

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2026, №3 https://www.agequal.ru/pdf/2026/AGE_QUALITY_3_2026.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Макаров В.В., Волчик О.В. Смарт-стандарты как инфраструктурный слой природоподобных экосистем: принципы построения и векторы развития // Электронный научный журнал «Век качества». 2026. №3. С. 22-40. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2026/326002.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 006.3/.8

Смарт-стандарты как инфраструктурный слой природоподобных экосистем: принципы построения и векторы развития

Макаров Владимир Васильевич,
доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры экономики данных,
Заслуженный деятель науки РФ,
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, корп. 1
akad.makarov@mail.ru

Волчик Олеся Владимировна,
кандидат экономических наук,
доцент кафедры экономики данных,
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, корп. 1
ovolchik.ov@sut.ru

Статья посвящена исследованию роли смарт-стандартов в формировании природоподобных экосистем на фоне нарастающей конвергенции биологических и цифровых технологий. Показано, что стандарты нового поколения выступают не просто нормативными документами, но активными инфраструктурными элементами, обеспечивающими взаимодействие киберфизических и биологических составляющих таких экосистем. Выявлены и систематизированы новые функциональные характеристики нормативных цифровых двойников – прогностическая, регулятивная, регенеративная и экологическая. Исследован потенциал объединения смарт-стандартов с цифровыми паспортами продукции применительно к задачам биоэкономики и циркулярного хозяйства. Разработана методология «живой» стандартизации, основанная на четырёх взаимосвязанных принципах: непрерывного самообновления, контекстуальной самоадаптации, накопительного

самообучения и децентрализованной самоорганизации. Рассмотрены отраслевые примеры и сценарии биоцифровой трансформации систем менеджмента качества, проанализированы сопутствующие этические и регуляторные риски. Предложена поэтапная дорожная карта перехода интегрированных систем менеджмента качества к природоподобной архитектуре, а также описаны три прогностических сценария развития смарт-стандартизации на горизонте до 2035–2050 годов.

Ключевые слова: смарт-стандарты, природоподобные экосистемы, биоцифровая конвергенция, нормативные цифровые двойники, цифровой паспорт продукции, Качество 5.0, «живая» стандартизация, биомиметика, устойчивое развитие, интегрированные системы менеджмента качества

Введение

Нынешний этап эволюции систем менеджмента качества (СМК) определяется радикальной сменой концептуальных оснований, вызванной ускоренным сближением биологических и цифровых технологий. На протяжении десятилетий управление качеством было нацелено прежде всего на устранение отклонений от заданных параметров и стабилизацию производственных процессов. Однако в условиях складывающихся природоподобных экосистем этот привычный целевой ориентир уступает место принципиально иному – поддержанию жизнеспособности систем, их способности адаптироваться к внешним воздействиям и самовосстанавливаться после сбоев.

Указанный сдвиг находит выражение в утверждении концепции «Качество 5.0», которая синтезирует технологические достижения четвёртой промышленной революции с человекоцентрированными и природосберегающими подходами к управлению [1]. В рамках новой парадигмы стандартизация перестаёт быть сводом статичных предписаний и превращается в живой, постоянно обновляемый механизм, координирующий взаимодействие киберфизических и биологических элементов экосистем [2].

Ведущие международные организации по стандартизации (IEC и ISO) целенаправленно исследуют нормативное обеспечение биоцифровых

взаимосвязей. В 2023 году Совет IEC по стандартизационному менеджменту учредил системный комитет SEG 12 по биоцифровой конвергенции, призванный сформировать дорожную карту стандартизации в этой области. Параллельно завершена разработка стандарта ISO 17298:2025 «Биоразнообразие для организаций», закладывающего инструментарий управления зависимостями организации от экосистем. Предстоящий пересмотр ISO 9001 (анонсированный на конец 2026 года) впервые предполагает включение климатических и экологических параметров в обязательные требования к СМК.

Цель настоящего исследования – обосновать инфраструктурную роль смарт-стандартов в природоподобных промышленных экосистемах и предложить методологию их проектирования на основе принципов «живой» стандартизации. Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач:

- раскрыть новые функциональные свойства нормативных цифровых двойников в условиях биоцифровых экосистем;
- исследовать механизмы интеграции смарт-стандартов с цифровыми паспортами продукции;
- разработать методологические принципы проектирования смарт-стандартов применительно к природоподобным экосистемам;
- выявить практические сценарии и ключевые препятствия внедрения.

