Международный научно-исследовательский журнал
«Прогрессивная экономика»
№ 3 / 2026 https://progressive-economy.ru/vypusk_1/razrabotka-mnogourovnevoj-sistemy-pokazatelej-dlya-oczenki-czifrovoj-zrelosti-predpriyatij-po-proizvodstvu-mineralnyh-udobrenij/
Научная статья / Original article
Шифр научной специальности ВАК: 5.2.3
УДК 338.45
DOI: 10.54861/27131211_2026_3_155



РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Сахарова Н.В., *старший преподаватель кафедры экономики,*
Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Россия
162600, Череповец, пр. Луначарского, 5
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1900-0891
e-mail: nvsakharova@chsu.ru

Вишнякова И.Л., *кандидат технических наук, доцент кафедры экономики,*
Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Россия
162600, Череповец, пр. Луначарского, 5
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2494-6481
e-mail: ilvishnyakova@chsu.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена отсутствием отраслеспецифичных, технологически независимых и метрологически обоснованных инструментов оценки цифровой зрелости для предприятий по производству минеральных удобрений. Существующие универсальные модели не учитывают специфику непрерывных химико-технологических процессов, а отечественные методики носят макроуровневый характер, что приводит к несистемным инвестициям и снижению эффективности цифровой трансформации. Цель статьи – разработка многоуровневой системы показателей, позволяющей не только давать интегральную количественную оценку, но и выявлять структурные дисбалансы в развитии технологических доменов. Научная новизна заключается в формализации нелинейной прогрессивной зависимости между уровнями зрелости посредством введения и эмпирического обоснования коэффициента β, а также в развитии ESG-ориентированного подхода за счёт включения в систему измеримых социальных (прогнозирование травматизма) и управленческих (полнота раскрытия нефинансовой отчётности) KPI. Методологическая база включает онтологическое моделирование предприятия как киберфизической системы, метод анализа иерархий Т. Саати для определения весовых коэффициентов доменов, а также математическое

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

моделирование для введения коэффициента прогрессивной зависимости β, формализующего нелинейную связь между уровнями цифровизации. В результате исследования авторами сформирована онтологическая модель, декомпозирующая предприятие на пять технологических доменов (Производство, ТОиР, Логистика, Безопасность/Экология, Управление) и три сквозных уровня цифровизации (данные, аналитика, автоматизация). На основе онтологической модели разработана компактная матрица из 15 количественных, верифицируемых ключевых показателей эффективности (KPI), привязанных к российскому технологическому стеку. Предложен алгоритм расчёта интегрального индекса цифровой зрелости (DMI), учитывающий прогрессивную зависимость уровней через коэффициент β. Апробация модели на условном предприятии «АгроХим» подтвердила её диагностическую ценность, позволив выявить дисбаланс между развитыми доменами безопасности и отстающей логистикой. Практическая значимость полученных результатов состоит в создании открытого, технологически независимого инструмента, позволяющего предприятиям самостоятельно проводить аудит цифрового состояния, осуществлять отраслевой бенчмаркинг и формировать стратегические дорожные карты цифровой трансформации с учётом выявленных структурных дисбалансов.

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровая зрелость, минеральные удобрения, интегральный показатель, управление на основе данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования Сахарова Н.В., Вишнякова И.Л. Разработка многоуровневой системы показателей для оценки цифровой зрелости предприятий по производству минеральных удобрений // Прогрессивная экономика. 2026. № 3. С. 155–177. https://doi.org/10.54861/27131211_2026_3_155.

Статья поступила в редакцию: 14.02.2026 г. Одобрена после рецензирования: 16.03.2026 г. Принята к публикации: 18.03.2026 г.

DEVELOPMENT OF A MULTI-LEVEL SYSTEM OF INDICATORS FOR ASSESSING THE DIGITAL MATURITY OF MINERAL FERTILIZER PRODUCTION ENTERPRISES

Sakharova N.V., *Senior Lecturer at the Department of Economics, Cherepovets State University, Cherepovets, Russia*
162600, Cherepovets, Lunacharsky Avenue, 5
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1900-0891
e-mail: nvsakharova@chsu.ru

Vishnyakova I.L., *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Economics, Cherepovets State University, Cherepovets, Russia*
162600, Cherepovets, Lunacharsky Avenue, 5
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2494-6481

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

e-mail: nvsakharova@chsu.ru

Abstract. The relevance of the study is due to the lack of industry-specific, technologically independent and metrologically sound tools for assessing digital maturity for enterprises producing mineral fertilizers. Existing universal models do not take into account the specifics of continuous chemical and technological processes, and domestic methods are of a macro-level nature, which leads to unsystematic investments and a decrease in the effectiveness of digital transformation. The purpose of the article is to develop a multi–level system of indicators that allows not only to provide an integral quantitative assessment, but also to identify structural imbalances in the development of technological domains. The scientific novelty lies in the formalization of a nonlinear progressive relationship between maturity levels through the introduction and empirical justification of the β coefficient, as well as in the development of an ESG-oriented approach by including measurable social (injury prediction) and managerial (completeness of disclosure of non-financial reporting) KPIs in the system. The methodological base includes the ontological modeling of an enterprise as a cyberphysical system, the method of analyzing hierarchies by T. Saati to determine the weighting coefficients of domains, as well as mathematical modeling to introduce the coefficient of progressive dependence β, which formalizes the nonlinear relationship between the levels of digitalization. As a result of the research, the authors have formed an ontological model that decomposes the enterprise into five technological domains (Production, MRO, Logistics, Security/Ecology, Management) and three end-to-end levels of digitalization (data, analytics, automation). Based on the ontological model, a compact matrix of 15 quantitative, verifiable key performance indicators (KPIs) linked to the Russian technology stack has been developed. An algorithm for calculating the integral digital maturity index (DMI) is proposed, taking into account the progressive dependence of levels through the coefficient β. The testing of the model at the conditional Agrochem enterprise confirmed its diagnostic value, making it possible to identify an imbalance between developed security domains and lagging logistics. The practical significance of the results obtained lies in the creation of an open, technologically independent tool that allows enterprises to independently audit their digital status, perform industry benchmarking, and create strategic roadmaps for digital transformation, taking into account the identified structural imbalances.

