITDA составила 14% за счет комплексного внедрения цифрового двойника предприятия и отлаживания бизнес-процессов. Диапазон роста годовой EBITDA за счет внедрения цифрового двойника среди опрошенных составил от 6,5 до 30%, в связи с тем что каждый из экспертов оценивал этот эффект, опираясь на свою компанию с уникальными внешними параметрами и степенью отлаженности бизнес-процессов и производственных процессов в текущий момент.

Эффекты на операционную эффективность от использования цифрового двойника можно классифицировать как эффекты, влияющие на объемы добычи, и эффекты, снижающие постоянные расходы в соответствии с осуществляемыми производственными процессами. Ключевыми и общими производственными процессами были определены:

Рис. 5. Наиболее значимые бизнес-процессы для формирования себестоимости
Fig. 5. The most significant business processes for cost formation

Источник: составлено автором.

вскрыша, добыча, обогащение и транспортировка вскрыши и угля. Внедрение цифровых двойников в данные процессы подразумевает оптимизацию работы оборудования и оптимизацию производства.

Таким образом, к ключевым эффектам на производственные процессы, оказывающим влияние на операционную эффективность горнодобывающих предприятий, можно отнести: повышение производительности горнодобывающей техники, повышение выхода угля после процесса обогащения и повышение производительности техники, транспортирующей товарную продукцию.

5. Методика оценки влияния цифрового двойника на операционную эффективность горнодобывающего предприятия

На основании проведенного исследования можно сделать необходимые ключевые допущения для оценки комплексного эффекта от использования цифрового двойника на угледобывающих предприятиях. Проведенное исследование позволяет сделать допущения о потенциальном влиянии цифрового двойника на угледобывающее предприятие и определить удельные коэффициенты потенциального влияния на производственные процессы угледобывающих предприятий, которые можно будет использовать в целях моделирования ожидаемого эффекта на операционную эффективность.

Для выявления этих удельных коэффициентов необходимо прибегнуть к методу взвешивания экспертных оценок: раздать веса по ожидаемым эффектам со стороны опрошенных (табл. 4). Веса будут раздаваться с учетом масштабов бизнеса и должности эксперта, чтобы выявить в дальнейшем средневзвешенное значение по эффекту, поскольку в выборке среди опрошенных присутствуют как крупные холдинги, например СУЭК, так и активы, работающие на одном угольном разрезе, например ООО «АнтрацитИнвестПроект».

Таблица 4
Веса при расстановке баллов
Table 4
Weights for the placement of points

Параметр	Баллы	Параметр	Баллы
До 1000	1	Генеральный директор	4
1000–2000	2	Финансовый директор	2
2000–3500	3	Руководитель ПЭО	1
3500–6500	4	Технический директор	3
Свыше 6500	5	Член совета директоров	4

При раздаче весов также необходимо учитывать и фактически полученные результаты от СУЭК, «АнтрацитИнвестПроект», «ВостокУголь» и «Мечел-майнинг», поскольку эти сведения сообщают о уже наступивших эффектах в рамках первого – третьего года применения технологии цифровых двойников (табл. 5).

После расстановки баллов необходимо выявить средневзвешенные результаты, которые будут применены в качестве допущения на предприятие, для которого планируется интеграция цифрового двойника:

$$S = \frac{\sum_{m=1}^n (V1n + V2n) \times Qn}{\sum_{m=1}^n (V1 + V2)},$$

где $S1$ – средневзвешенный ожидаемый прирост коэффициента выхода на линию производительности горнодобывающего оборудования составляет – 8,4%, $S2$ – средневзвешенный ожидаемый прирост выхода товарной продукции после обогащения составляет – 5,4%, $S3$ – средневзвешенный ожидаемый прирост коэффициента выхода на линию производительности самосвалов, осуществляющих транспортировку угля со склада на разрезе до склада на железнодорожной станции, составляет – 5,1%.

После получения удельных коэффициентов $S1$, $S2$, $S3$, отображающих ожидаемое влияние использования цифрового двойника на горнодобывающую компанию, необходимо осуществить ряд шагов для оценки влияния использования цифрового двойника на операционную эффективность.

Шаг 1. Составление финансово-экономической модели предприятия

В финансово-экономической модели должен присутствовать подробный расчет производительности специальной техники и работы горнодобывающих комплексов. Такой расчет позволит определить возможные объемы добычи в соответствии с производительностью горнодобывающих комплексов и выявить изменение коэффициента выхода на линию за счет интеграции цифрового двойника.

Аналогичная калькуляция применяется для определения эффективности транспортировки товарной продукции от склада на разрезе до склада на железнодорожной станции для определения производительности выхода на линию самосвалов.

В целях анализа эффекта от внедрения цифрового двойника в работу обогатительной фабрики достаточно выделить отдельной строкой коэффициент выхода обогащенного угля, направляемого на дальнейшую реализацию.

Шаг 2. Применение исчисленных коэффициентов $S1$, $S2$ и $S3$, рассчитанных ранее, на составленные производственные процессы

Результатом этого этапа послужит определение ожидаемого эффекта на производственные процессы от использования цифрового двойника и в дальнейшем поспособствует изменению объемов добычи и реализации.

Шаг 3. Осуществление расчета общих операционных расходов, понесенных в течение года

Результатом этапа станет индикатив в виде изменившегося удельного показателя себестоимости 1 тонны товарной продукции, которую можно будет сравнить со значением себестоимости 1 тонны товарной продукции без использования цифрового двойника и таким образом выявить удельный эффект от внедрения цифрового двойника на 1 тонну товарной продукции.

