



Трансформация интеллектуальных систем управления организацией: от детерминированных цифровых двойников Индустрии 4.0 к агентно-ориентированным моделям Индустрии 5.0

Ирина Соломоновна Таюрская

Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, Санкт-Петербург, Россия,
tis_ivesep@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8795-5672>

Аннотация

Цель. Исследовать трансформацию интеллектуальных систем управления (ИСУ) в контексте человекоцентричной парадигмы и разработать концептуальную модель архитектуры цифрового двойника организации, обеспечивающую переход от автоматизированного мониторинга Индустрии 4.0 к адаптивному управлению Индустрии 5.0.

Задачи. Проанализировать эволюцию ИСУ и выявить технологии ИИ для их трансформации в рамках человекоцентричной парадигмы; предложить концептуальную модель архитектуры цифрового двойника организации в качестве ядра ИСУ.

Методология. Используются методы анализа научных изданий российских и зарубежных авторов, теоретического обобщения и систематизации данных, полученных из открытых источников, экономико-организационного моделирования.

Результаты. Выполнена семантическая интерпретация термина «интеллектуальные системы управления», прослеживается эволюция концепции ИСУ. Рассмотрен процесс становления нового рыночного сегмента ИИ-технологий (сегмента AI-агентов), а также доказано преимущество многоагентной архитектуры для создания цифрового двойника организации в качестве ядра ИСУ. Автором предложена концептуальная модель цифрового двойника организации.

Выводы. Переход к Индустрии 5.0 требует трансформации ИСУ через конвергенцию цифрового двойника организации и многоагентных ИИ-технологий, что позволяет перейти от пассивного мониторинга к проактивному адаптивному управлению. Предложенная авторская концептуальная модель цифрового двойника на базе многоагентной системы создает методологический базис для реализации ключевых принципов Индустрии 5.0, в частности человекоцентричности, устойчивости и резильентности промышленных предприятий.

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровой двойник, цифровой двойник организации, AI-агенты, многоагентные системы

Для цитирования: Таюрская И. С. Трансформация интеллектуальных систем управления организацией: от детерминированных цифровых двойников Индустрии 4.0 к агентно-ориентированным моделям Индустрии 5.0 // *Экономика и управление*. 2026. Т. 32. № 7. С. 887–898. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-7-887-898>

Transformation of intelligent enterprise management systems: From deterministic digital twins of Industry 4.0 to agent-based models of Industry 5.0

Irina S. Tayurskaya

St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, St. Petersburg, Russia,
tis_ivesep@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8795-5672>

Abstract

Aim. To investigate the transformation of intelligent management systems (IMSs) in the context of the human-centric paradigm and to develop a conceptual model of the architecture of an enterprise digital twin that enables the transition from automated monitoring in Industry 4.0 to adaptive management in Industry 5.0.

Objectives. To analyze the evolution of IMS and identify AI technologies for their transformation within the human-centric paradigm; to propose a conceptual model of the architecture of an enterprise digital twin as the core of an IMS.

Methods. The study used methods of analysis of scholarly publications by Russian and international authors, theoretical generalization and systematization of data obtained from open sources, and economic-organizational modeling.

Results. A semantic interpretation of the term “intelligent management systems” was provided, and the evolution of the IMS concept was traced. The emergence of a new market segment of AI technologies (the AI-agent segment) was examined, and the advantages of a multi-agent architecture for creating an enterprise digital twin as the core of an IMS were demonstrated. We proposed a conceptual model of an enterprise digital twin.

Conclusions. The transition to Industry 5.0 requires the transformation of IMS through the convergence of enterprise digital twins and multi-agent AI technologies, enabling a shift from passive monitoring to proactive adaptive management. The proposed conceptual model of a digital twin based on a multi-agent system creates a methodological foundation for implementing the key principles of Industry 5.0, in particular human-centricity, sustainability, and resilience of industrial enterprises.

Keywords: digital transformation, digital twin, enterprise digital twin, AI agents, multi-agent systems

For citation: Tayurskaya I.S. Transformation of intelligent enterprise management systems: From deterministic digital twins of Industry 4.0 to agent-based models of Industry 5.0. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2026;32(7):887-898. (In Russ.). <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2026-7-887-898>

Введение

Современный этап развития промышленности характеризуется глубокой трансформацией, обусловленной сменой индустриальных парадигм, от Индустрии 4.0 к формирующимся концепциям Индустрии 5.0 и 6.0. В условиях геополитической нестабильности, разрыва традиционных технологических цепочек и необходимости импортозамещения перед российской промышленностью стоит задача системного переосмысления подходов к управлению.

Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государ-

ства» (2025–2030) знаменует стратегический переход России от парадигмы цифровизации инфраструктуры (национальный проект «Цифровая экономика», 2019–2024) к парадигме экономики данных, при которой данные выступают стратегическим ресурсом повышения производительности и устойчивости промышленных систем¹. Главная цель национального проекта — создание экосистемы, в которой данные становятся фактором, генерирующим конкурентные преимущества. Однако накопление данных само по себе не создает ценности. По оценкам экспертов Европейской комиссии, до 80 % промышленных данных

¹ Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства» // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ: офиц. сайт. URL: <https://digital.gov.ru/target/naczionalnyj-proekt-ekonomika-dannyh-i-czifrovaya-transformacziya-gosudarstva> (дата обращения: 04.02.2026).

в Европе остаются необработанными ввиду отсутствия интеллектуальных механизмов их интерпретации¹. Такие механизмы интерпретации реализуются интеллектуальными системами управления (далее — ИСУ).

Российские промышленные предприятия находятся на разных этапах внедрения технологий Индустрии 4.0. Между тем в технологически наиболее развитых странах практика управления промышленными предприятиями постепенно смещается в направлении парадигмы Индустрии 5.0, с акцентом на человекоцентричность, устойчивое развитие и резильентность. Это создает риск технологического отставания и требует разработки адаптированных стратегий перехода. Передовые мировые промышленные экосистемы обладают свойствами самоорганизации и адаптивности, что критически важно для обеспечения устойчивости современных предприятий в условиях глобальной нестабильности.