Keywords: digital transformation, digital maturity, mineral fertilizers, integral indicator, data-based management.

JEL classification: O38, D2, L11.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Sakharova N.V., Vishnyakova I.L. (2026). Razrabotka mnogourovnevoi sistemy pokazatelei dlya otsenki tsifrovoi zrelosti predpriyatii po proizvodstvu mineral'nykh udobrenii [Development of a multi-level system of indicators for assessing the digital maturity of enterprises producing mineral fertilizers]. Progressivnaya ekonomika [Progressive Economy], 3, 155–177, https://doi.org/10.54861/27131211_2026_3_155. (In Russ., abstract in Eng.)

The article was submitted to the editorial office: 14/02/2026. Approved after review: 16/03/2026. Accepted for publication: 18/03/2026.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Активная цифровая трансформация промышленных предприятий, в том числе в секторе производства минеральных удобрений, из стратегической инициативы переходит в область операционной необходимости. Однако процесс трансформации зачастую носит несистемный характер, а инвестиции в технологии не приносят ожидаемого экономического или операционного эффекта [1]. Одной из ключевых причин является отсутствие единого, признанного отраслью инструмента для диагностики текущего состояния и управления прогрессом. Существующие универсальные модели цифровой зрелости (ACATECH, Capgemini) [2] не учитывают специфику непрерывных химико-технологических процессов, а отечественные методики, включая утверждённую Минцифры России [3], носят макроуровневый характер и ориентированы преимущественно на ИТ-инфраструктуру. Данный методологический пробел отмечается и в современных исследованиях: Дин Хайци [4] подчеркивает, что фрагментарность управления и отсутствие единых подходов снижают адаптивность предприятий и усиливают разрывы между диагностикой цифрового состояния и реализацией стратегических решений. Автор обосновывает необходимость перехода от разрозненных показателей к целостному организационно-экономическому механизму, что концептуально созвучно задачам, решаемым в рамках предлагаемой модели DMI.

Кроме того, большинство моделей игнорируют нефинансовые аспекты деятельности, такие как социальная и управленческая компоненты устойчивого развития (ESG), которые критически важны для современных высокотехнологичных производств. Таким образом, формируется научная проблема, заключающаяся в отсутствии открытой, отраслеспецифичной и метрологически обоснованной системы оценки цифровой зрелости, которую предприятие могло бы применять самостоятельно, используя доступный российский программный стек.

Целью данного исследования является разработка такой системы, способной не только давать интегральную количественную оценку, но и выявлять структурные дисбалансы в развитии различных технологических доменов. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1) провести критический анализ существующих моделей и обосновать необходимость авторской разработки; 2) построить онтологическую модель предприятия отрасли; 3) разработать матрицу ключевых показателей; 4) формализовать математическую модель агрегации показателей с учётом прогрессивной зависимости; 5) провести комплексную валидацию модели и предложить инструменты её практической реализации.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступили предприятия химического комплекса по производству минеральных удобрений, рассматриваемые как сложные киберфизические системы. Предметом исследования является методология количественной оценки их цифровой зрелости.

В работе применялся комплекс взаимодополняющих методов:

1. Системный анализ и онтологическое моделирование – для декомпозиции предприятия на технологические домены (Производство, ТОиР, Логистика, Безопасность/Экология, Управление) и уровни цифровизации (Данные, Аналитика, Автоматизация).

2. Метод парных сравнений Т. Саати – для определения весовых коэффициентов важности доменов на основе экспертных оценок.

3. Метод математического моделирования – для формализации расчёта интегрального индекса DMI с введением коэффициента прогрессивной зависимости β.

4. Методы валидации – включая содержательную валидацию, кросс-валидацию на основе экспертных оценок, анализ чувствительности и робастности модели.

Теоретической основой модели стали принцип необходимого разнообразия У.Р. Эшби и эмпирические наблюдения за неудачными кейсами внедрения, где попытки внедрения сложной аналитики или автоматизации при слабом фундаменте данных приводили к «цифровым разрывам» [5].

Результаты и обсуждение

На основе системного анализа разработана онтологическая модель, представляющая предприятие как систему, взаимодействующую с внешней средой (рынок, регуляторы) и состоящую из пяти технологических доменов.

Предложенная в таблице 1 номенклатура показателей носит ориентирующий характер и предназначена для иллюстрации подхода. Для формирования метрологически обоснованного диагностического инструментария требуется переход к строго формализованным, верифицируемым KPI с фиксированными формулами расчёта и источниками данных.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Таблица 1

Создание таблицы связей

Table 1

Creating a relationship table

Подсистема	Уровень цифровизации	Данные (Data)	Аналитика (Analytics)	Автоматизация (Automation)	Примеры KPI (Российский контекст)
Производство	Данные	Параметры технологических процессов (КРУГ-2000, ТРИНИТИ)	Мониторинг параметров в реальном времени (Sber AI)	Диспетчеризация процессов (АСУ ТП российского производства)	Доля оцифрованных параметров процесса (%) (с использованием КРУГ-2000)
	Аналитика	Данные с датчиков (ТРИНИТИ)	Оптимизация технологических режимов (Yandex DataSphere)	АСУ ТП (российские решения)	Точность прогнозной модели выхода продукта (%) (на базе Sber AI)
	Автоматизация	Команды от аналитики	Автоматическое управление процессами	Цифровые двойники (российские разработки)	Доля автоматизированных операций (%) (с использованием АСУ ТП)
ТОиР	Данные	История отказов оборудования (российские системы мониторинга)	Анализ причин отказов (Sber AI)	Предиктивное обслуживание (российские решения)	Полнота данных об отказах (%) (с использованием российских систем мониторинга)
	Аналитика	Данные о надежности	Прогнозирование отказов (Sber AI)	Автоматизированные ремонтные работы	Точность прогноза отказов (%) (на базе Sber AI)
	Автоматизация	Команды на ремонт	Автоматическое планирование ремонтов	Роботизированные ремонтные работы	Доля автоматизированных ремонтов (%) (с использованием российских роботов)