Материалы и методы

Теоретико-методологической базой исследования служит системный анализ международных и национальных нормативных документов в сфере менеджмента качества, экологического менеджмента и цифровой трансформации производства. Эмпирическая основа работы состоит из материалов ISO/IEC, включая документацию Совместного стратегического комитета по биоцифровой конвергенции (IEC/ISO JSyC BDC) и оценочной группы IEC SEG 12. Аналитическому рассмотрению подверглись нормативные

документы, устанавливающие требования к цифровым двойникам (ГОСТ Р 57700.37–2021), смарт-стандартам (ПНСТ 864–2023), а также вновь принятые стандарты в области устойчивого развития – ISO 17298:2025 и ISO 18458.

Инструментальный арсенал исследования включает:

- системный анализ: для изучения структурно-функциональных характеристик природоподобных экосистем;
- принципы биомиметики: для переноса организационных паттернов живых систем в нормативную область;
- метод сценарного прогнозирования: для построения альтернативных траекторий развития смарт-стандартизации.

Оценка результативности функционирования природоподобных экосистем выполнена с опорой на многофакторный анализ, основанный на аппарате системной динамики и охватывающий технические, экологические, социальные и регенеративные показатели.

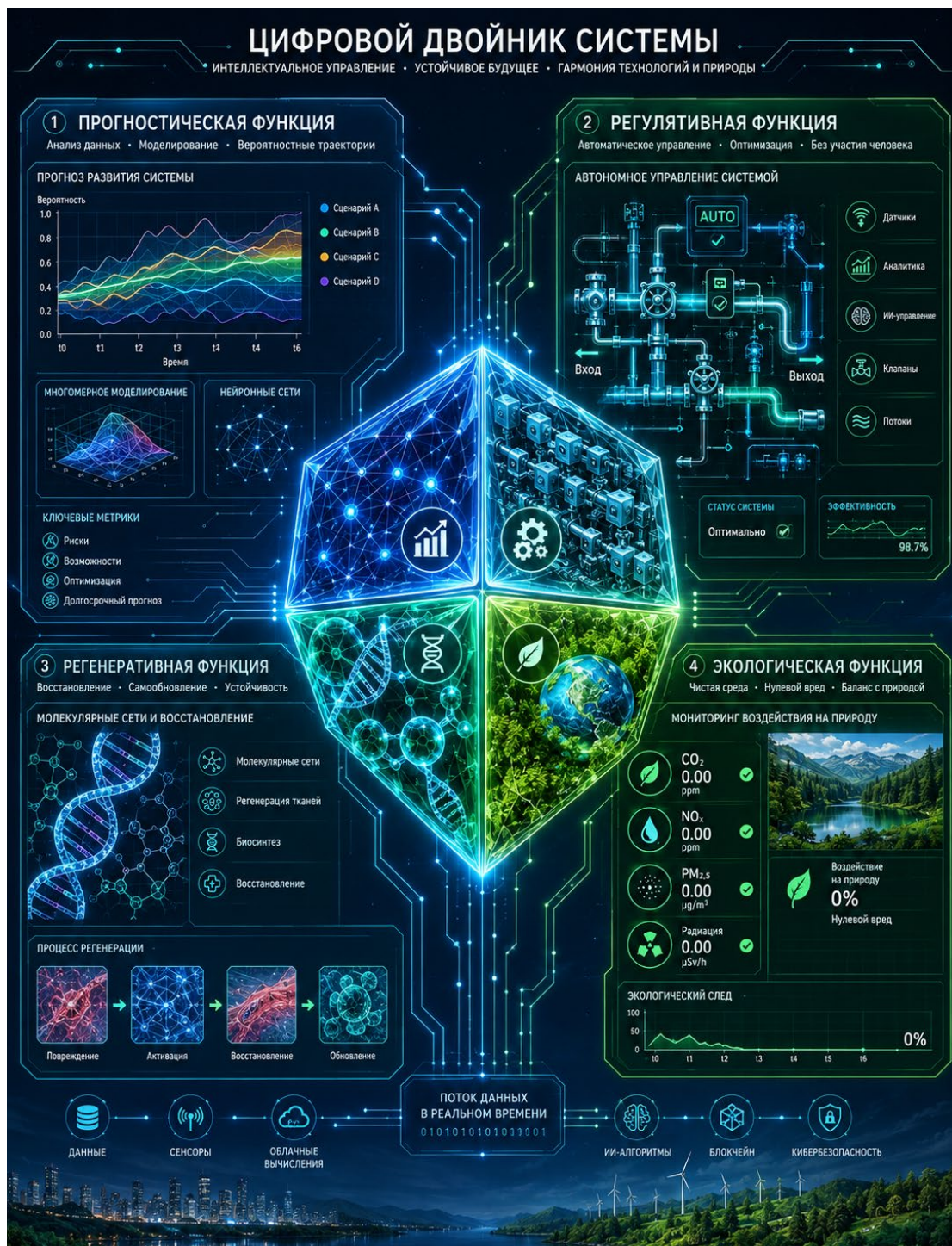
Информационную основу составили материалы пилотных инициатив в области природоподобного управления качеством, в частности европейского проекта bi0SpraCE по разработке цифровых паспортов продукции для устойчивых биоотраслей, а также данные о практике создания экопромышленных парков, проектов в сфере биоэнергетики и биопроизводства.

