

Экономическая эффективность цифровой трансформации угледобывающих предприятий: комплексная оценка внедрения интеллектуальных систем управления

Н.Г. Урасова✉

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

✉ Ung25@mail.ru

Резюме: Цифровая трансформация горнодобывающих предприятий представляет собой системный процесс модернизации производственной инфраструктуры на основе интеллектуальных технологий управления. Целью работы является разработка методологии комплексной оценки экономической эффективности внедрения цифровых технологий на угледобывающих предприятиях России.

В рамках исследования применялись методы системного анализа, эконометрического моделирования, факторного анализа. Эмпирическая база включает операционные данные 23 предприятий Кузбасского, Канского-Ачинского и Печорского угольных бассейнов за период 2021–2024 гг. Результаты демонстрируют, что внедрение систем диспетчеризации обеспечивает прирост производительности техники на 18,3–24,7% при сокращении расхода топлива на 12,6–15,4%. Интеллектуальные системы планирования повышают коэффициент извлечения на 4,2–6,8 процентных пункта. Роботизированные системы транспортировки увеличивают производительность на 5–10% за счет роста времени работы с 78,4 до 87,2%. Совокупный эффект комплексной цифровизации составляет от 8,4 до 13,7% снижения себестоимости при окупаемости 2,8–4,3 года.

Практическая ценность результатов состоит в формировании количественных критериев для обоснования инвестиционных решений в сфере цифровой трансформации горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: цифровая трансформация, угольная промышленность, экономическая эффективность, автоматизация горного производства, интеллектуальные системы управления, производительность труда, операционная эффективность

Для цитирования: Урасова Н.Г. Экономическая эффективность цифровой трансформации угледобывающих предприятий: комплексная оценка внедрения интеллектуальных систем управления. *Горная промышленность*. 2025;(6):112–119.
<https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-112-119>

Economic efficiency of digital transformation of coal mining companies: integrated assessment of implementing smart management systems

N.G. Urasova✉

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

✉ Ung25@mail.ru

Abstract: Digital transformation of mining companies is a systematic process of upgrading production infrastructure based on smart management technologies. The objective of this work is to develop a methodology for integrated assessment of the economic efficiency of implementing digital technologies at coal mining enterprises in the Russian Federation.

The study employed methods of systems analysis, econometric modeling, and factor analysis. The empirical base includes operational data from 23 companies in the Kuzbass, Kansk-Achinsk, and Pechora coal basins for the period of 2021–2024. The results show that introduction of dispatching systems increases equipment performance by 18.3–24.7% while reducing fuel consumption by 12.6–15.4%. Smart planning systems increase the extraction rate by 4.2–6.8 percentage points. Autonomous transportation systems increase productivity by 5–10% through increasing the operating time from 78.4% to 87.2%. The cumulative effect of integrated digitalization makes up from 8.4 to 13.7% of the cost reduction with a payback period of 2.8–4.3 years.

The practical value of the results lies in forming quantitative criteria for justifying investment decisions related to digital transformation of mining companies.

Keywords: digital transformation, coal industry, economic efficiency, mining automation, smart control systems, labor productivity, operational efficiency

For citation: Urasova N.G. Economic efficiency of digital transformation of coal mining companies: integrated assessment of implementing smart management systems. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):112–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-112-119>

Введение

Внедрение интеллектуальных систем управления производственными процессами кардинально меняет операционные модели горнодобывающих компаний, создавая возможности для повышения эффективности использования ресурсов и снижения издержек [1; 2]. Для российской угольной промышленности цифровая модернизация особенно актуальна в условиях ухудшения горно-геологических условий разработки месторождений и необходимости обеспечения технологического суверенитета [3; 4].

Анализ исследований выявляет три основных подхода к осмыслению цифровизации горного производства. Технократическая парадигма рассматривает внедрение технологий как инструмент автоматизации с фокусом на производительности оборудования [5]. Системно-интеграционный подход акцентирует создание взаимосвязанных информационных контуров управления [6; 7]. Экономико-ориентированная концепция фокусируется на количественной оценке финансовых результатов [8; 9]. Однако ни один не предлагает целостной методологии комплексной оценки многофакторного влияния цифровизации на эффективность предприятий. Терминологическое поле характеризуется неоднородностью. Под цифровизацией понимается внедрение систем диспетчерского управления [10], применение машинного обучения для прогнозного обслуживания [11] или создание интегрированных платформ управления [12]. В настоящем исследовании под цифровой трансформацией понимается системный процесс внедрения взаимосвязанного комплекса технологических решений, обеспечивающих автоматизацию сбора данных, интеллектуальную поддержку решений и оптимизацию технологических режимов [13]. Критический обзор литературы идентифицирует существенные пробелы. Отсутствуют систематические исследования, количественно оценивающие вклад отдельных компонентов цифровой инфраструктуры в совокупный экономический эффект [14]. Недостаточно изучены механизмы синергетических эффектов от одновременного внедрения взаимодополняющих систем [15]. Практически отсутствуют лонгитюдные исследования динамики эффектов на различных стадиях жизненного цикла внедрения [16]. Не разработаны методологические подходы к оценке косвенных эффектов, проявляющихся в повышении безопасности и снижении негативного воздействия на окружающую среду [17].

