Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96

Экономическая эффективность цифровой трансформации горнодобывающих предприятий в условиях технологической модернизации и решений Индустрии 4.0

Н.В. Кучковская ✉
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
✉ valentina2010@yandex.ru

Резюме: Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности представляет собой критический фактор повышения конкурентоспособности отечественных предприятий в условиях глобальных технологических вызовов и необходимости оптимизации производственных издержек. Актуальность исследования обусловлена масштабным внедрением технологий Индустрии 4.0 в горнодобывающий сектор, требующим комплексной оценки экономических эффектов от цифровизации производственных и управленческих процессов. Целью работы является количественная оценка экономической эффективности внедрения цифровых решений на горнодобывающих предприятиях и разработка методологического подхода к определению прямых и косвенных экономических эффектов цифровой трансформации. В исследовании применены методы сравнительного анализа, статистической обработки данных, экономико-математического моделирования и экспертной оценки. Эмпирическая база включает данные 50 горнодобывающих предприятий России за период 2019–2024 гг., результаты отраслевых исследований консалтинговых компаний и статистические материалы Росстата. Результаты показывают, что инвестиции в цифровые технологии горнодобывающих предприятий выросли с 4,2 млрд руб. в 2019 г. до 7,4 млрд руб. в 2024 г., что свидетельствует о 76,2%-ном увеличении. Внедрение интегрированных систем управления обеспечивает снижение эксплуатационных расходов на 3–7%, повышение производительности труда на 3–5% и прирост добычи на 5–7%. Применение цифровых двойников позволяет сократить аварийные простои на 15–20%, а использование IoT-решений повышает общую производительность на 25%. Комплексная цифровизация способна обеспечить снижение операционных издержек на 40%, капитальных затрат на 25% и увеличение коэффициента извлечения полезных ископаемых на 4%. Установлено, что 63% горнодобывающих предприятий прогнозируют значительное сокращение издержек в течение пятилетнего горизонта благодаря реализации цифровых проектов. Теоретическая значимость исследования заключается в развитии методического обеспечения оценки экономических эффектов цифровизации горной промышленности, включающего систему показателей прямого и косвенного экономического воздействия технологических решений. Практическая ценность работы определяется разработкой конкретных рекомендаций по оптимизации инвестиционных решений в области цифровой трансформации горнодобывающих предприятий и обоснованием приоритетных направлений технологической модернизации производства. Перспективы дальнейших исследований связаны с углубленным анализом влияния технологий искусственного интеллекта и генеративных моделей на долгосрочную финансовую устойчивость горнодобывающих компаний.

Ключевые слова: цифровая трансформация, горнодобывающая промышленность, экономическая эффективность, Индустрия 4.0, производственные издержки, цифровые двойники, интернет вещей

Для цитирования: Кучковская Н.В. Экономическая эффективность цифровой трансформации горнодобывающих предприятий в условиях технологической модернизации и решений Индустрии 4.0. *Горная промышленность*. 2025;(6):88–96. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96

Economic efficiency of digital transformation of mining companies in conditions of technological modernization and Industry 4.0 solutions

N.V. Kuchkovskaya ✉
Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
✉ nikvalentina2010@yandex.ru

Abstract: Digital transformation of the mining industry is a critical factor in enhancing the competitiveness of Russian companies in the face of global technological challenges and the need to optimize the production costs. The relevance of the study is defined by the large-scale introduction of Industry 4.0 technologies in the mining sector, which requires a comprehensive assessment of the economic effects of the digitalization of production and management processes. The aim of the work is to quantitatively assess the economic efficiency of implementing digital solutions in mining companies and to develop a methodological approach to identify the direct and indirect economic effects of digital transformation. The study uses methods of comparative analysis, statistical data processing, economic and mathematical modelling, as well as expert assessment. The empirical base includes data from 50 mining companies in Russia for the period of 2019–2024, the results of industry studies by consulting companies, and statistical materials from Rosstat. The results show that investments in digital technologies by mining companies grew from 4.2 billion RUB in 2019 to 7.4 billion RUB in 2024, representing a 76.2% increase. Introduction of integrated management systems reduces operating costs by 3–7%, increases labour productivity by 3–5% and boosts production by 5–7%. The use of digital twins reduces emergency downtime by 15–20%, while the use of IoT solutions increases overall productivity by 25%. Complex digitalization can reduce operating costs by 40%, capital costs by 25% and increase the mineral recovery rate by 4%. It has been established that 63% of the mining companies predict a significant reduction in costs over a five-year period thanks to the implementation of digital projects. The theoretical significance of the study lies in the development of methodological support for assessing the economic effects of digitalization in the mining industry, including a system of indicators of the direct and indirect economic impact of technological solutions. The practical value of the work is determined by the development of specific recommendations for optimizing investment decisions regarding digital transformation of mining companies and justification of priority areas for technological modernization of the operations. Prospects for further research are linked to an in-depth analysis of the impact of artificial intelligence technologies and generative models on the long-term financial sustainability of the mining companies.

Keywords: digital transformation, mining industry, economic efficiency, Industry 4.0, production costs, digital twins, Internet of Things

For citation: Kuchkovskaya N.V. Economic efficiency of digital transformation of mining companies in conditions of technological modernization and Industry 4.0 solutions. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):88–96. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-88-96

Введение

Современная горнодобывающая промышленность функционирует в условиях фундаментальных преобразований, детерминированных императивами технологической модернизации и цифровой трансформации. Масштабное внедрение технологий Индустрии 4.0 обусловлено необходимостью повышения операционной эффективности и обеспечения конкурентоспособности. Интеграция интеллектуальных систем управления, цифровых двойников, технологий интернета вещей и решений на основе искусственного интеллекта формирует качественно новую парадигму организации горнодобывающего производства [1]. Горнодобывающая отрасль демонстрирует одни из наиболее высоких темпов цифровизации среди традиционных секторов промышленности [2].