Разработка отечественных инновационных подходов к построению ИСУ будет способствовать выработке конкурентных преимуществ российской промышленности в эпоху цифровой экономики. Таким образом, исследование отвечает на актуальный научный вызов, предлагая решения, востребованные в процессе цифровой трансформации промышленности России и критически важные для достижения технологической независимости страны.

Научная новизна исследования состоит в разработке концептуальной модели архитектуры цифрового двойника организации, выступающей ядром ИСУ и обеспечивающей эволюцию от автоматизированного мониторинга (Индустрия 4.0) к адаптивному, человекоориентированному и устойчивому управлению (Индустрия 5.0).

Материалы и методы

При подготовке статьи использованы методы анализа научных публикаций российских и зарубежных авторов, экономико-организационного моделирования, теоретического обобщения и систематизации данных, полученных из открытых источников. Информационной базой послужили материалы российских и зарубежных исследовательских организаций, размещенные в открытом доступе.

Результаты и их обсуждение

История развития ИСУ тесно связана с развитием технологий искусственного интеллекта (далее — ИИ). Термин «интеллектуальные системы управления» появился в 60-е гг. XX в. В указанный период формируются теоретические основы ИСУ на стыке кибернетики, теории управления и зарождающегося ИИ. Прорывом стала разработка Л. Заде нечеткой логики (1965), позволившей формализовать рассуждения, обладающие некоей степенью неопределенности. В 70-е гг. Э. Мамдани создал первый нечеткий контроллер для управления паровым двигателем, доказав практическую применимость подхода. Параллельно в СССР происходило развитие теории адаптивных и самообучающихся систем, которые послужили основой для будущих интеллектуальных регуляторов.

В 80-е гг. термин «интеллектуальные системы управления» утвердился в научной среде как самостоятельная область исследований. В рассматриваемый период Япония стала лидером практического внедрения: в 1987 г. нечеткий контроллер успешно управлял движением поезда метро в Сендай, обеспечивая плавность хода и экономию энергии [1]. В военно-промышленном комплексе для диагностики и управления сложными технологическими процессами начали применять экспертные системы. Возникли первые гибридные архитектуры, объединяющие нечеткую логику с элементами машинного обучения [2].

Период 1990–2000-х гг. характеризовался интеграцией различных методов ИИ: нейросетей, генетических алгоритмов и нечеткой логики — в единые гибридные системы. Разработаны архитектуры типа ANFIS (адаптивные нейро-нечеткие системы вывода), сочетающие обучаемость нейросетей с интерпретируемостью правил. Созданы специализированные подклассы: мульти-агентные системы управления, системы реального времени, а также системы поддержки принятия решений. ИСУ получили широкое распространение в робототехнике, авиации, энергетике и автомобильной промышленности.

За рассмотренный период построена парадигма распределенного интеллектуального

¹ Industrial data: 80 % still asleep // Numeum. July 25. 2025. URL: <https://numeum.fr/en/public-affairs/industrial-data-80-still-asleep-can-europe-wake-up-in-time/> (дата обращения: 05.02.2026).

управления, при которой сложная задача декомпозируется между автономными агентами. Мультиагентные системы управления применяют для решения задач с пространственной распределенностью, динамической переконфигурацией и конфликтующими целями. 1990–2000-е гг. стали переходным этапом от «умного регулятора» к «умной экосистеме регуляторов», при этом интеллект распределяется между множеством взаимодействующих агентов, предшественников современных концепций киберфизических систем. ИСУ стали интегрироваться с концепцией Индустрия 4.0, IoT и цифровыми двойниками для управления киберфизическим оборудованием.

Несмотря на устоявшуюся практику использования термина «интеллектуальные системы управления», в российских научных работах отсутствует единое, строго формализованное его определение. В изученных нами работах рассмотрены различные характеристики, структура и функциональное назначение таких систем.

Одно из самых общих определений интеллектуальной информационной системы предложено отечественными учеными. Так, А. В. Остроух и Н. Е. Суркова пишут: «Интеллектуальная информационная система — автоматизированная информационная система, основанная на знаниях, или комплекс программных, лингвистических и логико-математических средств для реализации основной задачи — осуществления поддержки деятельности человека и поиска информации в режиме продвинутого диалога на естественном языке» [3, с. 13]. В определении К. А. Пупкова и Ю. К. Броварской показано отличие ИСУ от классических автоматических систем управления, поскольку особенность ИСУ состоит в том, что синтез цели и принятие решений реализуются внутри системы [4].

В статье О. П. Кузнецова утверждается, что интеллектуальные системы предназначены для поддержки принятия управляющих решений в слабоструктурированных ситуациях. В статье изучена ИСУ как программный комплекс, реализующий методы когнитивного анализа слабоструктурированных ситуаций, включающий в себя подсистемы ввода когнитивной модели, обработки (решения прямой и обратной задач) и представления результатов, с выдачей рекомендаций по принятию решений; ориентированный на работу с качественными,

нечеткими и субъективными оценками экспертов [5].

Ключевые подходы к определению ИСУ предполагают установление наиболее важного фактора, определяющего содержание исследуемого термина. Результаты проведенного терминологического исследования обобщены в таблице 1.

С учетом результатов анализа термина «интеллектуальные системы управления» к современным ИСУ можно отнести системы, в которых для решения задач управления применяют методы ИИ, такие как нечеткая логика, нейронные сети, генетические алгоритмы, экспертные системы и их гибридные комбинации, призванные обеспечивать эффективность управления сложными объектами с неполной информацией. В контексте темы исследования предлагаем рассматривать ИСУ как управленческую архитектуру, в которой цифровой двойник организации выступает интеллектуальным ядром, обеспечивающим синтез данных о бизнес-процессах, ресурсах и внешней среде для автоматизированного прогнозирования, сценарного моделирования и генерации оптимальных управленческих решений в режиме реального времени.