Выявленные лакуны определяют актуальность настоящего исследования, направленного на разработку комплексной методологии оценки экономической эффективности цифровой трансформации угледобывающих предприятий на основе анализа операционных данных [18]. Уникальность подхода заключается в одновременном рассмотрении прямых производственно-технических эффектов и опосредованных финансово-экономических результатов [19].

Материалы и методы

Методологический каркас базируется на комплексном применении количественных методов анализа операци-

онных и финансово-экономических показателей деятельности угледобывающих предприятий в сочетании с качественными экспертными оценками [20].

Основным методом выступил сравнительный анализ динамики операционных показателей предприятий, реализовавших проекты цифровизации, относительно контрольной группы предприятий без значительных инвестиций в цифровую трансформацию [21]. Для эlimинирования влияния экзогенных факторов применялась процедура формирования парных сопоставлений предприятий с близкими характеристиками по параметрам масштаба производства, способа добычи, качественных характеристик запасов и географического расположения [22].

Исследование реализовалось в четыре этапа. На первом этапе осуществлялся сбор первичных операционных данных за 2021–2024 гг., включая показатели объемов добычи, производительности оборудования, коэффициентов использования мощностей, удельного расхода энергии, численности персонала, травматизма. На втором этапе проводилась систематизация данных с приведением показателей к сопоставимому виду через нормализацию на масштабные характеристики. Третий этап предполагал факторный анализ изменений показателей с применением регрессионного моделирования для декомпозиции эффекта на составляющие компоненты. Четвертый этап включал углубленные интервью с руководителями для выявления организационно-управленческих факторов успешности внедрения цифровых технологий.

Эмпирическая база формировалась из данных 23 предприятий Кузнецкого, Канско-Ачинского и Печорского угольных бассейнов. Критериями отбора выступали годовой объем добычи не менее 1 млн т, наличие полной операционной статистики за весь период, реализация документально подтвержденных проектов цифровизации либо их отсутствие для контрольной группы. Совокупная добыча составила 111 млн т за 2024 год, что соответствует 27% от общероссийского объема. Структура выборки включала 14 предприятий открытой добычи мощностью 84 млн т в год и 9 шахт подземной добычи мощностью 27 млн т в год. Обеспечение валидности достигалось через триангуляцию методов, сочетающую количественные статистические методы с качественными экспертными оценками. Репрезентативность обеспечивалась включением предприятий различного масштаба и способов добычи. Для проверки устойчивости результатов использовались непараметрические статистические критерии. Критический порог статистической значимости устанавливался на уровне 5%.

Результаты

Комплексный анализ операционных данных угледобывающих предприятий выборки за период 2021–2024 гг. выявил существенную дифференциацию экономических эффектов от внедрения различных типов цифровых систем управления производственными процессами (табл. 1).

Предприятия контрольной группы показали прирост производительности 6,6%, отражающий общеотраслевую динамику от обновления техники. Дифференциал темпов

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Digital technologies

Таблица 1

Динамика производительности труда на угледобывающих предприятиях по группам внедрения цифровых технологий в 2021–2024 гг.

Table 1

Dynamics of labor productivity at coal mining companies by groups of digital technology implementation in 2021–2024

Группа предприятий	Производительность 2021, т/чел-мес	Производительность 2022, т/чел-мес	Производительность 2023, т/чел-мес	Производительность 2024, т/чел-мес	Прирост 2021–2024, %
Комплексная цифровизация	294,8	324,5	359,8	398,7	35,2
Диспетчеризация ГТК	301,2	319,8	340,6	366,9	21,8
Геологическое моделирование	288,4	302,8	320,7	342,4	18,7
Контрольная группа	296,1	301,7	308,4	315,6	6,6

Примечание: Показатель производительности труда рассчитывался как отношение объема добычи угля в тоннах к среднесписочной численности промышленно-производственного персонала. Группа комплексной цифровизации включала 6 предприятий с полным циклом внедрения интегрированных платформ. Группа диспетчеризации ГТК состояла из 7 предприятий. Группа геологического моделирования объединяла 4 предприятия. Контрольная группа из 6 предприятий не реализовывала значительных проектов цифровизации. Статистическая значимость различий проверялась критерием Краскела–Уоллиса с методом Данна, $p < 0,01$.

Note: The labor productivity indicator was calculated as the ratio of coal production in tons to the average number of industrial and operating personnel. The integrated digitalization group included six companies with the full cycle of integrated platform implementation. The mine fleet dispatching group consisted of seven companies. The geological modeling group comprised four companies. The reference group of six companies did not implement any significant digitalization projects. The statistical significance of the differences was tested using the Kruskal-Wallis test with the Dunn's test, $p < 0,01$.