Шаг 4. Составление P&L и CF для определения изменений в годовой EBITDA и денежном потоке предприятия на конец года

Результат этого этапа – оценка операционной эффективности горнодобывающего предприятия с использованием цифрового двойника.

Шаг 5. Необходимо сопоставить финансовый результат с результатом от ожидаемых эффектов внедрения в производственные процессы цифрового двойника и без них и

Таблица 5
Ранжирование ожидаемых эффектов применения цифровых двойников
Table 5
Ranking of the expected effects of Digital Twin usage

Компания	Должность	Объемы добычи (тыс. т/год)	V1	V2	Q1 (%)	Q2 (%)	Q3 (%)
«АнтрацитИнвестПроект»	Член совета директоров	1000–2000	4	2	10,0	6,0	6,0
«АнтрацитИнвестПроект»	Финансовый директор	1000–2000	2	2	7,5	4,0	4,0
«АнтрацитИнвестПроект»	Генеральный директор	1000–2000	4	2	15,0	7,2	8,0
«АнтрацитИнвестПроект»	Руководитель ПЭО	1000–2000	1	2	10,0	7,0	6,0
«АнтрацитИнвестПроект»	Технический директор	1000–2000	3	2	8,5	6,0	6,0
«АнтрацитИнвестПроект»	Член совета директоров	1000–2000	4	2	10,0	7,5	8,0
СУЭК	Руководитель ПЭО	Свыше 6500	2	5	10,0	6,5	4,0
СУЭК	Генеральный директор	Свыше 6500	4	5	8,5	5,5	8,0
«ВоркутаУголь»	Генеральный директор	До 400 000	4	1	6,5	2,5	4,0
«Новая Горная УК»	Генеральный директор	Свыше 6500	4	5	15,0	8,0	3,0
«КараканИнвест»	Генеральный директор	3500–6500	4	4	10,0	4,5	5,0
«МелТЭК»	Генеральный директор	3500–6500	4	4	12,5	6,5	6,0
«МелТЭК»	Член совета директоров	3500–6500	4	4	4,5	8,5	4,0
«АмурУголь»	Генеральный директор	2000–3500	4	3	7,5	4,5	3,0
«Берингпромуголь»	Генеральный директор	1000–2000	4	2	8,0	12,0	5,0
Практика внедрения							
СУЭК		Свыше 6500	8	5	4,5	3,5	6,0
«АнтрацитИнвестПроект»		1000–2000	8	2	6,0	4,0	4,3
«ВостокУголь»		Свыше 6500	8	5	7,5	—	5,4
«Мечел-Майнинг»		Свыше 6500	8	5	5,5	6,5	3,2

Примечание. V1 – вес по должности / вес за фактические сведения; V2 – вес по объему добычи; Q1 – ожидаемый прирост коэффициента выхода на линию производительности горнодобывающего оборудования; Q2 – ожидаемый прирост выхода товарной продукции после обогащения; Q3 – сокращение расстояния транспортирования.

Источник: составлено автором.

таким образом вычислить эффект на операционную эффективность от внедрения цифрового двойника

Результатом этапа станет искомая оценка влияния использования цифрового двойника на операционную эффективность горнодобывающего предприятия.

Данный метод расчета позволит:

- 1) пересчитывать возможные объемы добычи в соответствии с производительностью специальной техники;
- 2) выявлять дефицит мощностей техники на активе как на этапе добычи, так и на этапе транспортировки угля со склада угля на разрезе до склада угля на железнодорожной станции;
- 3) иметь возможность регулирования выходов угля после обогащения.

Таким образом, можно оценить ожидаемый эффект от внедрения цифровых двойников на горнодобывающих предприятиях для бизнес-процессов, связанных с производством товарной продукции (оптимизация работы оборудования, оптимизация производства), путем введения удельных коэффициентов: средневзвешенный ожидаемый прирост коэффициента выхода на линию производительности горнодобывающего оборудования; средневзвешенный ожидаемый прирост выхода товарной продукции после обогащения; средневзвешенный ожидаемый прирост коэффициента выхода на линию производительности автосамосвалов, осуществляющих транспортировку угля со склада на разрезе до склада на железнодорожной станции.

6. Расчет комплексного эффекта внедрения цифрового двойника на ООО «АнтрацитИнвестПроект»

Для проверки релевантности разработанного метода оценки влияния использования технологии цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий предлагается рассмотреть период со второго квартала 2022 года по первый квартал 2023 года (далее – исследуемый период), поскольку именно в этот период внедрение цифрового двойника начало оказывать влияние на операционную эффективность этого угледобывающего предприятия.

Для начала необходимо рассчитать очищенную производительность спецтехники от цифрового двойника. Предлагается взять производительность первого квартала 2022 года в качестве индикатива, поскольку в этот период еще не наступил эффект от внедрения цифрового двойника.

Производительность горнодобывающих комплексов по состоянию на первый квартал 2022 года представлена в табл. 6.

Таким образом, имеющиеся горнодобывающие комплексы за 12 месяцев могут обеспечить объем вскрыши горной массы угля – 8064 тыс. м³ и объем добычи 1613 тыс. тонн угля, что соответствует коэффициенту вскрыши на данный объем горной массы (коэффициент вскрыши равен 5) и подтверждается отчетом IMC и заключением консультантов McKinsey&Company.

Выход после обогащения угля по состоянию на первый квартал 2022 года составил 68%, соответственно, объем реализации товарной продукции за 12 месяцев не мог превысить 1097 тыс. тонн угля.

Имеющиеся самосвалы SHACMAN 38 тонн осуществляли четыре рейса в сутки с транспортировкой угля со склада на разрезе до склада на железнодорожной станции, соответственно, годовая возможность транспортирования угля на продажу составила 1094 тыс. тонн угля.