ИСУ на базе цифрового двойника организации трансформирует управление из практики реагирования на отчетную информацию в прогностическую дисциплину. При этом управленческие решения принимают на основе симуляции будущего, а цифровой двойник организации становится неким виртуальным исполнителем, способным мгновенно оценивать последствия управленческих решений до их реальной реализации.

К 2000-м гг. мультиагентные системы управления стали неотъемлемой частью теории ИСУ, сформировали основу для современной архитектуры цифровых двойников. AI-агенты трансформируют ИСУ из пассивного инструмента регистрации в активного когнитивного партнера, обеспечивая синергию человеческой креативности и машинной эффективности. Использование AI-агентов в информационных системах управления служит не просто технологическим обновлением, а стратегическим условием перехода к парадигме Индустрии 5.0. Значимость этого подхода видится в построении симбиотической системы управления, при которой технологическая эффективность машин сочетается с ценностными ориентирами человека.

Семантическая интерпретация термина «интеллектуальные системы управления»

Table 1. Semantic interpretation of the term “intelligent management systems”

Фактор	Основная функция	Основные характеристики ИСУ
Интеллектуализация поддержки решений	ИСУ реализует методы поддержки принятия управляющих решений в слабоструктурированных ситуациях на базе когнитивных моделей	ИСУ включает в себя: – подсистему ввода когнитивной модели ситуации; – подсистему обработки (методы решения прямой и обратной задач анализа); – подсистему представления результатов анализа и выдачи рекомендаций по принятию решений
Гибридная архитектура ИИ	Обеспечение функционирования в условиях неопределенности, неполноты информации и случайных внешних возмущений	Иерархическая система автоматического управления, построенная на технологиях обработки знаний (экспертных систем, нечеткой логики, нейросетевых структур, ассоциативной памяти), предусматривающая механизмы хранения и обработки знаний для обеспечения функционирования в условиях неопределенности, неполноты информации и случайных внешних возмущений
Реализация ситуационного управления	Практическая реализация концепции ситуационного управления на базе интеллектуальных технологий	Интеллектуальная система управления — гибридная человеко-машинная система, использующая семиотические модели знаний для ситуационного анализа и адаптивного выбора стратегий управления в условиях неопределенности, неполноты информации и невозможности полной формализации объекта управления. Ее цель — это не замена человека, а усиление его способности принимать эффективные решения в сложных динамических средах
Динамическая самоорганизация	Синтез цели, автономность принятия решений при нахождении рационального способа достижения цели	Объединенная информационным процессом совокупность технических средств и программного обеспечения, работающих во взаимосвязи с человеком (коллективом людей) или автономно, способная с учетом сведений и знаний при наличии мотивации синтезировать цель, принимать решение к действию и находить рациональный способ достижения цели

Источник: составлено автором на основе [4; 5; 6, с. 15; 7].

AI-агенты обеспечивают необходимую гибкость, интеллектуальную поддержку и адаптивность ИСУ, позволяя организациям достигать баланса между производительностью, благополучием сотрудников и устойчивым развитием. Без внедрения агентных архитектур реализация принципов Индустрии 5.0 рискует остаться декларативной, поскольку традиционные детерминированные системы не обладают достаточным потенциалом для работы в сложных, нелинейных условиях современной экономической среды.

Парадигма Индустрии 5.0, инициированная Европейской комиссией и ставшая важным стратегическим ориентиром современной промышленной политики, знаменует собой смену фокуса с техноцентричной автоматизации (Индустрия 4.0) на человекоориентированность, экологическую устойчивость и резильентность производственных систем. В этом контексте информационные системы управления, в том числе ИСУ, уже не инструмент фиксации транзакций, а среда взаимодействия человека и машины. Интеграция AI-агентов в архитектуру

ИСУ может быть рассмотрена как технологический императив для реализации целей Индустрии 5.0. Применение технологии AI-агентов в ИСУ связано с их способностью реализовывать на практике три фундаментальных принципа Индустрии 5.0: антропоцентричность, устойчивость и резильентность.

AI-агенты берут на себя рутинные, алгоритмируемые задачи (сбор данных, первичный анализ, заполнение форм), освобождая человеческий ресурс для творческой деятельности, стратегического планирования и принятия этических решений. Технологии AI-агентов способствуют снижению когнитивной нагрузки на пользователей ИСУ. Интерфейсы взаимодействия смещаются от сложных меню к диалоговым системам на естественном языке, что делает управление доступным для сотрудников без глубокой технической подготовки.

AI-агенты способствуют реализации принципа устойчивости, что подразумевает минимизацию экологического следа и оптимизацию использования ресурсов. Агентные системы способны выполнять многофактор-

ную оптимизацию в реальном времени, учитывая и экономические, и экологические показатели (энергопотребление, углеродный след, отходы). Внедрение указанной технологии помогает автономно корректировать производственные графики или логистические маршруты для снижения потребления ресурсов. Тем самым ИСУ становится инструментом обеспечения ESG-требований через автоматизированный контроль и исполнение.

AI-агенты способствуют также реализации принципа резильентности. Благодаря децентрализованной природе многоагентных систем отказ одного узла не приводит к коллапсу системы в целом. Агенты могут быстро переконфигурировать процессы в ответ на изменения внешней среды. Рассматриваемая технология реализует переход от жестко заданных бизнес-процессов к адаптивным потокам работ. ИСУ как система приобретает способность к самоорганизации в условиях неопределенности.

