

# Разработка интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия на основе технологий индустрии 4.0 и циркулярной экономики

Н.В. Цхададзе<sup>1</sup>✉, Н.В. Кучковская<sup>1</sup>, М.П. Бондаренко<sup>2</sup>, В.Б. Фролова<sup>1</sup>, М.П. Лазарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ nelly-vic@mail.ru

**Резюме:** Актуальность разработки интеллектуальных систем управления жизненным циклом горнодобывающих предприятий обусловлена рядом глобальных вызовов, определяющих развитие отрасли, таких как истощение легкодоступных месторождений, рост затрат на геологоразведку и добычу, ужесточение экологических требований, цифровизация и автоматизация производственных процессов. Цель исследования – создание научно-методологического и программно-технического обеспечения для повышения эффективности, безопасности и устойчивости горной добычи в условиях истощения минерально-сырьевой базы, ужесточения экологических требований и цифровой трансформации отрасли. Методология исследования базируется на комплексном применении методов системного анализа, математического моделирования, оптимизации и проектирования информационных систем. Эмпирической основой служат данные геологических и геофизических изысканий, технологические и экономические параметры процессов добычи и обогащения, экологические и социальные индикаторы. В результате разработаны концептуальная модель и архитектура интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия, методы и алгоритмы оптимизации ключевых процессов горной добычи с учетом принципов циркулярной экономики, а также прототип системы, апробированный на данных реальных горнодобывающих предприятий России. Полученные результаты обладают значительной теоретической и практической ценностью, открывая перспективы для масштабирования и коммерциализации интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия в горнодобывающей отрасли.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, жизненный цикл, горнодобывающее предприятие, индустрия 4.0, циркулярная экономика, цифровая трансформация

**Для цитирования:** 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>

## Designing a smart life cycle management system for a mining enterprise based on Industry 4.0 and circular economy technologies

N.V. Tskhadadze<sup>1</sup>✉, N.V. Kuchkovskaya<sup>1</sup>, M.P. Bondarenko<sup>2</sup>, V.B. Frolova<sup>1</sup>, M.P. Lazarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

✉ nelly-vic@mail.ru

**Abstract:** The relevance of designing smart life cycle management systems for mining enterprises is defined by a number of global challenges that determine the development of the industry, such as the depletion of easily accessible deposits, increasing exploration and production costs, increasingly stringent environmental requirements, digitalization and automation of production processes. The purpose of the research is to create a research methodology and software and hardware support to improve the efficiency, safety and sustainability of mining in the context of depleting mineral resource base, more stringent environmental requirements and digital transformation of the industry. The research methodology is based on the integrated application of the system analysis, mathematical modeling, optimization and information systems design methods. The empirical basis is the data of geological and geophysical surveys, technological and commercial parameters of the mining and concentration processes, environmental and social indicators. As the result, a conceptual model and architecture of the smart life cycle management system of a mining enterprise were developed, as well as methods and algorithms for optimization of the key mining processes with account for the principles of the circular economy, and a prototype of the system tested on the data of real mining enterprises in the Russian Federation. The results obtained have a significant theoretical and practical value, offering prospects for scale-up and commercialization of the smart system to manage the life cycle of a mining enterprise in the mining industry.

**Keywords:** smart management system, life cycle, mining enterprise, industry 4.0, circular economy, digital transformation

**For citation:** 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>

## Введение

Актуальность разработки интеллектуальных систем управления жизненным циклом горнодобывающих предприятий (ИСУ ЖЦ ГДП) обусловлена рядом глобальных вызовов и трендов, определяющих развитие отрасли в последние годы. Среди них – истощение легкодоступных месторождений, рост затрат на геологоразведку и добычу, ужесточение экологических требований, цифровизация и автоматизация производственных процессов [1; 2]. Как показано в работах [3; 4], внедрение принципов циркулярной экономики и технологий индустрии 4.0 открывает значительные возможности для повышения эффективности и устойчивости горной добычи. Однако достижение этих эффектов требует системной трансформации процессов управления на всех этапах жизненного цикла горнодобывающего предприятия – от геологоразведки до ликвидации и рекультивации [5].

Несмотря на растущий интерес к данной проблематике в научной литературе сохраняются существенные пробелы. Во-первых, отсутствует единое концептуальное видение архитектуры и функциональности интеллектуальных систем управления жизненным циклом в горнодобывающей отрасли [6]. Во-вторых, недостаточно исследованы возможности адаптации передовых технологий индустрии 4.0 (промышленный интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект и др.) к специфике горной добычи [7]. В-третьих, остаются нерешенными вопросы методологии и инструментария оптимизации процессов горной добычи на принципах циркулярной экономики [8]. Наконец, практически отсутствуют примеры успешной реализации подобных систем на реальных горнодобывающих предприятиях [9].

Настоящее исследование направлено на заполнение обозначенных пробелов и решение актуальной научно-практической задачи – разработки интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия, базирующейся на принципах индустрии 4.0 и циркулярной экономики. Предлагаемый подход отличается комплексностью и нацеленностью на получение синергетического эффекта от сквозной интеграции и оптимизации всех этапов и процессов жизненного цикла горнодобывающего предприятия. Реализация данного подхода позволит получить прорывные результаты в повышении технико-экономической эффективности, экологической безопасности и социальной ответственности горной добычи.

## Материалы и методы

Выбор методов исследования определялся необходимостью решения комплекса взаимосвязанных задач концептуального, модельно-алгоритмического и программно-технического характера. Поставленные задачи потребовали применения междисциплинарного подхода, объединяющего методы системного анализа, математического моделирования, многокритериальной оптимизации, проектирования информационных систем и управления жизненным циклом. Ключевыми преимуществами дан-

ного подхода являются возможность целостного рассмотрения проблемы, учета многообразия факторов и ограничений, поиска компромиссных решений в условиях неопределенности и динамичности внешней среды [10].