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Логистика	Данные	Данные о перемещении грузов (российские логистические платформы)	Оптимизация маршрутов (Yandex DataSphere)	Автоматизированные складские операции	Доля оцифрованных грузоперевозок (%) (с использованием российских платформ)
	Аналитика	Данные о логистических задержках	Прогнозирование задержек (Sber AI)	Автоматизированное управление складом	Точность прогноза логистических задержек (%) (на базе Sber AI)
	Автоматизация	Команды на перемещение	Автоматическое управление логистикой	Автономные транспортные средства	Доля автоматизированных логистических операций (%) (с использованием российских решений)
Безопасность/Экология	Данные	Данные о выбросах и безопасности (российские экологические стандарты), данные о микротравмах, условиях труда, обращениях персонала	Мониторинг выбросов в реальном времени (российские системы)	Автоматизированный контроль выбросов	Полнота данных о выбросах (%) (с учетом российских норм)
	Аналитика	Данные о микротравмах, условиях труда, обращениях персонала	Прогнозирование рисков (Sber AI), прогнозирование производственного травматизма (Sber AI)	Автоматизированные системы безопасности, автоматизированные системы контроля СИЗ, допусков	Точность прогноза экологических рисков (%) (на базе российских данных), коэффициент частоты травматизма (LTIF), прогнозная точность – %
	Автоматизация	Команды на снижение выбросов	Автоматическое управление безопасностью	Роботизированные системы мониторинга	Доля автоматизированных систем безопасности (%) (с использованием российских роботов)

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Управление	Данные	Финансовые и операционные данные (1С, российские ERP-системы)данные о соблюдении нормативных требований, результатах аудитов, данные о соблюдении нормативных требований, результатах аудитов	Анализ эффективности (Sber AI), анализ соблюдения антикоррупционной политики, оценка рисков	Автоматизированное планирование, автоматизированная система раскрытия нефинансовой отчётности	Полнота финансовых данных (%) (с использованием 1С), полнота раскрытия ESG-показателей в отчётности (%)
	Аналитика	Данные о производительности	Прогнозирование экономических показателей (Yandex DataSphere)	Автоматизированное управление ресурсами	Точность прогноза экономических показателей (%) (на базе российских данных)
	Автоматизация	Команды на оптимизацию	Автоматическое управление предприятием	ERP-системы (российские решения)	Доля автоматизированных управленческих процессов (%) (с использованием российских ERP)

Источник: составлено авторами по материалам [6; 7; 8; 9]
Source: compiled by the authors based on [6; 7; 8; 9]

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Соответствующая система из 15 ключевых показателей представлена в таблице 2. Её компактность обеспечивает практическую реализуемость, а жёсткая привязка к российскому технологическому стеку – импортонезависимость. На эти домены накладываются три уровня цифровизации: слой данных (сбор, интеграция) обеспечивает аналитику (мониторинг, прогноз), которая, в свою очередь, управляет автоматизацией (АСУ ТП, роботизация). Каждый KPI имеет чёткую формулу расчёта, единицы измерения и указание на источник данных в действующих системах предприятия (АСУ ТП, CMMS, ERP).

Таблица 2

Матрица ключевых показателей цифровой зрелости

Table2

The matrix of key indicators of digital maturity

Домен	Уровень	Название показателя	Формула расчёта	Источник данных
Производство	Данные	Доля оцифрованных параметров процесса	(Парам. с датчиками / Всего парам.) × 100%	АСУ ТП (КРУГ-2000)
	Аналитика	Точность прогноза выхода продукции	100% – (Ошибка прогноза / Факт) × 100%	Системы предиктивной аналитики
	Автоматизация	Доля закрытых контуров АСР	(Контуры АСР / Всего регулируемых) × 100%	Паспорта автоматизации
ТОиР	Данные	Полнота электронных паспортов оборудования	(Оборуд. с паспортами / Всего) × 100%	CMMS
	Аналитика	Точность прогнозных моделей отказов	100% – ((Ложные+Пропущенные) / Всего прогнозов) × 100%	Системы предиктивного обслуживания (PdM)
	Автоматизация	Доля автоматизированных заявок на ремонт	(Заявки через систему / Всего) × 100%	CMMS
Логистика	Данные	Охват RFID/датчиками грузов	(Тонны с датчиками / Всего тонн) × 100%	WMS, системы трекинга
	Аналитика	Эффективность оптимизации маршрутов	(Экономия пробега / Пробег до оптимизации) × 100%	TMS
	Автоматизация	Уровень автоматизации	(Операции в авторежиме / Всего) × 100%	WMS

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

		складских операций		
Безопасность/ Экология	Данные	Полнота данных о выбросах	(Источники с мониторингом / Всего источников) × 100%	Системы экомониторинга
	Аналитика	Точность прогноза выбросов, точность прогноза производственного травматизма	100% – (Отклонение прогноза / Факт) × 100%, 100% – (Отклонение прогноза / Факт) × 100%	Системы моделирования, системы учёта микротравм, Sber AI
	Автоматизация	Уровень автоматизации газоанализа	(Системы с автоуправлением / Всего) × 100%	АСУ ТП, газоанализаторы
Управление	Данные	Полнота финансовых данных в ERP, полнота раскрытия ESG-показателей в нефинансовой отчётности	(Статьи с заполнением / Всего статей) × 100%, (Факт. раскрытые показатели / Целевой перечень GRI/SASB) × 100%	ERP (1С), корпоративная отчётность, ESG-дашборды
	Аналитика	Точность финансовых прогнозов	100% – (Отклонение прогноза / Факт) × 100%	Системы фин. планирования
	Автоматизация	Уровень автоматизации бизнес-процессов	(Процессы с автоматизацией / Всего) × 100%	BPM-системы

Источник: составлено авторами по материалам [10]
Source: compiled by the authors based on [10]

Разработанная система KPI не ограничивается учётом экологической компоненты: в домене «Безопасность/Экология» введён показатель прогнозирования производственного травматизма (S-компонента ESG) и требованиям международных стандартов GRI 403 (Охрана труда) [11], а в домене «Управление» – полнота раскрытия нефинансовой отчётности (G-компонента). Такой подход согласуется с концепцией интеллектуальной зрелости промышленных экосистем, предложенной Е.В. Шкарупетой [12], согласно которой оценка цифровой трансформации должна включать не только технологические, но и когнитивные, социальные и управленческие аспекты, обеспечивающие устойчивость и адаптивность системы. Введение данных показателей позволяет рассматривать цифровую зрелость не как изолированную техническую характеристику, а как интегральный фактор долгосрочного развития предприятия в рамках ESG-повестки.