В начале 2026 г. аналитическое подразделение CNews Analytics совместно с отраслевым порталом CNews опубликовало итоги традиционного мониторинга, в рамках которого идентифицированы приоритетные направления развития информационных технологий для российского рынка. В исследовании приняли участие 152 эксперта: представители вендорских компаний и предприятий-интеграторов, а также заказчиков ИТ-решений. Респондентам предложили оценить востребованность различных цифровых инструментов в среднесрочной перспективе (от двух до семи лет)¹.

Основной вывод экспертного исследования состоит в прогнозируемом масштабном внедрении технологий ИИ в качестве базового драйвера цифровой трансформации корпоративного сектора. Две трети опрошенных (66 %) ожидают роста количества инициатив по интеграции генеративных моделей ИИ в 2026 г. Факторами, стимулирующими такой процесс, выступают экономическая эффективность решений, меры государственного стимулирования, повышение уровня цифровой зрелости организаций, появление

конкурентоспособных отечественных платформ, а также сохраняющийся кадровый дефицит в ИТ-отрасли. Векторы применения генеративного ИИ сосредоточены в основном в трех функциональных областях: это поддержка клиентского опыта, оптимизация внутренних операционных процессов и автоматизация жизненного цикла разработки программного обеспечения.

Global Market Insights Inc. (GMI), независимая компания по исследованию рынка и консалтингу, оценивает объем мирового рынка AI-агентов в размере 5,9 млрд долл. в 2024 г. По прогнозам компании, ожидается, что рынок вырастет до 105,6 млрд долл. в 2034 г. при среднегодовом темпе роста 38,5 %, как видно на рисунке 1.

Еще одна консалтинговая компания — Research Nester — предлагает текущую оценку мирового рынка AI-агентов за 2026 г. в объеме 11,79 млрд долл. США. Согласно ее прогнозу, к 2035 г. объем мирового рынка превысит 263,96 млрд долл., что соответствует среднегодовому темпу роста более 40,8 % в год². Наблюдаемая динамика не только подтверждает становление нового многомиллиардного рыночного сегмента, но и свидетельствует о фундаментальных структурных трансформациях в теории и практике создания и внедрения ИСУ.

В 2025 г. в России произошел качественный сдвиг в развитии ИИ, от диалоговых систем к практической реализации агентных архитектур. Однако, в отличие от глобальных трендов, отечественный рынок развивается поступательно, находясь на стадии ранних пилотных внедрений. Несмотря на умеренные темпы, профессиональное сообщество обращает внимание на устойчивое смещение инвестиционной и проектной активности в направлении агентных моделей ИИ, что определяет главный вектор среднесрочного технологического развития страны.

Эмпирическим подтверждением такой тенденции служат результаты исследования, проведенного экспертной группой Высшей школы бизнеса Национального исследовательского университета «Высшая

¹ Топ-10 ИТ-тренды в России на 2026 г. по версии CNews // CNews. 2026. 3 февраля. URL: https://www.cnews.ru/reviews/it-trendy_v_rossii_2026 (дата обращения: 05.04.2026).

² Объем и прогноз рынка автономного искусственного интеллекта и автономных агентов по предложению (оборудование, услуги, программное обеспечение); развертыванию; технологиям; вертикали — тенденции роста, ключевые игроки, региональный анализ на 2026–2035 гг. // Research Nester. URL: <https://www.researchnester.com/ru/reports/autonomous-ai-and-autonomous-agents-market/5948> (дата обращения: 06.04.2026).

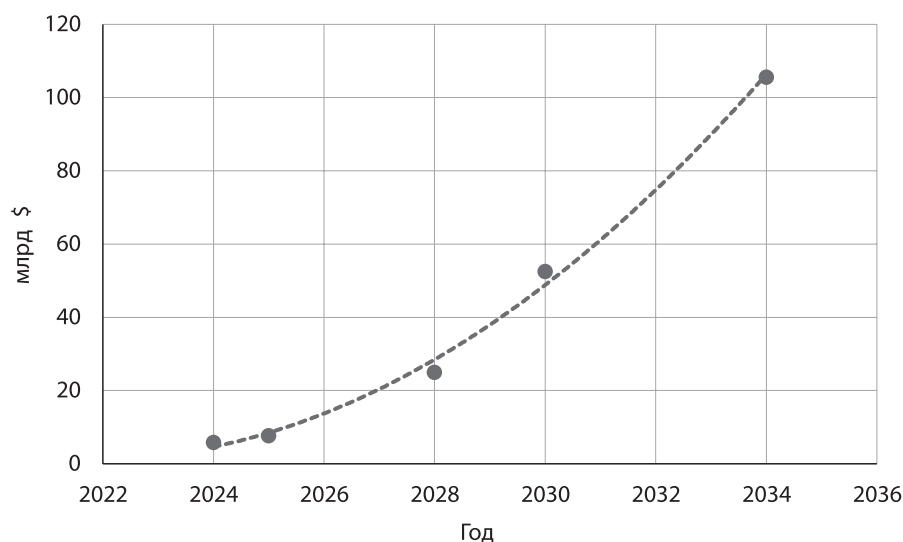


Рис. 1. Мировой рынок AI-агентов
Fig. 1. Global market for AI agents

Источник: составлено автором по данным. См.: AI Agents Market Size & Share 2025–2034 // Global Market Insights. URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/ai-agents-market> (дата обращения: 05.04.2026).

школа экономики» (НИУ ВШЭ). На основании комплексного анализа отечественного и международного опыта, а также данных опроса 306 представителей корпоративного сектора стал очевидным тот факт, что технология AI-агентов вошла в рейтинг десяти приоритетных стратегических трендов, определяющих развитие российских организаций в 2026 г. 59 % респондентов находятся в активной фазе поиска, оценки или подготовки к внедрению агентных решений, что свидетельствует о существовании устойчивого спроса на эти технологии в российском бизнес-сообществе¹.