Концептуальный анализ литературы выявляет несколько доминирующих исследовательских направлений. Первое фокусируется на технологических аспектах внедрения цифровых решений [3]. Второе концентрируется на организационно-управленческих аспектах цифровизации [4]. Третье исследует экономические последствия внедрения цифровых технологий. Значительный вклад внесли работы, анализирующие международный опыт внедрения технологий Индустрии 4.0 [5]. Однако критический анализ обнаруживает недостаточную проработанность методологических подходов к комплексной оценке экономической эффективности. Терминологический анализ обнаруживает значительную вариативность в определении ключевых понятий. Под цифровой трансформацией понимается комплексный процесс фундаментального изменения производственных, управленческих и бизнес-процессов посредством внедрения цифровых технологий. Технологии Индустрии 4.0 включают интегрированную совокупность решений на основе интернета вещей, искусственного интеллекта, больших данных, машинного обучения и цифровых двойников [6]. Экономическая эффективность цифровизации определяется как соотношение достигнутых экономических результатов и затрат на внедрение. Анализ исследований выявляет значимые пробелы. Во-первых, отсутствует комплексная методология оценки экономической эффективности [7]. Во-вторых, недостаточно изучены факторы, детерминирующие различия в результативности проектов цифровизации [8]. В-третьих, слабо проработана проблематика долгосрочных экономических последствий. В-четвертых, отсутствует систематический анализ барьеров цифровой трансформации [9].

Новизна исследования определяется систематизацией эмпирических данных о результатах внедрения различных типов цифровых технологий на российских предприятиях и выявлением количественных закономерностей влияния цифровизации на экономические показатели [10]. Практическая значимость обусловлена возможностью использования результатов для обоснования инвестиционных решений [11]. Результаты вносят вклад в развитие теоретических представлений о механизмах создания экономической ценности посредством цифровой трансформации [12].

Экономическая эффективность цифровой трансформации в горнодобыче проявляется не в количестве внедрённых технологий, а в приросте ценности по ключевым метрикам: себестоимость на тонну, извлечение, OEE, простоевость, энергия и вода на тонну, безопасность и оборотный капитал [13]. В условиях технологической модернизации и Индустрии 4.0 предприятие получает возможность «сшить» геологические данные, производство и логистику в единую сквозную систему управления, где решения принимаются на основе данных в реальном времени, а не постфактум [14; 15]. Это переводит операционную модель от реактивной к предиктивной и позволяет стабилизировать качество руды, загрузку оборудования и ритмичность поставок [16].

Ключевые драйверы экономии – предиктивное обслуживание (снижение незапланированных простоев), интеллектуальный диспетчинг горной техники, оптимизация буровзрывных работ и управление качеством руды (ore blending) на основе цифровых моделей месторождения [17]. Дополняют эффект цифровые двойники участков и фабрик, которые позволяют прогонять «что-если» сценарии без риска для производства, а также автоматизация рутинных процессов: от автономного самосвала до компьютерного зрения на конвейерах [18]. В совокупности это даёт прирост производительности, более высокий коэффициент извлечения и сокращение расхода энергии и реагентов – то есть прямое влияние на EBITDA и денежный поток [19].

Экономика внедрения должна оцениваться через TCO и ROI портфеля кейсов, а не «одиночных пилотов» [20]. Практично двигаться по stage-gate: быстрые пилоты с чётким бизнес-кейсом → промышленный масштаб → тиражирование [21]. В архитектуре – ставка на интероперабельность (открытые протоколы, API), прочную связь OT/IT (MES–ERP–SCADA–IoT), edge-вычисления для удалённых/подземных участков и кибербезопасность по принципу zero trust [22]. Отдельная статья экономии – повторное использование платформы данных и аналитических компонентов между карьерами и обогатительными фабриками, что снижает капитальные и операционные затраты при масштабировании.

Материалы и методы

Методологическая архитектура базируется на интеграции количественных и качественных методов анализа. Методический инструментарий включает сравнительный анализ технико-экономических показателей предприятий до и после внедрения цифровых решений, статистическую обработку данных, экономико-математическое моделирование зависимостей между инвестициями и изменениями ключевых показателей эффективности, а также экспертную оценку качественных эффектов. Исследование реализовано в четыре этапа. На первом этапе осуществлялся сбор вторичных данных из открытых источников за 2019–2024 гг. На втором этапе проводился анализ статистических данных Росстата о затратах на внедрение цифровых технологий, динамике производительности труда и изменении структуры операционных издержек. На третьем этапе осуществлялась обработка данных специализированных отраслевых исследований цифровизации, проведенных консалтинговыми компаниями в 2023–2024 гг. На четвертом этапе реализовывалось экономико-математическое моделирование зависимостей между объемом инвестиций в цифровые технологии и достигаемыми экономическими эффектами.

Эмпирическая база сформирована на основе интеграции данных из множественных источников. Первичный массив включает информацию о 50 крупнейших горнодобывающих предприятиях России, находящихся на различных стадиях реализации программ цифровой трансформации. Вторичные источники охватывают результаты двух масштабных отраслевых исследований цифровизации, проведенных консалтинговой компанией «Яков и Партнёры» совместно с ГК «Цифра» в 2023 и 2024 годах на основе опроса 130 респондентов из 50 горнодобывающих компаний. Дополнительным источником выступают публичные отчеты ведущих предприятий.