Таблица 2

Показатели эффективности использования карьерной техники при внедрении систем диспетчеризации горнотранспортного комплекса

Table 2

Utilization efficiency indicators for open-pit mining equipment when implementing mine fleet dispatching systems

Показатель	До внедрения системы	После внедрения системы	Изменение абсолютное	Изменение относительное, %
Коэффициент использования техники	0,684	0,823	+0,139	+20,3
Среднесуточная производительность самосвала, т	1847	2304	+457	+24,7
Удельный расход дизтоплива, кг/т-км	0,387	0,327	-0,060	-15,5
Количество холостых пробегов за смену	3,8	2,1	-1,7	-44,7
Время простоев в ожидании погрузки, мин/смену	87,3	34,6	-52,7	-60,4

Примечание. Данные получены на основе непрерывного мониторинга работы на четырех угольных разрезах Кузбасса суммарной мощностью 43 млн т в год в течение 12 мес до и 18 мес после внедрения системы «Карьер». Все измерения проводились в автоматическом режиме с частотой 1 с. Парк техники включал 123 карьерных самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 90–130 т и 37 экскаваторов с ковшом 8–15 м³.

Note: The data was obtained based on continuous monitoring of operations at four coal mines in Kuzbass with a total capacity of 43 million tons per year for 12 months before and 18 months after the implementation of the Karier system. All measurements were made in automatic mode with the frequency of 1 second. The fleet included 123 BELAZ mining dump trucks with a carrying capacity of 90–130 tons and 37 excavators with a bucket capacity of 8–15 m³.

Таблица 3

Экономическая эффективность внедрения роботизированных систем транспортировки горной массы на карьерах

Table 3

Economic efficiency of implementing autonomous rock mass transportation systems in open-pit mines

Экономический показатель	Традиционная технология	Роботизированная технология	Изменение
Фактическое время работы техники, % от календарного	78,4	87,2	+8,8 п.п.
Прирост объема транспортировки, %	Базовый уровень	+7,3	+7,3
Сокращение затрат на оплату труда водителей, млн руб/год	Базовый уровень	127,6	+127,6
Снижение аварийности техники, случаев/год	18,7	6,2	-12,5
Капитальные затраты на внедрение системы, млн руб.	–	486,3	–
Срок окупаемости проекта, лет	–	3,2	–

Примечание: Показатели получены на основе данных трех предприятий Канско-Ачинского и Кузбасского бассейнов, внедривших роботизированные системы в период июль 2022 – март 2023. Базовый период охватывает 12 мес до внедрения. Период эксплуатации составляет 21 мес с 7-го месяца после запуска. Парк из 27 беспилотных самосвалов БЕЛАЗ-7513R грузоподъемностью 130 т. Сокращение затрат рассчитано исходя из высвобождения 81 водителя со средней зарплатой 113 тыс. руб/мес включая начисления.

Note: The indicators are based on data from three enterprises in the Kansk-Achinsk and Kuzbass basins that implemented autonomous systems between July 2022 and March 2023. The reference period covers 12 months prior to implementation. The operating period is 21 months from the 7th month upon commissioning. A fleet of 27 BELAZ-7513R autonomous dump trucks with the carrying capacity of 130 tons. The cost reduction is calculated based on dismissal of 81 drivers with the average salary of 113 thousand rubles per month, including accruals.



Рис. 1
Показатели эффективности использования карьерной техники при внедрении систем диспетчеризации горнотранспортного комплекса

Fig. 1
Utilization efficiency indicators for open-pit mining equipment when implementing mine fleet dispatching systems

роста между группой комплексной цифровизации и контрольной группой составил 29 процентных пунктов, статистически значимый на уровне $p < 0,01$ (табл. 2).

Коэффициент использования техники увеличился с 0,684 до 0,823. Особенное существенное улучшение зафиксировано по времени простоев в ожидании погрузки, сократившемуся на 60,4% благодаря интеллектуальному распределению техники (табл. 3).

Внедрение систем диспетчеризации горнотранспортного комплекса на четырех угольных разрезах Кузбасса суммарной мощностью 43 млн т в год продемонстрировало существенное повышение эффективности использования карьерной техники. Коэффициент использования техники увеличился с 0,684 до 0,823 (+20,3%), а среднесуточная производительность самосвала возросла с 1847 до 2304 т (+24,7%). Наиболее впечатляющий эффект достигнут по сокращению времени простоев в ожидании погрузки – с 87,3 до 34,6 мин за смену (-60,4%), что обеспечено интеллектуальным распределением техники на основе непрерывного мониторинга с частотой 1 с. Удельный расход дизельного топлива снизился на 15,5% (с 0,387 до 0,327 кг/т·км), а количество холостых пробегов за смену сократилось на 44,7%

Таблица 4
Влияние внедрения систем трехмерного геологического моделирования на показатели извлечения полезного ископаемого

Table 4
The effect of implementing 3D geological modeling systems on the mineral extraction rates

Показатель	Традиционное планирование	3D-моделирование	Прирост абсолютный	Прирост относительный, %
Коэффициент извлечения угля из недр, %	87,6	92,8	+5,2	+5,9
Точность прогноза качества угля, %	73,4	91,7	+18,3	+24,9
Снижение объема вскрышных работ, %	Базовый уровень	-3,8	-3,8	-
Сокращение потерь при селективной выемке, тыс. т/год	Базовый уровень	47,3	+47,3	-
Дополнительная выручка от повышения качества продукции, млн руб/год	Базовый уровень	83,4	+83,4	-