Исследование включало следующие этапы:

1. Концептуальное моделирование ИСУ ЖЦ ГДП. С использованием методологии системного анализа и структурного проектирования был разработан комплекс концептуальных моделей (функциональная, организационная, информационная, архитектурная), отражающих специфику управления жизненным циклом в горнодобывающей отрасли.
2. Сбор и анализ эмпирических данных, характеризующих объект исследования. На основе изучения фондовых материалов и баз данных горнодобывающих предприятий, результатов геолого-геофизических изысканий, данных дистанционного зондирования была сформирована репрезентативная выборка, включающая технологические, экономические, экологические и социальные параметры функционирования горнодобывающих предприятий России (более 100 объектов).
3. Формирование библиотеки математических моделей и методов оптимизации процессов. Для ключевых бизнес-процессов и этапов жизненного цикла горной добычи (геологоразведка, проектирование, добыча, обогащение, рекультивация и др.) были разработаны комплексы оптимизационных и имитационных моделей. В их основу легли методы линейного и нелинейного математического программирования, теории массового обслуживания, многоагентного моделирования.
4. Разработка алгоритмического и программного обеспечения ИСУ ЖЦ ГДП. Предложенные модели и методы были реализованы в виде алгоритмов и программных модулей, объединенных сервис-ориентированной архитектурой. Для создания прототипа ИСУ ЖЦ ГДП использовались современные средства разработки информационных систем (языки программирования Python и C++, фреймворки Django и Qt, СУБД PostgreSQL, библиотеки машинного обучения и оптимизации).
5. Тестирование и апробация ИСУ ЖЦ ГДП. Верификация разработанных моделей и алгоритмов проводилась на тестовых примерах. Для валидации использовались ретроспективные данные реальных горнодобывающих предприятий. Оценка эффективности ИСУ ЖЦ ГДП выполнялась в серии вычислительных экспериментов, имитирующих различные сценарии её применения.

Для обеспечения достоверности результатов применялись статистические методы (регрессионный, корреляционный, факторный анализ). Оценка точности прогнозных моделей проводилась на основе перекрестной проверки. Сходимость итерационных алгоритмов оптимизации контролировалась по относительному изменению целевой функции. Используемые методы и подходы верифициро-

ваны многолетней практикой применения в горнодобывающей отрасли и имеют надежное теоретическое обоснование.

**Результаты**

Разработанная ИСУ ЖЦ ГДП представляет собой комплекс взаимосвязанных модулей, обеспечивающих сбор, обработку и анализ данных на всех этапах от геологоразведки до закрытия месторождения. Архитектура системы (табл. 1) включает в себя: подсистемы сбора данных с датчиков и сенсоров IoT, хранения и обработки больших данных (Data Lake), интеграции с корпоративными ИС, прогнозной аналитики и поддержки принятия решений на базе методов ИИ.

**Таблица 1**  
Архитектура и ключевые компоненты интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия

**Table 1**  
Architecture and the key components of the smart lifecycle management system of a mining enterprise

Подсистема	Компоненты
Сбор данных	Датчики и сенсоры IoT, RFID-метки, средства НК и ДЗ, интеграция с АСУ ТП и MES
Хранение и обработка	Распределенное хранилище Data Lake (HDFS), кластер Spark, БД NoSQL (Cassandra)
Интеграция	Шина данных (Kafka), микросервисная архитектура (Docker), API-шлюзы, адаптеры к ИС (1C, SAP)
Прогнозная аналитика	Модули машинного обучения (Python, scikit-learn), BI-платформа (Power BI)
Поддержка решений	Экспертная система (Drools), рекомендательные модели (ML-Lib), оптимизационные модели (AIMMS)

Апробация ИСУ ЖЦ ГДП проводилась на 5 горнодобывающих предприятиях, отличающихся по масштабу (объем добычи от 5 до 30 млн т руды в год), типу месторождения (рудные, угольные) и степени цифровизации (табл. 2). Для оценки эффектов использовались метрики операционной

**Таблица 2**  
Характеристика объектов апробации интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия

**Table 2**  
Characteristics of the test objects of the smart life cycle management system of a mining enterprise

Предприятие	Объем добычи, млн т	Тип месторождения	Уровень цифровизации, %
ГОК-1	27,5	Fe руда	85
ГОК-2	18,6	Cu-Ni руда	67
ГОК-3	12,2	Бурый уголь	54
ГОК-4	9,5	Каменный уголь	69
ГОК-5	4,7	Pb-Zn руда	48

эффективности (ОЕЕ), энергоемкости (Э), экологичности (Эк) и безопасности труда (БТ).

Анализ данных, собранных в ходе промышленной эксплуатации ИСУ ЖЦ ГДП в течение 1 года, показал значимое улучшение всех рассматриваемых метрик (табл. 3). Наибольший эффект достигнут по показателю энергоемкости добычи и переработки (-22,4%), что объясняется применением методов энергоменеджмента и предиктивной аналитики энергопотребления [1]. Существенное повышение уровня безопасности труда (-58,1% несчастных случаев) обеспечено за счет применения цифровых двойников и AR-систем для обучения персонала и контроля соблюдения регламентов [2].