Обеспечение качества реализовано посредством комплекса процедур валидации данных и верификации выводов. Валидность методов обеспечивается их широким признанием в международной практике исследований экономической эффективности технологических инноваций. Надежность данных проверялась сопоставлением информации из различных источников. Репрезентативность выборки обеспечивается включением предприятий различного масштаба и специализации. Использование множественных источников данных и методов анализа реализует принцип триангуляции.

Результаты

Анализ динамики инвестиций горнодобывающих предприятий в цифровые технологии за период 2019–2024 гг. выявляет устойчивую тенденцию к росту затрат на технологическую модернизацию производства. Согласно данным Росстата совокупный объем инвестиций в цифровые решения в секторе добычи полезных ископаемых увеличился с 4,2 млрд руб. в 2019 г. до 7,4 млрд руб. в 2024 г., что соответствует росту на 76,2% и свидетельствует о признании руководством компаний стратегической значимости цифровизации (табл. 1). Примечательно, что наиболее интенсивный рост инвестиций наблюдается в 2023–2024 гг., когда доля компаний, планирующих увеличение эффектов от цифровизации в ближайшие 2–3 года, выросла почти в четыре раза по сравнению с 2023 г. Структурный анализ инвестиций демонстрирует преимущественную концентрацию затрат на цифровизации непосредственно производственных процессов, тогда как внедрение цифровых технологий в корпоративные функции и управленческие процессы характеризуется относительно меньшей интенсивностью. Данная диспропорция отражает приоритизацию горнодобывающими компаниями проектов с наиболее очевидным и измеримым экономическим эффектом, связанных с повышением производительности оборудования и оптимизацией технологических параметров производства.

Таблица 1
Динамика инвестиций в цифровые технологии предприятий горнодобывающей промышленности России в 2019–2024 гг.

Table 1
Dynamics of investment in digital technologies by Russian mining companies in 2019–2024

Показатель	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Инвестиции, млрд руб.	4,2	5,1	7,4	6,2	6,8	7,4
Темп роста к предыдущему году, %	–	121,4	145,1	83,8	109,7	108,8
Доля в общих инвестициях отрасли, %	1,7	1,9	2,4	2,1	2,3	2,5
Количество предприятий-инвесторов	38	42	47	44	48	50
Средний объем инвестиций на предприятие, млн руб.	110,5	121,4	157,4	140,9	141,7	148,0

Примечание: Данные таблицы составлены на основе статистических материалов Росстата и результатов отраслевых исследований консалтинговых компаний. Снижение инвестиций в 2022 г. обусловлено макроэкономической нестабильностью и ростом себестоимости добычи, приведшими к сокращению инвестиционных программ 50% предприятий горно-металлургического комплекса. Восстановление инвестиционной активности в 2023–2024 гг. отражает адаптацию компаний к новым условиям и осознание критической значимости цифровизации для поддержания конкурентоспособности.
Note: The data in the table is based on Rosstat statistics and the results of industry research conducted by consulting companies. A decline in investment in 2022 is due to macroeconomic instability and rising production costs, which led to a reduction in investment programmes of 50% of the mining and metallurgical companies. The recovery of investment activity in 2023–2024 reflects companies' adaptation to new conditions and their awareness of the critical importance of digitalization to maintain competitiveness.

Оценка экономической эффективности внедрения интегрированных систем управления производством демонстрирует значительный потенциал данного типа цифровых решений для оптимизации операционных процессов горнодобывающих предприятий. Результаты анализа показывают, что применение интегрированных удаленных центров управления обеспечивает повышение производительности труда на 3–5% и сопоставимое снижение эксплуатационных расходов (табл. 2). Механизм формирования данных эффектов связан с оптимизацией координации производственных процессов, сокращением временных потерь при переналадке оборудования, повышением скорости принятия управленческих решений на основе данных реального времени и улучшением использования производственных мощностей. Характерно, что наибольшая эффективность интегрированных систем управления достигается на предприятиях с территориально распределенной структурой производственных объектов, где преимущества централизованного управления и удаленного мониторинга проявляются наиболее отчетливо. Вместе с тем реализация полного потенциала интегрированных систем управления требует не только технологических инвестиций, но и организационной трансформации, включающей пересмотр бизнес-процессов, перераспределение функциональных обязанностей и формирование новых компетенций персонала.

Анализ динамики инвестиций горнодобывающих предприятий в цифровые технологии за период 2019–2024 гг. выявляет устойчивую тенденцию к росту затрат на технологическую модернизацию производства. Совокупный объем инвестиций увеличился с 4,2 млрд руб. в 2019 г. до 7,4 млрд руб. в 2024 г., что соответствует приросту на 76,2%. Наиболее интенсивный рост наблюдается в 2020–2021 гг. (темп роста 145,1% в 2021 г.), тогда как снижение инвестиций в 2022 г. (до 6,2 млрд руб.) обусловлено макроэкономической нестабильностью. Доля цифровых инвестиций в общих капиталовложениях отрасли возросла с 1,7% до 2,5%, а количество предприятий-инвесторов увеличилось с 38 до 50, что свидетельствует о признании руководством компаний стратегической значимости цифровизации (рис. 1).