Результаты

Результаты исследования содержат:

1. Описание функционала нормативных цифровых двойников в биоцифровых экосистемах.

В условиях природоподобных экосистем цифровые двойники обретают качественно иной статус [3]. Из инструментов пассивного мониторинга они превращаются в активных агентов управления, наделённых рядом принципиально новых функций (рис. 1).



Источник: составлено авторами

Рис. 1. Функции нормативных цифровых двойников в биоцифровых экосистемах

Прогностическая функция выражается в способности системы предвосхищать будущие состояния на основе непрерывного анализа текущей

динамики и экологических факторов, что позволяет упреждать, а не лишь реагировать на нежелательные отклонения.

Регулятивная функция предполагает переход от оповещения об отклонениях к самостоятельной инициации корректирующих воздействий без обязательного участия человека-оператора, что существенно сокращает время реакции системы [4].

Регенеративная функция обеспечивает формирование вариантов восстановления системы после сбоев посредством биомиметических алгоритмов, способных воспроизводить логику регенерации живых организмов.

Экологическая функция обязывает принимать во внимание наряду с техническими и экономическими характеристиками системы также её воздействие на окружающую природную среду.

Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021, цифровой двойник представляет собой совокупность компьютерных моделей, электронной документации и иерархической системы требований [5]. В контексте биоцифровой конвергенции данная иерархия подлежит расширению за счёт экологических и регенеративных параметров, а сам двойник – преобразованию из инструмента контроля в соуправляющий элемент экосистемы.

2. Анализ возможностей интеграции смарт-стандартов с цифровыми паспортами продукции.

Цифровой паспорт продукции (Digital Product Passport, DPP) – это структурированная цифровая запись, аккумулирующая актуальные сведения о составе изделия, его ремонтпригодности, ресурсоёмкости и возможности вторичного использования на протяжении всего жизненного цикла [6]. Европейский консорциальный проект bi0SpaCE демонстрирует, каким образом DPP могут быть объединены с пространствами данных, совместимыми с принципами экономики замкнутого цикла [7].

Сопряжение смарт-стандартов с DPP открывает ряд принципиально новых возможностей:

- обеспечивает автоматическое пополнение сведений об объекте в режиме реального времени;
- переводит контроль соответствия из периодического режима в непрерывный;
- формирует исчерпывающий профиль прослеживаемости от источника сырья до конечного потребителя;
- интегрирует разрозненные данные в единую аналитическую платформу для ESG-отчётности.

Практическим следствием такой интеграции становится автоматизированная верификация соответствия нормативным требованиям на каждой стадии жизненного цикла и устранение информационной асимметрии между участниками цепочки создания ценности [8].

3. Обоснование необходимости стандартизации интерфейсов взаимодействия.

Достижение полноценной интероперабельности между киберфизическими и биологическими компонентами природоподобных экосистем невозможно без разработки стандартизированных протоколов их сопряжения [9]. Подобные протоколы должны решать три взаимосвязанные задачи:

- обеспечивать бесшовную передачу данных биологических сенсоров (например, показателей мониторинга экосистем) в цифровые контуры управления качеством;
- транслировать управляющие сигналы от цифровых систем к биологическим компонентам;
- поддерживать семантическую совместимость разнородных потоков данных.

