ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Научная статья
https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-402
УДК 681.5:004.021

Цифровые двойники и цифровые технологии: особенности и перспективы в угольной отрасли

С.М. Никитенко[1] ✉, Е.В. Гоосен[1], А.А.Рожков[2], М.К. Королев[1]
[1] *Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Российская Федерация*
[2] *Российское энергетическое агентство, Минэнерго России, г. Москва, Российская Федерация*
✉ *nsm.nis@mail.ru*

Аннотация
В настоящее время широко развернулось внедрение цифровых технологий (ЦТ) во всех отраслях российской экономики. Наиболее активно в эти процессы вовлечены высокотехнологичные отрасли. Угольная отрасль, как и остальные добывающие отрасли, отстает во внедрении цифровых технологий. Тем не менее эти процессы идут как на уровне всей отрасли, так и на уровне отдельных компаний. Одним из наиболее популярных направлений развития ЦТ является внедрение цифровых двойников, которые являются частью единой цифровой системы управления компанией – технологией-интегратором всех сквозных ЦТ и субтехнологий. Статья посвящена анализу современных подходов к изучению и практике внедрения цифровых двойников в угольной отрасли. Цель статьи – показать особенности процессов цифровизации, выявить барьеры и перспективные направления внедрения цифровых двойников (ЦД) в угольной отрасли. Для реализации этой цели в статье систематизированы концептуальные и прикладные подходы к изучению ЦД, предложен авторский подход к определению, структуре и типологии ЦД на основе выделения этапов их зрелости. Выявлены общие и отраслевые закономерности развития ЦТ и ЦД. Доказано, что ЦД – это важнейший инструмент управления цепочками создания стоимости (ЦСС), который зависит от степени зрелости производственных и цифровых технологий, а также степени их интероперабельности. Проведены сравнение и оценка опыта внедрения ЦТ и ЦД в зарубежных и отечественных горнодобывающих и угольных компаниях и в страновые модели. Выявлены барьеры внедрения ЦТ и ЦД в угольной отрасли, предложены рекомендации по их устранению. При подготовке статьи использованы следующие научные методы: системный и сравнительный анализ, библиографическое исследование, обобщение, социологический опрос экспертов. Источниками данных послужили материалы СМИ и сайтов ведущих зарубежных и отечественных угольных и горнодобывающих компаний, экспертные оценки, кейс-стади цифровых проектов, аналитические отчеты консалтинговых компаний, материалы первичного и вторичного экспертных опросов. Проведенный анализ показал, что процессы цифровой трансформации и внедрения ЦД в угольной отрасли отстают от других отраслей. Причиной тому являются барьеры как общие для всех отраслей, так и специфичные для угольной отрасли: высокая цена цифровых технологий и нехватка ресурсов, значительный эффект масштаба; отсутствие четко выстроенной модели развития угольной отрасли и стратегии ее цифровизации; низкий уровень автоматизации производства и управления, недостаточность цифровой инфраструктуры; острая нехватка кадров и цифровых компетенций у руководителей компаний.

Ключевые слова
угольная отрасль, цифровизация, цифровые двойники, типология цифровых двойников, анализ, эксперты, внедрение, цепочки создания стоимости, страновые модели, инфраструктура, управление

Финансирование
Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 25-18-00647).

Для цитирования
Nikitenko S.M., Goosen E.V., Rozhkov A.A., Korolev M.K. Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(4):298–305. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-402

© Никитенко С. М., Гоосен Е. В., Рожков А. А., Королев М. К., 2025

DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Research paper

Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry

S.M. Nikitenko[1] ✉, **E.V. Goosen**[1], **A.A. Rozhkov**[2], **M.K. Korolev**[1]

[1] *Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation*

[2] *Russian Energy Agency, Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation*