Наличие набора разнородных показателей не решает задачу комплексной оценки. Необходим механизм агрегации, который позволил бы

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

перейти от пятнадцати частных KPI к единому интегральному индексу. При этом сам механизм должен учитывать нелинейный характер цифровой трансформации, а именно – фундаментальную зависимость верхних уровней (аналитика, автоматизация) от зрелости нижележащего слоя данных. Для формализации этой зависимости вводится коэффициент прогрессивной зависимости β.

Для обеспечения воспроизводимости и однозначности результатов разработана многоэтапная процедура расчета интегрального индекса цифровой зрелости (DMI), основанная на предложенной онтологической модели и матрице KPI. Ниже представлено формализованное описание всех этапов этого алгоритма.

Этап 0. Входные данные. Исходными данными для расчета служат фактические значения 15 ключевых показателей эффективности (KPI), структурированных по пяти технологическим доменам и трем уровням цифровизации (Таблица 2). Обозначим множество этих показателей как $X = \{x_k\}$, где $k = 1, \dots, 15$.

Этап 1. Нормализация показателей. В связи с разнородностью единиц измерения и диапазонов значений KPI, необходим этап приведения их к единой безразмерной шкале [0, 1]. Выбор функции нормализации зависит от типа показателя.

1. Для показателей типа «больше – лучше» (доля охвата, точность, уровень автоматизации и т.п.), где рост значения свидетельствует о прогрессе, используется формула (1):

$$N(x_k) = \frac{x_k - x_k^{\min}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}, \quad (1)$$

где $x_k^{\min}$ и $x_k^{\max}$ – минимальное и максимальное эталонные значения показателя (определяются нормативно или на основе лучших отраслевых практик).

2. Для показателей типа «меньше – лучше» (доля ошибок, частота отказов), где прогресс соответствует снижению значения, применяется формула (2).

$$N(x_k) = \frac{x_k^{\max} - x_k}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}. \quad (2)$$

3. Для категориальных показателей, измеряемых в баллах по дискретной шкале (например, от 0 до 5), нормализация производится делением на максимально возможный балл, что показано в формуле (3).

$$N(x_k) = \frac{x_k}{L}, \quad (3)$$

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

где L – максимальное значение шкалы (в данном случае $L = 5$).

В результате данного этапа формируется вектор нормализованных оценок $\{N(x_k)\}$.

Этап 2. Внутриуровневая агрегация (расчет оценок уровней по доменам). Для каждого технологического домена j (производство, ТОиР, логистика, безопасность/экология, управление) рассчитываются средние арифметические значения нормализованных оценок, относящихся к одному уровню цифровизации по формулам (4) – (6).

$$S_D^j = \text{mean}\{\, N(x_k) \mid x_k \in \text{домен } j, \text{ уровень данных} \,\}, \quad (4)$$

$$S_A^j = \text{mean}\{N(x_k) \mid x_k \in \text{домен } j, \text{ уровень аналитики}\}, \quad (5)$$

$$S_U^j = \text{mean}\{N(x_k) \mid x_k \in \text{домен } j, \text{ уровень автоматизации}\}, \quad (6)$$

где S_D^j, S_A^j, S_U^j– средние оценки уровней данных, аналитики и автоматизации, соответственно.

Этап 3. Коррекция оценок с учетом прогрессивной зависимости (коэффициент β). Введение коэффициента β базируется на фундаментальном законе кибернетики – принципе необходимого разнообразия У.Р. Эшби [13]. Согласно данному принципу, эффективность управления (уровень автоматизации) ограничена разнообразием средств управления (уровень аналитики), которое, в свою очередь, определяется полнотой и качеством исходных данных об объекте. Следовательно, зрелость вышележащих уровней цифрового стека не может неограниченно превосходить зрелость нижележащих без потери устойчивости системы и эффективности инвестиций. Коэффициент $\beta \geq 1$ количественно формализует это ограничение, задавая максимально допустимое опережение одного уровня над другим. Значение $\beta = 1.2$ получено эмпирически и обосновано двумя независимыми подходами:

1. Экспертный опрос руководителей по цифровой трансформации (CIO) показал, что допустимое опережение уровня аналитики над уровнем данных (и автоматизации над аналитикой) в среднем составляет 20–25%.

2. Ретроспективный анализ успешных проектов на предприятиях отрасли («ФосАгро», «Уралхим») подтвердил, что соотношение оценок смежных уровней в фазе активного внедрения не превышало 1.15–1.3, тогда как при значениях выше 1.4 фиксировались системные срывы [14].

Таким образом, β выполняет роль «ограничителя», корректируя оценки верхних уровней в зависимости от фундамента нижележащих.

Коррекция выполняется каскадно, снизу вверх. Сначала корректируется уровень аналитики по формуле (7), а затем автоматизации по (8).

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

$$S_A^{adj} = \min(S_A^j, \beta \cdot S_D^j), \quad (7)$$

$$S_U^{adj} = \min(S_U^j, \beta \cdot S_A^{adj}). \quad (8)$$

Таким образом, для каждого домена j формируется скорректированный вектор оценок $(S_D^j, S_A^{adj}, S_U^{adj})$.

Этап 4. Агрегация в рамках домена. Итоговая оценка цифровой зрелости для каждого домена S_j рассчитывается как взвешенная сумма оценок трех уровней по формуле (9).

$$S_j = w_D \cdot S_D^j + w_A \cdot S_A^{adj} + w_U \cdot S_U^{adj}, \quad (9)$$

где w_D, w_A, w_U – весовые коэффициенты значимости уровней. В базовой модели приняты следующие веса, отражающие возрастающую ценность аналитических возможностей: $w_D = 0,3$, $w_A = 0,4$, $w_U = 0,3$ (условие нормировки: $w_D + w_A + w_U = 1$).

