



Научная статья  
УДК 338.012  
doi: 10.55186/25876740\_2026\_69\_2\_185

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДОРОЖНАЯ КАРТА ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА: УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПОДХОД ОТ ПОЛЯ ДО СТРАНЫ

М.С. Петухова, О.В. Агафонова

Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологий,  
Новосибирск, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена разработке комплексной технологической дорожной карты (ТДК) цифровой трансформации сельского хозяйства России, предлагающей универсальный многоуровневый подход. Предметом исследования является процесс цифровой трансформации аграрного сектора на микро- (хозяйство), мезо- (регион) и макроуровне (страна). Цель работы — создать структурированный и адаптируемый инструмент стратегического планирования, синхронизирующий усилия всех стейкхолдеров. Методология построена на синтезе международного опыта (анализ ТДК Нидерландов, Германии, США, Китая) и отечественных разработок, прежде всего методологии foresight-исследований Форсайт-центра НИУ ВШЭ, с акцентом на активное участие экспертного сообщества. Научная новизна заключается в разработке оригинальной шестизападной модели трансформации (спецификация, информатизация, автоматизация/роботизация, оцифровка, цифровизация, цифровая экосистема), где для каждого этапа детально определены ключевые технологии, управленческие решения, система показателей, инструменты поддержки и оценка необходимых ресурсов для всех трех уровней. Результаты включают универсальный шаблон для выбора маршрута трансформации, проиллюстрированный кейсом конкретного хозяйства, и унифицированную матрицу, наглядно демонстрирующую взаимосвязь этапов и уровней. Основным выводом заключается в том, что успешная цифровая трансформация требует не просто внедрения технологий, а системных, синхронизированных изменений в управлении, регулировании и подготовке кадров на всех уровнях. Разработанная ТДК позиционируется как практический инструмент для руководителей агропредприятий и органов власти, направленный на минимизацию рисков, оптимизацию инвестиций и ускорение перехода отрасли к управлению на основе данных и цифровым экосистемам.

**Ключевые слова:** цифровая трансформация, сельское хозяйство, технологическая дорожная карта, микроуровень, мезоуровень, макроуровень, этапы цифровой трансформации

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-78-00028.

Original article

## TECHNOLOGICAL ROADMAP FOR THE DIGITAL TRANSFORMATION OF AGRICULTURE: A UNIVERSAL APPROACH FROM THE FIELD TO THE COUNTRY

M.S. Petukhova, O.V. Agafonova

Siberian State University of Engineering and Biotechnology, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** The article is devoted to the development of a comprehensive technology roadmap (TRM) for the digital transformation of Russian agriculture, proposing a universal multi-level approach. The research subject is the process of digital transformation of the agricultural sector at the micro- (farm), meso- (region), and macro-levels (country). The aim is to create a structured and adaptable strategic planning tool that synchronizes the efforts of all stakeholders. The methodology is based on a synthesis of international experience (analysis of TRMs from the Netherlands, Germany, the USA, and China) and domestic developments, primarily the foresight methodology of the HSE Foresight Centre, emphasizing the active participation of the expert community. The scientific novelty lies in the development of an original six-stage transformation model (specification, informatization, automation/robotization, digitization, digitalization, digital ecosystem), where each stage details key technologies, managerial decisions, a system of indicators, support tools, and an assessment of required resources for all three levels. The results include a universal template for choosing a transformation path, illustrated by a case study of a specific farm, and a unified matrix visually demonstrating the interconnection of stages and levels. The main conclusion is that successful digital transformation requires not just technology adoption, but systemic, synchronized changes in management, regulation, and workforce training at all levels. The developed TRM is positioned as a practical tool for agribusiness leaders and government authorities, aimed at minimizing risks, optimizing investments, and accelerating the industry's transition to data-driven management and digital ecosystems.

**Keywords:** digital transformation, agriculture, technology roadmap, micro-level, meso-level, macro-level, stages of digital transformation

**Acknowledgments:** the research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 24-78-00028.

**Введение.** Сельское хозяйство России стоит на пороге фундаментальных изменений. Цифровая трансформация стала императивом для обеспечения продовольственной безопасности, конкурентоспособности и устойчивого развития. Однако процесс сталкивается с системными вызовами: технологической неоднородностью регионов, высокими инвестиционными барьерами, дефицитом кадров и нормативно-правовыми ограничениями. В этих условиях необходим системный подход, обеспечивающий синхронизацию действий всех участников — от отдельного хозяйства до федеральных органов власти, реализация которого возможна с помощью технологической дорожной карты (ТДК).