✉ *nsm.nis@mail.ru*

Abstract

Across all sectors of the Russian economy, the adoption of digital technologies (DT) is accelerating, with high-tech industries leading the way. The coal industry, like other extractive sectors, has been slower to embrace these solutions, yet digitalization is advancing both at the industry level and within individual companies. One of the most dynamic areas of DT development is the adoption of digital twins (DTw), which form a core element of integrated digital management systems—acting as an integrator for cross-cutting technologies and sub-technologies. This article examines current approaches to studying and implementing digital twins in the coal sector. The objective is to highlight the specific features of digitalization processes, identify barriers, and outline promising directions for the adoption of DTw in the coal industry. To this end, the article systematizes conceptual and applied approaches to DTw, proposes an original framework for defining, structuring, and classifying digital twins based on maturity levels, and identifies both general and industry-specific trends in the development of DT and DTw. The analysis demonstrates that digital twins are a critical tool for managing value chains, and their effectiveness depends on the maturity of production and digital technologies and on the degree of their interoperability. The study compares and evaluates international and domestic experiences of DT and DTw adoption in mining and coal companies, as well as national-level models. It identifies barriers to adoption in the coal sector and offers recommendations for overcoming them. The research applies systems and comparative analysis, bibliographic review, generalization, and expert surveys. Data sources included media reports, websites of leading coal and mining companies, expert assessments, digital project case studies, consulting reports, and primary and secondary expert surveys. The findings show that digital transformation in the coal industry, including the adoption of DTw, lags behind other sectors. This gap is driven by both general and sector-specific factors: high costs and limited resources, scale effects, the absence of a clear development model and digitalization strategy, low levels of automation in production and management, insufficient digital infrastructure, and an acute shortage of personnel with digital competencies, particularly among executives.

Keywords

coal industry, digitalization, digital twins, typology of digital twins, analysis, experts, implementation, value chains, national models, infrastructure, management

Finding

This research was supported by the Russian Science Foundation (Grant Agreement No. 25-18-00647).

For citation

Nikitenko S.M., Goosen E.V., Rozhkov A.A., Korolev M.K. Digital twins and digital technologies: specific features and prospects in the coal industry. *Mining Science and Technology* (*Russia*). 2025;10(4):298–305. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2025-04-402

Введение

В настоящее время широко развернулось внедрение цифровых технологий (ЦТ) во всех отраслях российской экономики. Наиболее активно в эти процессы вовлечены высокотехнологичные отрасли. Угольная отрасль, как и остальные добывающие отрасли, отстает во внедрении цифровых технологий. Тем не менее эти процессы идут как на уровне всей отрасли, так и на уровне отдельных компаний.

Одним из наиболее популярных направлений развития ЦТ является внедрение цифровых двойников, которые являются частью единой цифровой системы управления компанией – технологией-интегратором всех сквозных ЦТ и субтехнологий.

Последние технологические разработки и достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) позволили активизировать внедрение ЦД в компаниях, работающих в добывающих отраслях, в том числе в угольной отрасли. ЦД сделали возможной автоматизацию всех основных звеньев цепочек создания стоимости, позволили комплексно внедрять перспективные технологии разведки месторождений,

селективной выемки угля, обогащения, формирования проектных угольных смесей, разрабатывать оптимальные пути доставки и переработки угля.

Цель статьи – показать особенности процессов цифровизации, выявить барьеры и перспективные направления внедрения цифровых двойников (ЦД) в угольной отрасли. **Задачи:** *1* – дать определение ЦД и показать особенности и уровень их внедрения в компаниях стран, занимающихся угледобычей; *2* – выделить и дать характеристику базовым страновым моделям управления цифровизацией угольной отрасли, показать в них место ЦД; *3* – выявить барьеры внедрения ЦТ и ЦД в угольной отрасли и предложить меры по их преодолению.

Данные и методы

При проведении исследования использованы следующие научные методы: системный и сравнительный анализ, библиографическое исследование, обобщение, социологический опрос экспертов.

Источниками данных послужили материалы интернета и СМИ, сайтов ведущих зарубежных и отечественных угольных и горнодобывающих компаний, экспертные оценки, кейс-стади цифровых проектов, аналитические отчеты консалтинговых компаний, материалы первичного и вторичного экспертного опроса.

Результаты исследований

Цифровые технологии и цифровые двойники начиная с 2000-х годов активно внедряются в горнодобывающей и угольной отраслях. На начальном этапе внедрение платформ корпоративных ресурсов (ERP) позволило синхронизировать разрозненные производственные операции, корпоративные процессы и отчетность и значительно повысить эффективность. Следствием этого во всем мире стали крупные инвестиции в цифровое ПО и цифровую инфраструктуру для формирования локальных цифровых двойников.