Исходя из этих вводных можно сформировать оценку операционной эффективности ООО «АнтрацитИнвестПроект» без использования цифрового двойника (табл. 7).

Таким образом, EBITDA исследуемого периода без цифрового двойника составила 1662141 тыс. руб. Остаток денежных средств на конец исследуемого периода без цифрового двойника составила 457490 тыс. руб.

Далее на модель необходимо применить рассчитанные ранее коэффициенты $S1$, $S2$, $S3$ (табл. 8).

Таким образом, имеющиеся горнодобывающие комплексы за 12 месяцев могут обеспечить объем вскрыши горной массы угля 8741 тыс. м³ и объем добычи – 1740 тыс. тонн угля, что соответствует коэффициенту вскрыши на данный объем горной массы (коэффициент вскрыши равен 5).

Выход после обогащения угля составит 73,2% с учетом ожидаемого прироста эффективности от внедрения цифрового двойника, соответственно, объем реализации товарной продукции за период 12 месяцев не мог превысить 1274 тыс. тонн угля.

Имеющиеся самосвалы SHACMAN 38 тонн осуществляют пять рейсов в сутки с транспортировкой угля со склада на разрезе до склада на железнодорожной станции с учетом ожидаемого прироста эффективности от внедрения цифрового двойника, соответственно, годовая возможность транспортирования угля на продажу составит 1368 тыс. тонн угля.

Исходя из этих вводных можно сформировать оценку операционной эффективности использования цифрового двойника «АнтрацитИнвестПроект» (табл. 9).

Таким образом, ожидаемая EBITDA исследуемого периода после внедрения цифрового двойника составила 2133971 тыс. руб. Ожидаемый остаток денежных средств на конец исследуемого периода с ожидаемым эффектом от внедрения цифрового двойника составит 1050854 тыс. руб.

Далее необходимо сопоставить полученные результаты до и после внедрения цифрового двойника (табл. 10).

Ожидаемый прирост EBITDA от внедрения цифрового двойника составлял 28%, фактический за исследуемый период составил 21%. Ожидаемый прирост свободных денежных средств на конец периода составлял 593 млн руб. (+130%), фактический прирост за исследуемый период составил 441 млн руб. (+96%).

Эти отклонения вызваны временной издержкой возникающей оптимизации производственных и бизнес-процессов при вводе на актив цифрового двойника добывающего предприятия (табл. 11).

Ожидаемый результат от внедрения цифровых двойников отличается от реального в пределах 3%, что позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов. В наилучшей степени метод оценки влияния использования

технологии цифрового двойника на операционную эффективность горнодобывающих предприятий проявил себя в рамках выявления количества рейсов транспортировки угля самосвалами.

Таким образом, можно сделать вывод о достоверности разработанного метода оценки влияния использования цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий и его практической применимости.

Этот метод был принят и применяется в ООО «АнтрацитИнвестПроект» и «Холдинговая компания “Эволюция”». Интеграция цифрового двойника положительно влияет на операционную активность угледобывающих активов, в частности ООО «АнтрацитИнвестПроект».

Можно выявить ряд недостатков рассматриваемого метода оценки влияния применения технологии цифрового двойника на операционную эффективность горнодобывающих предприятий: метод не учитывает

- 1) период внедрения и наращивания эффекта от цифрового двойника;
- 2) изменения внешних факторов, влияющих на производительность техники, например таких, как сезонность.

Эти недостатки обуславливают продолжение исследования влияния цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий.

7. Обсуждение и дальнейшие исследования

Разработанный метод оценки влияния использования технологии цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий позволяет оценить эффект от внедрения цифрового двойника и помочь сформировать менеджменту позицию относительно целесообразности внедрения. Однако для уточнения получаемых результатов необходимо уточнить ряд параметров, таких как факторы изменения внешних параметров, особенности добываемых марок углей при обогащении, ожидаемые эффекты, влияющие на снижение коэффициента вскрыши, и пр.

Дальнейшее исследование влияния цифровых двойников на горнодобывающие предприятия будет способствовать распространению этой технологии и, соответственно, развитию отрасли. Поскольку добыча полезных ископаемых, в частности угля, является одним из ключевых направлений в мировой экономике, распространение технологии цифровых двойников способно косвенно повлиять на глобальный экономический рост.

Целесообразно продолжать исследования и уточнять полученный метод оценки влияния использования технологии цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий. Существует несколько перспективных областей исследований, которые можно изучить для оценки эффективности воздействия цифровых двойников на горнодобывающие компании. К ним относятся:

- 1) учет факторов не только изменения производительности техники, но и изменений внешних параметров, влияющих на ее производительность, таких как расстояние перевозки, вес горной массы и пр. Как было отмечено, помимо предиктивного технического обслуживания в целях сокращения простоев цифровой двойник может оптимизировать

Таблица 6
Производительность горнодобывающих комплексов по состоянию на первый квартал 2022 года
Table 6
Productivity of potential mining complexes from the first quarter of 2022