Внедрение технологии цифровых двойников горнотехнических объектов демонстрирует высокую эффективность в контексте оптимизации планирования производства,

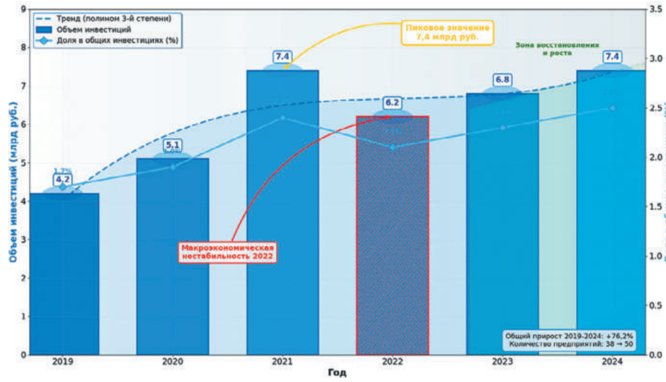

Рис. 1
Динамика инвестиций в цифровые технологии горнодобывающих предприятий России (2019–2024 гг.)

Fig. 1
Dynamics of investment in digital technologies by Russian mining companies (2019–2024)

прогнозирования отказов оборудования и моделирования альтернативных сценариев развития горных работ. Согласно результатам анализа применение цифровых двойников обеспечивает снижение эксплуатационных расходов на 3–7%, повышение производительности труда на 1–2% и повышение надежности оборудования на 1–3% (табл. 3). Ключевое преимущество цифровых двойников заключается в возможности проведения виртуальных экспериментов производственными процессами без риска нарушения реального производства, что позволяет выявлять оптимальные режимы работы оборудования и идентифицировать потенциальные проблемы до их проявления в реальном производстве. Особенно значимый эффект достигается при использовании цифровых двойников для прогнозного обслуживания оборудования, позволяющего предотвращать незапланированные остановки производства и оптимизировать периодичность технического обслуживания. Вместе с тем создание полноценных цифровых двойников сложных горнотехнических систем представляет собой технологически сложную задачу, требующую значительных инвестиций в сенсорную инфраструктуру, вычислительные мощности и специализированное программное обеспечение, что объясняет относительно медленные темпы распространения данной технологии.

Таблица 2
Экономические эффекты внедрения различных типов цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях

Table 2
Economic effects from implementing different types of digital technologies in mining companies

Тип цифровой технологии	Снижение эксплуатационных расходов, %	Повышение производительности труда, %	Повышение надежности оборудования, %	Сокращение аварийных простоев, %
Интегрированные системы управления	3–5	3–5	2–4	10–15
Цифровые двойники	3–7	1–2	1–3	15–20
IoT-решения и сенсорные сети	4–6	3–4	3–5	15–20
Системы на основе ИИ и машинного обучения	5–8	4–6	4–6	20–25
Автономное оборудование	8–12	5–10	2–4	10–12
Комплексные цифровые решения	10–15	8–12	5–8	25–30

Примечание: Данные таблицы агрегированы на основе результатов внедрения цифровых технологий на 50 крупнейших горнодобывающих предприятиях России за период 2019–2024 гг. Диапазоны значений отражают вариативность эффектов в зависимости от специфики горно-геологических условий, технологических характеристик производства и масштаба внедрения цифровых решений. Комплексные цифровые решения подразумевают синергетическую интеграцию множественных технологий, обеспечивающую кумулятивный эффект, превышающий сумму эффектов от применения отдельных технологических решений.
Note: The data in the table is aggregated based on the results of introducing digital technologies at the 50 largest mining companies in Russia for the period of 2019-2024. The ranges of values reflect the variability of effects depending on the specific mining and geological conditions, technological characteristics of production, and the scale of digitalization. Complex digital solutions involve a synergistic integration of multiple technologies, providing a cumulative effect that exceeds the total effect of all the technological solutions applied separately.

Таблица 3
Результаты внедрения цифровых двойников на горнодобывающих предприятиях в 2022–2024 гг.

Table 3
Results of implementing digital twins in mining companies in 2022–2024

Предприятие / Объект цифрового двойника	Снижение эксплуатационных расходов, %	Повышение производительности, %	Сокращение простоев, %	Период окупаемости инвестиций, мес.
Угольный карьер (НТС)	5,2	1,8	18,5	24
Алмазодобывающее предприятие (АЛРОСА)	4,7	1,3	17,2	28
Трубопрокатное производство (ТМК)	6,3	2,1	16,8	22
Портовый терминал (НТС)	3,8	1,5	14,3	30
Вагоноремонтный завод (НТС)	4,1	1,7	15,7	26
Рудник цветных металлов	5,8	1,9	19,2	25
Среднее значение	5,0	1,7	16,9	25,8

Примечание: Данные таблицы основаны на публичных отчетах компаний о результатах внедрения цифровых двойников. Период окупаемости рассчитан с учетом полных затрат на создание цифрового двойника, включая инфраструктурные инвестиции, ПО и затраты на интеграцию. Вариативность показателей отражает различия в сложности моделируемых объектов, полноте реализации функционала и зрелости процессов использования получаемых данных в управлении производством.
Note: The data in the table is based on companies' public reports on the results of implementing digital twins. The payback period is calculated with account of the full cost of creating a digital twin, including infrastructure investments, software, and integration costs. Variability of the indicators reflects the differences in the complexity of the modelled objects, the completeness of their functionality implementation, and the maturity of the processes used in production management.

Применение решений на основе интернета вещей и сенсорных сетей обеспечивает повышение прозрачности производственных процессов и создает информационную основу для принятия оперативных решений. Результаты внедрения IoT-технологий демонстрируют сокращение аварийных простоев на 15–20% за счет своевременного выявления отклонений в работе оборудования (табл. 4). Более 70% горнодобывающих предприятий уже внедрили IoT-решения для мониторинга техники и контроля безопасности. Экономический эффект формируется за счет оптимизации расходования ресурсов, снижения издержек на внеплановый ремонт, повышения коэффициента использования мощностей и улучшения условий труда. По прогнозам экспертов, к 2030 г. доля компаний с интегрированными IoT-экосистемами возрастет на 40%, что обеспечит дальнейшее повышение производительности на 25% и улучшение прозрачности управления ресурсами.