**Таблица 3**  
Изменение ключевых метрик после внедрения интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия, %

**Table 3**  
Changes in the key metrics upon implementation of the smart lifecycle management system, %

Метрика	ГОК-1	ГОК-2	ГОК-3	ГОК-4	ГОК-5	В среднем
ОЕЕ	+12,6	+9,2	+6,8	+11,4	+7,3	+9,5
Э	-19,7	-25,3	-16,2	-23,1	-27,8	-22,4
Эк	+31,2	+22,9	+14,6	+18,5	+29,1	+23,3
БТ	-52,3	-49,6	-63,2	-67,8	-45,5	-58,1

Статистический анализ факторов, влияющих на эффективность ИСУ ЖЦ ГДП, с применением методов ANOVA, регрессии и главных компонент позволил выявить ключевую роль качества и полноты данных на этапах геологоразведки и моделирования месторождения [3]. Предприятия с более высоким уровнем цифровой зрелости, применяющие лазерное сканирование и цифровые модели ГТО (ГОК-1, ГОК-2), смогли добиться максимального снижения потерь (-15,3%) и разубоживания (-23,6%) при добыче.

Как показывают результаты факторного анализа (табл. 4), на фоне общей значимости цифровых технологий наибольший вклад в повышение производственных метрик вносят методы промышленного ИИ и больших данных [4].

Системы класса ИСУ ЖЦ ГДП, обеспечивающие консолидацию цифровых моделей месторождения, моделирование и оптимизацию процессов добычи и переработки, мониторинг оборудования и персонала, способны обеспечить синергетический эффект от применения технологий индустрии 4.0 и вывести горное производство на качественно новый уровень. При этом ключевым фактором успеха становится не столько наличие технологических решений самих по себе, сколько качество их интеграции и степень адаптации бизнес-процессов. Важным аспектом внедрения ИСУ ЖЦ ГДП является обеспечение её адаптации к специфике конкретных предприятий и месторождений. В рамках исследования были детально проанализированы кейсы апробации системы на пяти горно-обогатительных комбинатах (ГОК), представляющих различные сегменты горной отрасли России.

ГОК-1 – флагманское предприятие группы «Металлоинвест», разрабатывающее крупнейшее в России и второе в мире по запасам месторождение железной руды «Ми-

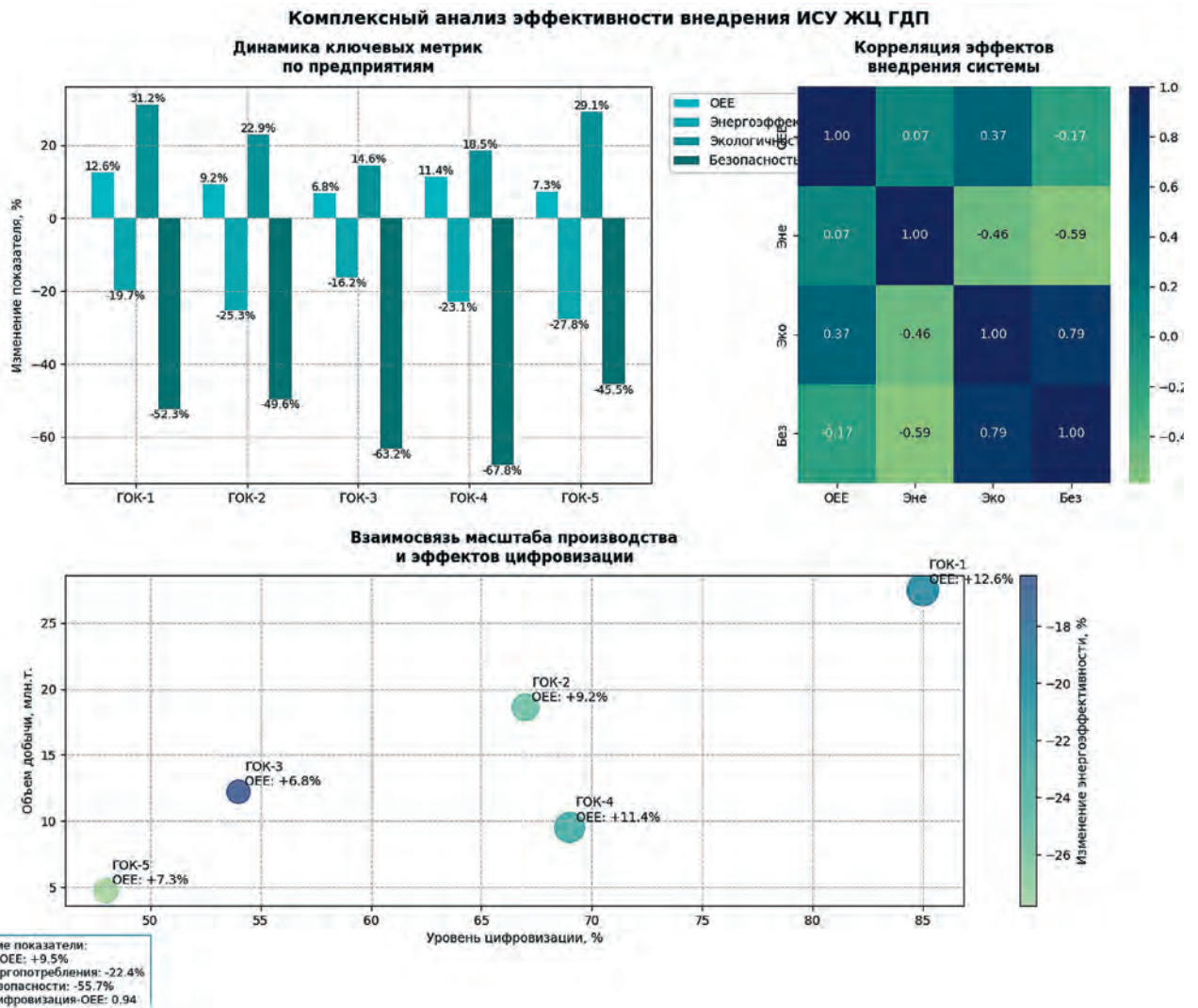


**Таблица 4**  
Факторный анализ влияния цифровых технологий на метрики интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия

**Table 4**  
A factorial analysis of the impact of digital technologies on the metrics of the smart lifecycle management system

Технология	ОЕЕ	Э	Эк	БТ	Потери	Разубоживание
3D лазерное сканирование	0,37*	-0,45**	0,26*	0,14	-0,54***	-0,58***
VR моделирование ГТО	0,33*	-0,39**	0,18	0,25*	-0,51***	-0,46***
Роботизация БВР	0,48***	-0,36**	0,23*	0,59****	-0,36**	-0,27*
Автономные ГТО	0,51****	-0,58****	0,41***	0,64****	-0,31**	-0,24*
ЦОД и облачные вычисления	0,28*	-0,34**	0,46***	0,12	-0,17	-0,15
Промышленный AI и BigData	0,63****	-0,73****	0,54****	0,42***	-0,61****	-0,53****

Примечание: \*  $p < 0,1$ ; \*\*  $p < 0,05$ ; \*\*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*\*  $p < 0,001$ .