Методологическая концепция «сверху вниз», применяемая IEC SEG 12, ориентирована именно на то, чтобы проблематика стандартизации таких интерфейсов рассматривалась не в технической изоляции, но с обязательным учётом социального, этического и экологического контекста. Рабочая группа 7

данного комитета специализируется на нормативном оформлении социальных, этических, рискованных и устойчивых аспектов биоцифровой конвергенции, включая вопросы управления данными [10; 11].

4. Разработку принципов «живой» стандартизации.

Традиционный стандарт статичен по своей природе. Он разрабатывается, утверждается и сохраняется в неизменном виде до очередного планового пересмотра, нередко занимающего несколько лет. В условиях непрерывных и многовекторных изменений, характерных для биоцифровой конвергенции, подобная модель утрачивает адекватность. Её альтернативой выступает концепция «живой» стандартизации, наделяющей нормативные документы атрибутами живых организмов. Данная концепция основана на принципах, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Принципы «живой» стандартизации

Наименование	Описание
Самообновление	Предполагает автоматическую актуализацию стандартов при появлении новых научных данных, корректировке законодательства или возникновении значимых технологических новшеств. Его реализация опирается на механизмы непрерывной разработки, концептуально близкие подходам, обсуждаемым в рамках инициативы ISO/IEC SMART.
Самоадаптация	Требует, чтобы стандарт органично подстраивался под специфику конкретного контекста применения, не жертвуя при этом нормативной строгостью. Инструментальной основой служат параметрические стандарты, в которых конкретные числовые значения требований задаются как функции от контекстных переменных.
Самообучение	Означает, что стандарт систематически аккумулирует практический опыт своего применения и использует накопленные данные для уточнения и совершенствования собственных требований, посредством механизмов обратной связи и методов машинного обучения.
Самоорганизация	Ориентирован на формирование децентрализованных сетей взаимосвязанных нормативных требований, координация которых осуществляется не иерархически, а через распределённое взаимодействие узлов сети.

Источник: составлено авторами на основе [12]

5. Обоснование необходимости интеграции показателей экологической устойчивости.

Исторически СМК были сосредоточены на технических и экономических индикаторах. Переход к природоподобным экосистемам делает включение экологических показателей в нормативную систему требований объективной необходимостью.

Принятый в 2025 году стандарт ISO 17298 «Биоразнообразие для организаций» впервые предоставляет бизнесу структурированный инструментарий для диагностики собственных зависимостей от биосистем, оценки связанных рисков и возможностей [13]. Анонсированная ревизия ISO 9001 закрепляет это требование как обязательное. Климатические и экологические воздействия отныне должны систематически учитываться и оцениваться в рамках СМК [14].

Практически интеграция экологической составляющей может быть реализована с помощью нескольких взаимодополняющих механизмов, таких как:

- введение природоохранных критериев в матрицы структурирования функции качества;
- создание цифровых моделей для сквозной оценки экологического следа продукции;
- стыковка смарт-стандартов с системами дистанционного экологического мониторинга;
- включение индикаторов биоразнообразия в корпоративные системы ключевых показателей эффективности.

К обсуждаемым в рамках настоящего исследования вопросам относятся методология оценки результативности природоподобных экосистем, дорожная карта перехода к природоподобной архитектуре для практического воплощения биоцифровой трансформации СМК, а также прогнозные сценарии и вызовы, стоящие перед ее реализацией.

Говоря о методологии оценки результативности отметим, что природоподобные экосистемы принципиально отличаются от объектов, на исследование которых ориентированы традиционные методы оценки. Под ними понимаются искусственные или модифицированные экосистемы, которые копируют либо вдохновляются природными процессами, принципами самоорганизации, цикличности веществ, адаптивности и устойчивости. Цель природоподобных систем состоит в том, чтобы не просто существовать рядом с природой, а гибко встраиваться в естественный ресурсооборот, минимизируя негативное воздействие и способствуя восстановлению нарушенных процессов. Их отличительные черты:

- сетевая, а не линейная связность элементов;
- цикличность, а не однонаправленность ресурсных потоков;
- преобладание долгосрочных эффектов над краткосрочными;
- многомерность результатов, включающих экологическое и социальное измерения наряду с экономическим.