Оценка экономической эффективности различных типов цифровых технологий демонстрирует значительный разброс показателей в зависимости от характера внедряемых решений. Наибольший совокупный эффект обеспечивают комплексные цифровые решения, предполагающие синергетическую интеграцию множественных технологий: снижение эксплуатационных расходов на 10–15%, повышение производительности труда на 8–12% и сокращение аварийных простоев на 25–30%. Системы на основе искусственного интеллекта демонстрируют оптимальное соотношение эффективности (снижение расходов до 8%, сокращение простоев до 25%) и периода внедрения. IoT-решения и сенсорные сети показывают сбалансированное влияние на все исследуемые параметры при относительно невысокой сложности реализации. Базовые интегрированные системы управления, несмотря на умеренные показатели эффективности (3–5% по основным параметрам), характеризуются наименьшими рисками внедрения и могут рассматриваться как стартовая точка цифровой трансформации предприятия (рис. 2).

Внедрение систем на основе искусственного интеллек-

Таблица 4
Эффективность применения IoT-решений в горнодобывающей промышленности в 2023–2024 гг.

Table 4
Efficiency of implementing the IoT solutions in the mining industry in 2023–2024

Область применения IoT	Доля предприятий, внедривших решение, %	Средний прирост эффективности, %	Снижение издержек, %	Повышение безопасности (качественная оценка)
Мониторинг состояния горнотранспортного оборудования	72	15–18	12–15	Высокое
Контроль параметров буровзрывных работ	58	10–12	8–10	Очень высокое
Управление энергопотреблением	64	18-22	15-20	Среднее
Мониторинг геомеханических параметров	47	12–15	8–12	Очень высокое
Контроль качества руды	53	8–10	6–8	Низкое
Система промышленной безопасности	81	25–30	10–12	Критическое

Примечание: Данные таблицы получены на основе опроса 130 респондентов из 50 горнодобывающих компаний, проведенного в рамках отраслевого исследования консалтинговых компаний «Яков и Партнёры» и ГК «Цифра» в 2024 г. Качественная оценка повышения безопасности базируется на экспертных суждениях специалистов по охране труда и промышленной безопасности. Вариативность показателей эффективности обусловлена различиями в масштабе внедрения IoT-решений, интеграции с существующими информационными системами и зрелости процессов использования получаемых данных для принятия управленческих решений.
Note: The data in the table is based on a survey of 130 respondents from 50 mining companies conducted as part of an industry research performed by the Yakov & Partners consulting company and the Zyfra Group in 2024. The qualitative assessment of the safety improvements is based on the expert opinions of occupational health and safety specialists. Variability of the performance indicators is due to the differences in the scale of IoT solution implementation, integration with the existing information systems, and the maturity of processes to use the data obtained in management decision-making.

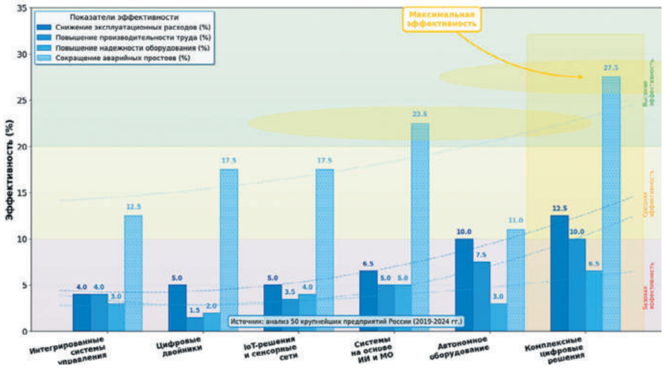

Рис. 2
Экономические эффекты внедрения различных типов цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях

Fig. 2
Economic effects from implementing different types of digital technologies in mining companies

та и машинного обучения открывает новые возможности для оптимизации производственных процессов. Результаты применения ИИ-решений демонстрируют снижение эксплуатационных расходов на 5–8%, повышение производительности труда на 4–6% и сокращение аварийных простоев на 20–25% (табл. 5). Особенно высокая эффективность достигается в задачах прогнозного обслуживания оборудования, оптимизации параметров буровзрывных работ, управления логистическими потоками и контроля качества сырья. Технологии машинного зрения обеспечивают автоматизацию контроля целостности конвейерных лент, выявление дефектов оборудования и мониторинг соблюдения требований безопасности. Рекомендательные системы на основе ИИ позволяют оптимизировать маршруты движения и режимы работы самосвалов, обеспечивая повышение производительности на 17% и увеличение коэффициента использования оборудования на 25%. Внедрение ИИ-решений сталкивается с барьерами: высокая сложность адаптации алгоритмов к специфике производственных условий, необходимость обширных данных для обучения моделей и дефицит специалистов по машинному обучению в горной промышленности.

Комплексный анализ перспектив цифровой трансформации выявляет позитивную динамику ожиданий руководителей при сохранении значимых барьеров. Доля компаний, прогнозирующих выход российской отрасли в мировые лидеры цифровизации, возросла с 20 до 25% (+5 п.п.), тогда как доля скептиков снизилась с 48 до 44% (–4 п.п.). Существенно выросли ожидания относительно экономических эффектов: 63% компаний прогнозируют значительное сокращение издержек в пятилетнем горизонте (+5 п.п.), а 52% достигают плановых целей цифровизации (+4 п.п.). Однако доля респондентов, указывающих на рост сложности внедряемых решений, увеличилась до 43% (+4 п.п.), а проблема недостатка компетенций остается критической для 40% компаний (+3 п.п.). Положительная динамика всех показателей в 2024 г. отражает адаптацию компаний к вызовам цифровой трансформации и накопление практического опыта реализации технологических проектов (рис. 3).