Этап 5. Финальная агрегация (расчет интегрального индекса DMI). Интегральный индекс цифровой зрелости предприятия (Digital Maturity Index, DMI) представляет собой взвешенную сумму итоговых оценок всех пяти технологических доменов и рассчитывается по формуле (10).

$$\text{DMI} = \sum_{j=1}^{5} \gamma_j \cdot S_j, \quad (10)$$

где γ_j – весовой коэффициент значимости j-го домена, определенный методом анализа иерархий Т. Саати. Вектор весов доменов имеет следующие значения:

$$\gamma = (\gamma_{\text{Произв}}, \gamma_{\text{ТОиР}}, \gamma_{\text{Лог}}, \gamma_{\text{Безоп}}, \gamma_{\text{Упр}}) = (0,25; 0.20; 0,15; 0,25; 0,15).$$

Этап 6. Интерпретация результата. Полученное числовое значение индекса DMI (Digital Maturity Index) – интегрального, нормализованного показателя, разработанного для комплексной оценки уровня цифровой трансформации предприятия (Рис. 1), – требует содержательной интерпретации для реализации его диагностического и стратегического потенциала.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

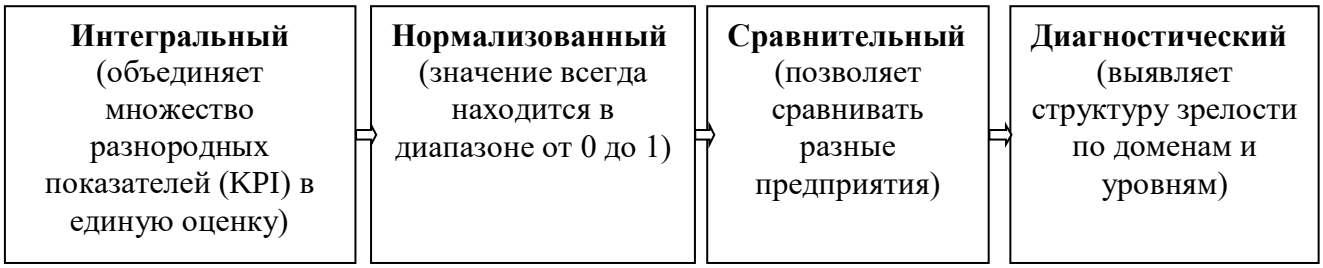


Рис.1. Ключевые характеристики DMI

Источник: составлено авторами

Fig. 1. Key DMI Features

Source: compiled by the authors

В связи с этим в рамках исследования разработана шкала интерпретации уровней цифровой зрелости (Таблица 3), которая выполняет две ключевые функции:

1. Переводит непрерывную величину DMI в дискретную, качественную характеристику стадии развития предприятия, что удобно для стратегического позиционирования.

2. Задает целевые ориентиры, определяя, какой уровень зрелости необходимо достичь.

Границы диапазонов шкалы определены эмпирически, на основе анализа проектов цифровой трансформации в химической промышленности, и прошли экспертизу в ходе валидации модели [1; 14]. Следует отметить, что качественная шкала, как инструмент интерпретации DMI, может быть уточнен по мере накопления отраслевой статистики.

Таблица 3

Шкала интерпретации DMI

Table 3

DMI interpretation scale

Диапазон	Уровень зрелости	Характеристика стадии
0.00 – 0.30	Начальный (Initial)	Точечные пилоты, отсутствие единой стратегии, ручные процессы.
0.31 – 0.60	Активное внедрение (Developing)	Локальная автоматизация, формирование цифровой стратегии, первые измеримые результаты.
0.61 – 0.80	Интегрированный (Integrated)	Сквозные цифровые процессы, управление на основе данных, синергия между доменами.
0.81 – 1.00	Трансформированный (Transformed)	Цифровая бизнес-модель, экосистемное взаимодействие, AI-оптимизация, максимальная гибкость.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors based on

После агрегации показателей внутри доменов возникает задача сведения пяти разнородных оценок S_j в единый индекс DMI. Присвоение доменам равных весов методологически некорректно, поскольку их вклад в общую

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

цифровую зрелость предприятия различен. Для определения весов применен метод парных сравнений Т. Саати [15].

На основе экспертных оценок построена матрица парных сравнений (Таблица 4), отражающая относительную важность доменов для отрасли с учетом российских приоритетов (безопасность, производство).

Таблица 4

Матрица парных сравнений для доменов

Table 4

Pairwise comparison matrix for domains

	Производство	ТОиР	Логистика	Безопасность	Управление
Производство	1	2	2	1/2	3
ТОиР	1/2	1	1/2	1/3	2
Логистика	1/2	2	1	1/3	2
Безопасность	2	3	3	1	4
Управление	1/3	1/2	1/2	1/4	1

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors

Шкала Саати: 1 - равная важность, 3 - умеренное превосходство, 5 - сильное превосходство, 7 - очень сильное, 9 - абсолютное.

На основе матрицы рассчитаны следующие весовые коэффициенты доменов: производство – 0,25; ТОиР – 0,20; логистика – 0,15; безопасность/экология – 0,25; управление – 0,15. Отношение согласованности CR=0,07 значительно меньше порогового значения 0,1. Это свидетельствует о высокой степени непротиворечивости экспертных суждений и, следовательно, о надежности и достоверности полученных весовых коэффициентов, позволяет использовать полученные веса γ_j в формуле финальной агрегации (10).

Полученные весовые коэффициенты, а также предложенный механизм коррекции оценок через коэффициент β, формируют законченную математическую модель расчёта DMI. Для демонстрации её работоспособности и диагностических возможностей выполнен апробационный расчёт на примере условного предприятия «АгроХим». Исходные данные и поэтапные результаты вычислений приведены в таблице 5.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Таблица 5

Исходные данные и результаты расчёта для предприятия «АгроХим»

Table 5

Source data and calculation results for AgroChem

Домен	S_D^j	S_A^j	S_U^j	S_A^{adj}	S_U^{adj}	S_j	γ_j
Производство	0,70	0,85	0,60	0,84*	0,60	0,726	0,25
ТОиР	0,50	0,75	0,40	0,60*	0,40	0,500	0,20
Логистика	0,30	0,50	0,20	0,36*	0,20	0,286	0,15
Безопасность/ Экология	0,90	0,80	0,70	0,80	0,70	0,800	0,25
Управление	0,60	0,65	0,30	0,65	0,30	0,515	0,15

Источник. составлено авторами
Source: compiled by the authors

Расчёт итоговой оценки домена на примере производства:

$$S_{\text{произв}} = 0{,}3 \times 0{,}70 + 0{,}4 \times 0{,}84 + 0{,}3 \times 0{,}60 = 0{,}210 + 0{,}336 + 0{,}180 = 0{,}726,$$

где 0,3; 0,4; 0,3 – веса уровней данных, аналитики и автоматизации внутри домена соответственно.