Функциональное преимущество AI-агентов видится в автоматизации задач, ранее требовавших участия человека или написания кода, через обработку естественного языка и автономное выполнение поручений. Например, аналитический агент способен самостоятельно мониторить показатели, выявлять отклонения и формировать рекомендации. Эксперты прогнозируют переход от изолированных агентов к интегрированным экосистемам, при которых множественные специализированные агенты координируют свои действия.

В контексте системного подхода организация интерпретируется как сложная адаптивная система, функциональная ар-

хитектура которой детерминирована распределенностью элементов, нелинейностью взаимосвязей и стохастической динамикой внешней среды. При этом традиционные монолитные модели цифрового двойника организации демонстрируют ограничения масштабируемости и формируют централизованные узлы принятия решений, выступающие фактором системных задержек в контуре управления.

Многоагентный подход обеспечивает методологически согласованное моделирование организации, воплощая ее элементы, процессы и ресурсы в виде автономных агентов. Управленческие решения формируются через их координированное взаимодействие, что помогает цифровому двойнику реализовывать активную симуляцию децентрализованной логики функционирования и адаптивного реагирования на изменения среды.

С учетом классического подхода, основанного на работах Вудриджа и Дженнингса [8], AI-агент характеризуется как автономная программная сущность, размещенная вне толькоопределенной среде и обладающая четырьмя поведенческими атрибутами: автономностью, реактивностью, проактивностью, социальностью, описание которых приведено в таблице 2. Таким образом, в данном контексте AI-агент рассмотрен через функ-

¹ Главные российские IT-тренды 2026 года: исследование ВШБ ВШЭ // Высшая школа бизнеса НИУ ВШЭ. URL: <https://gsb.hse.ru/news/1102888721.html> (дата обращения: 05.04.2026).

Свойства AI-агентов
Table 2. Properties of AI agents

№	Атрибут	Описание атрибута
1	Автономность	Способность системы принимать решения и управлять своими действиями, независимо от вмешательства человека или других агентов, сохраняя контроль над внутренним состоянием и поведением
2	Реактивность	Способность воспринимать контекст окружающей среды и своевременно отвечать на ее изменения, в том числе при обнаружении ситуаций, в которых цели агента оказываются под угрозой нарушения
3	Проактивность	Характеристика, отличающая агента от пассивных систем, выражена в способности демонстрировать целенаправленное поведение и инициировать действия для достижения задач, а не только реагировать на внешние стимулы
4	Социальность	Возможность взаимодействия с другими агентами (в том числе преследующими собственные цели) посредством организованных коммуникационных протоколов, включая механизмы кооперации, переговоров и координации действий

Источник: составлено автором на основе [8].

Таблица 3

AI-агенты производственной компании
Table 3. AI agents of a manufacturing company

Тип	Характеристика	Пример реализации
Функциональные агенты	Представляют структурные единицы или бизнес-функции	Агент логистики, агент HR, агент финансов
Агенты ресурсов	Моделируют ограниченные ресурсы	Агент станка, агент бюджета, агент специалиста
Процессные агенты	Управляют жизненным циклом конкретных экземпляров процессов	Агент заказа клиента, агент проекта разработки
Агенты-посредники (Facilitators)	Координируют взаимодействие, решают конфликты	Агент-арбитр, агент реестра услуг

Источник: составлено автором.

циональные свойства его взаимодействия со средой и остальными субъектами системы.

Для полноценного покрытия функционала организации в агентном слое цифрового двойника используется гетерогенная популяция агентов, что отражено в таблице 3.

На рисунке 2 показана концептуальная модель архитектуры цифрового двойника промышленного предприятия, сочетающая традиционный классический подход с агентно-ориентированной парадигмой моделирования.

Информационный обмен между физическим контуром системы и цифровым двойником реализуется при передаче структурированных потоков данных и событийной телеметрии на интерфейсный уровень многоагентного модуля. Агентный слой осуществляет верификацию поступающей информации, ее семантическую интерпретацию и генерацию управленческих рекомендаций на основе предустановленных когнитивных алгоритмов.

Архитектурная структура цифрового двойника отражает принцип структурного

параллелизма: физической декомпозиции предприятия на производственные и управленческие подсистемы корреспондирует функциональная сегментация цифрового отражения, включающего в себя модель производственных процессов и модель бизнес-процессов. В этой архитектуре многоагентный компонент выполняет функцию адаптивного посредника (middleware), обеспечивающего синхронизацию, координацию и двусторонний информационный обмен между физическим и цифровым контурами через стандартизированные интерфейсные протоколы. Подробнее назначение и функционирование многоагентной компоненты цифрового двойника представлены на рисунке 3.

Между блоками интерфейсного и агентного слоев показаны стрелки, указывающие на обмен информацией между физическим уровнем, уровнем данных, цифровой моделью организации и агентным слоем с небазой знаний. Представленная схема отражает принцип интеграции физического и цифрового контуров предприятия через многоагентную архитектуру.