Комплексный анализ перспектив цифровой трансформации горнодобывающей промышленности выявляет существенный нереализованный потенциал технологической модернизации отрасли. Результаты опроса руководителей горнодобывающих компаний демонстрируют, что 63% респондентов ожидают значительного сокращения издержек в течение пятилетнего горизонта благодаря реализации цифровых проектов, тогда как 50% прогнозируют существенное увеличение объемов производства (табл. 6). Примечательно, что доля компаний, рассматривающих возможность достижения мирового лидерства в области цифровизации, выросла с 20% в 2023 г. до 25% в 2024 г., что свидетельствует о повышении уверенности отрасли в технологических перспективах. Вместе с тем реализация потенциала цифровой трансформации сталкивается с рядом серьезных барьеров. Согласно данным исследования, 43% респондентов указывают на рост сложности внедряемых решений как ключевую проблему, требующую развития внутренних компетенций и привлечения высококвалифицированных специалистов. Для 40% компаний критической проблемой является недостаток компетенций в области управления проектами цифровой трансформации, что

Таблица 5
Экономический эффект внедрения решений на основе искусственного интеллекта на горнодобывающих предприятиях

Table 5
Economic effects of implementing artificial intelligence solutions in mining companies

Тип ИИ-решения	Область применения	Повышение эффективности процесса, %	Экономический эффект, млн руб/год	Срок внедрения, мес.
Прогнозное обслуживание	Горнотранспортное оборудование	20–25	45–78	12–18
Машинное зрение	Контроль качества и безопасности	30–35	28–52	8–12
Оптимизация БВР	Буровзрывные работы	15–18	62–95	14–20
Рекомендательные системы	Управление горнотранспортным комплексом	17–22	85–142	10–16
Генеративный ИИ	Анализ геологоразведочных данных	10–15	35–68	16–24
Прогнозирование отказов	Критическое оборудование	25–30	72–126	12–18

Примечание: Данные таблицы основаны на результатах внедрения ИИ-решений на ведущих горнодобывающих предприятиях России за 2022–2024 гг., включая проекты АЛРОСА, Распадской угольной компании, Норильского никеля и других лидеров отрасли. Экономический эффект рассчитан для предприятия среднего масштаба с годовым объемом добычи 5–7 млн т руды. Срок внедрения включает период от начала проекта до достижения проектной эффективности.
Note: The data in the table is based on the results of implementing AI solutions at leading Russian mining companies in 2022–2024, including projects by ALROSA, Raspadskaya Coal Company, Norilsk Nickel and other industry leaders. The economic effect is calculated for a medium-sized operation with the annual ore mining volume of 5–7 million tonnes. The implementation period includes the period from the project launch to the point in time when the project reaches its design efficiency.

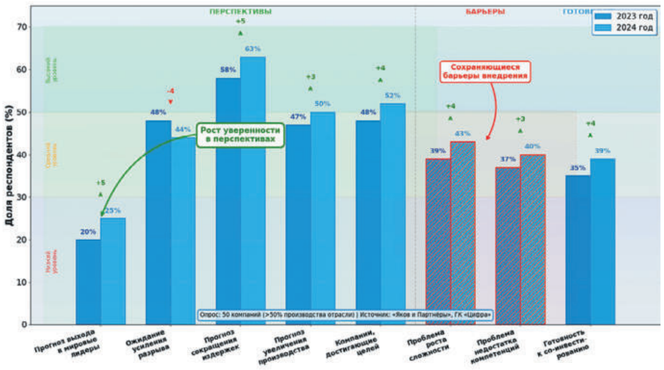

Рис. 3
Оценка перспектив и барьеров цифровой трансформации горнодобывающей промышленности России (2023–2024 гг.)

Fig. 3
Assessment of the prospects and barriers to digital transformation in the Russian mining industry (2023–2024)

обусловлено обостряющимся дефицитом руководителей ИТ-проектов в условиях повышенной конкуренции со стороны технологических компаний.

Теоретическая значимость исследования определяется развитием методологического подхода к оценке экономической эффективности цифровой трансформации горнодобывающих предприятий. Систематизация эмпирических данных позволяет выявить закономерности формирования экономических эффектов в зависимости от характеристик производства, организационных особенностей и специфики реализации проектов. Эффективность проявляется не только в снижении операционных издержек и повышении производительности, но и в косвенных эффектах: повышении безопасности, улучшении экологических характеристик, снижении профессиональных рисков и повышении привлекательности для инвесторов. Динамика инвестиций в цифровые технологии демонстрирует устойчивую тенденцию к росту после временного снижения в 2022 г. Восстановление в 2023–2024 гг. отражает адаптацию компаний и осознание критической значимости цифровизации. Доля компаний, планирующих увеличение эффектов от цифровизации, выросла почти в четыре раза. Среднее снижение эксплуатационных расходов при внедрении цифровых двойников составляет 5,0%, повышения производительности – 1,7%, сокращения простоев – 16,9%, при периоде окупаемости 25,8 мес. Более 70% предприятий внедрили IoT-решения для мониторинга техники, 81% используют системы промышленной безопасности на основе интернета вещей. К 2030 г. доля компаний с интегрированными IoT-экосистемами возрастет на 40%. Экономический эффект от рекомендательных систем на основе ИИ достигает 85–142 млн руб. в год для предприятия среднего масштаба.

