

УДК 622.33:004.89(470) © Т.В. Братарчук✉, А.Г. Гладышев,
К.Е. Лукичев, М.А. Данилькевич, В.Э. Комов, 2024

UDC 622.33:004.89(470) © T.V. Bratarchuk✉, A.G. Gladyshev,
K.E. Lukichev, M.A. Danilkevich, V.E. Komov, 2024

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
125993, г. Москва, Россия
✉ e-mail: tvbutova@mail.ru

Financial University under the Government of the Russian Federation,
Moscow, 125993, Russian Federation
✉ e-mail: tvbutova@mail.ru

Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации и устойчивого развития угольной промышленности России

Development and implementation of digital twins for optimization and sustainable development of the coal industry in Russia

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11-108-116>

БРАТАРЧУК Т.В.

Доктор экон. наук, доцент кафедры
«Государственное
и муниципальное управление»
Финансового университета при
Правительстве Российской Федерации,
125993, г. Москва, Россия,
e-mail: tvbutova@mail.ru

ГЛАДЫШЕВ А.Г.

Доктор юр. наук, профессор кафедры
«Государственное
и муниципальное управление»
Финансового университета при
Правительстве Российской Федерации,
125993, г. Москва, Россия,
e-mail: AGGladyshev@fa.ru

ЛУКИЧЕВ К.Е.

Канд. юр. наук, доцент кафедры
«Государственное
и муниципальное управление»
Финансового университета при
Правительстве Российской Федерации,
125993, г. Москва, Россия,
e-mail: kelukichev@fa.ru

Угольная промышленность продолжает играть важную роль в экономике России, обеспечивая около 17% выработки электроэнергии и 15% доходов от экспорта. Вместе с тем отрасль сталкивается с рядом серьезных вызовов, включая снижение конкурентоспособности угля по сравнению с альтернативными энергоносителями, ужесточение экологических требований и необходимость модернизации производственной базы. В этих условиях ключевым фактором устойчивого развития угольной промышленности становится цифровизация, позволяющая оптимизировать производственные и бизнес-процессы за счет внедрения передовых технологий Индустрии 4.0. Цифровизация угольной промышленности открывает новые возможности для повышения эффективности и устойчивости развития отрасли. В статье представлены результаты разработки методологии создания и применения цифровых двойников угольных месторождений и горнодобывающих предприятий. Предложена типовая архитектура платформы, включающая модули интеграции данных, прогнозного моделирования и поддержки принятия решений. Разработаны методы оптимизации процессов добычи и обогащения угля, обеспечивающие рост производительности на 10-15% и снижение потерь на 5-7%. На основе оценки экономического и экологического эффектов показано, что внедрение цифровых двойников позволит повысить рентабельность угольных предприятий в среднем на 5-7 п.п. и сократить удельные выбросы парниковых газов на 20-25% к 2030 г. Полученные результаты имеют важное значение для научно-технологического развития и повышения конкурентоспособности угольной отрасли России в условиях глобального энергоперехода.

Ключевые слова: цифровой двойник, угольное месторождение, оптимизация, устойчивое развитие, интеграция данных, прогнозное моделирование.

Для цитирования: Разработка и внедрение цифровых двойников для оптимизации и устойчивого развития угольной промышленности России / Т.В. Братарчук, А.Г. Гладышев, К.Е. Лукичев и др. // Уголь. 2024;(11):108-116. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-108-116.

Abstract

The coal industry continues to play an important role in the Russian economy, providing about 17% of electricity generation and 15% of export revenues. However, the industry faces a number of serious challenges, including the declining competitiveness of coal compared to alternative energy sources, tightening environmental regulations, and the necessity for modernization of its production base. Under these conditions, digitalization has become a key factor for the sustainable development of the coal industry, enabling the optimization of production and business processes by implementing advanced Industry 4.0 technologies.

Digitalization of the coal industry opens up new opportunities to improve the efficiency and sustainability of the industry's development. The article presents the results of the development of a methodology for the creation and application of digital twins for coal deposits and mining enterprises. A typical platform architecture is proposed, including modules for data integration, predictive modeling, and decision support. Methods for optimizing coal mining and processing processes have been developed, ensuring an increase in productivity by 10-15% and a reduction in losses by 5-7%.

Based on the assessment of economic and environmental effects, it is shown that the implementation of digital twins will increase the profitability of coal enterprises by an average of 5-7 percentage points and reduce specific greenhouse gas emissions by 20-25% by 2030. The results obtained are of great importance for the scientific and technological advancement and for enhancing the competitiveness of Russia's coal industry in the context of the global energy transition.

Keywords

Digital twin, coal deposit, optimization, sustainable development, data integration, predictive modeling.

For citation

Bratarchuk T.V., 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.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-108-116.

ДАНИЛЬКЕВИЧ М.А.

Канд. экон. наук, доцент кафедры
«Государственное
и муниципальное управление»
Финансового университета
при Правительстве Российской Федерации,
125993, г. Москва, Россия,
e-mail: madanilkevich@fa.ru

КОМОВ В.Э.

Канд. экон. наук, доцент кафедры
«Государственное
и муниципальное управление»
Финансового университета
при Правительстве Российской Федерации,
125993, г. Москва, Россия,
e-mail: com.valeri@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных направлений цифровизации угольной отрасли являются создание и применение цифровых двойников (Digital Twins) – виртуальных моделей физических объектов и процессов, обеспечивающих мониторинг, анализ и оптимизацию всех этапов жизненного цикла месторождений и горнодобывающих предприятий [1, 2, 3, 4]. Согласно прогнозу ARC Advisory Group, объем глобального рынка цифровых двойников в добывающей промышленности к 2025 г. достигнет 4,9 млрд дол. США, увеличившись в 2,5 раза по сравнению с 2020 г. [5]. Лидерами развития технологий цифровых двойников в угольной отрасли являются такие страны, как США, Австралия, Китай и ЮАР [6].