Переменные	Экскаватор 7 м ³ , мощность 90 т	Экскаватор 7 м ³ , мощность 130 т	Экскаватор 12 м ³ , мощность 90 т	Экскаватор 12 м ³ , мощность 130 т
Объем ковш (м ³)	7	7	12	12
Коэффициент разрыхления (ед.)	1,45	1,45	1,45	1,45
Вместимость ковша в целике (м ³)	4,8	4,8	8	8
Время цикла экскаватора (сек.)	27	27	29	29
Чистое время работы экскаватора (час)	10,5	10,5	10,5	10,5
Регламентированные простои внутри смены (мин.)	90	90	90	90
– пересменок (мин.)	30	30	30	30
– обед (мин.)	30	30	30	30
– заправка и личные надобности (мин.)	30	30	30	30
Время цикла загрузки самосвала (мин.)	4,4	5,7	3,1	4,4
– время установки самосвала под погрузку (мин.)	0,7	0,7	0,7	0,8
– количество ковшей для загрузки самосвала (ед.)	7	10	4	6
– время загрузки самосвала по паспорту (мин.)	3,2	4,5	1,9	2,9
– время выезда самосвала из-под погрузки (мин.)	0,5	0,5	0,5	0,7
Среднее время на маневры в час (перемещение по забою, подготовка площадки под погрузку) (мин.)	6	6	7	7
Чистое время работы в час (мин.)	54	54	53	53
Часовая производительность экскаватора (м ³ /час)	447	493	609	626
Сменная производительность экскаватора (м ³ /смена)	4692	5173	6394	6577
Расчетная суточная производительность экскаватора (м ³ /сут.)	9385	10345	12788	13154
Количество дней в месяце	30	30	30	30
– продолжительность ремонта (ТО, ППР) (дней)	1	1	1	1
– количество рабочих дней в месяце	29	29	29	29
Расчетная месячная производительность экскаватора (тыс. м ³)	272,2	300,0	370,8	381,5
Коэффициент выхода (использования на линии)	0,80	0,80	0,80	0,80
Месячная производительность экскаватора с учетом КТГ 0,85 (тыс. м ³)	218	240	297	305
Грузоподъемность самосвала (т)	90	130	90	130
Плотность породы (т/м ³)	2,5	2,5	2,5	2,5
Вместимость кузова (м ³)	36,0	52,0	36,0	52,0
Время установки самосвала под погрузку (сек.)	42,0	42,0	42,0	48,0
Время погрузки (мин.)	3,2	4,0	1,9	2,9
Время выезда самосвала после погрузки (сек.)	30,0	30,0	30,0	42,0
Расстояние транспортирования (км)	1,5	1,5	1,5	1,5
Среднейсовая скорость движения самосвала (км/ч)	19,5	18,5	18,5	18,5
Время установки самосвала под разгрузку (сек.)	42,0	42,0	42,0	48,0
Время разгрузки самосвала (сек.)	60,0	60,0	70,0	70,0
Время в движении (туда – обратно) (мин.)	9,2	9,7	9,7	9,7
Время оборота одного рейса (мин.)	15,3	17,1	14,7	16,1
Количество рейсов в час (ед.)	3,9	3,5	4,1	3,7
Производительность (м ³ /час)	141,4	182,1	146,6	193,8
Количество рейсов в смену (ед.)	41,0	36,0	42,0	39,0
Сменная производительность самосвала (м ³ /смена)	1476,0	1872,0	1512,0	2028,0
Количество рейсов в сутки (ед.)	82,0	72,0	84,0	78,0
Расчетная суточная производительность самосвала (м ³ /сут.)	2952,0	3744,0	3024,0	4056,0
Коэффициент выхода (использования на линии)	0,8	0,8	0,8	0,8
Количество рейсов в месяц (ед.)	1902,0	1670,0	1949,0	1810,0
Месячная производительность самосвала с учетом КИ (тыс. м ³)	68,5	86,9	70,2	94,1
Потребность самосвалов на максимальную производительность экскаватора (ед.)	3,2	2,8	4,3	3,3

Источник: составлено автором.

Таблица 7
Расчет финансового результата исследуемого периода без применения цифрового двойника, 2023
Table 7
Calculation of the financial result of the study period without the use of a Digital Twin in 2023

Коэффициент вскрыши	5,0	– содержание обслуживающих хозяйств	168254
Объем вскрыши (тыс. м ³)	8040	– налог на имущество	88029
Добыча угля (тыс. т)	1608	– общепроизводственные	621115
Реализация угля (тыс. т)	1093	Прочие коммерческие расходы (тыс. руб.)	143605
Средняя цена FCA (долл./т)	59	– содержание склада и отгрузка на ж-д станции	143605
Доля реализованной продукции (%)	68	Административные, управленческие расходы (тыс. руб.)	334029
Курс доллара (руб./долл.)	75	– справочно: амортизация в составе затрат	420536
Средняя калорийность (кКал)	5440	EBITDA (тыс. руб.)	1662141
Перевозка угля на ж-д (тыс. т)	1093	Остаток денежных средств на начало периода (тыс. руб.)	316324
Отчет о прибыли и убытках		Остаток денежных средств на конец периода (тыс. руб.)	457490
Выручка от реализации (тыс. руб.)	4875517	Финансовая деятельность (тыс. руб.)	5347321
Итого – внутренний рынок (тыс. руб.)	2302188	– поступление кредитных средств КД 0051/21	4012228
Итого – экспорт (тыс. руб.)	2573329	– поступление кредитных средств КД 0758/21	1335093
Себестоимость реализованной продукции (тыс. руб.)	3086793	– поступление займов участников	–
Валовая прибыль (тыс. руб.)	1788725	Операционная деятельность (тыс. руб.)	6712427
Прямые переменные расходы (тыс. руб.)	2028326	– прочая выручка	–
– БВР	257542	– выручка от реализации	4875517
– вскрыша	793768	– поступление средств по депозитам	405434
– добыча	147581	– возмещение НДС – операционные расходы	180686
– обогащение	323208	– возмещение НДС – инвестиции	1228032
– НДПИ	285841	– возмещение НДС – лизинг	22757
– склад угля, дробление и отгрузка на разрезе	53583	Итого поступления (тыс. руб.)	12059748
– перевозка продукции на склад ж-д станции	166803	Финансовая деятельность (тыс. руб.)	1838637
Косвенные переменные расходы (тыс. руб.)	69485	Выплата процентов (тыс. руб.)	1278637
Расходы на организацию отгрузок (тыс. руб.)	42833	– выплата процентов займов участников	183662
– аренда локомотива	14753	Выплата долга (тыс. руб.)	560000
– прочие расходы (подача, уборка вагонов и т.д.)	28080	Операционная деятельность (тыс. руб.)	4067582
Расходы по сопровождению отгрузок (тыс. руб.)	26653	– операционные расходы (без НДС)	3853963
– международная сертификация	26653	– корректировка по ранее оплаченному НДПИ	74844
Маржинальная прибыль (тыс. руб.)	2777706	– НДС – операционные расходы	288463
Косвенные постоянные расходы (тыс. руб.)	1536100	Инвестиционная деятельность (тыс. руб.)	6012363
Общие производственные расходы (тыс. руб.)	1058466	– инвестиционная деятельность	3871556
– содержание ж-д инфраструктуры	25966	– инвестиционная деятельность техника	1335093
– содержание автодорог	155101	– лизинг и пополнение залогового счета	805714
		Итого выбытие (тыс. руб.)	11918582