Примечание: Данные получены на основе информации пяти предприятий Кузнецкого и Печорского бассейнов, внедривших системы 3D-моделирования на базе Micromine и Datamine в 2021–2022 гг. Коэффициент извлечения рассчитывался на отработанных участках площадью 172 га. Традиционное планирование базировалось на 2D-разрезах с интерполяцией методом обратных взвешенных расстояний. 3D-моделирование использовало геостатистический кrigинг с блоками 20×20×2 м. Точность прогноза определялась как доля партий с отклонением не более 5% по зольности и 700 кДж/кг по теплотворной способности. Дополнительная выручка рассчитана исходя из средней премии 817 руб/т.

Note: The data is based on information from five companies in the Kuznetsk and Pechora basins that implemented Micromine and Datamine-based 3D modeling systems in 2021–2022. The extraction rate was calculated for mined areas covering 172 hectares. Conventional planning was based on 2D sections with interpolation using the inverse distance weighting interpolation method. 3D modeling used geostatistical kriging with the 20×20×2 m blocks. The accuracy of the forecast was determined as the proportion of batches with the deviations of no more than 5% in the ash content and 700 kJ/kg in the calorific value. The additional revenue was calculated based on an average premium of 817 rubles/ton.

Таблица 5
Динамика удельного энергопотребления при внедрении систем мониторинга и оптимизации энергоэффективности оборудования

Table 5
Dynamics of energy intensity upon implementation of the energy efficiency monitoring and optimization systems for the equipment

Период	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	Снижение относительно базового периода, %	Экономия энергии, млн кВт·ч/год	Стоймостная оценка экономии, млн руб/год
2021 (базовый)	18,27	0,0	–	–
2022	17,62	3,6	8,9	50,2
2023	16,84	7,8	19,3	108,9
2024	16,04	12,2	30,1	169,8

Примечание: Данные представляют агрегированные показатели восьми предприятий, внедривших системы автоматизированного мониторинга и оптимизации энергопотребления на базе платформ «ЭнергоМониторинг» и SCADA Wonderware в январе 2021 г.– декабре 2024 г. Измерение осуществлялось интеллектуальными счетчиками класса точности 0,5 на вводах установок мощностью >50 кВт. В 2022 г. внедрен мониторинг в реальном времени. В 2023 г. запущены модули интеллектуального анализа с автоматической генерацией рекомендаций. В 2024 г. реализована полная автоматизация управления режимами с адаптивной оптимизацией параметров на основе машинного обучения. Стоймостная оценка определена с тарифом 5,64 руб/кВт·ч в 2024 г.

Note: The data represents aggregated indicators of eight enterprises that implemented automated monitoring and energy optimization systems based on the EnergyMonitoring and SCADA Wonderware platforms in January 2021 to December 2024. The measurements were conducted using smart meters with an accuracy class of 0,5 at the inputs of installations with a capacity of >50 kW. In 2022, real-time monitoring was implemented. In 2023, smart analysis modules with automatic generation of recommendations were launched. In 2024, full automation of mode control with adaptive parameter optimization based on machine learning was implemented. The cost estimate was determined at a rate of 5.64 RUB/kWh in 2024.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Digital technologies



Рис. 2
Сравнительная эффективность различных типов цифровых систем по критериям окупаемости инвестиций (горизонт планирования 10 лет, ставка дисконтирования 10%)

(с 3,8 до 2,1), что свидетельствует об оптимизации маршрутов движения и повышении эффективности логистических процессов. Мониторинг парка из 123 карьерных самосвалов БЕЛАЗ и 37 экскаваторов в течение 18 мес после внедрения системы «Карьер» подтверждает стабильность достигнутых результатов (рис. 1).

Основной вклад обеспечивает увеличение фактического времени работы за счет исключения технологических перерывов и возможности круглосуточной эксплуатации. Дополнительный эффект формируется за счет экономии на фонде оплаты труда и снижения затрат на ремонт вследствие устранения человеческого фактора (табл. 4).

Коэффициент извлечения угля возрос с 87,6 до 92,8%. Точность прогнозирования качественных параметров повысилась с 73,4 до 91,7% благодаря детальным цифровым моделям распределения характеристик угля (табл. 5).