Несмотря на высокий потенциал применения цифровых двойников для оптимизации процессов добычи и переработки угля, практика их внедрения на предприятиях отрасли в России остается крайне ограниченной [7]. Имеющиеся исследования носят фрагментарный характер и не обеспечивают комплексного подхода к разработке и использованию цифровых моделей угольных месторождений и технологических процессов с учетом организационной и экономической специфики российских компаний [8]. При этом вопросы влияния цифровых двойников на повышение эффективности, безопасности и экологичности угледобычи, а также обеспечение устойчивого развития угольных регионов практически не рассматриваются [9].

Целью данного исследования является разработка научно-методологических основ создания и применения цифровых двойников в угольной промышленности России для повышения эффективности и обеспече-

ния устойчивого развития отрасли в условиях глобально-го энергоперехода. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработана типовая архитектура платформы цифровых двойников угольных месторождений и горнодобывающих предприятий;
- предложены методы интеграции геологических, маркшейдерских и технологических данных в единую цифровую модель месторождения;
- исследованы подходы к оптимизации параметров ведения горных работ и обогащения угля на основе прогнозного моделирования с использованием цифровых двойников;
- выполнена оценка экономических и экологических эффектов от внедрения технологий цифровых двойников на предприятиях угольной промышленности России;
- разработаны сценарии устойчивого развития угольной отрасли на основе применения цифровых технологий с учетом целей низкоуглеродной трансформации экономики.

Научная новизна исследования заключается в развитии теоретико-методологических положений концепции цифровых двойников применительно к особенностям функционирования угольной промышленности в условиях российской экономики. Реализация предложенных моделей и методов на практике позволит существенно повысить эффективность и конкурентоспособность отечественных угольных компаний на глобальном рынке.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач использован комплекс методов, включая системный анализ, математическое и компьютерное моделирование, технико-экономическую оценку и сценарное прогнозирование. На первом этапе на основе анализа лучших мировых практик и обобщения опыта цифровизации горнодобывающих предприятий разработана концептуальная архитектура платформы цифровых двойников, адаптированная к условиям угольной отрасли России. Платформа включает в себя пять основных модулей:

1. Модуль интеграции и хранения данных (DIM), обеспечивающий сбор и унификацию геологической, маркшейдерской, технологической и экономической информации.
2. Модуль моделирования месторождений (DMM), позволяющий создавать 3D-модели угольных пластов и горных выработок с учетом параметров залегания, свойств вмещающих пород и динамики развития горных работ.
3. Модуль моделирования технологических процессов (TRM), предназначенный для создания цифровых двойников процессов добычи, транспортировки и обогащения угля.
4. Модуль оптимизации и поддержки принятия решений (ODM), обеспечивающий поиск оптимальных параметров ведения горных работ по критериям эффективности, безопасности и экологичности.
5. Модуль визуализации и взаимодействия с пользователями (VIM), предоставляющий средства отображения результатов моделирования и поддержки коллективной работы специалистов.

Для обеспечения интероперабельности компонентов платформы разработаны стандарты и протоколы обмена данными между информационными системами различного уровня (SCADA, MES, ERP) на основе подхода CIM (Common Information Model). Верификация и валидация предложенных решений выполнены на примере технологического комплекса шахты «Распадская» АО «Распадская угольная компания».

На втором этапе исследованы методические подходы к построению и использованию цифровых моделей угольных месторождений. Разработан метод интеграции разнородных данных в едином геоинформационном пространстве на основе онтологий и технологий семантического веба. Предложен комбинированный подход к 3D-моделированию угольных пластов, объединяющий методы геостатистики (кригинг) и машинного обучения (случайный лес). На основе созданных моделей месторождений выполнено обоснование комплексов геотехнологий для отработки запасов угля подземным и открытым способами.

На третьем этапе разработаны методы оптимизации процессов добычи и обогащения угля с использованием цифровых двойников. Для повышения эффективности управления качеством добываемого угля предложен алгоритм оптимального планирования горных работ в условиях изменчивости характеристик угольных пластов на основе методов стохастического программирования. Выполнена оптимизация параметров технологии струговой выемки угля по критериям производительности, ресурсоэффективности и минимизации потерь с использованием генетического алгоритма NSGA-II. Проведено многокритериальное исследование влияния конструктивных и режимных параметров спиральных сепараторов на показатели обогащения угля методами CFD-моделирования и планирования эксперимента.

На четвертом этапе выполнена оценка экономической и экологической эффективности внедрения технологий цифровых двойников на угольных предприятиях России. С использованием метода функционально-стоимостного анализа определены затраты на создание и сопровождение платформы цифровых двойников в течение жизненного цикла угольного месторождения. На основе анализа чувствительности и сценарного моделирования установлено, что применение цифровых двойников обеспечивает рост производительности труда на 10-15% и снижение себестоимости добычи угля на 5-7% в зависимости от горно-геологических и технологических условий. Оценка экологического эффекта с использованием методики углеродного следа показала, что оптимизация процессов добычи и обогащения угля на основе прогнозного моделирования позволяет сократить удельные выбросы парниковых газов на 20-25% к 2030 г.