Источник: составлено автором.

расстояние транспортирования. Такое исследование позволило бы уточнить рассчитанные удельные коэффициенты и увеличило бы точность оценки влияния цифрового двойника на угледобывающее предприятие;

2) расширение выборки экспертов угледобывающих компаний, как российских, так и международных. Такой подход позволил бы выявить более точное ожидаемое влияние цифрового двойника на угледобывающие компании и, возможно, выявил и другие бизнес-процессы, оказывающие существенное влияние на операционную эффективность угледобывающей компании. В частности, исследование позволило бы уточнить метод расчета и ввело бы региональные коэффициенты как внутри Российской Федерации в зависимости от месторождения и марок угля, так и страновые;

3) поскольку в различных пластах залегают различные марки угля, они обладают различными свойствами обогащаемости, такими как зольность и Y-Y. Предлагаемые исследования позволили бы уточнить ожидаемый коэффициент выхода обогащенного угля, используемый при оценке эффек-

тивности от внедрения цифрового двойника на обогательных фабриках;

4) учет факторов влияния более качественного планирования разработки разреза и геологоразведки. Как упоминалось ранее, цифровые двойники применяются, в частности, для планирования добычи и геологоразведки. За счет работы цифрового двойника можно оптимизировать формирование бортов и отработки пластов с углем, что повлечет за собой снижение коэффициента. Данный процесс напрямую не связан с операционной эффективностью угледобывающего предприятия, однако способен оказать косвенное влияние на нее путем оптимизации коэффициента вскрыши: чем ниже коэффициент вскрыши, тем больше угля можно добыть при сохранении текущей производительности спецтехники;

5) учет влияния повышения промышленной безопасности на активе. Снижение риска инцидентов и потерь угля на различных этапах производственного процесса может привести к росту производительности труда. Повышение безопасности тоже косвенно влияет на операционную эффек-

Таблица 8
Производительность горнодобывающих комплексов
Table 8
Productivity of potential mining complexes

Переменные	Экскаватор 7 м³, мощ. 90 т	Экскаватор 7 м³, мощ. 130 т	Экскаватор 12 м³, мощ. 90 т	Экскаватор 12 м³, мощ. 130 т
Объем ковша (м³)	7	7	12	12
Коэффициент разрыхления	1,45	1,45	1,45	1,45
Вместимость ковша в целике (м³)	4,8	4,8	8	8
Время цикла экскаватора (сек.)	27	27	29	29
Чистое время работы экскаватора (час)	10,5	10,5	10,5	10,5
Регламентированные простои внутри смены (мин.)	90	90	90	90
– пересменок (мин.)	30	30	30	30
– обед (мин.)	30	30	30	30
– заправка и личные надобности (мин.)	30	30	30	30
Время цикла загрузки самосвала (мин.)	4,4	5,7	3,1	4,4
– время установки самосвала под погрузку (мин.)	0,7	0,7	0,7	0,8
– количество ковшей для загрузки самосвала (ед.)	7	10	4	6
– время загрузки самосвала по паспорту (мин.)	3,2	4,5	1,9	2,9
– время выезда самосвала из-под погрузки (мин.)	0,5	0,5	0,5	0,7
Среднее время на маневры в час (перемещение по забою, подготовка площадки под погрузку) (мин.)	6	6	7	7
Чистое время работы в час (мин.)	54	54	53	53
– часовая производительность экскаватора (м³/час)	447	493	609	626
– сменная производительность экскаватора (м³/смена)	4692	5173	6394	6577
– расчетная суточная производительность экскаватора (м³/сут.)	9385	10345	12788	13154
Количество дней в месяце	30	30	30	30
– продолжительность ремонта (ТО, ППР) (дней)	1	1	1	1
– количество рабочих дней в месяце	29	29	29	29
Расчетная месячная производительность экскаватора (тыс. м³)	272,2	300,0	370,8	381,5
Коэффициент выхода (использования на линии)	0,88	0,88	0,88	0,88
Месячная производительность экскаватора с учетом КТГ 0,85 (тыс. м³)	241	265	328	337
Грузоподъемность самосвала (т)	90	130	90	130
Плотность породы (т/м³)	2,5	2,5	2,5	2,5
Вместимость кузова (м³)	36,0	52,0	36,0	52,0
Время установки самосвала под погрузку (сек.)	42	42	42	48
Время погрузки (мин.)	3,2	4,5	1,9	2,9
Время выезда самосвала после погрузки (сек.)	30	30	30	42
Расстояние транспортирования (км)	1,5	1,5	1,5	1,5
Среднейсовая скорость движения самосвала (км/ч)	19,5	18,5	18,5	18,5
Время установки самосвала под разгрузку (сек.)	42	42	42	48
Время разгрузки самосвала (сек.)	60	60	70	70
Время в движении (туда – обратно) (мин.)	9,2	9,7	9,7	9,7
Время оборота одного рейса (мин.)	15,3	17,1	14,7	16,1
Количество рейсов в час (ед.)	3,93	3,50	4,07	3,73
Производительность в час (м³/час)	141,4	182,1	146,6	193,8
Количество рейсов в смену (ед.)	41	36	42	39
Сменная производительность самосвала (м³/смена)	1476,0	1872,0	1512,0	2028,0
Количество рейсов в сутки (ед.)	82	72	84	78
Расчетная суточная производительность самосвала (м³/сут.)	2952	3744	3024	4056
Коэффициент выхода (использования на линии)	0,88	0,88	0,88	0,88
Количество рейсов в месяц (ед.)	2102	1846	2153	2000
Месячная производительность самосвала с учетом КИ (тыс. м³/мес.)	75,7	96,0	77,5	104,0
Потребность самосвалов на максимальную производительность экскаватора (ед.)	3,2	2,8	4,3	3,3