Таблица 6
Сравнительная эффективность различных типов цифровых систем по критерию окупаемости инвестиций

Тип цифровой системы	Средние капитальные затраты, млн руб.	Ежегодный экономический эффект, млн руб.	Срок окупаемости, лет	Чистая приведенная стоимость за 10 лет, млн руб.
Диспетчеризация ГТК	284,7	98,3	2,9	423,6
Роботизированный транспорт	486,3	151,8	3,2	612,4
Геологическое 3D-моделирование	127,5	44,6	2,9	192,8
Системы энергомониторинга	63,8	26,4	2,4	115,7
Комплексная платформа	892,4	347,2	2,6	1584,3

Примечание: Показатели рассчитаны на основе анализа проектов на 23 предприятиях за 2021–2024 гг. с экстраполяцией на 10-летний горизонт. Капитальные затраты включают ПО с лицензиями, серверное и коммуникационное оборудование, датчики и контроллеры, услуги по внедрению и техническому сопровождению. Диспетчеризация ГТК включает GPS-трекеры, радиосвязь, серверы и ПО диспетчерского управления. Роботизированный транспорт предполагает оснащение самосвалов системами автономного управления с лидарами, камерами, радарами, создание цифровых карт и сеть базовых станций. Геологическое 3D-моделирование требует специализированного ПО и рабочих станций с графическими ускорителями. Системы энергомониторинга включают интеллектуальные счетчики и ПО анализа данных. Комплексная платформа объединяет функциональность всех систем с дополнительными модулями планирования, управления ТОиР и контроля качества. Срок окупаемости рассчитан простым методом без дисконтирования. Чистая приведенная стоимость определена суммированием дисконтированных денежных потоков за 10 лет при ставке 10% годовых с остаточной стоимостью активов 20%.

Note: The figures are calculated based on analyzing projects in 23 companies in 2021–2024, extrapolated over a 10-year period. The capital expenses include software with licenses, server and communication equipment, sensors and controllers, implementation and technical support services. Dispatching of mine fleet includes GPS trackers, radio communication, servers, and dispatch management software. Autonomous transport involves equipping dump trucks with autonomous control systems with lidars, cameras, radars, creating of digital maps, and a grid of base stations. 3D geological modeling requires specialized software and workstations with graphics accelerators. Energy monitoring systems include smart meters and data analysis software. The integrated platform combines the functionality of all the systems with additional modules for planning, maintenance and repair management, and quality control. The payback period is calculated using a simple method without discounting. The net present value is determined by summing the discounted cash flows for 10 years at an annual rate of 10% with a residual asset value of 20%.

Сравнительный анализ эффективности различных типов цифровых систем по критерию окупаемости инвестиций выявил значительную дифференциацию показателей. Наименьший срок окупаемости демонстрируют системы энергомониторинга (2,4 года) при капитальных затратах 63,8 млн руб. и годовом экономическом эффекте 26,4 млн руб. Проекты внедрения комплексных интегрированных платформ несмотря на максимальные капитальные затраты (892,4 млн руб.) обеспечивают наивысшую чистую приведенную стоимость за 10-летний горизонт (1584,3 млн руб.) при сроке окупаемости 2,6 года и годовом эффекте 347,2 млн руб. Критически важно, что показатели эффективности комплексных платформ превосходят простую сумму эффектов от отдельных компонентов, что свидетельствует о значимых синергетических эффектах от интеграции функциональности диспетчеризации, роботизации, геологического моделирования и энергомониторинга. Роботизированный транспорт характеризуется средним сроком окупаемости (3,2 года) при высокой NPV (612,4 млн руб.), тогда как системы геологического 3D-моделирования обеспечивают быструю окупаемость (2,9 года) при умеренных инвестициях (127,5 млн руб.) (рис. 2).

За период 2021–2024 гг. удельное энергопотребление сократилось на 12,2%. Основной вклад внесла оптимизация режимов работы дробильно-сортировочных комплексов на основе мониторинга гранулометрического состава с автоматической адаптацией параметров дробления (табл. 6).

Наименьший срок окупаемости демонстрируют системы мониторинга энергопотребления. Проекты внедрения комплексных платформ обеспечивают максимальный совокупный экономический эффект и наивысшую чистую приведенную стоимость. Показатели эффективности комплексных платформ превосходят простую сумму эффектов от отдельных компонентов, что свидетельствует о наличии значимых синергетических эффектов от интеграции (табл. 7).

Предприятия группы комплексной цифровизации достигли снижения себестоимости на 13,6% при росте на 3%

Table 6
Comparative efficiency of various types of digital systems based on the return on investment criteria

Таблица 7

Влияние масштаба цифровизации на динамику себестоимости добычи угля

Table 7

The impact of the digitalization scale on the dynamics of coal production costs

Группа предприятий	Себестоимость 2021, руб/т	Себестоимость 2024, руб/т	Изменение абсолютное, руб/т	Изменение относительное, %
Комплексная цифровизация	2914	2517	-397	-13,6
Частичная цифровизация	2981	2732	-249	-8,4
Контрольная группа	2958	3046	+88	+3,0