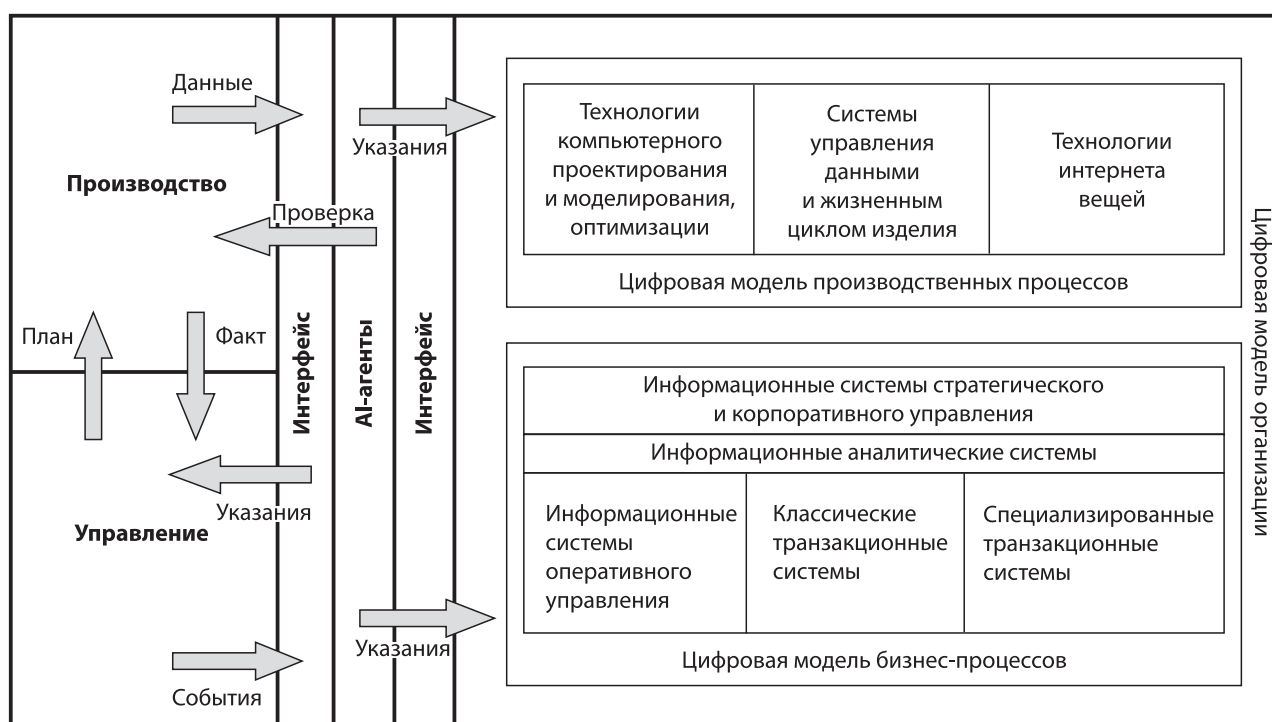


Рис. 2. Модель архитектуры цифрового двойника промышленного предприятия

Fig. 2. Model of the architecture of an industrial enterprise digital twin

Источник: составлено автором.

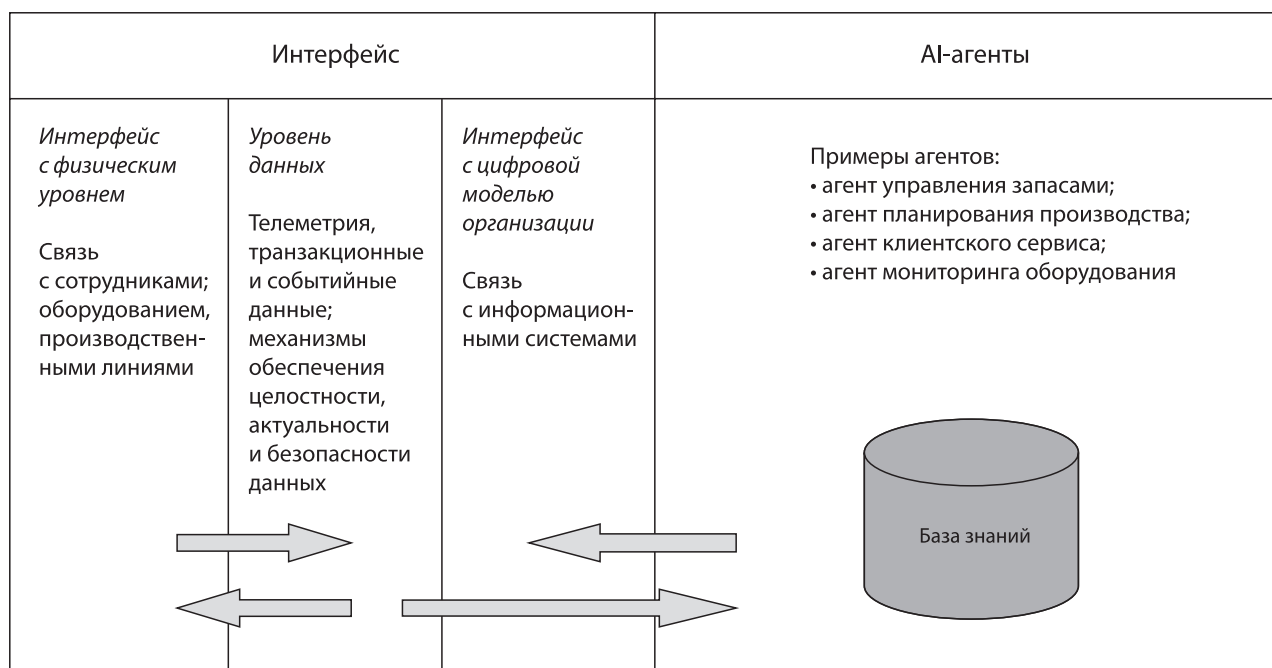


Рис. 3. Схема многоагентного компонента цифрового двойника

Fig. 3. Diagram of the multi-agent component of the digital twin

Источник: составлено автором.