Источник: составлено автором.

Таблица 9
Оценка операционной эффективности использования цифрового двойника «АнтрацитИнвестПроект» за 2023 год
Table 9
Evaluation of the operational effectiveness of using the Digital Twin 'AnthracitInvestProject' in 2023

Коэффициент вскрыши	5	– содержание обслуживающих хозяйств	168254
Объем вскрыши (тыс. м³)	8700	– налог на имущество	88029
Добыча угля (тыс. т)	1740	– общепроизводственные	621115
Реализация угля (тыс. т)	1274	Прочие коммерческие расходы (тыс. руб.)	144694
Средняя цена FCA (долл./т)	59	– содержание склада и отгрузка на ж-д станции	144694
Доля реализованной продукции (%)	73	Административные, управленческие расходы (тыс. руб.)	334029
Курс доллара (руб./долл.)	75	– справочно: амортизация в составе затрат	411241
Средняя калорийность (кКал)	5440	EBITDA (тыс. руб.)	2133971
Перевозка угля на ж-д (тыс. т)	1274	Остаток денежных средств на начало периода (тыс. руб.)	316324
Отчет о прибыли и убытках (тыс. руб.)		Остаток денежных средств на конец периода (тыс. руб.)	1050854
– выручка от реализации	5679186	Финансовая деятельность (тыс. руб.)	5347321
– итого – внутренний рынок	2681675	– поступление кредитных средств КД 0051/21	4012228
– итого – экспорт	2997510	– поступление кредитных средств КД 0758/21	1335093
– себестоимость реализованной продукции	3399226	– поступление займов участников	–
– валовая прибыль	2279959	Операционная деятельность (тыс. руб.)	7524220
Прямые переменные расходы (тыс. руб.)	2339691	– прочая выручка	–
– БВР	305424	– выручка от реализации	5679186
– вскрыша	925205	– поступление средств по депозитам	405434
– добыча	160121	– возмещение НДС – операционные расходы	188810
– обогащение	349740	– возмещение НДС – инвестиции	1228032
– НДПИ	330174	– возмещение НДС – лизинг	22757
– склад угля, дробление и отгрузка на разрезе	62137	Итого поступления (тыс. руб.)	12871541
– перевозка продукции на склад ж-д станции	206889	Финансовая деятельность (тыс. руб.)	1838637
Косвенные переменные расходы (тыс. руб.)	78507	Выплата процентов (тыс. руб.)	1278637
Расходы на организацию отгрузок (тыс. руб.)	47461	– выплата процентов займов участников	183662
– аренда локомотива	14753	Выплата долга (тыс. руб.)	560000
– прочие расходы (подача, уборка вагонов и т.д.)	32708	Операционная деятельность (тыс. руб.)	4286009
Расходы по сопровождению отгрузок (тыс. руб.)	31046	– операционные расходы (без НДС)	4059299
– международная сертификация	31046	– корректировка по ранее оплаченному НДПИ	74844
Маржинальная прибыль (тыс. руб.)	3260988	– НДС – операционные расходы	301555
Косвенные постоянные расходы (тыс. руб.)	1538258	Инвестиционная деятельность (тыс. руб.)	6012363
Общие производственные расходы (тыс. руб.)	1059535	– инвестиционная деятельность	3871556
– содержание ж-д инфраструктуры	25966	– инвестиционная деятельность – техника	1335093
– содержание автодорог	156170	– лизинг и пополнение залогового счета	805714
		Итого выбытие (тыс. руб.)	12137010

Источник: составлено автором.

тивность, оказывая существенный эффект за счет снижения риска поломок, потерь и инцидентов, способных вызвать простой в операционной деятельности;

б) анализа внедрения технологии на выброс загрязняющих веществ, таких как парниковые газы, утилизации отходов и пр. Прямого влияния на операционную активность этот процесс не имеет, однако способен снизить риск получения штрафов за загрязнение окружающей среды;

7) обучение и развитие рабочей силы. Можно провести исследование, чтобы определить влияние цифровых двойников на обучение и развитие персонала. Это можно сделать, проанализировав потребности рабочей силы в обучении и эффективность программ обучения. Такое исследование позволит учесть сроки, необходимые на обучение персонала для эффективного применения цифрового двойника, и оценить повышение производительности;

8) сокращение ФОТ за счет оптимизации административных бизнес-процессов, что окажет прямое влияние на операционную эффективность.