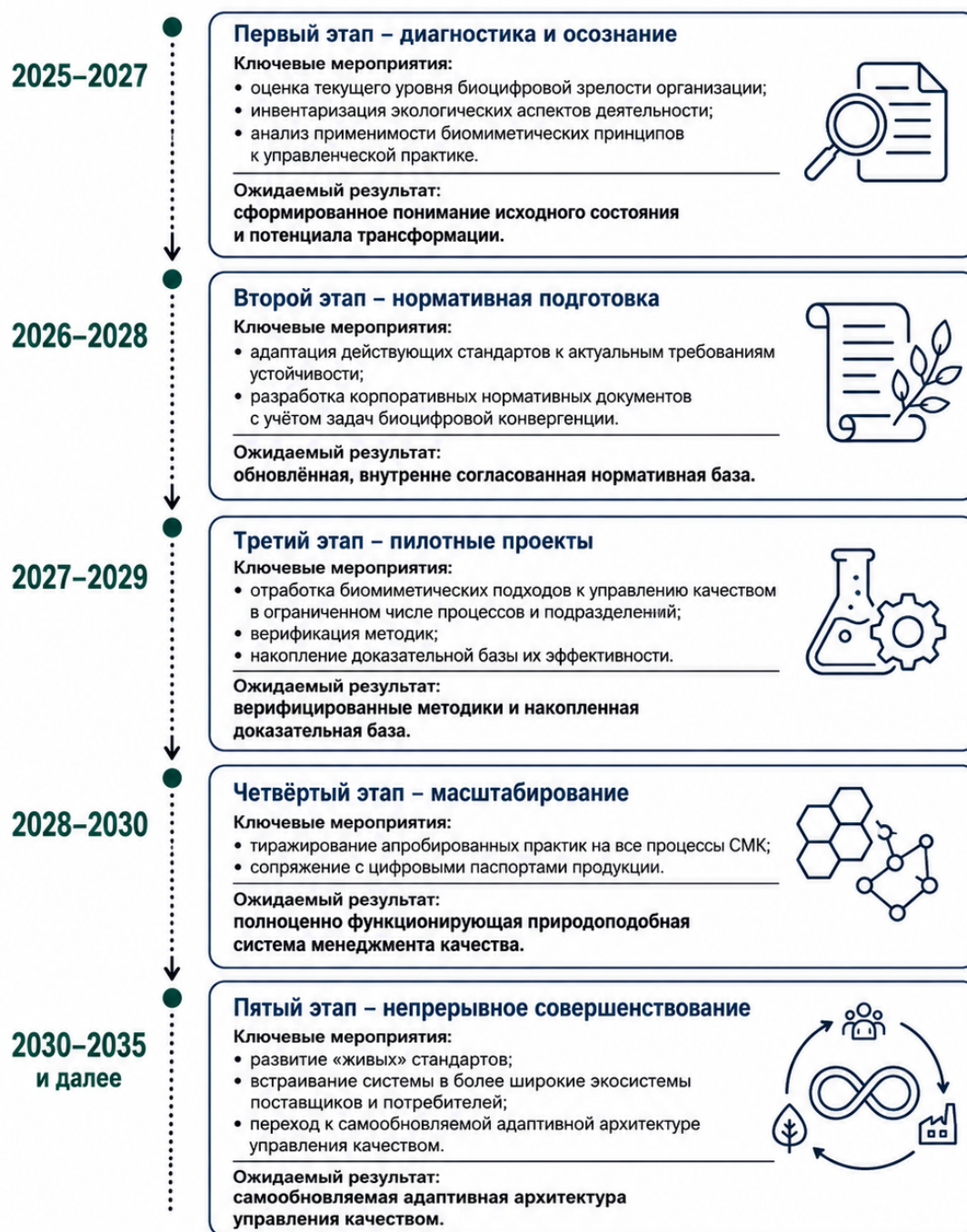
Научные исследования в области регенеративного управления качеством фиксируют постепенное сближение понятий «качество» и «жизнеспособность» [15]. По мере развития природоподобных экосистем совершенствование качества всё в большей мере отождествляется с улучшением способности системы к регенерации и длительному сохранению функциональности. Это обязывает разрабатывать интегральные показатели, одновременно охватывающие техническую, экологическую, социальную и регенеративную результативность.