Общая динамика характеризуется переходом от экспериментального внедрения отдельных решений к формированию комплексных цифровых экосистем. Наблюдается смещение фокуса от цифровизации отдельных процессов к трансформации корпоративных функций и управленческих систем. Возрастает роль технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Доля компаний, рассматривающих выход в мировые лидеры цифровизации, выросла с 20 до 25%, тогда как доля скептиков сократилась с 48 до 44%. Однако 63% предприятий ожидают значительного сокращения издержек только в пятилетнем горизонте. Основными барьерами остаются рост сложности внедряемых решений (43% респондентов) и недостаток компетенций (40% компаний).

Заключение

Результаты исследования подтверждают гипотезу о высокой экономической эффективности цифровой трансформации горнодобывающих предприятий. Инвестиции в цифровые технологии увеличились с 4,2 млрд руб. в 2019 г. до 7,4 млрд руб. в 2024 г. (рост на 76,2%). Внедрение интегрированных систем управления обеспечивает повышение производительности труда на 3–5% и снижение эксплуатационных расходов на аналогичную величину. Применение цифровых двойников демонстрирует снижение расходов на 3–7%, повышение производительности на 1–2% и сокращение аварийных простоев на 15–20%. IoT-решения обеспечивают прирост производительности на 25% и сокращение простоев на 15–20%. Системы на основе ИИ демонстрируют наиболее высокую эффективность: сни-

Таблица 6. Оценка перспектив и барьеров цифровой трансформации горнодобывающей промышленности России

Table 6. Assessment of the prospects and barriers to digital transformation in the Russian mining industry

Показатель / Фактор	2023	2024	Изменение, п.п.
Прогноз выхода в мировые лидеры цифровизации, % компаний	20	25	+5
Ожидание усиления технологического разрыва, % компаний	48	44	-4
Прогноз значительного сокращения издержек (5 лет), %	58	63	+5
Прогноз увеличения объема производства, %	47	50	+3
Компании, достигающие плановых целей цифровизации, %	48	52	+4
Проблема роста сложности решений, %	39	43	+4
Проблема недостатка компетенций, %	37	40	+3
Готовность к со-инвестированию в создание ПО, %	35	39	+4

Примечание: Данные таблицы получены на основе опросов топ-менеджеров горнодобывающих компаний, проведенных консалтинговыми компаниями «Яков и Партнёры» и ГК «Цифра» в 2023 и 2024 гг. Выборка исследования включает представителей 50 компаний горно-металлургической отрасли, представляющих более половины объема производства отрасли. Положительная динамика показателей в 2024 г. отражает адаптацию компаний к вызовам цифровой трансформации и накопление опыта реализации цифровых проектов, тогда как сохранение значительной доли скептически настроенных респондентов свидетельствует о наличии системных проблем, требующих комплексного решения.

Note: The data in the table is derived from surveys of top managers of mining companies conducted by the Yakov & Partners consulting company and the Zyfra Group in 2023 and 2024. The surveyed group includes representatives of 50 companies in the mining and metallurgical industry, accounting for more than half of the industry's production volume. Positive dynamics of the 2024 indicators reflects the adaptation of the companies to the challenges of digital transformation and the accumulation of experience in implementing digital projects, while the remaining significant share of skeptically-minded respondents indicates the existence of system-level problems that require a comprehensive approach.

жение эксплуатационных расходов на 5–8%, повышение производительности на 4–6% и сокращение простоев на 20–25%. Комплексная цифровизация способна обеспечить снижение операционных издержек на 10–15%, повышение производительности труда на 8–12% и сокращение аварийных простоев на 25–30%. Международный опыт свидетельствует о возможности более значительных эффектов: сокращения потребления электроэнергии на 40%, снижения капитальных затрат на 25% и повышения коэффициента извлечения полезных компонентов на 4%.