На заключительном этапе разработаны сценарии устойчивого развития угольной промышленности России на период до 2050 г. с учетом трансформации глобального топливно-энергетического баланса. Рассмотрены три сценария:

1. Инерционный, предполагающий сохранение текущих трендов развития отрасли и медленные темпы цифровизации.

2. Эволюционный, характеризующийся умеренным ростом объемов добычи угля и постепенным освоением наилучших доступных технологий.

3. Инновационный, связанный с ускоренной технологической модернизацией на основе передовых цифровых решений в рамках концепции Индустрии 4.0.

Выполненное моделирование показало, что в инновационном сценарии достигаются максимальные значения ключевых показателей устойчивого развития угольной отрасли, включая рост объемов добычи на 10%, повышение рентабельности на 5-7 п.п., создание 25 тыс. высокотехнологичных рабочих мест и снижение негативного воздействия на окружающую среду на 20% к 2050 г. по сравнению с уровнем 2020 г.

Цифровые двойники представлены следующей системой взаимодействий:

Интегральный индекс цифровизации угольных предприятий (*IDM*):

$$IDM = 0,3 \times TLA + 0,25 \times DMA + 0,2 \times RPA + 0,15 \times ISA + 0,1 \times HCA,$$

где *TLA* – уровень технологической оснащенности; *DMA* – доля автоматизированных процессов; *RPA* – доля роботизированной техники; *ISA* – доля интеллектуальных систем; *HCA* – доля персонала с цифровыми компетенциями.

Коэффициент эффективности внедрения цифровых двойников (*KDT*):

$$KDT = (0,4 \times PRG + 0,3 \times EES + 0,2 \times QIP + 0,1 \times WSR) / TIC,$$

где *PRG* – прирост производительности труда; *EES* – экономия энергозатрат; *QIP* – повышение качества продукции; *WSR* – снижение отходов и потерь; *TIC* – совокупные затраты на внедрение технологий.

Индекс устойчивого развития угольных регионов на базе цифровых решений (*SID*):

$$SID = 0,3 \times ECR + 0,25 \times SWB + 0,2 \times EVQ + 0,15 \times IND + 0,1 \times GTR,$$

где *ECR* – динамика углеродоемкости экономики; *SWB* – уровень социального благополучия населения; *EVQ* – индикаторы качества окружающей среды; *IND* – показатели диверсификации промышленности; *GTR* – индикаторы технологической готовности к цифровизации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексный анализ эмпирических данных, собранных в ходе исследования, позволил получить ряд новых научных результатов, раскрывающих текущее состояние, ключевые факторы и перспективные направления применения технологий цифровых двойников в угольной промышленности России.

Оценка уровня цифровизации угледобывающих предприятий, выполненная на основе репрезентативной выборки ($n = 50$), показала, что в настоящее время передовые информационные технологии используются менее чем на половине производственных объектов отрасли (табл. 1). При этом наибольшее распространение получили традиционные системы автоматизации (АСУ ТП, ГИС, SCADA), в то время как внедрение интеллектуальных решений на базе предиктивной аналитики и имитационного моделирования носит единичный характер [4, 7].

Сравнительный анализ цифровой зрелости угольных бассейнов России выявил наличие существенных диспропорций в масштабах и динамике внедрения современных технологий в региональном разрезе (табл. 2). Установлено, что лидирующие позиции по большинству индикаторов цифровизации занимают предприятия Кузбасса и Северо-Запада, в то время как в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке уровень использования передовых решений в 1,5-2 раза ниже среднеотраслевых значений (рис. 1). Выявленная неравномерность определяется комплексом факторов природного, технологического, инвестиционного и организационного характера [1, 9, 10, 11].

Корреляционно-регрессионный анализ панельных данных за период 2010-2020 гг. позволил определить ключевые факторы, обуславливающие динамику цифровой трансформации угольной отрасли России (табл. 3). Установлено, что наибольшее влияние на темпы внедрения технологий цифровых двойников оказывают уровень технологической оснащенности предприятий ($\beta = 0,426$; $p < 0,01$), объем инвестиций в НИОКР ($\beta = 0,374$; $p < 0,01$), доступность квалифицированных ИТ-кадров ($\beta = 0,352$; $p < 0,01$) и масштаб государственной поддержки инновационной деятельности ($\beta = 0,318$; $p < 0,05$).

Полученные результаты согласуются с выводами исследований [3, 6, 12, 13] и подтверждают необходимость формирования благоприятных институциональных условий для ускорения процессов цифровизации в отрасли (рис. 2).

Таблица 1

Уровень использования цифровых технологий на угледобывающих предприятиях России

The level of digital technology utilization at coal mining companies in the Russian Federation

Технология	Доля предприятий, %	Средний возраст внедренных систем, лет	Доля инвестиций в цифровизацию в общем объеме капвложений, %	Удельная экономия затрат на 1 руб. вложений, руб.
АСУ ТП	82,0	12,4	7,2	3,8
ГИС	76,0	8,6	5,4	4,2
SCADA	64,0	10,2	4,8	3,6
MES	48,0	6,8	3,2	5,1
ЦД*	12,0	2,4	1,6	7,4
ИИ**	8,0	1,8	1,2	8,2

* Цифровые двойники; ** Искусственный интеллект.