Многоагентный компонент представляет собой когнитивное ядро архитектуры цифрового двойника, реализующее распределенную систему принятия решений на основе

популяции AI-агентов, взаимодействующих посредством событийно-ориентированной шины данных. На рисунке 4 дана в качестве примера диаграмма процесса предотвращения

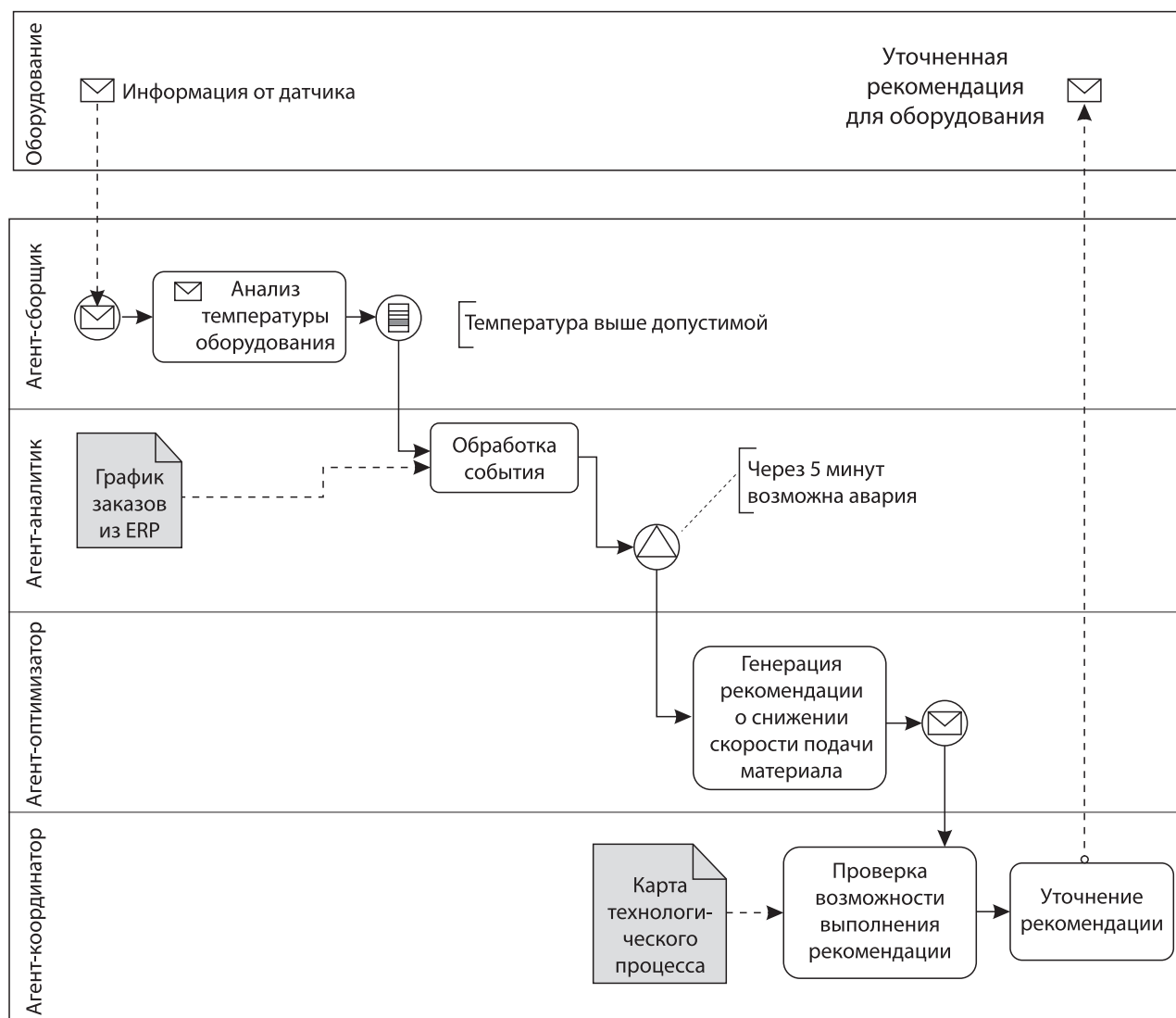


Рис. 4. Сценарий функционирования многоагентного компонента цифрового двойника (кейс предотвращения аварийной ситуации)

Fig. 4. Scenario for the operation of the multi-agent component of the digital twin (case study of emergency prevention)

Источник: составлено автором.

ния аварийной ситуации в случае превышения пороговых значений температурного режима производственного оборудования. Сценарий состоит из четырех последовательных блоков действий. К ним отнесены выявление отклонения, контекстуальный анализ, генерация управляющего воздействия, системная валидация.

Агент-сборщик, реализующий реактивную поведенческую модель, фиксирует превышение пороговых значений температурного режима производственного оборудования и инициирует публикацию соответствующего события в шину данных. Агент-аналитик, наделенный социальными компетенциями, получает события задан-

ного типа по подписке, коррелирует их с данными о производственной загрузке из ERP-системы и прогнозирует вероятность аварийного отказа в течение ближайших пяти минут.

Агент-оптимизатор, функционирующий в проактивном режиме, на основе прогнозной модели автономно формулирует рекомендацию по снижению скорости подачи сырья, направленную на предотвращение остановки конвейерной линии без нарушения общего производственного цикла. Агент-координатор осуществляет проверку предлагаемого управляющего воздействия на соответствие ограничениям смежных технологических процессов и бизнес-правил

организации, обеспечивая целостность и непротиворечивость принимаемых решений при реализации глобальной цели функционирования предприятия.

Рассмотренный пример передает суть принципа эмерджентного интеллекта многоагентной системы, при котором сложное адаптивное поведение достигается за счет координации специализированных агентов. Каждый из них обладает ограниченной, но четко определенной функциональностью.

Внедрение технологии мультиагентности в архитектуру цифрового двойника организации трансформирует его из инструмента технической оптимизации в человекоориентированную среду принятия решений, в которой учет интересов и потребностей сотрудника становится одной из главных функций системы наравне с экономической эффективностью. Делегирование рутинных операций AI-агентам реализует принцип *human-in-the-loop*, освобождая сотрудника для стратегических и творческих решений. Агенты адаптируют интерфейс и логику взаимодействия под индивидуальные когнитивные стили пользователя, повышая комфорт и снижая ошибки человеческого фактора. Таким образом, человекоцентричность ИСУ реализуется архитектурно: мультиагентная система не заменяет человека, а усиливает его возможности, создавая устойчивый симбиоз в парадигме Индустрии 5.0.