Среди методов, пригодных для оценки природоподобных экосистем, следует выделить:

- многофакторный анализ на основе системной динамики;
- расширенную оценку жизненного цикла с включением экосистемных индикаторов;
- анализ сетевых взаимодействий;

– предиктивную аналитику, опирающуюся на непрерывные потоки данных мониторинга.

Трансформация СМК в направлении природоподобной архитектуры представляет собой многолетний процесс, требующий последовательного планирования. Предлагаемая дорожная карта структурирована по пяти этапам (рис. 2).



Источник: составлено авторами

Рис. 2. Дорожная карта перехода к природоподобной архитектуре

Анализируя сроки реализации мероприятий в рамках предложенной дорожной карты, можно сделать вывод о том, что трансформация СМК в направлении природоподобной архитектуры представляет собой многолетний процесс, требующий последовательного планирования.

Практическое воплощение биоцифровой трансформации СМК наблюдается в нескольких ключевых отраслях. В биопроизводстве (прежде всего в фармацевтике и биотехнологиях) действующие системы, интегрирующие стандарты ISO 9001 с требованиями GxP, обогащаются инструментами мониторинга биологических процессов и цифровыми двойниками биореакторов [16]. В экопромышленных парках выстраиваются замкнутые цепочки материальных потоков, где отходы одного производителя служат входным сырьём для другого, а контроль качества распространяется на всю систему в целом. В биоэнергетике стандарты качества вынуждены учитывать принципиальную биологическую вариабельность сырья и процессов. В агропромышленном секторе создаются цифровые двойники агроэкосистем, интегрирующие данные сенсоров, которые ведут мониторинг состояния почвы и посевов, а нормативные требования к качеству охватывают как продуктивность, так и экологическую устойчивость угодий [10].

Говоря о вызовах биоцифровой конвергенции можно выделить этические и регуляторные.

Этические вызовы сопряжены с четырьмя принципиальными вопросами. Кто несёт ответственность за решения, автономно принимаемые киберфизическими системами на основе смарт-стандартов? Как обеспечить конфиденциальность потенциально чувствительных данных о биологических процессах? Каким образом справедливо распределять выгоды и риски в конвергентных экосистемах? Наконец, как предотвратить долгосрочный ущерб биоразнообразию от интенсивного вмешательства в природные системы?

Регуляторные вызовы обусловлены тремя обстоятельствами. Во-первых, значительная часть практик биоцифровой конвергенции пока не охвачена ни

действующими стандартами, ни специальным законодательством. Во-вторых, юридический статус решений, принятых на основании смарт-стандартов автономными системами, остаётся в большинстве юрисдикций неопределённым. В-третьих, межотраслевой характер конвергенции требует согласованных действий регуляторных органов из принципиально разных сфер – промышленности, экологии, биоэтики, информационной безопасности.

На основе анализа текущих международных тенденций можно выделить три альтернативных сценария развития смарт-стандартизации в контексте природоподобных экосистем (табл. 2).

Таблица 2

Сценарии развития смарт-стандартизации в контексте природоподобных экосистем

Сценарий	Сроки	Условия реализации	Содержание
Эволюционный	2025–2035	Оцениваемый как наиболее вероятный, предполагает последовательное встраивание экологических показателей в действующие стандарты при сохранении их базовой архитектуры.	В этот период формируются отраслевые стандарты для конвергентных биотехнологий и складывается нормативная база для цифровых паспортов продукции в биоэкономике. ISO 9001 и смежные стандарты адаптируются к требованиям устойчивого развития; биомиметические принципы начинают проникать в управленческую практику, но не становятся доминирующей парадигмой.
Ускоренный	2025–2040	Реализуется при условии интенсивного технологического прорыва и согласованных международных усилий.	предполагает широкое внедрение самоадаптирующихся «живых» стандартов, повсеместное распространение DPP с интеграцией в смарт-стандарты и формирование глобальной нормативной экосистемы для биоцифровой конвергенции. К 2040 году «Качество 5.0» утверждается в качестве господствующей управленческой парадигмы.

Продолжение таблицы 2

Консервативный	2025–2050	Реализуется при сохранении существенных регуляторных и этических барьеров.	В этом случае стандартизация в области биоцифровой конвергенции развивается медленно, нормативная база остаётся фрагментированной по отраслевому признаку, биомиметические принципы находят лишь точечное применение, а «Качество 4.0» с отдельными элементами устойчивости сохраняет доминирующее положение вплоть до середины столетия.
----------------	-----------	--	---

Источник: составлено авторами

Вне зависимости от реализуемого сценария ключевыми движущими силами останутся:

- технологические инновации в области искусственного интеллекта и конвергентных биотехнологий;
- ужесточение экологического законодательства и ESG-требований;
- рост потребительского спроса на продукцию с подтверждённой экологической устойчивостью;
- международное нормативное сотрудничество в рамках ISO, IEC и национальных органов по стандартизации.