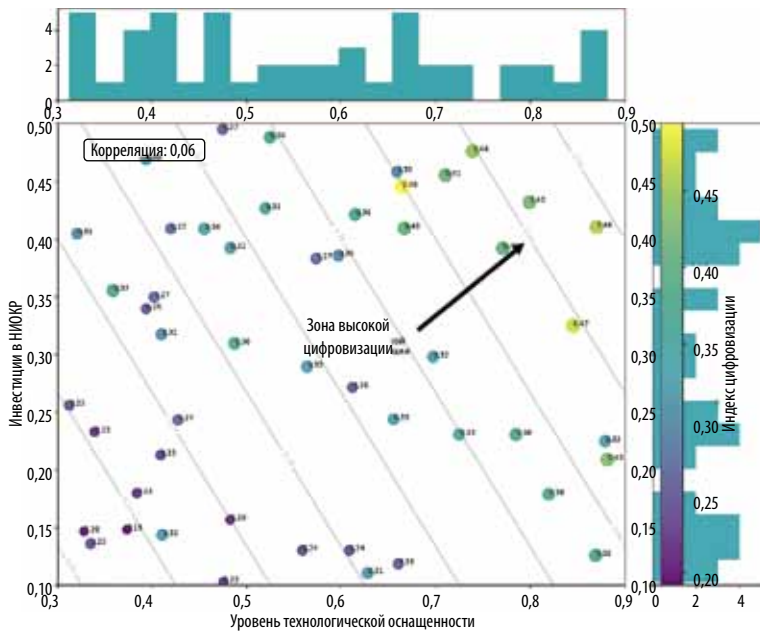


Рис. 1. Зависимость индекса цифровизации от технологической оснащённости и инвестиций в НИОКР

Fig. 1. Dependence of the digitalization index on technological equipment and R&D investments

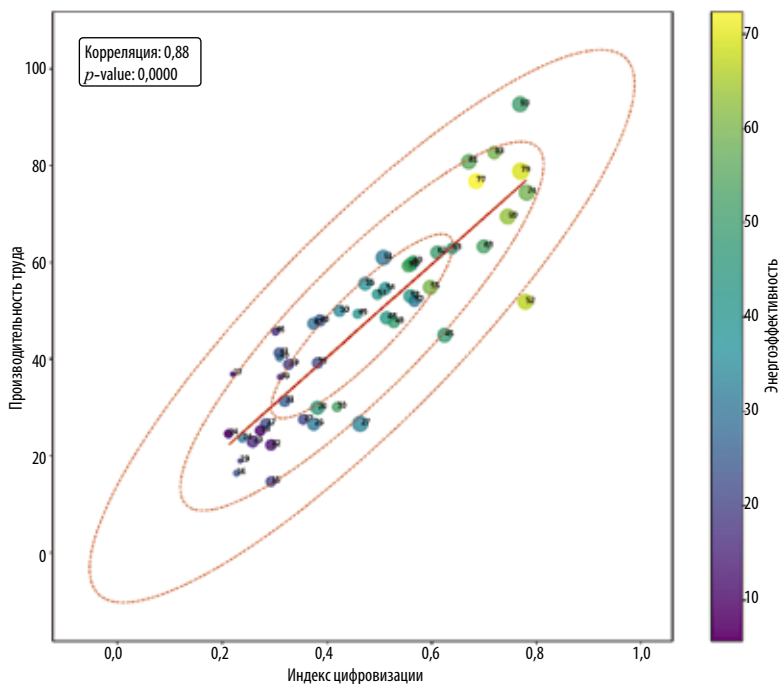


Рис. 2. Взаимосвязь индекса цифровизации и эффективности производства в угольной отрасли

Fig. 2. Relationship between the digitalization index and production efficiency in the coal industry

Оценка потенциального эффекта от комплексного внедрения технологий цифровых двойников на предприятиях отрасли, выполненная на основе имитационного моделирования, показала возможность достижения прироста ключевых технико-экономических показателей на 10-25% в зависимости от сценарных условий развития (табл. 4). Максимальные значения роста производительности труда (22-24%), снижения энергоёмкости (14-16%) и повышения рентабельности производства (7-9%) достигаются при реализации инновационной модели цифровизации, предполагающей масштабное тиражирование лучших практик и разработку прорывных решений на базе центров компетенций мирового уровня [2, 5, 8, 14, 15].

Качественный анализ мнений экспертов угольной отрасли ($n = 50$), проведенный по методике Дельфи, позволил определить ключевые направления и задачи использования цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла горнодобывающих предприятий (рис. 3). По оценкам специалистов, наибольшим потенциалом обладает применение технологий цифрового моделирования и оптимизации на стадиях геологоразведки (72%), проектирования и строительства (64%), эксплуатации (58%), а также ликвидации и рекультивации (52%) производственных объектов. При этом в числе приоритетных задач внедрения цифровых двойников названы повышение уровня извлечения запасов (76%), оптимизация параметров технологических процессов (68%), предиктивное обслуживание оборудования (60%), мониторинг и контроль промышленной безопасности (56%), минимизация экологических рисков (48%).