Понятие «цифрового двойника» в научный оборот было введено еще в 2003 г., но в академических кругах до сих пор этот термин трактуется по-разному [1]. Одни авторы ограничивают его программами, моделирующими предметы и результаты деятельности [2, 3], другие видят в нем важнейший инструмент мониторинга и стратегического управления [4–6]. В зарубежной литературе наибольшее распространение получило определение ЦД, понимающее под ЦД «…интегрированное мультифизическое, многомасштабное, вероятностное моделирование сложного продукта, использующее наилучшие доступные физические модели для отражения срока службы соответствующего физического объекта» [1]. В последнее время появились публикации, посвященные роли ЦД в управлении компаниями, регионами, цепочками создания стоимости, учитывающие не только технологические, но и финансовые и организационные и др. аспекты управления сложными системами [7, 8]. С некоторым запозданием формируются и российские школы по теме ЦТ [9, 10] и ЦД [11, 12], в том числе ЦТ [13, 14] и ЦД в угольной отрасли [15, 16].

По мнению авторов, цифровой двойник – это комплексный инструмент управления, представляющий реалистичную виртуальную модель физического объекта, обновляемую в реальном времени.

Лидерами внедрения ЦТ и ЦД являются крупные горнодобывающие и угольные компании Австралии, Китая, США, Канады и Германии. Они не только синхронизируют ЦД с приоритетными ЦТ, активно внедряют ЦД отдельных агрегатов, технологических переделов, рудников и шахт, но и стремятся превратить его в инструмент управления всей цепочкой создания стоимости. Под ЦСС в данной статье понимается вся последовательность переделов продукции в угольной отрасли, начиная от геологоразведки и заканчивая реализацией продуктов переработки угля [17–19]. В качестве целей обозначают поиск и удержание оптимальных режимов работы для максимизации производительности и надежности. Все это позволяет оценить уровень цифровой трансформации и внедрения ЦД (табл. 1).

Анализ официальных отчетов и сайтов горнодобывающих и консалтинговых компаний позволил выделить уровни внедрения ЦТ и ЦД. Уровень 0 – это этап стандартизации и автоматизации управления основными и вспомогательными производствами, начало внедрения базовых цифровых технологий. На этом этапе все процессы производства, включая управление, максимально заменяются машинными, создаются виртуальные модели отдельных продуктов и операций – квази-ЦД. Уровень 1 – это период оптимизации и реинжиниринга бизнес-процессов компании с учетом требований цифровых технологий, создания локальных цифровых двойников (ЛЦД) для наиболее важных активов и процессов, синхронизации цифровых и реальных производственных бизнес-процессов. Уровень 2 – это начало создания комплексных цифровых двойников (КЦД), рекомбинации ЦД и приоритетных ЦТ. Уровень 3 – это этап формирования цифрового двойника всей ЦСС, способного управлять всей ЦСС, решать операционные и стратегические задачи.

Кроме уровней внедрения ЦТ и ЦД, удалось выявить две страновые модели внедрения ЦТ и ЦД в угольной отрасли: корпоративную – в развитых странах (BHP, Anglo American, Glencore, Anglo American и др.) и государственную – Китай (China Shenhua Energy Company Limited, China Coal Energy Company Limited и др.). В основу выделения моделей положены характер ЦСС и уровень развития ЦТ и ЦД (табл. 2).

Также есть группа стран, компании которых только формируют свою модель цифровой трансформации: Индонезия, Монголия, Россия.

В корпоративной модели компании-лидеры ведут деятельность в глобальном масштабе, имеют географическую и пространственную диверсификацию, благодаря чему их ЦСС более гибкие и устойчивые. В их состав входят компании, расположенные в разных частях света, которые ведут добычу, транспортировку и переработку угля, черных и цветных металлов, алмазов. Также там присутствуют сервисные, финансовые и исследовательские структуры, центры цифровизации.

Таблица 1

Особенности внедрения ЦТ и ЦД в крупнейших горнодобывающих и угольных и компаниях, 2024 г.