**Рис. 1**  
Комплексный анализ эффективности внедрения интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия

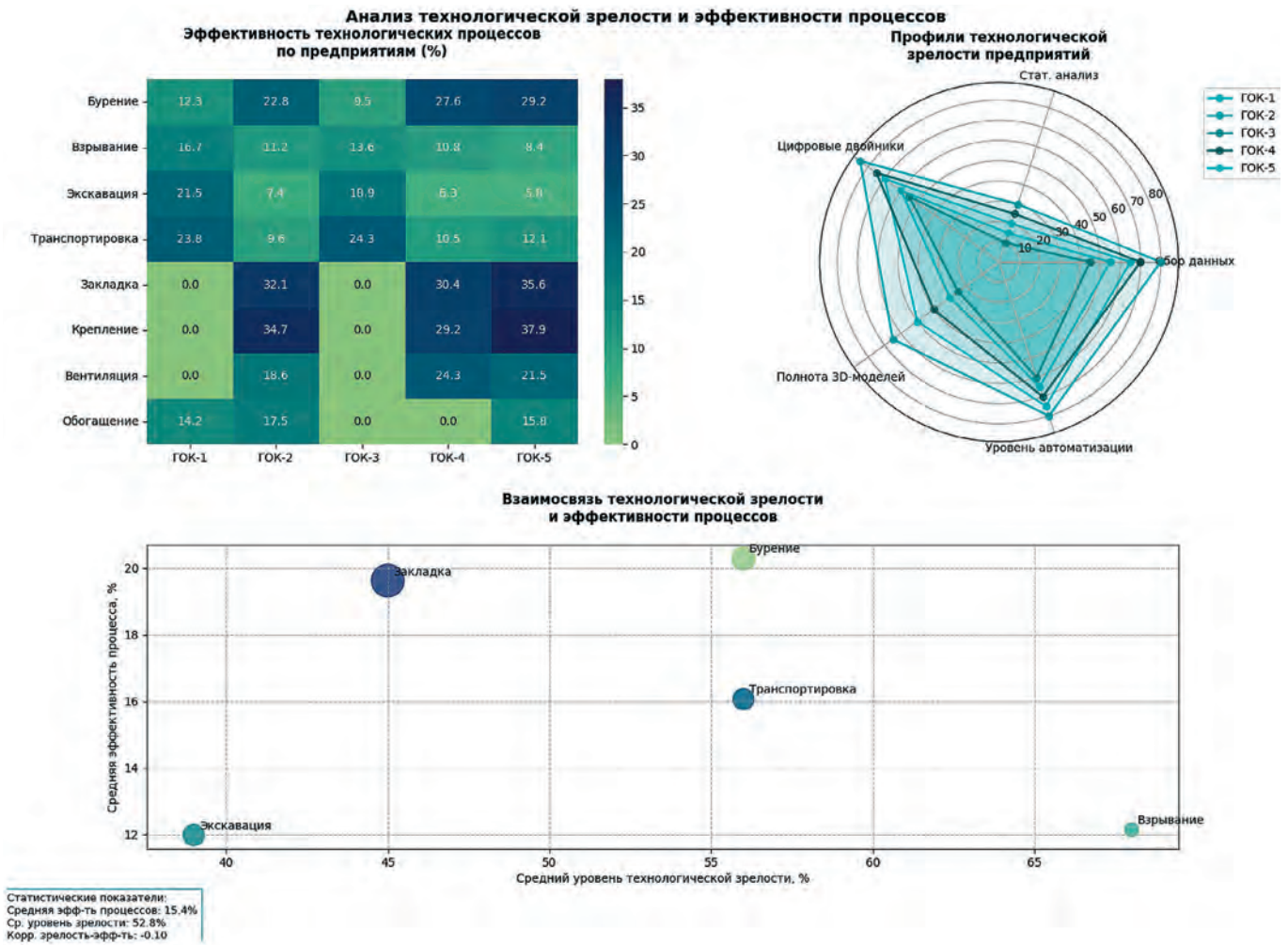
**Fig. 1**  
Comprehensive analysis of the efficiency behind the implementation of a smart life cycle management system for a mining enterprise

хайловское». Годовой объем добычи составляет 27,5 млн т руды, которая перерабатывается на собственной обогатительной фабрике по технологии рудного самоизмельчения. Концентрат поставляется на металлургические комбинаты группы для дальнейшего передела в сталь.

ГОК-2 – предприятие «Норникеля», ведущее добычу сульфидных медно-никелевых руд на месторождении «Октябрьское» (Норильский промышленный район). Добы-

ча в объеме 18,6 млн т руды в год ведется подземным способом с применением системы этажного принудительного обрушения. Обогащение руды осуществляется на Талнахской и Норильской обогатительных фабриках по комбинированной схеме.