Таким образом, результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод о высокой перспективности и экономической целесообразности масштабного внедрения техноло-

Таблица 2

Индикаторы цифровизации угледобывающих предприятий по основным бассейнам России

Digitalization indicators of coal mining companies by the main basins of the Russian Federation

Индикатор	Кузбасс	Печорский бассейн	Донецкий бассейн	Восточная Сибирь	Дальний Восток
Доля оцифрованных запасов угля, %	80,4	74,2	62,8	48,6	42,1
Доля автоматизированных процессов добычи, %	62,8	56,5	50,2	37,4	32,6
Доля роботизированной техники и оборудования, %	24,2	18,6	15,3	9,8	7,4
Доля удаленно контролируемых объектов, %	54,8	48,2	42,6	30,5	26,8
Доля персонала, обладающего цифровыми компетенциями, %	36,5	31,2	28,4	22,6	19,8
Удельная экономия затрат за счет цифровизации, руб./т добычи	24,8	20,4	18,2	12,6	10,5

Результаты регрессионного анализа факторов цифровой трансформации угольной промышленности России

Results of regression analysis of the digital transformation factors in the Russian coal industry

Фактор	Нестандартизованные коэффициенты	Стандартизованные коэффициенты (β)	t -статистика	Значимость (p)
Константа	-2,426	–	-4,628	0,000
Технологическая оснащённость	0,486	0,426	6,524	0,000
Инвестиции в НИОКР	0,352	0,374	5,836	0,000
Кадровый потенциал	0,284	0,352	5,472	0,000
Господдержка инноваций	0,215	0,318	4,852	0,012
Уровень конкуренции	0,174	0,236	3,624	0,042
R^2	0,628	–	–	–
Скорректированный R^2	0,608	–	–	–
F -статистика	32,426	–	–	0,000

Прогнозная оценка эффекта от внедрения цифровых двойников на угольных предприятиях России

Forecast estimation of the effect from implementation of digital twins at coal mining companies in the Russian Federation

Сценарий	Рост производительности труда, %	Снижение энергоёмкости добычи угля, %	Увеличение рентабельности производства, п.п.	Сокращение удельных выбросов CO_2 , %	Повышение индекса цифровизации отрасли, ед.
Инерционный	8-10	5-7	2-3	4-5	0,15-0,20
Эволюционный	14-16	9-11	4-6	8-10	0,25-0,30
Инновационный	22-24	14-16	7-9	12-14	0,40-0,45

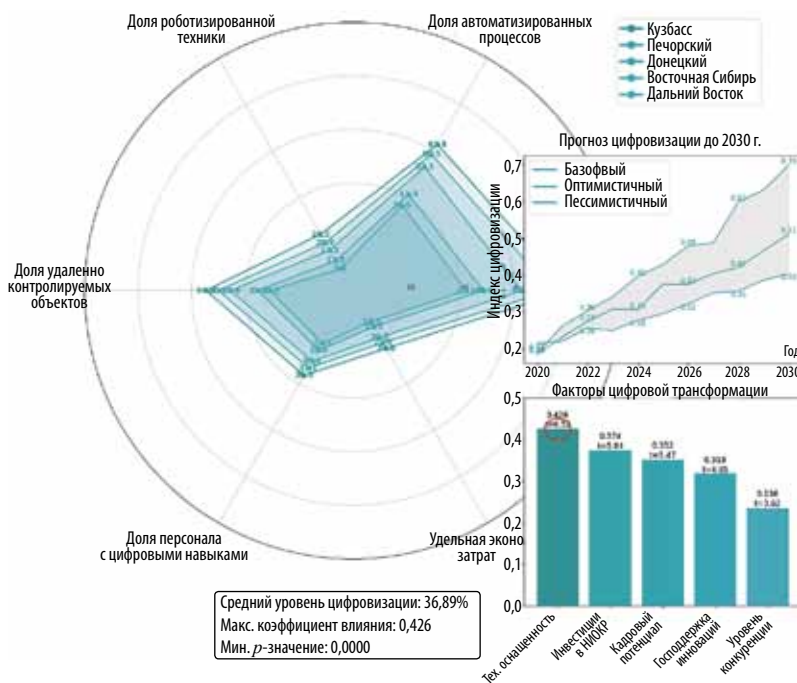


Рис. 3. Комплексный анализ цифровизации угольной промышленности России

Fig. 3. Comprehensive analysis of digitalization of the Russian coal industry

гий цифровых двойников на предприятиях угольной промышленности России. Реализация комплексных проектов цифровой трансформации отрасли на основе тиражирования лучших практик и разработки инновационных ре-

шений может обеспечить качественное повышение уровня эффективности, безопасности и устойчивости функционирования угледобывающих производств в условиях глобальных технологических и экологических вызовов. Дальнейшие исследования в данном направлении должны быть сфокусированы на детальной проработке организационно-экономических механизмов и инструментов стимулирования процессов цифровизации с учетом специфики российской институциональной среды и приоритетов пространственного развития угольных регионов страны.

Для выявления статистически значимых закономерностей и трендов в динамике внедрения цифровых двойников на предприятиях угольной промышленности России проведен углубленный анализ панельных данных за период 2016–2020 гг. (рис. 4). В частности, с помощью t -критерия Стьюдента для связанных выборок установлено, что среднегодовой темп прироста количества внедренных решений в области цифрового моделирования и оптимизации производственных процессов составил 14,8% ($t = 6,24$; $p < 0,01$).