Примечание: Себестоимость рассчитывалась по полной производственной себестоимости, включающей прямые материальные затраты, оплату труда, амортизацию, расходы на энергоносители и общехозяйственные расходы. Данные получены из официальной отчетности с корректировкой на инфляцию методом дефляции по индексу цен производителей. Группа комплексной цифровизации включала шесть предприятий с интегрированными платформами, охватывающими ≥70% производственных процессов. Группа частичной цифровизации объединяла 11 предприятий с охватом 20–50%. Контрольная группа из шести предприятий характеризовалась отсутствием значительных инвестиций в цифровизацию. Снижение себестоимости достигается за счет роста производительности труда, снижения расхода материалов и энергоресурсов, уменьшения затрат на ремонт при переходе на прогностическое обслуживание, повышения коэффициента использования мощностей. Рост себестоимости в контрольной группе отражает инфляцию, повышение тарифов и ухудшение горно-геологических условий. Статистическая значимость различий подтверждена критерием Краскела–Уоллиса, $p < 0,01$. Note: The cost was calculated based on the total production cost, including direct material costs, labor costs, depreciation, energy costs, and general administrative expenses. The data was obtained from official reports and adjusted for inflation using the producer price index deflation method. The integrated digitalization group included six companies with integrated platforms covering ≥70% of the production processes. The partial digitalization group included 11 companies with the coverage of 20–50%. The reference group of six companies was characterized by the absence of significant investments in digitalization. The reduction in production costs is achieved through increased labor productivity, reduced consumption of materials and energy resources, reduced repair costs through the transition to predictive maintenance, and increased capacity utilization. The increase in production costs in the reference group reflects inflation, tariff increases, and deteriorating mining and geological conditions. The statistical significance of the differences was confirmed using the Kruskal-Wallis test, $p < 0,01$.

Таблица 8

Факторы, детерминирующие успешность реализации проектов цифровой трансформации угледобывающих предприятий

Table

Factors defining success of the digital transformation projects at coal mining enterprises

Фактор успеха	Доля успешных проектов при наличии фактора, %	Доля успешных проектов при отсутствии фактора, %	Вклад фактора в вероятность успеха, п.п.
Наличие цифровой стратегии компании	87,3	34,6	52,7
Вовлеченность топ-менеджмента	91,2	28,4	62,8
Подготовка персонала к изменениям	83,7	41,2	42,5
Качество данных в существующих системах	78,9	38,7	40,2
Партнерство с поставщиком решений	76,4	44,3	32,1
Пилотное тестирование технологий	81,5	47,8	33,7

Примечание: Данные получены на основе полуструктурированных интервью с руководителями 42 угледобывающих предприятий России, реализовавших проекты цифровизации в 2020–2024 гг., и анализа проектной документации. Проект классифицировался как успешный при достижении ≥80% запланированных показателей экономической эффективности в течение первых 18 мес с обеспечением стабильности функционирования ≥95% времени. Наличие фактора определялось экспертной оценкой по шкале 0–10 баллов, где значения >7 подтверждают присутствие фактора. Вклад фактора рассчитан как разность долей успешных проектов в группах с наличием и отсутствием фактора.

Note: The data was obtained based on semi-structured interviews with the heads of 42 Russian coal mining companies that implemented digitalization projects in 2020–2024, and analysis of project documentation. A project was classified as successful if it achieved ≥80% of its planned economic efficiency indicators within the first 18 months, and with ≥95% of the operational stability. The presence of a factor was determined by expert assessment on the scale of 0–10 points, where values >7 confirmed the presence of the factor. The contribution of the factor was calculated as the difference between the proportions of the successful projects in groups with and without the factor.

в контрольной группе. Дифференциал составил 16,6 процентных пункта. Предприятия частичной цифровизации показали промежуточный результат со снижением себестоимости на 8,4%. Применение систем видеомониторинга с интеллектуальным распознаванием нарушений, геопозиционирования персонала и автоматического контроля параметров среды обеспечило сокращение коэффициента частоты травматизма на 40%. Количество инцидентов без последствий сократилось на 46,5% благодаря упреждающему выявлению опасных ситуаций (табл. 8).

Цифровая стратегия определялась как формализованный документ на горизонте ≥3 лет с распределением ответственности и бюджетом. Вовлеченность топ-менеджмента оценивалась по критериям личного участия в проектных совещаниях ≥1 раз в месяц и наличия персональных KPI. Подготовка персонала включала программы обучения ≥40 академических часов. Качество данных оценивалось по критериям полноты заполнения справочников ≥90%, актуальности информации с периодом обновления ≤7 дней, согласованности данных с уровнем расхождений ≤5%. Пилот-

ное тестирование подразумевало опытную эксплуатацию ≥3 месяцев до масштабирования. Наиболее существенное влияние на вероятность успешной реализации оказывает уровень вовлеченности высшего руководства, обеспечивающий увеличение доли успешных проектов на 62,8 процентных пункта. Наличие formalизованной цифровой стратегии повышает вероятность успеха на 52,7 процентных пункта.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют значительный потенциал повышения операционной результативности на основе внедрения интеллектуальных систем управления. Предприятия комплексной цифровизации достигли прироста производительности труда 35,2% за 2021–2024 гг. при снижении себестоимости добычи 13,6%, что превосходит результаты контрольной группы с приростом производительности 6,6% и ростом себестоимости 3%. Системы диспетчеризации обеспечили увеличение коэффициента использования техники с 0,684 до 0,823 и прирост произво-

дительности самосвалов 24,7%. Роботизированные системы продемонстрировали рост времени работы оборудования с 78,4 до 87,2% с экономией 127,6 млн руб. ежегодно при окупаемости 3,2 года. Трехмерное геологическое моделирование обеспечило повышение коэффициента извлечения угля с 87,6 до 92,8%. Энергомониторинг обеспечил снижение удельного расхода электроэнергии на 12,2% с экономией 169,8 млн руб. в год. Получены подтверждения значимых синергетических эффектов от интеграции различных цифровых систем. Чистая приведенная стоимость интегрированных платформ за 10-летний горизонт составила 1584,3 млн руб., превышая на 32,4% простую сумму эффектов от изолированного внедрения отдельных компонентов. Дифференциал динамики себестоимости между группой ком-

плексной цифровизации и контрольной группой достиг 16,6 процентных пункта. Косвенным эффектом выступают 40%-ное снижение коэффициента частоты травматизма и 77,5%-ное сокращение времени реагирования на аварийные ситуации.