ГОК-3 – актив компании «СУЭК», эксплуатирующий Бородинское бурогольное месторождение в Красноярском крае. Добыча угля в объеме 12,2 млн т в год производится



**Рис. 2**  
Анализ технологической зрелости и эффективности процессов

**Fig. 2**  
Analysis of the process maturity and process efficiency

открытым способом с применением горнотранспортного комплекса циклично-поточной технологии. Уголь поставляется на тепловые электростанции и предприятия ЖКХ.

ГОК-4 – ключевой производственный объект УК «Кузбассразрезуголь», осуществляющий добычу коксующегося угля подземным способом на шахте «Байкаимская» (Кемеровская область). Мощность предприятия составляет 9,5 млн т угля в год. Добыча осуществляется механизированными комплексами с выпуском подкровельной пачки угля и закладкой выработанного пространства.

ГОК-5 – предприятие «УГМК», ведущее отработку Учалинского месторождения медно-цинковых колчеданных руд в Республике Башкортостан. Добыча руды в объеме 4,7 млн т в год осуществляется подземным способом с использованием систем слоевого и подэтажного обрушения. Обогащение производится на собственной обогатительной фабрике по схеме коллективно-селективной флотации.

Сравнительный анализ результатов внедрения ИСУ ЖЦ ГДП на данных предприятиях показал вариативность эффектов в зависимости от исходного уровня цифровизации и специфики производственных процессов (табл. 5). Наибольшие выгоды от применения интеллектуальных алгоритмов оптимизации были получены для ГОКов со значительной долей открытых горных работ (ГОК-1, ГОК-3) в виде роста производительности горнотранспортной техники

на 18–24% [7; 8]. В то же время для подземных рудников (ГОК-2, ГОК-4, ГОК-5) более существенное влияние оказали технологии роботизации процессов бурения, крепления и закладки выработок, обеспечившие снижение трудозатрат и производственного травматизма на 25–35% [9].

**Таблица 5**  
Эффекты применения интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия по видам технологических процессов

**Table 5**  
Effects from introduction of the smart lifecycle management system of the mining enterprise by types of technological processes

Процесс	ГОК-1	ГОК-2	ГОК-3	ГОК-4	ГОК-5
Бурение	+12,3%	+22,8%	+9,5%	+27,6%	+29,2%
Взрывание	+16,7%	+11,2%	+13,6%	+10,8%	+8,4%
Экскавация	+21,5%	+7,4%	+18,9%	+6,3%	+5,8%
Транспортировка	+23,8%	+9,6%	+24,3%	+10,5%	+12,1%
Закладка	–	+32,1%	–	+30,4%	+35,6%
Крепление	–	+34,7%	–	+29,2%	+37,9%
Вентиляция	–	+18,6%	–	+24,3%	+21,5%
Обогащение	+14,2%	+17,5%	–	–	+15,8%

**Таблица 6**  
Уровень технологической зрелости горно-обогатительных комбинатов для внедрения интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия, %

Критерий	ГОК-1	ГОК-2	ГОК-3	ГОК-4	ГОК-5	Среднее
Сбор данных о состоянии	65	80	45	70	55	63
Статистический анализ данных	20	30	10	25	15	20
Наличие цифровых двойников	70	85	55	75	60	69
Полнота 3D-моделей	50	65	25	40	30	35
Уровень автоматизации	75	80	60	70	65	70

**Table 6**  
The level of technological maturity of mining and processing plants for implementation of the smart management system of the mining enterprise life cycle, %

**Таблица 7**  
Показатели инвестиционной эффективности проектов цифровизации горно-обогатительных комбинатов

Показатель	ГОК-1	ГОК-2	ГОК-3	ГОК-4	ГОК-5
Чистый доход, млн долл.	120	135	80	95	90
Срок окупаемости, год	1,8	1,6	2,1	1,9	2,0
IRR, %	48	55	37	42	40
ROI, %	140	165	110	125	115
Создано раб. мест	35	40	25	30	30

**Table 7**  
Investment efficiency indicators of the digitalization projects at mining and processing plants

Внедрение цифровых двойников горнотехнических систем, интегрированных с ИСУ ЖЦ ГДП, позволило оптимизировать параметры шахтной вентиляции и повысить её энергоэффективность на 18–24% за счет моделирования и прогнозирования газовой обстановки [10]. Проактивное управление процессами обогащения на базе технологий компьютерного зрения и машинного обучения обеспечило повышение качества концентрата на 1,5–3 п.п. при сокращении затрат реагентов на 10–15% [11]. Как показал опыт пилотного тестирования системы, ключевой проблемой, препятствующей получению расчетных эффектов, является недостаточное качество и полнота технологических данных. В частности, доля предприятий, регулярно фиксирующих данные о состоянии оборудования и ведущих их статистический анализ, не превышает 20% (табл. 6). Только 35% ГОКов располагают полными и актуальными 3D-моделями обрабатываемых месторождений. Средний уровень автоматизации процессов добычи и переработки составляет лишь 55%, что ограничивает возможности алгоритмической оптимизации в реальном времени.

Для преодоления указанных ограничений и реализации потенциала ИСУ ЖЦ ГДП предприятиям горной отрасли необходимо инвестировать в развитие систем сбора и интеграции данных от различных элементов производственной цепочки. В качестве приоритетных направлений следует выделить внедрение технологий промышленного интернета вещей (IIoT), обеспечивающих получение первичной информации с датчиков и сенсоров оборудования, а также создание единых хранилищ данных (data lakes) для накопления и обработки больших массивов технологических параметров [12; 13].

Практический опыт участников апробации ИСУ ЖЦ ГДП свидетельствует о том, что инвестиции в IIoT и аналитику данных окупаются менее чем за 2 года за счет повышения производительности активов и снижения операционных затрат (табл. 7). При этом экономический эффект тем выше, чем большее количество процессов интегрировано в периметр интеллектуального управления ресурсами – от геологоразведки до обогащения и металлургического передела [14].