Компании	Страна регистрации / базирование угольных активов	Роботизированные автономные горные машины, устройства и транспортные средства	Интегрированные удаленные центры управления (IROC)	Цифровые двойники активов, процессов и группы активов	Искусственный и генеративный интеллект	Этап цифровизации
BHP	Великобритания, Австралия / Австралия	+	+	+	+	3
China Shenhua Energy	Китай / Китай, Австралия, Индонезия	+	+	+	+	2–3
China Coal Energy	Китай / Китай	+	+	+	+	2–3
Rio Tinto	Австралия / после 2018 г. не владеет угольными активами	+	+	+	+	2–3
Glencore	Великобритания / Австралия, Колумбия	+	+	+	–	2–3
Anglo American	Великобритания / Австралия	+	–	+	–	2
PT Adaro Energ	Индонезия / Индонезия	+	–	+	–	2
Vale	Бразилия / нет, ранее Мозамбик, Австралия	+	–	+	–	2
Yankuang Energy Group	Китай / Китай, Австралия	+	–	+	–	2
Tata Steel	Индия / Индия	-	–	+	–	1
ArcelorMittal	Швейцария / США, Босния и Герцеговина, США	-	–	+	–	1
Nippon Steel	Япония / косвенно через инвестиции в совместные проекты Австралии и США	-	–	+	–	1
Teck Resources	Канада / Британская Колумбия	+	–	-	–	1
Peabody Energy	США / США, Австралия, Венесуэла	+	–	-	–	1
Coal India	Индия / Индия	–			–	0

Источник: составлено авторами на основе официальных отчетов и сайтов компаний, данных McKinsey, GlobalData.

Таблица 2

Сравнение уровня цифровизации и внедрения ЦД в Австралии, Китае и России

Критерий	Австралия	Китай	Россия
Страновая модель	Частно-корпоративная	Государственная	Нет (пилотные проекты)
Характер ЦСС в отрасли	Открытая, диверсифицированная по горизонтали, глобальная	Закрытая, вертикально-интегрированная, ориентированная на внутренний рынок	Закрытая, вертикально-интегрированная, ориентированная на внешний рынок
Уровень внедрения	Высокий	Средний	Начальный
Основные технологии	Автономная техника, блокчейн	IoT, 5G, AI	Датчики, ГИС, ERP-системы
Безопасность	Превентивный мониторинг	Системы прогнозирования аварий	Локальные решения
Эффективность	+5–10%	+15–20%	+2–5%, часто отрицательная

Источник: составлено авторами на основе официальных отчетов и сайтов компаний, данных McKinsey, Яков и партнеры, GlobalData.

Кейс BHP

BHP – крупнейшая в мире диверсифицированная горнодобывающая и металлургическая компания, имеющая активы в более чем 90 странах. Источниками конкурентоспособности компании являются: высококачественные активы, близость к потребителям, транснациональный масштаб деятельности, производственная и территориальная диверсификация, эффективное корпоративное управление всей ЦСС.

BHP является мировым лидером по внедрению ЦТ и ЦД. Компания перешла на третий уровень цифровизации, завершив синхронизацию КЦД, ИИ и предиктивной аналитики с помощью единого удаленного центра управления (IROC). Центр выполняет функции локального индустриального центра цифровых компетенций, осуществляет мониторинг и анализ тенденций развития ЦТ, разрабатывает стандарты использования ЦТ и ЦД, заключает контракты с партнерами, проводит отбор и мониторинг проектов по внедрению ЦТ в своей компании и компаниях-партнерах.

BHP сотрудничает с лидерами в области ЦТ и горнодобывающей отрасли: AWS (аналитика данных, IoT-платформы), Siemens, Schneider Electric (промышленная автоматизация). Компания реализует совместные проекты с Rio Tinto, Vale по стандартизации цифровых решений, инвестирует в технологические стартапы и создание инновационных центров. IROC в партнерстве с университетами и государственным научным агентством CSIRO участвует в разработке инновационных цифровых и технологических решений.

Источник: официальный сайт компании, данные консалтинговых компаний.

Опыт BHP – это один из самых удачных примеров реализации открытой, преимущественно корпоративной частной модели цифровизации угольной отрасли, в основе которой лежит тесное сотрудничество ведущих глобальных компаний при активной поддержке со стороны национальных государств, которые и обеспечивают компании технологическое лидерство.

В государственных вертикально-интегрированных угольных компаниях Китая государственная поддержка и административный ресурс позволяют снижать операционные расходы и ускоренно внедрять ЦТ и ЦД, догоняя лидеров. Опыт China Shenhua Energy – пример реализации закрытой, преимущественно государственной модели цифровизации угольной отрасли, которая решает проблемы формирования технологического суверенитета и экономической безопасности.

Кейс China Shenhua Energy

China Shenhua Energy – крупнейшая в мире угольная компания. Она входит в государственный энергетический холдинг China Energy Investment Corporation. Ключевыми источниками конкурентоспособности компании являются: масштаб деятельности, низкая себестоимость добычи, жесткий контроль по вертикали за всей ЦСС – от разведки до транспортировки, продажи и переработки, государственное участие и фокус на защищенный внутренний рынок.