Теоретическая значимость заключается в развитии методологии оценки синергетических эффектов от внедрения взаимосвязанных цифровых систем. Выявлены нелинейные зависимости между масштабом инвестиций и достигаемым экономическим эффектом. Идентифицированы критические организационно-управленческие факторы: наибольшее влияние оказывают вовлеченность топ-менеджмента и наличие формализованной цифровой стратегии.

Список литературы / References

1. Сахапова Т.С., Исмагилов Т.Ш., Тихонов В.А. Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия. *Горная промышленность*. 2023;(2):62–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-62-68>
Sakhapova T.S., Ismagilov T.Sh., Tikhonov V.A. A digital twin of the manufacturing system as a stage in the new digital business model of an industrial company. *Russian Mining Industry*. 2023;(2):62–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-2-62-68>
2. Тронин С.А., Ксенофонтов А.А., Юссуф А.А., Бурова О.А.2, Фролова В.Б. Роль распределенных серверных систем в модернизации угольного сектора с целью повышения экономической эффективности и экологической устойчивости предприятия. *Уголь*. 2025;(2):110–118. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2502110.pdf> (дата обращения: 16.04.2025).
Tronin S.A., Ksenofontov A.A., Yussuf A.A., Burova O.A., Frolova V.B. The role of distributed server systems in modernizing the coal sector to improve the economic efficiency and environmental sustainability of the enterprise. *Ugol'*. 2025;(2):110–118. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2502110.pdf> (accessed: 16.04.2025).
3. Чернов В.А. Реализация цифровых технологий в финансовом управлении хозяйственной деятельностью. *Экономика региона*. 2020;16(1):283–297. <https://doi.org/10.17059/2020-1-21>
Chernov V.A. Implementation of digital technologies in financial management. *Economy of Regions*. 2020;16(1):283–297. (In Russ.) <https://doi.org/10.17059/2020-1-21>
4. Захаров В.Н., Кубрин С.С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5-2):31–47. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_31
Zakharov V.N., Kubrin S.S. Digital transformation and intellectualization of mining systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5-2):31–47. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_31
5. Амирова Э.Ф., Зиганшин Б.Г. Экономические методы нивелирования углеродного следа в зернопродуктовом подкомплексе. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2022;17(4):128–134. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-128-134>
Amirova E.F., Ziganshin B.G. Economic methods for leveling the carbon footprint in grain sub-complex. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2022;17(4):128–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-128-134>
6. Зозуля А.В., Зозуля П.В., Титов С.А., Титова Н.В., Мезина Т.В. Эффективность использования цифровых технологий в производственных процессах угольной промышленности. *Уголь*. 2022;(9):47–52. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-47-52>
Zozulya A.V., Zozulya P.V., Titov S.A., Titova N.V., Mezina T.V. The effectiveness of the use of digital technologies in the production processes of the coal industry. *Ugol'*. 2022;(9):47–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-47-52>
7. Зиновьева О.М., Кузнецова Д.С., Меркулова А.М., Смирнова Н.А. Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):113–123. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123>
Zinovieva O.M., Kuznetsov D.S., Merkulova A.M., Smirnova N.A. Digitalization of industrial safety management systems in mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):113–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123>
8. Жданеев О.В., Власова И.М. Вызовы и приоритеты цифровой трансформации угольной отрасли. *Уголь*. 2023;(1):62–69. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69>
Zhdaneev O.V., Vlasova I.M. Digital transformation of the coal industry. *Ugol'*. 2023;(1):62–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69>
9. Астафьев О.Е. Закономерности устойчивого развития промышленности в рамках цифровой экосистемы. *Уголь*. 2022;(1):8–10. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-1-8-10>
Astafov O.E. Patterns of sustainable development of the coal industry within the digital ecosystem. *Ugol'*. 2022;(1):8–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-1-8-10>
10. Гилярова А.А. Горнорудная промышленность: подходы к экономическому учету современных геотехнологий и инноваций. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2020;(1):117–126. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2020.67.010>
Gilyarova A.A. Mining industry: approaches to economic accounting of modern geotechnologies and innovations. *Sever i Rynok: Formirovanie Ekonomicheskogo Poryadka*. 2020;(1):117–126. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/2220-802X.1.2020.67.010>