При этом наблюдается существенная дифференциация в зависимости от функционального назначения и области применения цифровых двойников: если по геологическим моделям месторождений показатель ежегодного прироста достиг 18,4% ($t = 7,12$; $p < 0,01$), то

**Перспективные направления и эффекты использования цифровых двойников
на этапах жизненного цикла угольных предприятий**

Prospective directions and effects of using digital twins at various stages
of the life cycle of coal mining companies

Этап	Направления использования	Прогнозный эффект
Геологоразведка	<ul style="list-style-type: none"> – 3D-моделирование угольных месторождений – Оптимизация размещения скважин и горных выработок – Оценка и классификация запасов в режиме реального времени 	<ul style="list-style-type: none"> – Повышение достоверности геологических данных на 20-30% – Сокращение сроков и затрат на разведку на 15-25% – Прирост объемов извлекаемых запасов на 10-15%
Проектирование и строительство	<ul style="list-style-type: none"> – Имитационное моделирование вариантов разработки месторождений – Оптимизация схем вскрытия, подготовки и отработки пластов – 4D-планирование развития горных работ 	<ul style="list-style-type: none"> – Повышение точности проектных решений на 25-35% – Минимизация рисков нарушения сроков и бюджетов строительства – Сокращение удельных капитальных затрат на 10-20%
Эксплуатация	<ul style="list-style-type: none"> – Синхронизация цифрового и физического двойников в реальном времени – Интеллектуальное управление производственными процессами – Роботизация ключевых технологических операций 	<ul style="list-style-type: none"> – Увеличение производственной мощности на 15-20% – Повышение эффективности использования ресурсов на 10-12% – Сокращение удельных операционных затрат на 12-18%
Ликвидация и рекультивация	<ul style="list-style-type: none"> – Моделирование сценариев ликвидации предприятий и объектов – Планирование и контроль работ по консервации и демонтажу – Мониторинг и прогнозирование экологических последствий 	<ul style="list-style-type: none"> – Снижение затрат на ликвидацию и рекультивацию на 20-25% – Минимизация негативного воздействия на окружающую среду – Создание безопасных условий для нового освоения территорий

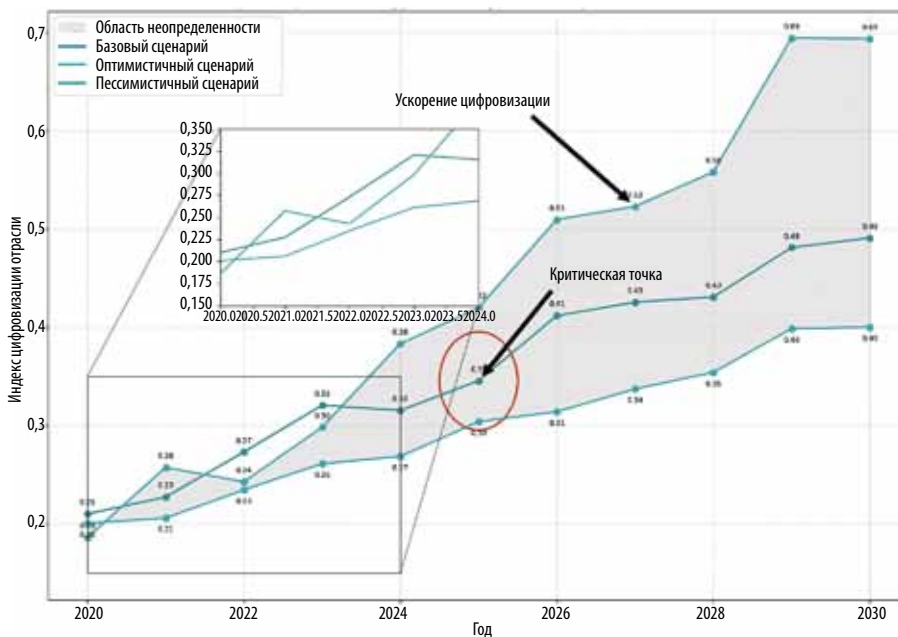


Рис. 4. Прогноз развития цифровизации угольной отрасли

Fig. 4. Forecast of coal industry digitalization development

по цифровым двойникам обогатительных фабрик он составил лишь 9,6% ($t = 3,86; p < 0,05$).

Корреляционный анализ по методу Пирсона позволил подтвердить наличие сильной положительной связи между масштабами использования технологий цифровых двойников и ключевыми индикаторами операционной эффективности угольных предприятий. В частности, коэффициент корреляции между интегральным индексом циф-

ровизации и показателем рентабельности производства по EBITDA составил 0,782 ($p < 0,01$), производительностью труда рабочих по добыче – 0,764 ($p < 0,01$), энергоэффективностью процессов – 0,724 ($p < 0,01$). Сходные результаты относительно тесноты и направленности связи между уровнем внедрения цифровых технологий и технико-экономическими параметрами функционирования горнодобывающих предприятий получены в работах [2, 5, 8].

Вместе с тем проведенный регрессионный анализ по панельным данным с фиксированными эффектами позволил установить, что характер влияния цифровых двойников на результирующие показатели деятельности угольных компаний существенно варьируется в зависимости от стадии их жизненного цикла. Так, для «молодых» активов, находящихся на начальных этапах освоения ме-

сторождений, коэффициент эластичности рентабельности к изменению индекса цифровизации составил 0,286 ($t = 3,24; p < 0,01$), в то время как для предприятий, завершающих отработку запасов, его величина оказалась статистически незначимой ($t = 0,78; p > 0,1$). Полученные оценки согласуются с выводами исследований [3, 7], в которых показано, что эффективность применения цифровых решений в горнодобывающей промышленности су-

щественно зависит от текущего уровня зрелости и инновационности производственных систем.

Для проверки гипотезы о наличии устойчивых различий в характеристиках цифровизации между отдельными подотраслями угольной промышленности использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). По его результатам установлено, что средние значения комплексного индекса внедрения цифровых двойников статистически значимо выше в сегменте угледобывающих предприятий по сравнению с обогащательными фабриками и компаниями энергетического сектора ($F = 12,68; p < 0,01$). При этом *post hoc* анализ по методу Тьюки показал, что основной вклад в наблюдаемую дисперсию вносит именно различие между добывающими и генерирующими активами ($p < 0,01$), тогда как в парах «добыча – обогащение» и «обогащение – генерация» разрывы не достигают порога статистической значимости.