Помимо данных направлений исследований, сконцентрированных на формировании дополнительных удельных коэффициентов и уточнении применяемых в текущей методологии, необходимо акцентировать внимание и на разработанный метод оценки влияния использования технологии цифрового двойника на операционную эффективность горнодобывающих предприятий путем моделирования эффектов от внедрения цифровых двойников.

Также дальнейшие направления исследования влияния цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий могут быть сосредоточены на оптимизации складирования. Это позволило бы выявить эффекты, влияющие на оборачиваемость склада и оптимизировать постоянные расходы, связанные с его содержанием, что потенциально повлияло бы на операционную эффективность предприятия в целом.

Для уточнения разработанного метода оценки влияния использования технологии цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий

Таблица 10
Сопоставление полученных результатов за период второй квартал 2022 года – первый квартал 2023 года
Table 10
Comparison of the results obtained for the period from the second quarter of 2022 to the first quarter of 2023

Переменные	Без цифрового двойника	Ожидаемый результат от внедрения цифрового двойника	Фактический результат от внедрения цифрового двойника
Коэффициент вскрыши	5	5	5
Объем вскрыши (тыс. руб.)	8040	8700	8522
Добыча угля (тыс. руб.)	1608	1740	1704
Реализация угля (тыс. руб.)	1093	1274	1227
Средняя цена FCA (тыс. руб.)	59	59	59
Выход угля после обогащения реализованной (%)	68	73	72
Курс доллара (руб./долл.)	75	75	75
Перевозка угля по ж-д (тыс. руб.)	1093	1274	1227
Натуральные показатели на конец периода			
Коэффициент выхода на линию производительности горнодобывающего оборудования	0,8	0,884	0,86
Процент выхода товарной продукции после обогащения (%)	0,68	0,732	72
Коэффициент выхода на линию производительности самосвалов, осуществляющих транспортировку угля со склада на разрезе до склада на железнодорожной станции	0,72	0,774	0,763
Количество рейсов SHACMAN 38 т в сутки	4	5	5
Прямые переменные расходы (тыс. руб.)			
БВР (тыс. руб.)	257542	305424	293083
– вскрыша	793768	925205	894252
– добыча	147581	160121	154225
– обогащение	323208	349740	342600
– НДС	285841	330174	318748
– склад угля, дробление и отгрузка на разрезе	53583	62137	60281
– перевозка продукции на склад ж-д станции	166803	206889	196420
EBITDA (тыс. руб.)	1662141	2133971	2009158
Остаток денежных средств на конец периода (тыс. руб.)	457490	1050854	898022
Себестоимость 1 т товарной продукции (тыс. руб.)	39	37	38

Источник: составлено автором.

Таблица 11
Отклонения по натуральным показателям (%)
Table 11
Deviations in natural indicators (%)

Переменные	Ожидаемый результат от внедрения цифрового двойника	Фактический результат от внедрения цифрового двойника	Отклонение натуральных показателей
Коэффициент выхода на линию производительности горнодобывающего оборудования	88,4	86,0	–3,0
Процент выхода товарной продукции после обогащения	73,2	72,0	–2,0
Коэффициент выхода на линию производительности самосвалов, осуществляющих транспортировку угля со склада на разрезе до склада на ж-д станции	77,4	76,3	–1,0
Количество рейсов SHACMAN 38 т в сутки	5	5	0

Источник: составлено автором.

целесообразно рассматривать более детализированные натуральные показатели, учитывающие индивидуальные реальные особенности техники и заключения технического аудита по ним.

Разработанный метод оценки влияния использования технологии цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий может быть применен для других горнодобывающих предприятий, имеющих схожую технологию добычи, например занятых добычей золота, марганца, ильменитов и т.д. открытым способом.

Перспективное направление исследования в целях применения данного метода оценки влияния использования технологии цифровых двойников на горнодобывающие пред-

приятия – это исследование влияния цифровых двойников на активы с подземными горными работами. Концепция цифровой шахты является относительно популярной среди добывающих предприятий, однако применяемые в предложенной методологии производственные процессы могут не быть ключевыми для добычи полезных ископаемых подземным способом.

Таким образом, предложенный метод оценки влияния использования технологии цифровых двойников на горнодобывающие предприятия потенциально может иметь широкий спектр применения и оставляет обширное пространство для дополнительных исследований и уточнений. Каждое из последующих исследований расширит и уточнит предло-

женный подход, однако концептуально на него не повлияет, а исключительно дополнит.

Одним из ключевых направлений дальнейших исследований и доработки метода оценки влияния использования цифрового двойника на операционную эффективность гор-

нодобывающего предприятия является выявление косвенных факторов и факторов, снижающих риски, для дополнения разработанного метода оценки влияния использования технологии цифровых двойников на операционную эффективность горнодобывающих предприятий.