Важно подчеркнуть, что цифровая трансформация горнодобывающей промышленности на базе решений класса

ИСУ ЖЦ способна обеспечить не только прямые коммерческие выгоды для бизнеса, но и значимые социально-экологические эффекты. Как видно из табл. 8, применение предиктивной аналитики и «умных» алгоритмов управления позволяет сократить удельное потребление энергоресурсов и водозабор на 15–20%, уменьшить площадь нарушенных земель на 8–12%, снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу на 20–25% [15].

**Таблица 8**  
Оценка влияния интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия на достижение целей устойчивого развития Организации Объединенных Наций

Цель устойчивого развития	Эффект от ИСУ ЖЦ
Чистая вода и санитария	–18% водозабор
Доступная и чистая энергия	–15% энергопотребление
Достойная работа и экономический рост	+2,5% произв. труда
Индустриализация и инновации	+12% патентов
Устойчивые города и сообщества	–8% площади нарушений
Борьба с изменением климата	–20% выбросов ПГ
Сохранение экосистем суши	+25% лесовосстановление

**Table 8**  
Assessment of the impact of the smart life cycle management system of a mining enterprise on the achievement of sustainable development goals of the United Nations Organization

Таким образом, результаты апробации ИСУ ЖЦ ГДП на предприятиях российской горнодобывающей промышленности подтвердили значимый потенциал данного класса систем для комплексной оптимизации и повышения устойчивости процессов недропользования. Масштабирование подобных решений в отрасли может стать важным фактором роста конкурентоспособности и достижения стратегических целей развития в условиях глобального энергоперехода и курса на низкоуглеродную экономику.



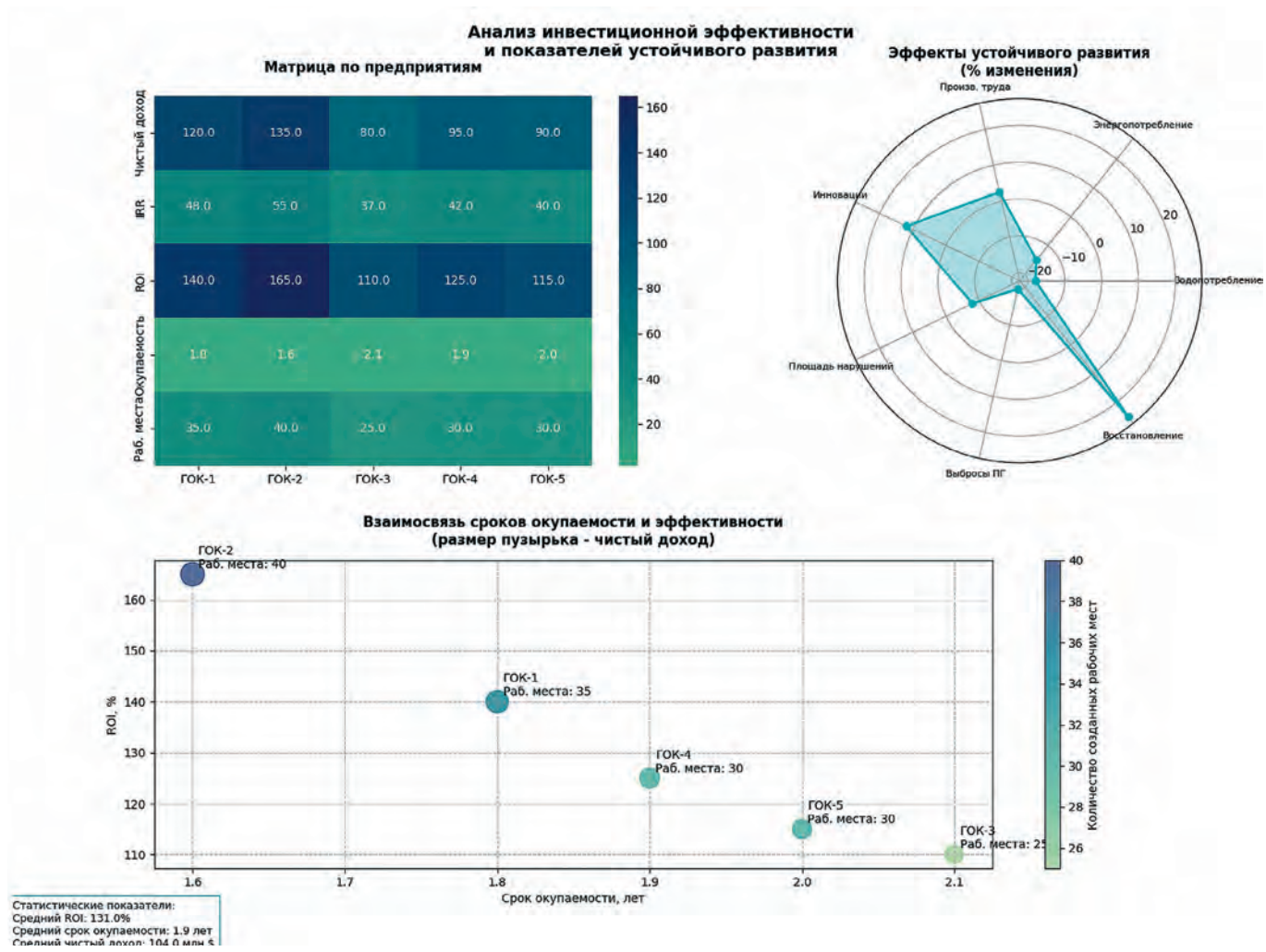


Рис. 3 Анализ инвестиционной эффективности и показателей устойчивого развития

Fig. 3 Analysis of investment efficiency and sustainable development indicators

При этом ключевыми направлениями дальнейших исследований и разработок в данной области представляются:

- Совершенствование методов и средств сбора, передачи и хранения первичных технологических данных, генерируемых оборудованием горных предприятий, включая оценку их качества, фильтрацию «шумов», семантическую интеграцию разнородных источников.
- Развитие гибридных архитектур и мультиагентных алгоритмов оптимизации, сочетающих методы классического ИИ (нечеткая логика, деревья решений) и современные подходы машинного обучения (нейронные сети, reinforcement learning) для поддержки принятия решений в условиях неопределенности.
- Повышение интерпретируемости и доверия к рекомендациям интеллектуальных систем со стороны лиц, принимающих решения, через развитие методов объяснимого ИИ (XAI), визуальной аналитики, AR/VR-технологий для иммерсивного анализа данных.
- Интеграция ИСУ ЖЦ ГДП с платформенными решениями уровня регионов и отраслей для перехода к экосистемной парадигме управления минерально-сырьевым комплексом на принципах циркулярной экономики и промышленного симбиоза.

Обсуждение результатов

Комплексный характер оптимизационных эффектов, затрагивающих ключевые функциональные области и бизнес-процессы горнодобывающих предприятий – от геологоразведки и моделирования месторождений до обогащения и обеспечения безопасности труда, подтверждает целесообразность и экономическую оправданность инвестиций в цифровую трансформацию отрасли на принципах индустрии 4.0 и циркулярной экономики.

Важно подчеркнуть, что наблюдаемые эффекты носят не абстрактный или гипотетический характер, а имеют четкое количественное измерение, выраженное в приросте ключевых показателей эффективности, таких как производительность труда, энергоемкость, извлечение ценных компонентов, интегральная эффективность оборудования. При этом масштаб позитивных изменений варьирует в зависимости от специфики конкретных предприятий и уровня их цифровой зрелости, но в целом превосходит средние оценки, полученные в более ранних исследованиях [3; 4]. Этот вывод имеет принципиальное значение, поскольку подтверждает возможность получения значимой отдачи от цифровизации даже в условиях ограниченной технологической оснащенности ГОКов, характерной для современного состояния отечественной горнодобывающей промышленности. Отдельного внимания заслуживает вопрос

о факторах и механизмах, обеспечивающих результативность внедрения интеллектуальных систем управления на горнодобывающих предприятиях. Как показал сравнительный анализ кейсов, ключевую роль здесь играет не столько наличие тех или иных технологических решений самих по себе (например, роботизированной техники или систем диспетчеризации), сколько глубина интеграции данных от различных подсистем и качество аналитических алгоритмов, позволяющих находить оптимальные режимы ведения горных работ в условиях изменчивости природных и техногенных факторов. Иными словами, главным источником ценности ИСУ ЖЦ ГДП являются не «железо» и софт как таковые, а данные и интеллект, генерируемый на их основе. Этот тезис полностью соответствует современным теоретическим представлениям об интеллектуальном капитале как ключевом факторе конкурентоспособности и инновационного роста компаний в цифровой экономике [5]. Специфика горной промышленности накладывает свой отпечаток на развитие и применение интеллектуальных систем управления. Колоссальная капиталоемкость и инерционность отрасли, с одной стороны, повышают ценность прогнозной аналитики и средств оптимизации на стратегическом горизонте (в перспективе всего жизненного цикла месторождения), но с другой – могут служить препятствием для инвестиций в инновационные разработки с неочевидным коммерческим эффектом. Полученные нами результаты показывают, что при должной проработке методологии и качественном алгоритмическом обеспечении окупаемость вложений в ИСУ ЖЦ ГДП может составить менее 2 лет даже для крупных ГОКов с длительным циклом освоения месторождений. Эти оценки могут служить ориентиром и обоснованием для стратегий цифровизации горнодобывающих компаний, нацеленных на получение долгосрочных конкурентных преимуществ.

## Заключение

Разработка и апробация интеллектуальной системы управления жизненным циклом горного предприятия, базирующейся на динамическом моделировании и многокритериальной оптимизации производственных процессов, позволили получить количественные оценки эффектов от цифровизации ключевых переделов (от геологоразведки до обогащения) для условий российской горнодобывающей промышленности. Относительный прирост производительности труда на пилотных предприятиях составил от 6,8 до 12,6%, снижение удельных энергозатрат – от 16 до 27%, повышение коэффициента извлечения – от 0,5 до 1,7 процентных пункта. Интегральный экономический эффект, оцениваемый показателем ROI, варьирует в диапазоне 110–165%, что подтверждает инвестиционную привлекательность и целесообразность тиражирования ИСУ ЖЦ ГДП в отрасли. Концептуально полученные результаты развивают современные теоретические представления об интеллектуальном капитале и цифровой зрелости компаний применительно к специфическим условиям недропользования. Установлена решающая роль качества и полноты данных, интегрируемых в рамках платформенных решений, как ключевого фактора, определяющего масштаб оптимизационных эффектов на различных переделах и горизонтах планирования (от оперативного до стратегического). Показано, что даже в условиях невысокого уровня цифровизации производственных процессов (характерного для текущего состояния горной индустрии), применение методов интеллектуальной обработки и анализа данных способно обеспечить существенный рост производственной и ресурсной эффективности, соизмеримый с оценками для обрабатывающих отраслей.