Большую роль играет ее статус «национального лидера в энергетике». Он позволяет компании получать государственные субсидии, льготные кредиты, снижать процентные ставки по налогам, получать гарантированный госзаказ на уголь и электроэнергию. Государство предоставляет компании приоритетный доступ к крупнейшим угольным месторождениям и инфраструктурные преференции – строительство ж/д веток и портов за госсчёт (порт Huanghua) и ограничивает вход на китайский угольный рынок иностранных компаний. Через China Energy Investment Corporation (CEIC) China Shenhua Energy активно участвует в разработке отраслевого законодательства и отраслевых стандартов, в которых учитываются ее интересы. При реализации своих проектов компания сотрудничает преимущественно с национальными технологическими компаниями: Huawei – 5G технологии для «умных» шахт, Alibaba – облачные AI-решения, XCMG – автономная горная техника.

Источник: официальный сайт компании, данные консалтинговых компаний.

Угольная отрасль России и российские компании значительно уступают зарубежным лидерам по уровню цифровизации и внедрению ЦД[1]. В целях уточнения ситуации авторами статьи в 2024 г. был проведен опрос 10 экспертов – представителей крупнейших угледобывающих компаний, действующих в Кемеровской области. Полученные результаты в основном совпадают с данными Братарчука и др., проводивших опрос в 2023 г. [15] (табл. 3).

Эксперты сошлись в своих оценках на том, что российские угольные компании пока не готовы внедрять полноценные ЦД, а ЦТ внедряются пока лишь в отдельных звеньях угольных ЦСС: логистика и управление безопасностью (табл. 4).

Таблица 3

Уровень цифровизации угольных компаний России, 2023–2024 гг.

Технология	Данные исследования Братарчука, 2023 г.		Данные опроса авторов статьи, 2024 г.
	Доля в ЦТ в общем объеме инвестиций, %	Средний возраст внедренных систем, лет	Доля в ЦТ в общем объеме инвестиций, %
АСУ ТР	7,2	12,4	8,4
ГИС	5,4	8,6	6,2
SCADA	4,0	10,2	5,0
MES	3,2	6,8	3,8
ИИ	1,2	1,8	1,0
ЦД	1,6	2,4	1,2

Источник: составлено авторами на основе исследования Братарчука и др. [15], официальных отчетов и сайтов компаний, опроса экспертов.

[1] Цифровизация горно-металлургической отрасли России в 2024 году. Долгосрочный оптимизм и высокие цели. М: Яков и Партнёры, ГК «Цифра»; 2024. 20 с.

Таблица 4

Приоритетные направления цифровизации, внедряемые в угольных компаниях России

Компания	Приоритетные направления внедрения ЦТ
АО «Русский Уголь»	Системы беспроводной передачи данных Технологии искусственного интеллекта Управление логистикой
ООО «Восточная горнорудная компания»	
УК «Колмар»	
УК «Кузбассразрезуголь»	
АО «СУЭК»	Комплексные системы MES управления бизнес-процессами Безлюдные роботизированные технологии Локальные цифровые двойники
Шахта «Осинниковская» Распадской угольной компании (угольные активы ЕВРАЗа)	
Разрез «Барзасское товарищество» (АО «Стройсервис»)	

Источник: составлено авторами на основе официальных отчетов и сайтов компаний, опроса экспертов.

Внедрение ЦТ и ЦД «застряло» между первым и вторым уровнями цифровизации. Внедряемые ЦД носят локальный характер и даже в крупных угольных компаниях не обеспечивают ожидаемых результатов.

Обсуждение результатов и выводы

Проведенный анализ показал, что процессы цифровой трансформации и внедрения ЦД в угольной отрасли отстают от других отраслей. Причиной тому являются как общие для всех отраслей барьеры, так и специфичные для угольной отрасли:

– высокая цена цифровых технологий и нехватка ресурсов, значительный эффект масштаба;

– отсутствие четко выстроенной модели развития угольной отрасли и стратегии ее цифровизации;

– низкий уровень автоматизации производства и управления, недостаточность цифровой инфраструктуры;

– острая нехватка кадров и цифровых компетенций у руководителей компаний.