Выводы

Подводя итог, укажем, что настоящее исследование позволяет сформировать актуальное понимание процесса создания циф-

рового двойника организации. Установлено, что переход к Индустрии 5.0 требует трансформации функционала ИСУ от пассивного мониторинга к проактивному адаптивному управлению с делегированием рутинных операций AI-агентам. Традиционные монолитные архитектуры не обеспечивают гибкости и устойчивости, что обосновывает необходимость перехода к распределенным многоагентным системам.

Технологическим ядром трансформации служит конвергенция цифрового двойника организации, AI-агентов и протоколов многоагентной координации. Синергия указанных технологий помогает реализовать ключевые принципы Индустрии 5.0: антропоцентричность, устойчивость и резильентность управленческих процессов. В исследовательской работе предложена авторская концептуальная модель архитектуры цифрового двойника организации на базе мультиагентных систем управления. Указанная модель обеспечивает методологический базис для перехода от автоматизированной фиксации событий к адаптивному человекоориентированному управлению.

Практическая значимость результатов подтверждается потенциальными эффектами: сокращением времени реакции на изменения среды, снижением операционных рисков и повышением устойчивости цепочек создания стоимости. Цифровой двойник организации на базе многоагентных технологий выступает необходимым условием реализации парадигмы Индустрии 5.0, создавая теоретический фундамент для адаптивного, устойчивого и человекоцентричного управления промышленными предприятиями.

Список источников

1. Oshima H., Yasunobu S., Sekino S. Automatic train operation system based on predictive fuzzy control // Proc. of the Int. workshop on artificial intelligence for industrial applications. (Hitachi City, May 25–27, 1988). New York, NY: IEEE, 1988. P. 485–489. <https://doi.org/10.1109/AIIP.1988.13336>
2. Kierner S., Kucharski J., Kierner Z. Taxonomy of hybrid architectures involving rule-based reasoning and machine learning in clinical decision systems: A scoping review // Journal of Biomedical Informatics. 2023. Vol. 144. Article 104428. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104428>
3. Остроух А. В., Суркова Н. Е. Интеллектуальные информационные системы и технологии: монография. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. 370 с.
4. Пупков К. А., Броварская Ю. К. Динамические и информационные свойства интеллектуальных систем управления // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 167–170.
5. Кузнецов О. П. Интеллектуализация поддержки управляющих решений и создание интеллектуальных систем // Проблемы управления. 2009. № 3 S1. С. 64–72.
6. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 333 с.

7. Averkin A. N., Kobrinskii B. A. D. A. Pospelov and the development of artificial intelligence in the Soviet Union and the Russian Federation // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2023. Vol. 33. No. 4. P. 840–861. <https://doi.org/10.1134/S1054661823040089>
8. Wooldridge M., Jennings N. R. Intelligent agents: Theory and practice // *The Knowledge Engineering Review*. 1995. Vol. 10. No. 2. P. 115–152. URL: https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp_papers/integrated1/wooldridge_intelligent_agents.pdf (дата обращения: 15.05.2026).

References

1. Oshima H., Yasunobu S., Sekino S. Automatic train operation system based on predictive fuzzy control. In: Proc. Int. workshop on artificial intelligence for industrial applications (Hitachi City, May 25-27, 1988). New York, NY: IEEE; 1988:485-489. <https://doi.org/10.1109/AIIA.1988.13336>
2. Kierner S., Kucharski J., Kierner Z. Taxonomy of hybrid architectures involving rule-based reasoning and machine learning in clinical decision systems: A scoping review. *Journal of Biomedical Informatics*. 2023;144:104428. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2023.104428>
3. Ostroukh A.V., Surkova N.E. Intelligent information systems and technologies. Krasnoyarsk: Scientific and Innovation Center; 2015. 370 p. (In Russ.).
4. Pupkov K.A., Brovanskaya Yu.K. Dynamic and informational properties of intelligent control systems. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii = Automation. Modern Technologies*. 2021;75(4):167-170. (In Russ.).
5. Kuznetsov O.I. Intellectualization of control decisions support and creation of intellectual systems in the RAS Institute of Control Sciences. *Problemy upravleniya = Control Sciences*. 2009;(3S1):64-72. (In Russ.).
6. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. Artificial intelligence and intelligent control systems. Moscow: Nauka; 2006. 333 p. (In Russ.).
7. Averkin A.N., Kobrinskii B.A. D.A. Pospelov and the development of artificial intelligence in the Soviet Union and the Russian Federation. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2023;33(4):840-861. <https://doi.org/10.1134/S1054661823040089>
8. Wooldridge M., Jennings N.R. Intelligent agents: Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995;10(2):115-152. URL: https://www.cs.cmu.edu/~motionplanning/papers/sbp_papers/integrated1/wooldridge_intelligent_agents.pdf (accessed on 15.05.2026).

Информация об авторе

Ирина Соломоновна Таюрская

кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры информационных технологий
и математики

Санкт-Петербургский университет технологий
управления и экономики

190020, Санкт-Петербург, Лермонтовский пр.,
д. 44а

SPIN-код: 6491-7119

AuthorID: 652423

Поступила в редакцию 15.04.2026
Прошла рецензирование 04.05.2026
Подписана в печать 29.07.2026

Information about the author

Irina S. Tayurskaya

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department
of Information Technology and Mathematics

St. Petersburg University of Management
Technologies and Economics

44A Lermontovskiy Ave., St. Petersburg 190020,
Russia

SPIN: 6491-7119

AuthorID: 652423

Received 15.04.2026
Revised 04.05.2026
Accepted 29.07.2026

Конфликт интересов: автор декларирует отсутствие конфликта интересов,
связанных с публикацией данной статьи.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest
related to the publication of this article.