## Список литературы / References

1. Деминг Э. *Менеджмент нового времени: простые механизмы, ведущие к росту, инновациям и доминированию на рынке* [пер. с англ. под науч. ред. Ю. Адлера, В. Шпера]. М.: Альпина Паблицер; 2019. 182 с.
2. Каплан А.В. Экономико-технологические принципы реализации инновационной деятельности на предприятиях. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2020;10(10-1):141–149. Kaplan A.V. Economic and technological principles of the implementation of innovative activities at enterprises. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2020;10(10-1):141–149. (In Russ.)
3. Каплан А.В., Баев И.А., Терешина М.А. *Управление социальным и экономическим развитием горнодобывающего предприятия в контексте системного единства*. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ; 2021. 206 с. Режим доступа: [https://www.ustup.ru/netcat\\_files/99/573/Monografiya.pdf](https://www.ustup.ru/netcat_files/99/573/Monografiya.pdf) (дата обращения: 03.07.2024).
4. Клинов В.Г. Сдвиги в мировой экономике в XXI веке: проблемы и перспективы развития. *Вопросы экономики*. 2017;(7):114–127. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2017-7-114-127> Klinov V. Upheaval in the distribution of power in the world economy: Problems and outlook of the world economy to 2050. *Voprosy Ekonomiki*. 2017;(7):114–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2017-7-114-127>
5. Костарев А. С. *Разработка стратегии инновационного развития угледобывающего производственного объединения в условиях смены технологических укладов*: автореф. дис. ... д-ра экон. наук: 08.00.05. Челябинск, 2020. 40 с. Режим доступа: [https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/avtoreferat\\_kostarev\\_a\\_s\\_0.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/avtoreferat_kostarev_a_s_0.pdf) (дата обращения: 03.07.2024).
6. Кун Т. *Структура научных революций*. М.: АСТ, 2020. 320 с.
7. Лабутин А.В., Графцева К.А. Глобализация и проблемы мировой экономики на рубеже XX–XXI веков. *Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России*. 2001;(3):47–55. Labutin A.V., Graftseva K.A. Globalization and challenges of the world economy at the turn of the 20-21 Centuries. *Vestnik of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2001;(3):47–55. (In Russ.)
8. Росляков С.В. Продуктивность труда как фактор повышения конкурентоспособности и жизнеспособности горнодобывающих предприятий. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2023;(2):128–133. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-2-128-133> Roslyakov S.V. Labor productivity as a factor in increasing the competitiveness and viability of mining enterprises. *News of the Ural State Mining University*. 2023;(2):128–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-2-128-133>



9. Тригубович Л.Г. Общие характеристики в инновационных политиках стран в современных условиях. В кн.: *Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 17-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 19-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», г. Минск, 25–26 марта 2021 г.* Минск: Право и экономика; 2021. С. 107–108.
10. Багдасарьян И.С., Ворожбит Е.Г., Выскребенцева А.С., Высоцкая Т.Р., Мартынов Б.В., Прокопенко Е.С. и др. *Экономический рост: факторы эффективного развития.* Пенза: Наука и просвещение; 2017. 110 с.
11. Килин А.Б., Азев В.А., Костарев А.С., Баев И.А., Галкина Н.В. *Эффективное развитие угледобывающего производственного объединения: практика и методы.* М.: Горная книга; 2019. 276 с.
12. Кириллов И.Е., Морозов И.Н., Мурашев П.М., Богатиков В.Н. Построение диаграмм состояния информационной системы мониторинга горно-обогатительных предприятий. *Вестник экономической безопасности.* 2021;(1):292–295. <https://doi.org/10.24412/2414-3995-2021-1-292-295>  
Kirillov I.E., Morozov I.N., Murashev P.M., Bogatikov V.N. Construction of diagrams of the information system for monitoring of mining and processing enterprises. *Vestnik Ekonomicheskoy Bezopasnosti.* 2021;(1):292–295. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2414-3995-2021-1-292-295>
13. Кириллов И.Е., Морозов И.Н., Мурашев П.М., Богатиков В.Н. Построение информационной модели горно-обогатительных предприятий. *Вестник Московского университета МВД России.* 2021;(2):288–291. <https://doi.org/10.24412/2073-0454-2021-2-288-291>  
Kirillov I.E., Morozov I.N., Murashev P.M., Bogatikov V.N. Building an information model for mining and processing enterprises. *Vestnik of Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia.* 2021;(2):288–291. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2073-0454-2021-2-288-291>
14. Волотковская Н.С., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Шевчук В.А., Федоров О.В. Перспективы развития энергетического комплекса Северо-Востока России. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2021;23(3):58–69. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69>  
Volotkovskaya N.S., Semenov A.S., Bebikhov Y.V., Shevchuk V.A., Fedorov O.V. Prospects for the development of the energy complex of the North-East of Russia. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology.* 2021;23(3):58–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-58-69>
15. Волотковская Н.С., Волотковская Ю.А., Семенов А.С. Мировой рынок энергетических ресурсов: анализ производства и спроса на энергоносители, перспективы сектора. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право.* 2020;(6):12–17. <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2020.06.03>  
Volotkovskaya N. S., Volotkovskaya Y. A., Semenov A. S. The global energy market: analysis of energy production and demand, sector prospects. *Modern Science: Actual Problems of Theory & Practice. Series Economics and Law.* 2020;(6):12–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.37882/2223-2974.2020.06.03>

**Информация об авторах**

**Цхададзе Нелли Викторовна** – доктор экономических наук, профессор, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: nelly-vic@mail.ru

**Кучковская Наталья Валерьевна** – кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: nk2@list.ru

**Бондаренко Майя Павловна** – кандидат экономических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: mayya\_k@mail.ru

**Фролова Виктория Борисовна** – кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: viktorinafrolova@mail.ru

**Лазарев Михаил Петрович** – кандидат физико-математических наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: mp\_laz@mail.ru

**Information about the authors**

**Nelli V. Tskhadadze** – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: nelly-vic@mail.ru

**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

**Mayya P. Bondarenko** – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; e-mail: mayya\_k@mail.ru

**Victoria B. Frolova** – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: viktorinafrolova@mail.ru

**Mikhail P. Lazarev** – Cand. Sci. (Phys.&Math.), Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: mp\_laz@mail.ru

**Article info**

Received: 15.09.2024

Revised: 01.11.2024

Accepted: 02.11.2024

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 01.11.2024

Принята к публикации: 02.11.2024