Заключение

Проведённое исследование позволяет сформулировать несколько ключевых выводов.

Прежде всего, биоцифровая конвергенция означает системный переход в логике управления качеством – от минимизации отклонений к управлению жизнеспособностью. Этот переход воплощается в концепции «Качество 5.0» и находит нормативное сопровождение в деятельности IEC/ISO JSyC BDC, принятии ISO 17298 и ревизии ISO 9001.

Кроме того, организационные принципы живых систем (самоорганизация, адаптивность, гомеостаз, регенерация, симбиоз) принципиально переносимы на архитектуру смарт-стандартов нового поколения. Стандарт ISO 18458 создаёт концептуальный фундамент для такого переноса, однако детальная методология применения биомиметических принципов к управленческим системам требует дальнейшей научной проработки.

Отметим также, что смарт-стандарты выполняют функцию инфраструктурного слоя природоподобных промышленных экосистем. Они сопрягают киберфизические и биологические компоненты, обеспечивают прослеживаемость и доверие в децентрализованных сетях, связывают производственные системы с цифровыми паспортами продукции в контексте биоэкономики и циркулярного хозяйства.

Проектирование смарт-стандартов для природоподобных экосистем должно опираться на четыре взаимосвязанных принципа «живой» стандартизации: самообновление, самоадаптацию, самообучение и самоорганизацию. При этом включение показателей экологической устойчивости и биоразнообразия в нормативные требования переходит из категории желательного в категорию обязательного.

И наконец, внедрение природоподобных экосистем сопряжено с комплексом этических, регуляторных и технологических вызовов, преодоление которых требует системного, межотраслевого подхода. Международные пилотные инициативы (bi0SpaCE, ISO/IEC SMART, ISO 17298) формируют доказательную базу и прецеденты для продвижения в этом направлении.

Приоритетными направлениями дальнейших исследований являются:

- разработка конкретных методик проектирования «живых» смарт-стандартов;
- построение отраслевых моделей природоподобных экосистем качества;
- экономическая оценка эффектов конвергентной трансформации интегрированных СМК;

– анализ социальных и этических последствий внедрения конвергентных биотехнологий в управленческую практику.

Список литературы

1. Quality 5.0: A product of Industry 5.0 building on Quality 4.0 technologies [Электронный ресурс]. – URL: <https://asq.org> (дата обращения: 01.09.2026).
2. SMART-стандарты как основа цифровой трансформации промышленности: глобальные тренды и национальные стратегии [Электронный ресурс] // Mail.kz. – 2025. – 13 авг. – URL: <https://mail.kz/ru/news/kz-news/smart-standarty-kak-osnova-cifrovoi-transformacii-promyshlennosti-globalnye-trendy-i-nacionalnye-strategii> (дата обращения: 15.08.2026).
3. Кваша, Н.В. Природоподобные технологии как основа формирования устойчивых промышленных экосистем / Н.В. Кваша, О.В. Волчик // Достижения науки и технологий (ДНиТ-V-2026): сборник научных статей по материалам V Всероссийской (национальной) научной конференции, Красноярск, 26–27 февраля 2026 года. – Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники, 2026. – С. 445–450. – EDN АННМФС.
4. Управление качеством через цифровые технологии: тренды и перспективы [Электронный ресурс] // Синаптик. – URL: <https://synaptik.ru/blog/kak-it-resheniya-uluchshayut-kachestvo-produkczii/upravlenie-kachestvom-cherez-cifrovye-tehnologii-trendy-i-perspektivy> (дата обращения: 01.03.2026).
5. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (дата обращения: 28.07.2026).
6. Digital product passport complete guide [Электронный ресурс] // Protokol. – 2026. – URL: <https://www.protokol.com/insights/digital-product-passport-complete-guide/> (дата обращения: 20.08.2026).