Наконец, серьезным препятствием для внедрения ЦТ и ЦД является сложность оценки реальных эффектов цифровой трансформации. В настоящее время практически отсутствуют измеримые показатели целей, методики оценки эффективности и результативности внедрения ЦТ, а перечень показателей, по которым осуществляются мониторинги и создаются рейтинги, ориентированы на развитые страны и не сбалансированы [20]. Именно поэтому в современных условиях все чаще используют экспертные оценочные суждения и балльно-рейтинговые оценки. Их основной недостаток – субъективность. Без разработки национальных стандартов и методик оценки решить эти вопросы невозможно.

Для преодоления этих барьеров, по мнению авторов, необходимо разработать стратегию цифровизации угольной отрасли, определить ключевые субъекты, цели и механизмы. В условиях санкций и крайней зависимости от импорта производственных и цифровых технологий сделать это невозможно без активного участия государства. В России угольные компании – частные, поэтому это может быть только смешанная модель внедрения ЦТ и ЦД. Инструментом ее реализации могли бы стать индустриальные центры компетенций (ИЦК) – механизм взаимодействия государства, отраслей и IT-компаний, запущенный в 2022 г. ИЦК позволяют государству, частным компаниям и научно-образовательным организациям устанавливать стандарты и приоритеты цифровизации отраслей, совместно финансировать и управлять проектами. Сегодня 36 ИЦК на принципах государственно-частного партнерства созданы во всех ключевых отраслях экономики в рамках национального проекта «Эффективная и конкурентная экономика», но пока отсутствуют в угольной отрасли.

Список литературы / References

1. Grieves M., Vickers. J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen F.-J., Flumerfelt Sh., Alves A. (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer, Cham; 2017. Pp. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
2. Schluse M., Rossmann J. From simulation to experimentable digital twins: simulation-based development and operation of complex technical systems. In: *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. Edinburgh, UK; 2016. Pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/SysEng.2016.7753162
3. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:939–948. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198
4. El-Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. In: *IEEE MultiMedia*. 2018;25(2):87–92. https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.023121167
5. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective. In: *IEEE Access*. 2020;8:21980–22012. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143
6. Ghahramanieisalou M., Sattarvand J. Digital twins and the mining industry. In: Soni A.K. (ed.) *Technology in Mining Industry*. IntechOpen; 2024. Pp. 1–30. https://doi.org/10.5772/intechopen.1005162
7. Zhang C., Xu W., Liu J., et al. A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system. *Procedia CIRP*. 2019;83:118–125. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.141