Литература

- Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. (2018). «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. *Трамплин к успеху*, 13: 26.
- Гривс М. (2002). Виртуальная реальность и трансформация разработки продукции. *Автоматизация сборки*, 22(4): 312–319.
- Исаев Р.А. (2023). *Управление ИТ-архитектурой организации: проектирование, анализ, оптимизация и трансформация*. М., Инфра-М.
- Самосудов М.В. (2018). Концепция программы нового поколения для автоматизации деятельности. В: *Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика. Революция в управлении: новая цифровая экономика или новый мир машин: материалы II Международного научного форума*. Вып. 5. М., Издательский дом ГУУ, 40–50. https://guu.ru/wp-content/uploads/forum_bl_v55.pdf.
- Alam K.M., Saddik A. (2017). El C2PS: A Digital Twin architecture reference model for the cloud-based cyberphysical systems. *IEEE Access*, 5: 2050.
- Arenkov I., Tsenzharik M. (2019). Digital technologies in supply chain management. *Atlantis Highlights in Computer Sciences*, 1: 720–734.
- Bao Q. (2020). Ontology-based modeling of part Digital Twin oriented to assembly. *Journal of Engineering Manufacture*, 13(4): 534–556.
- Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. (2019). A Survey on Digital Twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 7: 289–301.
- Glaessgen E., Stargel D. (2012). The Digital Twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- Grieves M., Vickers J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, 16(4): 85–113.
- Karapetyan D., Mitrovic Minic S., Malladi K.T., Punnen A.P. (2020). Satellite downlink scheduling problem: A case study. *Omega*, 27(2): 115–129.
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51: 334–346.
- Merdan M., Moser T., Sunindyo W., Biffl S., Vrba P. (2022). Workflow scheduling using multi-agent systems in a dynamically changing environment. *Journal of Simulation*, 118–129.
- Negri E., Fumagalli L., Macchi M. (2017). A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11: 939–948.
- Saddik A.E. (2018). A Digital Twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE MultiMedia*, 25(2): 87.
- Stark R., Damerau T. (2019). Digital Twin, CIRP. In: *Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg, Springer, 66: 1.
- Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A., Zhou L. (2019). Digital Twins and cyber-physical systems. Toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661.
- Trauer J., Schweigert-Recksiek S., Engel C., Spreitzer K., Zimmermann M. (2020). What is a Digital Twin? In: *Design Conference, proceedings of the design society*, 1: 757. DOI: 10.1017/dsd.
- Zhuang Ñ., Liu J., Xiong H. (2018). Digital Twin – based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96: 1149.

References

- Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Maruseva V.M. (2018). Smart Digital Twins are the basis of a new paradigm of digital design and modeling of globally competitive products of a new generation. *Springboard to Success*, 13: 26. (In Russ.)
- Grieves M. (2002). Virtual reality and the transformation of product development. *Assembly Automation*, 22(4): 312–319. (In Russ.)
- Isaev R.A. (2023). *Management of the organization's OT architecture: Design, analysis, optimization and transformation*. Moscow, Infra-M. (In Russ.)
- Samosudov M.V. (2018). The concept of a new generation program for automation of activities. In: *Step into the future: Artificial intelligence and the digital economy. Revolution in management: A new digital economy or a new world of machines*. Proceedings of the II International Scientific Forum, 5. Moscow, GUU Publishing House, 40–50. https://guu.ru/wp-content/uploads/forum_bl_v55.pdf. (In Russ.)

- Alam K.M., Saddik A. (2017). El C2PS: A Digital Twin architecture reference model for the cloud-based cyberphysical systems. *IEEE Access*, 5: 2050.
- Arenkov I., Tsenzharik M. (2019). Digital technologies in supply chain management. *Atlantis Highlights in Computer Sciences*, 1: 720-734.
- Bao Q. (2020). Ontology-based modeling of part Digital Twin oriented to assembly. *Journal of Engineering Manufacture*, 13(4): 534-556.
- Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. (2019). A Survey on Digital Twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 7: 289-301.
- Glaessgen E., Stargel D. (2012). The Digital Twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- Grieves M., Vickers J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, 16(4): 85-113.
- Karapetyan D., Mitrovic Minic S., Malladi K.T., Punnen A.P. (2020). Satellite downlink scheduling problem: A case study. *Omega*, 27(2): 115-129.
- Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51: 334-346.
- Merdan M., Moser T., Sunindyo W., Biffl S., Vrba P. (2022). Workflow scheduling using multi-agent systems in a dynamically changing environment. *Journal of Simulation*, 118-129.
- Negri E., Fumagalli L., Macchi M. (2017). A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11: 939-948.
- Saddik A.E. (2018). A Digital Twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE MultiMedia*, 25(2): 87.
- Stark R., Damerau T. (2019). Digital Twin, CIRP. In: *Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg, Springer, 66: 1.
- Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A., Zhou L. (2019). Digital Twins and cyber-physical systems. Toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661.
- Trauer J., Schweigert-Recksiek S., Engel C., Spreitzer K., Zimmermann M. (2020). What is a Digital Twin? In: *Design Conference, Proceedings of the Design Society*, 1: 757. DOI:10.1017/dsd.
- Zhuang N., Liu J., Xiong H. (2018). Digital Twin - based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96: 1149.

Информация об авторе

Владислав Андреевич Свадковский

Старший инвестиционный аналитик АО «ХК Эволюция» (Москва, Россия).

Область научных интересов: цифровые технологии и эффекты от их внедрения, деятельность крупных угледобывающих промышленных компаний, эффективность операционной деятельности.

vladskk@yandex.ru

About the author

Vladislav A. Svadkovsky

Senior investment analyst at 'HC Evolution' JSC (Moscow, Russia).

Research interests: digital technologies and the effects of their implementation, the activities of large industrial coal mining companies, operational efficiency.

vladskk@yandex.ru

作者信息

Vladislav A. Svadkovsky

'Evolution' 控股集团公司的高级投资分析师（俄罗斯·莫斯科）。

科研兴趣领域：数字技术及其应用效果，大型煤炭开采工业公司活动，运营活动效率。

vladskk@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.09.2023; после рецензирования 05.10.2023 принята к публикации 20.10.2023. Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The article was submitted on 20.09.2023; revised on 05.10.2023 and accepted for publication on 20.10.2023. The author read and approved the final version of the manuscript.

文章于 20.09.2023 提交给编辑。文章于 05.10.2023 已审稿。之后于 20.10.2023 接受发表。作者已经阅读并批准了手稿的最终版本。