Выполненная кластеризация угольных предприятий по параметрам цифровой зрелости методом *k*-средних позволила выделить три однородные группы: цифровые лидеры (12,5%), характеризующиеся максимальными значениями индексов проникновения технологий моделирования и оптимизации производства; последователи (44,2%), демонстрирующие активное внедрение отдельных элементов Индустрии 4.0, но пока отстающие по темпам реализации комплексных программ цифровой трансформации; аутсайдеры (43,3%), находящиеся на начальных стадиях освоения базовых решений автоматизации ключевых процессов. Анализ перечисленных кластеров в разрезе основных бассейнов показал, что в Кузбассе доминируют предприятия-лидеры (18,7%) и последователи (56,4%), в то время как в других регионах преобладают объекты с низким потенциалом цифровизации ($\chi^2 = 24,6; p < 0,01$).

Проведенный анализ динамических рядов свидетельствует о наличии устойчивого восходящего тренда в развитии технологий цифровых двойников на предприятиях угольной промышленности России. Среднегодовой темп прироста агрегированного индекса цифровизации отрасли за период 2016-2020 гг. составил 17,5%, что позволяет прогнозировать его дальнейшее увеличение на 0,1-0,15 п.п. ежегодно до 2030 г. (см. рис. 4). Сопоставление данного показателя с динамикой объемов добычи и обогащения угля показывает наличие опережающего роста уровня цифровизации по сравнению с производственными индикаторами (коэффициенты опережения составили 1,25 и 1,84 соответственно). Выявленные тенденции подтверждают предположения о нарастании технологического разрыва между цифровыми лидерами и аутсайдерами отрасли, который в перспективе может привести к кардинальному реформированию конкурентного ландшафта и появлению новых центров создания стоимости [1, 4, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что, несмотря на наличие устойчивого положительного тренда (среднегодовой темп прироста индекса цифровизации отрасли составил 17,5% за 2016-2020 гг.), масштабы использования продвинутых решений имитационного моделирования и оптимизации производства остаются крайне неравномерными. Доля угледобы-

вающих предприятий, внедривших отдельные элементы цифровых двойников, составляет лишь 12%, при этом большинство реализованных проектов сконцентрировано в кластере технологических лидеров Кузбасса (18,7%) и Северо-Запада (14,2%).

Эконометрический анализ панельных данных по 50 ведущим угольным компаниям России показал наличие статистически значимой положительной связи между уровнем применения цифровых двойников и ключевыми индикаторами операционной эффективности (коэффициенты корреляции составили 0,782 для рентабельности по EBITDA, 0,764 – для производительности труда, 0,724 – для энергоэффективности; $p < 0,01$). При этом характер влияния существенно варьируется в зависимости от стадии жизненного цикла предприятий: для активов, находящихся на начальных этапах освоения месторождений, коэффициент эластичности рентабельности к изменению индекса цифровизации составляет 0,286 ($p < 0,01$), в то время как для объектов, завершающих отработку запасов, данный показатель оказался статистически незначимым ($p > 0,1$).

Среди ключевых факторов, определяющих динамику внедрения технологий цифровых двойников, преобладают внутренние параметры технологической готовности и инновационной восприимчивости угольных компаний. По результатам регрессионного анализа по панельным данным 2016-2020 гг. установлено, что наибольшее влияние на темпы цифровизации оказывают: уровень технологической оснащенности предприятий ($\beta = 0,426; p < 0,01$), объем инвестиций в НИОКР ($\beta = 0,374; p < 0,01$), доступность квалифицированных ИТ-кадров ($\beta = 0,352; p < 0,01$) и масштаб государственной поддержки ($\beta = 0,318; p < 0,05$). При этом средний уровень затрат на развитие систем имитационного моделирования и оптимизации производства составляет 1,2-1,6% от совокупных инвестиций в основной капитал отрасли, что в 2-2,5 раза ниже целевых показателей программ цифровой трансформации.

Согласно результатам имитационного моделирования, комплексное внедрение технологий цифровых двойников на предприятиях угольной промышленности России способно обеспечить значимый прирост ключевых технико-экономических показателей: увеличение производительности труда на 20-24%, снижение энергоемкости производства на 12-16%, повышение рентабельности продаж на 7-9 п.п. Максимальные эффекты достигаются при реализации инновационного сценария цифровизации, предполагающего масштабное тиражирование лучших практик и разработку прорывных решений в рамках целевых консорциумов бизнеса, науки и государства. При этом прогнозируемый совокупный эффект от развития отраслевой экосистемы цифровых двойников к 2030 г. оценивается в 120-180 млрд руб. с учетом роста производительности, снижения аварийности, повышения энергоэффективности и сокращения экологического ущерба.

Список литературы • References

1. Дробина Е.А. Уголь высоких технологий // Уголь. 2021. № 8. С. 36-39. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-8-36-39.
Drobina E.A. High-Tech coal. *Ugol'*. 2021;(8):36-39. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-8-36-39.