7. bi0SpaCE: Industry 4.0 Enhanced Digital Product Passports and Circular Economy Dataspaces for Sustainable Bio-Based Industries [Электронный ресурс] // CORDIS. – 2025. – URL: <https://cordis.europa.eu> (дата обращения: 20.08.2026).
8. Макаров, В.В. Подходы к формированию цифровых экосистем по управлению качеством на предприятиях / В.В. Макаров, О.В. Волчик, Н.М. Мироненко // Век качества. – 2026. – № 1. – С. 211–226. – EDN DCUNQP.
9. Макаров, В.В. К вопросу о проблемах развития информационной структуры смарт-стандартов / В.В. Макаров, О.В. Волчик // Проблемы современной экономики. – 2023. – № 2(86). – С. 245–248. – EDN VRMZSK.
10. Future Standards for Bio-Digital Convergence [Электронный ресурс] // UCL STEaPP. – 2025. – URL: <https://www.ucl.ac.uk/steapp> (дата обращения: 20.08.2026).
11. IEC and ISO plans for bio-digital convergence [Электронный ресурс] // eTech IEC. – 2025. – URL: <https://etech.iec.ch> (дата обращения: 20.08.2026).
12. Cornejo, J. Aerospace Bionic Robotics: BEAM-D Technical Standard of Biomimetic Engineering Design Methodology Applied to Mechatronics Systems [Электронный ресурс] / J. Cornejo, A. Weitzenfeld, J. Vaca, C. E. García Cena // PMC. – 2025. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov> (дата обращения: 20.08.2026).
13. ISO 17298:2025. Biodiversity – Considering biodiversity in the strategy and operations of organizations – Requirements and guidelines [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iso.org/standard/17298> (дата обращения: 20.08.2026).
14. Referentenentwurf Revision der ISO 9001 [Электронный ресурс] // FutureCamp. – 2025. – URL: <https://future-camp.de> (дата обращения: 20.08.2026).
15. Lilja, J. Exploring an Ecosystemic and Regenerative Approach to Quality Management: Towards New Theory and Practice for a Living World / J. Lilja, K. Snyder, R. Jørgensen, C. Hedlund // The 30th EurOMA International Annual Conference 2023. – Leuven, Belgium, 2023.

16. Merck, M. Business ethics and quality management systems: Integrating ISO 9001, GxP, and ISO 14001 [Электронный ресурс] / M. Merck // Sustainability Report, Merck Group. – 2023. – URL: <https://www.merckgroup.com/en/sustainability-report/2023/> (дата обращения: 20.08.2026).

Smart standards as an infrastructure layer of nature-like ecosystems: design principles and development vectors

Makarov Vladimir Vasilievich,
Doctor of Economics, Professor of the Chair of Data Economics,
Honored Scientist of the Russian Federation,
The Bonch-Bruевич St Petersburg State University of Telecommunications
193232, Russia, Saint Petersburg, 22 Bolshevikov Avenue, Building 1
akad.makarov@mail.ru

Volchik Olesia Vladimirovna,
Candidate of Economic Sciences (PhD),
docent at the Department of Data Economics,
The Bonch-Bruевич St Petersburg State University of Telecommunications
193232, Russia, Saint Petersburg, 22 Bolshevikov Avenue, Building 1
ovolchik.ov@sut.ru

The article is devoted to studying the role of smart standards in the formation of nature-like ecosystems against the backdrop of the growing convergence of biological and digital technologies. It is shown that next-generation standards are not just regulatory documents, but active infrastructure elements that ensure the interaction of the cyberphysical and biological components of such ecosystems. New functional characteristics of regulatory digital twins have been identified and systematized – predictive, regulatory, regenerative, and ecological. The potential of combining smart standards with digital product passports in relation to the tasks of the bioeconomy and circular economy has been studied. A methodology for «living» standardization has been developed, based on four interrelated principles: continuous self-renewal, contextual self-adaptation, cumulative self-learning, and decentralized self-organization. Industry examples and scenarios of the bi-digital transformation of quality management systems have been examined, and the associated ethical and regulatory risks have been analysed. A step-by-step roadmap for transitioning integrated quality management systems to a nature-like architecture has been proposed, and three predictive scenarios for the development of smart standardization over the horizon up to 2035 – 2050 have been described.

Keywords: smart standards, nature-like ecosystems, bio-digital convergence, regulatory digital twins, digital product passport, Quality 5.0, «living» standardization, biomimicry, sustainable development, integrated quality management systems