Список литературы / References

1. Карпова С.В., Устинова О.Е. Технологические и маркетинговые тенденции в горнодобывающей промышленности. *Горная промышленность*. 2025;(3):170–179. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-170-179
Karpova S.V., Ustinova O.E. Technological and marketing trends in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):170–179. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-170-179
2. Красавина Е.В. Цифровизация экологического мониторинга урбанизированных территорий: интеграционный подход к оценке качества воздуха на основе гетерогенных источников данных. *Вопросы экологии*. 2023;13(1):36–50. Режим доступа: https://grreview.ru/index.php/wej/article/view/188 (дата обращения: 29.04.2025).
Krasavina E.V. Digitalization of environmental monitoring of urbanized territories: an integrated approach to air quality assessment based on heterogeneous data sources. *Voprosy Ecologii*. 2023;13(1):36–50. (In Russ.) Available at: https://grreview.ru/index.php/wej/article/view/188 (accessed: 29.04.2025).
3. Кучковская Н.В., Харитонова Е.Н., Заславская И.В., Полевой С.А., Смирнов В.В. Интеграция интеллектуальных систем учета и управления в процессы разработки угольных месторождений и добычи. *Уголь*. 2025;(3):69–78. Режим доступа: https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2503069.pdf (дата обращения: 29.04.2025).
Kuchkovskaya N.V., Kharitonova E.N., Zaslavskaya I.V., Polevoy S.A., Smirnov V.V. Integration of smart accounting and control systems into the processes of coal field development and coal production. *Ugol'*. 2025;(3):69–78. (In Russ.) Available at: https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2503069.pdf (accessed: 29.04.2025).
4. Рождественская И.А., Беляев А.М., Лукичев К.Е., Зубенко А.В., Лаффах А.М. Разработка интеллектуальных распределённых систем хранения и анализа данных для оптимизации горного производства и управления угольной добычей. *Горная промышленность*. 2025;(2):56–64. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-56-64
Rozhdestvenskaya I.A., Belyaev A.M., Lukichev K.E., Zubenko A.V., Laffakh A.M. Development of smart distributed data storage and analysis systems for optimization of mining operations and coal mining management. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):56–64. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-56-64
5. 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
6. Лукичёв С.В. Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий. *Горная промышленность*. 2021;(4):73–79. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-73-79
Lukichev S.V. Digital past, present, and future of mining industry. *Russian Mining Industry*. 2021;(4):73–79. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-4-73-79
7. Братарчук Т.В., Гладышев А.Г., Лукичев К.Е., Данилькевич М.А., Комов В.Э. Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации и устойчивого развития угольной промышленности России. *Уголь*. 2024;(11):108–116. Режим доступа: https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2411108.pdf (дата обращения: 29.04.2025).
Bratarchuk T.V.1, Gladyshev A.G., Lukichev K.E., Danilkevich M.A., Komov V.E. Development and implementation of digital twins for optimization and sustainable development of the coal industry in Russia. *Ugol'*. 2024;(11):108–116. (In Russ.) Available at: https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2411108.pdf (accessed: 29.04.2025).
8. Журавков М.Л., Николаев А.В., Кычкин А.В., Пресняков А.А. Исследование инструментов цифровых трансформаций подземных горнодобывающих предприятий в аспекте управления спросом на электроэнергию. *Уголь*. 2023;(9):55–62. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-55-62
Zhuravkov M.L., Nikolaev A.V., Kychkin A.V., Presnyakov A.A. Research of the digital transformation tools for the underground mining enterprises from an electricity demand response perspective. *Ugol'*. 2023;(9):55–62. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-55-62
9. Рождественская И.А., Завалько Н.А., Лукичев К.Е., Зубенко А.В., Лаффах А.М. Применение технологий больших данных для повышения устойчивости и эффективности угольной промышленности в условиях цифровой трансформации отрасли. *Уголь*. 2025;(1):82–92. Режим доступа: https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2501082.pdf (дата обращения: 29.04.2025).
Rozhdestvenskaya I.A., Zaval'ko N.A., Lukichev K.E., Zubenko A.V., Laffakh A.M. Application of big data technologies to improve sustainability and efficiency of the coal industry in conditions of digital transformation of the industry. *Ugol'*. 2025;(1):82–92. (In Russ.) Available at: https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2501082.pdf (accessed: 29.04.2025).
10. Рыльникова М.В., Струков К.И., Радченко Д.Н., Есина Е.Н. Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем. *Горная промышленность*. 2021;(3):74–78. https://doi.org/10.30686/1609-91922021-3-74-78
Rylnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina E.N. Digital transformation: a prerequisite and foundation for sustainable development of mining operations. *Russian Mining Industry*. 2021;(3):74–78. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-3-74-78
11. Рыльникова М.В. Условия и принципы устойчивого развития горнодобывающих предприятий в период повышенных рисков и глобальных вызовов. *Горная промышленность*. 2022;(3):69–73. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-69-73
Rylnikova M.V. Conditions and principles for sustainable development of mining companies during a period of higher risks and global challenges. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):69–73. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-69-73

12. Савон Д.Ю., Шкарупета Е.В., Сафронов А.Е., Анисимов А.Ю., Вихрова Н.О. Цифровая трансформация производственных процессов и бизнес-моделей горнодобывающей промышленности в условиях рыночной нестабильности. *Уголь*. 2021;(2):32–37. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-32-37
Savon D.Yu., Shkarupeta E.V., Safronov A.E., Anisimov A.Yu., Vichrova N.O. Digital transformation of production processes and mining business models in the conditions of market instability. *Ugol'*. 2021;(2):32–37. (In Russ.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-2-32-37
13. Никитенко С.М., Гоосен Е.В., Каган Е.С. Оценка приоритетности направлений инновационно-технологического развития горнодобывающих территорий. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2025;17(1):282–294. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-1-282-294
Nikitenko S.M., Goosen E.V., Kagan E.S. Assessment of innovative and technological development priority of mining territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025;17(1):282–294. (In Russ.) https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-1-282-294
14. 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
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. 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
Kargpova 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
18. Кудрявцев В.Л., Забайкин Ю.В., Арсаханова З.А., Чумакова О.В. Интеллектуальное управление и автоматизированное регулирование в угольной промышленности: трансформация технологических систем в эпоху цифровизации. *Горная промышленность*. 2025;(3):153–163. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-153-163
Kudryavtsev V.L., Zabaikin Yu.V., Arsakhanova Z.A., Chumakova O.V. Smart control and automated regulation in the coal industry: transforming industrial process systems in the digital age. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):153–163. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-153-163
19. 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
20. Борисова О.В. Прогнозирование доходов федерального бюджета с использованием MIDAS-моделей. *Экономика. яНалоги. Право*. 2024;17(6):89–100. Режим доступа: https://etl.fa.ru/jour/article/view/148 (дата обращения: 29.04.2025).
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: 29.04.2025).
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
Кучковская Наталья Валерьевна – кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: nk2@list.ru

Information about the author
Natalia V. Kuchkovskaya – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: nk2@list.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 02.09.2025
Поступила после рецензирования: 27.10.2025
Принята к публикации: 05.11.2025

Article info
Received: 02.09.2025
Revised: 27.10.2025
Accepted: 05.11.2025