Расчёт интегрального индекса DMI:

$$\text{DMI} = \gamma_{\text{произв}} \cdot S_{\text{произв}} + \gamma_{\text{ТОиР}} \cdot S_{\text{ТОиР}} + \gamma_{\text{лог}} \cdot S_{\text{лог}} + \gamma_{\text{без/эк}} \cdot S_{\text{без/эк}} + \gamma_{\text{упр}} \cdot S_{\text{упр}} = 0{,}25 \cdot 0{,}726 + 0{,}20 \cdot 0{,}500 + 0{,}15 \cdot 0{,}286 + 0{,}25 \cdot 0{,}800 + 0{,}15 \cdot 0{,}515 = 0{,}60165 \approx 0{,}602.$$

Интерпретация результатов:

1. Общий уровень зрелости для предприятия «АгроХим» находится на стадии активного внедрения (DMI = 0,602), что соответствует диапазону 0,31–0,60 по предложенной шкале.

2. Наиболее развитый домен – «Безопасность/Экология» (0,800) – отражает не только приоритет экологического мониторинга, но и зрелость социальной составляющей ESG, высокую точность прогноза травматизма и полноту учёта микротравм. Домен «Управление» (0,515) при этом демонстрирует потенциал роста в части нефинансовой отчётности и прозрачности. Выявленный профиль характерен для предприятий, активно инвестирующих в «зелёную» повестку, но ещё не в полной мере использующих цифровые инструменты для раскрытия ESG-данных стейкхолдерам [14].

Критически слабым доменом является «Логистика» (0,286). Это указывает на существенное отставание в цифровизации цепочки поставок, что является типичной проблемой для многих предприятий отрасли.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Дисбаланс развития отражается разрывом между максимальным (0,800) и минимальным (0,286) показателями, составляет 0,514, что свидетельствует о несбалансированной цифровой трансформации.

3. Рекомендации для предприятия будут следующие. Основное внимание следует направить в инвестиции в цифровизацию логистики (внедрение WMS, TMS, систем трекинга), в сохранение высокого уровня развития в области безопасности и экологии, а также усиление цифровизации в управленческих процессах для повышения гибкости предприятия.

Данный пример наглядно демонстрирует, что разработанная модель не только оценивает общий уровень цифровой зрелости, но и позволяет выявлять структурные дисбалансы, что является ценным инструментом для стратегического планирования цифровой трансформации.

Для проверки корректности, согласованности, устойчивости и практической полезности разработанной модели была проведена её комплексная валидация по четырём взаимодополняющим направлениям.

1. Цель содержательной валидации – убедиться, что модель измеряет именно комплексную цифровую зрелость как способность создавать ценность, а не только технологическую оснащённость. Анализ логики модели показал, что она корректно идентифицирует и интерпретирует различные профили предприятий. Так, профиль «Лидер» получает высокий DMI благодаря высоким баллам во всех доменах, особенно в аналитике и управлении, что соответствует парадигме управления, основанного на данных (data-driven). Профиль «Технократ» демонстрирует характерный дисбаланс: при высоком уровне оснащения системами сбора данных и промышленной автоматизации, уровень аналитических компетенций остается низким. В рамках предложенной модели это приводит к тому, что интегральная оценка автоматизации (S_U^{adj}) редуцируется пропорционально низкому уровню аналитики (S_A^j) через коэффициент β, формализуя неэффективность инвестиций в аппаратную базу без развития интеллектуальных надстроек. Таким образом, архитектура модели обеспечивает её содержательную валидность.

2. В рамках кросс-валидации требовалось проверить соответствие результатов формальной модели интуитивной комплексной оценке квалифицированных специалистов. Независимые эксперты – профессора, руководители консалтинговых практик, CIO – оценили общий уровень цифровой зрелости пяти виртуальных, но реалистично описанных предприятий по 100-балльной шкале. Их усреднённые оценки, нормализованные к диапазону [0,1], были сопоставлены с расчётными значениями DMI. Среднеквадратическое отклонение (RMSE) между DMI и экспертной оценкой составило 0,048. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между рангами предприятий, полученными моделью и экспертами, достиг ρ = 0,95 (p-value< 0,05). Полученные результаты свидетельствуют о

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

высокой конвергентной валидности модели и практически полном совпадении в ранжировании с экспертной оценкой.

3. Анализ чувствительности и устойчивости (робастность) был направлен на оценку влияния вариации ключевых параметров модели – коэффициента β и весов доменов γ_j – на итоговый результат. Вариация β в диапазоне от 1,0 (жёсткая связь) до 1,5 (гибкая связь) приводит к колебанию DMI для тестового предприятия в пределах ±2,8 % без изменения стадии зрелости. Последовательное изменение веса каждого из пяти доменов на ±10 % при фиксированных остальных изменяет DMI менее чем на 0,5 % для каждого случая. Сценарное тестирование подтвердило, что модель стабильно и корректно ранжирует заведомо разные типовые профили – от низкого к среднему и далее к высокому – при любых допустимых значениях параметров. Совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод о робастности модели: её выводы не зависят от незначительных погрешностей в определении параметров, что критически важно для практического применения.

4. Прагматическая валидация нацелена на оценку способности модели служить инструментом для принятия управленческих решений и прогнозирования результатов цифровой трансформации. В соответствии с разработанным планом на реальном предприятии отрасли предполагается провести базовый замер DMI и построить профиль зрелости, затем на основе выявленных «узких мест» сформировать и реализовать программу целевых проектов цифровизации (например, внедрение системы трекинга для слабого домена «Логистика»), а через 12–18 месяцев выполнить повторный замер DMI. Ожидаемым результатом является подтверждение того, что DMI объективно отразит рост зрелости, причём наиболее значительный рост произойдёт в целенаправленно развиваемых доменах и уровнях. Это докажет, что модель является не только диагностическим, но и управленческим инструментом.