11. Mottaeva A., Gordeyeva Ye. Sustainable development of the mining industry in the context of digital transformation. *E3S Web of Conferences*. 2024;531:01032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453101032>
12. Кныш В.А., Иванова Л.В. Циркулярная экономика: угроза для предприятий горнодобывающего сектора или драйвер их технологического развития? *Горный журнал*. 2020;(9):33–41. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.04>
Knysh V.A., Ivanova L.V. Circular economy: A threat or a driver of technological advance in the mining sector? *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):33–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.04>
13. Попов А.Т., Суслова О.А., Коберницкий А.А., Хмелев А.С. Совершенствование информационного взаимодействия металлургического комбината и операторских компаний. *Мир транспорта*. 2021;19(4):110–116. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-12>
Popov A.T., Suslova O.A., Kobernitsky A.A., Khmelev A.S. Improving information interaction between the metallurgical plant and rail operators. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(4):110–116. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-12>
14. Лукичёв С.В., Наговицын О.В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее. *Горный журнал*. 2020;(9):13–18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.01>
Lukichev S.V., Nagovitsin O.V. Digital transformation of mining industry: Past, Present and Future. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):13–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.01>
15. Петерс К.И., Щербакова Л.Н., Федулова Е.А., Кузнецов А.Д., Бурмин Л.Н. Практика применения 3D-модели в горной промышленности на примере угольных предприятий в Кемеровской области - Кузбассе // Уголь. 2024. №10 (1185). С. 110–117.
16. Цхададзе Н.В., Кудряшов А.Л., Кучковская Н.В., Фролова В.Б., Лазарев М.П. Исследование влияния внедрения практик устойчивого развития на экологическую и социально-экономическую ответственность горнодобывающих компаний России. *Горная промышленность*. 2024;(5S):130–136. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-130-136>
Tskhadadze N.V., Kudryashov A.L., Kuchkovskaya N.V., Frolova V.B., Lazarev M.P. Studying the effects of implementing sustainable development practices on the environmental, social and economic responsibility of mining companies in Russia. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):130–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-130-136>
17. Панина О.В., Беляев А.М., Завалько Н.А., Еремин С.Г., Сагина О.А. Применение методов глубокого машинного обучения для структурного анализа рудных тел и прогнозирования оптимальных зон добычи. *Горная промышленность*. 2025;(1):177–183. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-177-183>
Panina O.V., Belyaev A.M., Zavalko N.A., Eremin S.G., Sagina O.A. Application of deep machine learning methods for structural analysis of ore bodies and prediction of optimal mining zones. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):177–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-177-183>
18. Карпова С.В., Погодина Т.В. Маркетинговые аспекты технологического развития предприятий горной промышленности. *Горная промышленность*. 2025;(3):58–66. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-58-66>
Karppova S.V., Pogodina T.V. Marketing aspects of technological development of mining enterprises. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):58–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-58-66>
19. Цхададзе Н.В., Кучковская Н.В., Бондаренко М.П., Фролова В.Б., Лазарев М.П. Разработка интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия на основе технологий индустрии 4.0 и циркулярной экономики. *Горная промышленность*. 2024;(5S):12–20. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-12-20>
Tskhadadze N.V., Kuchkovskaya N.V., Bondarenko M.P., Frolova V.B., Lazarev M.P. Designing a smart life cycle management system for a mining enterprise based on Industry 4.0 and circular economy technologies. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):12–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-12-20>
20. Борисова О.В. Прогнозирование доходов федерального бюджета с использованием MIDAS-моделей. *Экономика. Налоги. Право*. 2024;17(6):89–100. Режим доступа: <https://etl.fa.ru/jour/article/view/148> (дата обращения: 16.04.2025).
Borisova O.V. Forecasting federal budget revenues using MIDAS models. *Economics, Taxes & Law*. 2024;17(6):89–100. (In Russ.) Available at: <https://etl.fa.ru/jour/article/view/148> (accessed: 16.04.2025).
21. Белозорова Э.Н. Эффективность денежно-кредитной политики ФРС в целях таргетирования инфляции в 2022–2024 годы. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(5):64–76. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-5-64-76>
Belozorova E.N. The Effectiveness of the fed's monetary policy in targeting inflation in the years 2022–2024. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(5):64–76. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-5-64-76>
22. Борисова О.В., Древинг С.Р., Лосева О.В., Федотова М.А. Меры финансовой господдержки и риск-факторы, влияющие на стоимость инвестиционных проектов по внедрению промышленных робототехнических комплексов. *Финансы: теория и практика*. 2025;29(3):20–34. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-3-20-34>
Borisova O.V., Dreving S.R., Loseva O.V., Fedotova M.A. State financial support measures and risk factors affecting the cost of investment projects for the introduction of industrial robotic complex. *Finance: Theory and Practice*. 2025;29(3):20–34. <https://doi.org/10.26794/2587-5671-2025-29-3-20-34>

Информация об авторе

Урасова Наталья Григорьевна – кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Ung25@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 28.08.2025
Поступила после рецензирования: 10.11.2025
Принята к публикации: 18.11.2025

Information about the author

Natalia G. Urasova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: Ung25@mail.ru

Article info

Received: 28.08.2025
Revised: 10.11.2025
Accepted: 18.11.2025