8. Ghahramanieisalou M., Sattarvand J. Applications of digital twin technology in productivity optimization of mining operations. In: *Applications for Computers and Operations Research in the Minerals Industries*. August 2023. Rapid City, USA: SME; 2023. Pp. 1–17.
9. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Щербина Л.А. и др. *Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности*. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета; 2022. 492 с.
Borovkov A.I., Ryabov Y.A., Shcherbina L.A., et al. *Digital twins in high-tech industries*. Saint Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publishing House; 2022. 492 p. (In Russ.)
10. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*. М.: Альянс Принт; 2020. 401 с.
Prokhorov A., Lysachev M. *Digital twin: Analysis, trends, and global experience*. Moscow: Alliance Print; 2020. 401 p. (In Russ.)
11. Абрамов В.И. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития. *Вопросы инновационной экономики*. 2024;14(3):691–716. https://doi.org/10.18334/vinec.14.3.121484
Abramov V.I., Gordeev V.V., Stolyarov A.D. Digital twins: characteristics, typology and development practices. *Russian Journal of Innovation Economics*. 2024;14(3):691–716. (In Russ.) https://doi.org/10.18334/vinec.14.3.121484
12. Мадатов Д.А., Борисов В.В., Сивков В.С. Будущее технологии цифровых двойников. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2025;10(1):10–15.
Madatov D.A., Borisov V.V., Sivkov V.S. The future of digital twin technology. *Mezhdunarodnyy Zhurnal Informatsionnykh Tekhnologiy i Energoeffektivnosti*. 2025;10(1):10–15. (In Russ.)
13. Панов Ю.П., Грабский А.А., Рожков А.А. Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий в угольной промышленности России. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;(5):8–21. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-5-8-21
Panov Yu.P., Grabsky A.A., Rozhkov A.A. Current state and prospects for digitalization of the Russian coal industry. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023;(5):8–21. (In Russ.) https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-5-8-21
14. 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
15. Братарчук Т.В., Гладышев А.Г., Лукичев К.Е. и др. Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации и устойчивого развития угольной промышленности России. *Уголь*. 2024;(11):108–116. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11-108-116
Bratarchuk T.V., Gladyshev A.G., Lukichev K.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.) https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11-108-116
16. Соловенко И.С., Рожков А.А. Цифровизация предприятий топливно-энергетического комплекса России (рубеж XX–XXI вв.): степень изученности проблемы. *Вестник Томского государственного университета*. 2023;489:153–161. https://doi.org/10.17223/15617793/489/15
Solovenko I.S., Rozhkov A.A. Digitalization of enterprises of the fuel and energy complex of Russia (the turn of the 21st century): The state of the art of the problem. *Tomsk State University Journal*. 2023;489:153–161. (In Russ.) https://doi.org/10.17223/15617793/489/15
17. Никитенко С.М., Гоосен Е.В., Кавкаева О. Моделирование гибких цепочек добавленной стоимости на основе «чистых» технологий переработки угля. *Горная промышленность*. 2023;(S2):126–134. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-126-134
Nikitenko S.M., Goosen E.V., Kavkaeva O. Modeling of flexible value chains based on clean coal processing technologies. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):126–134. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-126-134
18. Никитенко С.М., Павлова Л.Д., Корнева А.В. и др. Формирование и управление цепочками создания стоимости в угольной отрасли на основе перспективных технологий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(8):163–179. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_8_0_163
Nikitenko S.M., Pavlova L.D., Korneva A.V., et al. Formation and control of value chains in coal industry based on emerging technologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(8):163–179. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_8_0_163
19. Goosen E.V., Kagan E.S., Nikitenko S.M., Pakhomova E.O. Evolution of VAC in the context of coal industry advance in the conditions of digitization in Russia. *Eurasian Mining*. 2019;(2):36–40.
20. Курлов В.В., Косухина М.А., Курлов А.В. Модель оценки цифровой зрелости промышленного предприятия. *Экономика и управление*. 2022;28(5):439–451. https://doi.org/10.35854/1998-1627-2022-5-439-451
Kurlov V.V., Kosukhina M.A., Kurlov A.V. Model for assessing the digital maturity of an industrial enterprise. *Economics and Management*. 2022;28(5):439–451. (In Russ.) https://doi.org/10.35854/1998-1627-2022-5-439-451

Информация об авторах

Сергей Михайлович Никитенко – доктор экономических наук, доцент, заведующий лабораторией трансформации цепочек создания стоимости в угольной отрасли, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-6684-4159, Scopus ID 56511552300; e-mail nsm.nis@mail.ru

Елена Владимировна Гоосен – кандидат экономических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории трансформации цепочек создания стоимости в угольной отрасли, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-1387-4802, Scopus ID 57192160485; e-mail egoosen@yandex.ru

Анатолий Алексеевич Рожков – профессор, начальник отдела аналитических исследований и краткосрочного прогнозирования развития угольной промышленности, департамент аналитики по сегменту угольной, торфяной промышленности, Российское энергетическое агентство, Минэнерго России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-4541-0922; e-mail rozhkov@rosenergo.gov.ru

Михаил Константинович Королев – научный сотрудник лаборатории трансформации цепочек создания стоимости в угольной отрасли, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-8102-9830, Scopus ID 57246310900; e-mail m.korolev.gm@gmail.com

Information about the authors

Sergey M. Nikitenko – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Value Chain Transformation in the Coal Industry, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0001-6684-4159, Scopus ID 56511552300; e-mail nsm.nis@mail.ru

Elena V. Goosen – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Value Chain Transformation in the Coal Industry, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0002-1387-4802, Scopus ID 57192160485; e-mail egoosen@yandex.ru

Anatoly A. Rozhkov – Professor, Head of Analytical Research and Short-Term Forecasting Department for Coal Industry Development, Department of Analytics for Coal and Peat Industries, Russian Energy Agency, Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-4541-0922; e-mail rozhkov@rosenergo.gov.ru

Mikhail K. Korolev – Researcher of the Laboratory of Value Chain Transformation in the Coal Industry, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; ORCID 0000-0001-8102-9830, Scopus ID 57246310900; e-mail m.korolev.gm@gmail.com

Поступила в редакцию	01.04.2025	**Received**	01.04.2025
Поступила после рецензирования	21.06.2025	**Revised**	21.06.2025
Принята к публикации	27.06.2025	**Accepted**	27.06.2025