Разработанная модель DMI прошла комплексную процедуру валидации, доказав свою содержательную адекватность (корректная интерпретация различных профилей), согласованность с экспертным знанием (высокая корреляция оценок и рангов), устойчивость к вариации параметров ($\Delta DMI < 3\,\%$) и практическую направленность (наличие плана прогностической проверки).

Таким образом, модель является валидным, надёжным и пригодным для практического применения научно-методическим инструментом для количественной оценки и управления цифровой трансформацией.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Создание отраслеспецифичной онтологии, явно связывающей уровни цифровизации с технологическими доменами и бизнес-целями предприятий минеральных удобрений.

2. Разработка компактной, измеримой системы показателей (15 KPI), преодолевающей абстрактность существующих моделей.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

3. Формализация нелинейной зависимости между уровнями зрелости через введение и обоснование коэффициента прогрессивной зависимости β.

4. Развитие ESG-ориентированного подхода к оценке цифровой зрелости: в отличие от существующих моделей, ограниченных учётом экологических параметров, предложенная система включает измеримые KPI социальной (прогнозирование травматизма) и управленческой (полнота раскрытия нефинансовой отчётности) компонент устойчивого развития.

Разработанная система представляет собой диагностический инструмент, позволяющий предприятиям самостоятельно проводить аудит цифрового состояния, выявлять «узкие места» и структурные дисбалансы. Она может использоваться как инструмент стратегического управления, поскольку целевые значения DMI и профиля зрелости интегрируются в стратегию и дорожные карты цифровой трансформации. Модель создаёт основу для отраслевого бенчмаркинга, обеспечивая возможность анонимного сравнения с эталонными значениями и лучшими практиками. Кроме того, она служит обоснованием инвестиций, устанавливая количественную связь между уровнем цифровизации и операционно-финансовыми результатами, что критически важно для защиты ИТ-бюджетов.

Таким образом, предложенная авторская система показателей способствует закрытию существующего методологического пробела и обеспечивает отрасль инструментарием для перехода от абстрактного целеполагания к количественному управлению цифровой трансформацией. Для обеспечения практического применения разработанной модели цифровой зрелости и возможности её автоматизации, ниже представлены детальные алгоритмы и руководства по реализации расчёта DMI в двух наиболее распространённых средах: Microsoft Excel (для пользователей-аналитиков) и Python (для интеграции в ИТ-системы и углублённого анализа). Порядок расчёта интегрального индекса DMI для предприятия приведен в таблице 6).

Таблица 6

Расчёт интегрального индекса DMI

Table 6

Calculation of the integral DMI index

Название шага	Описание	Выходные данные
Сбор исходных данных	Для каждого из 15 KPI (Таблица 2) собирается фактическое значение в соответствии с формулой и источником данных.	Вектор из 15 «сырых» значений x_k.
Нормализация показателей	Каждое значение x_k приводится к безразмерной шкале [0, 1] по формулам (1) – (3) в зависимости от типа показателя.	Вектор из 15 нормализованных значений $N(x_k)$.
Расчёт средних по уровням внутри домена	Для каждого из 5 доменов вычисляются средние арифметические нормализованных оценок по трём	5 троек значений (S_D^j, S_A^j, S_U^j).

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

	уровням: данные (S_D^j), аналитика (S_A^j), автоматизация (S_U^j) по формулам (4) – (6)	
Коррекция оценок с учётом прогрессивной зависимости (β)	Для каждого домена j рассчитываются скорректированные оценки аналитики и автоматизации согласно формулам (7), (8).	5 троек скорректированных значений $\left(S_D^j, S_A^{adj}, S_U^{adj}\right)$.
Расчёт итоговой оценки домена	Для каждого домена вычисляется взвешенная сумма по формуле (9)	5 значений S_j – итоговые баллы доменов.
Расчёт интегрального индекса DMI	Вычисляется взвешенная сумма итоговых оценок доменов по формуле (10)	Итоговое значение DMI в диапазоне [0, 1].
Интерпретация и визуализация	DMI сопоставляется со шкалой зрелости (Начальный, Развивающийся, Интегрированный, Трансформированный). Строится профиль зрелости (радарная диаграмма по доменам) и тепловая карта по KPI для выявления «узких мест».	Отчёт с числовым индексом, стадией зрелости и наглядными графиками.

Источник. составлено авторами
Source: compiled by the authors

Чёткая последовательность шагов позволяет предприятию самостоятельно провести оценку, интерпретировать результаты и определить направления цифрового развития. Возможность реализации как в Excel, так и в Python делает методику доступной для компаний с разным уровнем цифровой зрелости – от пилотных проектов до корпоративных центров компетенций.

Заключение

В результате исследования разработана авторская многоуровневая система показателей цифровой зрелости для предприятий отрасли минеральных удобрений, преодолевающая ключевые недостатки существующих универсальных моделей. Научная новизна работы заключается в следующем: 1) создание отраслеспецифичной онтологии, связывающей технологические домены с уровнями цифровизации; 2) формирование компактной системы измеримых KPI, привязанных к российскому технологическому стеку; 3) формализация нелинейной прогрессивной зависимости между уровнями зрелости через введение и обоснование коэффициента β; 4) разработка алгоритма расчёта интегрального индекса DMI, обеспечивающего количественную, сопоставимую оценку.

Практическая значимость системы заключается в том, что она предоставляет отраслевым предприятиям инструмент для самостоятельного аудита цифрового состояния, выявления структурных дисбалансов и «узких мест». DMI и профиль зрелости могут быть интегрированы в стратегию и дорожные карты цифровой трансформации, служить основой для обоснования инвестиций в цифровые проекты и для анонимного отраслевого бенчмаркинга.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Модель является открытой, технологически независимой и адаптируемой, что соответствует задачам технологического суверенитета. Проведённая валидация подтверждает её содержательную адекватность, согласованность с экспертным знанием, устойчивость и практическую применимость.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию предложенной модели к другим отраслям химического комплекса, а также на развитие инструментов прогнозного моделирования траекторий цифровой трансформации. Перспективным направлением является интеграция индекса DMI в более широкий контекст управления интеллектуальной зрелостью промышленных экосистем, что позволит оценивать не только внутреннюю эффективность предприятия, но и его роль и устойчивость в системе межотраслевого взаимодействия [12]. Развитие подобного подхода будет способствовать формированию сбалансированных стратегий цифрового развития, ориентированных на синергетический эффект от кооперации участников производственных цепочек.