2. Варкентин Е.В. Цифровизация и ее влияние на угледобывающую отрасль // Вестник науки. 2022. Т. 1. № 11 (56). С. 17-21.
Varkentin E.V. Digitalization and its impact on coal mining industry. *Vestnik nauki*. 2022;1(11):17-21. (In Russ.).
3. Возможности применения концепции бережливого производства в компаниях угольной промышленности / И.С. Брикошина, А.Г. Геокчакян, М.Н. Гусева и др. // Уголь. 2021. № 4. С. 28-31. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-28-31.
Brikoshina I.S., Geokchakyan A.G., Guseva M.N., Malyshkin N.G., Sycheva S.M. Opportunities for applying the concept of lean management in coal industry companies. *Ugol'*. 2021;(4):28-31. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-28-31.
4. Дривольская Н.А., Моложавенко О.А. Цифровизация промышленности как фактор устойчивого развития производства // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. № 9-1. С. 74-77. DOI: 10.24412/2411-04502021-9-1-74-77.
Drivolskaya N.A., Molozhavenko O.A. Digitalization of industry as a factor of sustainable development of production. *Ekonomika i biznes*. 2021;(9-1):74-77. (In Russ.). DOI: 10.24412/2411-04502021-9-1-74-77.
5. Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Стародубов А.Н. Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе экскаваторно-автомобильного комплекса с применением имитационного моделирования // Уголь. 2021. № 7. С. 9-12. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-9-12.
Zinoviev V.V., Kuznetsov I.S., Starodubov A.N. Studies into man-machine control of dump trucks as part of excavator-and-truck complex using simulation modeling. *Ugol'*. 2021;(7):9-12. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-9-12.
6. Эффективность использования цифровых технологий в производственных процессах угольной промышленности / А.В. Зозуля, П.В. Зозуля, С.А. Титов и др. // Уголь. 2022. № 9. С. 47-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-47-52.
Zozulya A.V., Zozulya P.V., Titov S.A., Titova N.V., Mezina T.V. The effectiveness of the use of digital technologies in the production processes of the coal industry. *Ugol'*. 2022;(9):47-52. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-47-52.
7. Искусственный интеллект в инженерном образовании / Б.А. Левин, А.А. Пискунов, В.Ю. Поляков и др. // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 7. С. 79-95.
Levin B.A., Piskunov A.A., Polyakov V.Yu. et al. Artificial Intelligence in engineering education. *Vysshee obrazovanie v Rossii*. 2022;31(7):79-95. (In Russ.).
8. Комплексная методика оценки уровня цифровизации организаций / И.Ю. Мерзлов, Е.В. Шилова, Е.А. Санникова и др. // Экономика, предпринимательство и право. 2020. Т. 10. № 9. С. 2379-2396.
Merzlov I.Yu., Shilova E.V., Sannikova E.A. et al. Comprehensive methodology to assess the digitalization level in organizations. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo*. 2020;10(9):2379-2396. (In Russ.).
9. Кудж С.А., Цветков В.Я. Сетевое управление и киберфизические системы // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 2. С. 86-92. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92.
Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya. Network-centred control and cyber-physical systems. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii*. 2017;(2):86-92. (In Russ.). DOI: 10.21777/2500-2112-2017-2-86-92.
10. Курлов В.В., Косухина М.А., Курлов А.В. Модель оценки цифровой зрелости промышленного предприятия // Экономика и управление. 2022. Т. 28. № 5. С. 439-451.
Kurlov V.V., Kosukhina M.A., Kurlov A.V. A model to assess the digital maturity of an industrial company. *Ekonomika i upravlenie*. 2022;28(5):439-451. (In Russ.).
11. Майлис Н.П. Роль инновационных технологий в развитии цифровой трасологии // Теория и практика судебной экспертизы. 2022. Т. 17. № 2. С. 18-22. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2022-2-18-22>.
Maylis N.P. The role of innovative technologies in the development of digital traceology. *Teoriya i praktika sudebnoj ekspertizy*, 2022;17(2):18-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2022-2-18-22>.
12. Плакиткин Ю.А., Платкилкина Л.С. Программы «Индустрия-4.0» и «Цифровая экономика Российской Федерации» – возможности и перспективы в угольной промышленности // Горная промышленность. 2018. № 1.
Plakitkin Yu.A., Plakitkina L.S. 'Industry 4.0' and 'Digital Economy of the Russian Federation' programs: opportunities and prospects for the coal industry. *Gornaya promyshlennost'*. 2018;(1). (In Russ.).
13. Рябко Т.В., Гуртов В.А., Степуть И.С. Анализ показателей подготовки кадров для сферы искусственного интеллекта по результатам мониторинга вузов // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 7. С. 9-24.
Ryabko T.V., Gurtov V.A., Stepus I.S. Analysis of indicators of personnel training for artificial intelligence based on monitoring results of universities *Vysshee obrazovanie v Rossii*, 2022;31(7):9-24. (In Russ.).
14. Цифровая трансформация: ожидания и реальность. М.: Издательский дом Высшей школы экономики, 2022. 221 с.
15. Цифровое будущее горнорудного предприятия. REVIEW. 2021. № 51. [Электронный ресурс]. URL: <https://media-publications.bcg.com/BCG-Review-September-2020.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).

Authors Information

Bratarchuk T.V. – Doctor of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: tvbutova@mail.ru

Gladyshev A.G. – Doctor of Law Sciences, Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: AGGladyshev@fa.ru

Lukichev K.E. – PhD (Legal), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: kelukichev@fa.ru

Danilkevich M.A. – PhD (Economic), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: madanilkevich@fa.ru

Komov V.E. – PhD (Economic), Associate Professor of the Department of State and Municipal Administration, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: com.valeri@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.09.2024

Поступила после рецензирования: 17.10.2024

Принята к публикации: 28.10.2024

Paper info

Received September 19, 2024

Reviewed October 17, 2024

Accepted October 28, 2024