Литература

1. Цифровая экономика: 2024: краткий статистический сборник / В.Л. Абашкин, Г.И. Абдрахманова, К.О. Вишневский, Л.М. Гохберг и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М. : ИСИЭЗ ВШЭ, 2024. 124 с.

2. ACATECH. Implementation Strategy Industrie 4.0: Report on the results of the Industrie 4.0 Platform. Berlin, 2016.

3. Методика оценки уровня цифровизации государственных компаний и компаний с государственным участием (утв. Минцифры России). 2022. URL: https://digital.gov.ru/ru/documents/ (дата обращения: 09.01.2026).

4. Дин Хайци. Разработка организационно-экономического механизма управления цифровой зрелостью промышленного предприятия // Прогрессивная экономика. 2026. № 1. С. 29–44. https://doi.org/10.54861/27131211_2026_1_29.

5. Погорельцев А.С., Салимьянова И.Г. Особенности оценки цифровой зрелости организаций // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2022. № 5–2 (137). С. 118–125.

6. КРУГ-2000. Программно-технический комплекс. НПФ «КРУГ». URL: https://www.krug2000.ru/ (дата обращения: 12.01.2026).

7. ТРИНИТИ. Интегрированная система управления производством. URL: https://www.triniti.ru/ (дата обращения: 15.01.2026).

8. Sber AI. Решения в области искусственного интеллекта для промышленности. URL: https://ai.sber.ru/ (дата обращения: 16.01.2026).

9. Yandex DataSphere. Платформа для ML-разработки. URL: https://cloud.yandex.ru/services/datasphere (дата обращения: 17.01.2026).

10. SASB Standards. Sustainability Accounting Standards Board. URL: https://www.sasb.org/standards/ (дата обращения: 19.01.2026).

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

11. GRI 403: Occupational Health and Safety 2018. Global Reporting Initiative. URL: https://www.globalreporting.org/standards/ (дата обращения: 20.01.2026).

12. Шкарупета Е.В. Стратегическое управление интеллектуальной зрелостью промышленных экосистем в условиях экономики данных // Экономинфо. 2024. Т.19. № 4. С. 5–12.

13. Ashby W.R. An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall, 1956. 295 p.

14. Отчёт в области устойчивого развития ПАО «ФосАгро» за 2023 год. URL: https://www.phosagro.ru/investors/reports/ (дата обращения: 22.01.2026).

15. Saaty T. Decision Making. The Analytic Hierarchy Process. Moscow: Radio and Communications, 1993. 278 p.

References

1. Abashkin, V.L., Abdrakhmanova, G.I., Vishnevskii, K.O., Gokhberg, L.M. et al. (2024). Tsifrovaya ekonomika: 2024: kratkii statisticheskii sbornik [Digital economy: 2024: statistical brief]. Moscow: ISIEZ VShE, 124. (In Russ.)

2. ACATECH (2016). Implementation Strategy Industrie 4.0: Report on the results of the Industrie 4.0 Platform. Berlin. (In Eng.)

3. Metodika otsenki urovnya tsifrovizatsii gosudarstvennykh kompanii i kompanii s gosudarstvennym uchastiem (2022) [Methodology for assessing the level of digitalization of state-owned companies]. Retrieved from: https://digital.gov.ru/ru/documents/ (Date of access: 09.01.2026). (In Russ.)

4. Din, Khaici (2026). Razrabotka organizatsionno-ekonomicheskogo mekhanizma upravleniya tsifrovoi zrelost'yu promyshlennogo predpriyatiya [Development of an organizational and economic mechanism for managing digital maturity of an industrial enterprise]. Progressivnaya ekonomika [Progressive Economy], 1, 29–44. https://doi.org/10.54861/27131211_2026_1_29. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Pogoreltsev, A.S., Salim'yanova, I.G. (2022). Osobennosti otsenki tsifrovoi zrelosti organizatsii [Features of assessing digital maturity of organizations]. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta [Bulletin of Saint Petersburg State University of Economics], 5-2(137), 118–125. (In Russ., abstract in Eng.)

6. KRUG-2000 (2026). Programmno-tekhnicheskii kompleks [Software and hardware complex]. Retrieved from: https://www.krug2000.ru/ (Date of access: 12.01.2026). (In Russ.)

7. TRINITI (2026). Integrirovannaya sistema upravleniya proizvodstvom [Integrated production management system]. Retrieved from: https://www.triniti.ru/ (Date of access: 15.01.2026). (In Russ.)

8. Sber AI (2026). Resheniya v oblasti iskusstvennogo intellekta dlya promyshlennosti [AI solutions for industry]. Retrieved from: https://ai.sber.ru/ (Date of access: 16.01.2026). (In Russ.)

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

9. Yandex DataSphere (2026). Platforma dlya ML-razrabotki [Platform for machine learning development]. Retrieved from: https://cloud.yandex.ru/services/datasphere (Date of access: 17.01.2026). (In Russ.)

10. SASB Standards (2026). Sustainability Accounting Standards Board. Retrieved from: https://www.sasb.org/standards/ (Date of access: 19.01.2026). (In Eng.)

11. GRI 403: Occupational Health and Safety (2018). Global Reporting Initiative. Retrieved from: https://www.globalreporting.org/standards/ (Date of access: 20.01.2026). (In Eng.)

12. Shkarupeta, E.V. (2024). Strategicheskoe upravlenie intellektual'noi zrelost'yu promyshlennykh ekosistem v usloviyakh ekonomiki dannykh [Strategic management of intellectual maturity of industrial ecosystems in the data economy]. Ekonominfo [Econominfo], 19(4), 5–12. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Ashby, W.R. (1956). An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall, 295. (In Eng.)

14. PAO "FosAgro" (2023). Otchet v oblasti ustoichivogo razvitiya [Sustainability report]. Retrieved from: https://www.phosagro.ru/investors/reports/ (Date of access: 22.01.2026). (In Russ.)

15. Saaty, T. (1993). Decision Making. The Analytic Hierarchy Process. Moscow: Radio and Communications, 278. (In Eng.)

© Сахарова Н.В., Вишнякова И.Л. 2026

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.