Ее главная задача — синхронизировать процессы на микро- (отдельное хозяйство), мезо- (регион) и макроуровне (страна), создавая синергию между технологическими компаниями, аграриями и государством. Для руководителя хозяйства ТДК становится пошаговой инструкцией, позволяющей выбрать реалистичный и экономически обоснованный путь развития, минимизируя риски и грамотно планируя ресурсы. Для органов федеральной и региональной власти дорожная карта является инструментом стратегического планирования, позволяющим формировать адресные меры поддержки, устранять регуляторные препятствия и объективно оценивать прогресс в достижении национальных целей

продовольственной безопасности и технологического суверенитета.

Цель данного исследования — разработать универсальный шаблон технологической дорожной карты цифровой трансформации сельскохозяйственного производства России для различных уровней хозяйствования.

Стоит отметить, что в статье будет рассматриваться исключительно отрасль сельского хозяйства, а не в целом агропромышленный комплекс. Производство средств производства и машин, перерабатывающая и пищевая промышленности имеют ряд особенностей, отличающих процесс цифровой трансформации там от сельскохозяйственного производства.



**Методология исследования.**

1. Разработка предложенной универсальной технологической дорожной карты (ТДК) осуществлялась на основе комплексного методологического подхода, интегрирующего качественные и количественные методы форсайт-исследований.

2. Сравнительный анализ международных практик: были системно проанализированы ТДК Нидерландов (Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, 2022), Германии (Buchenrieder et al., 2021), США (The Mixing Bowl & SVG Ventures, 2020) и Китая (Zhao, Wang and Li, 2022) для выявления общих тенденций, национальных особенностей и переносимых в российский контекст решений.

**Результаты исследования и их обсуждение.**

*Генезис и развитие концепции технологических дорожных карт.*

Концепция технологических дорожных карт (Technology Roadmapping) зародилась в конце 1970-х годов в корпорации Motorola как инструмент стратегического планирования технологического развития. Первоначально она использовалась для координации инженерных и маркетинговых активностей, позволяя визуализировать взаимосвязь между рыночными потребностями, продуктами и технологиями. В 1980-1990-е годы метод получил распространение в таких компаниях, как Intel, Boeing и Philips, где доказал свою эффективность для управления инновациями и снижения рисков.

В 2000-е годы концепция вышла за пределы корпоративных структур и стала применяться на отраслевом и национальном уровнях. Пионером в этой области стали США, где Управление перспективных исследовательских проектов (DARPA) и Министерство энергетики начали разрабатывать отраслевые ТДК для координации усилий государства, бизнеса и науки.

С современной точки зрения, технологическая дорожная карта — это стратегический план, определяющий вектор развития технологий, продуктов или услуг на основе согласованного видения будущего. Она отвечает на три ключевых вопроса:

1. Куда мы движемся? (Целевое состояние).
2. Где мы находимся сейчас? (Текущее состояние).
3. Как нам добраться? (Пути и средства достижения).

ТДК интегрирует в себе несколько измерений:

- временное — определение этапов и сроков;
- технологическое — идентификация критических технологий;
- ресурсное — оценка необходимых инвестиций и компетенций;
- институциональное — управленческие и нормативные решения.

Важнейшим принципом построения ТДК является итеративность и адаптивность, позволяющая корректировать траекторию в условиях неопределенности.

В России одним из ведущих центров исследования и разработки технологических дорожных карт является Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), в частности, его ученые активно развивают методологию форсайт-исследований, тесно интегрированную с построением дорожных карт. Их работы подчеркивают, что эффективная ТДК для таких сложных социально-технических систем, как АПК, не может быть чисто технологической [1, 8]. Она должна учитывать:

- социальные и институциональные барьеры (нормативное регулирование, готовность к изменениям);

- системные комплементарности (взаимодополняемость технологий и инфраструктуры);
- сценарную обусловленность (различные траектории в зависимости от внешних условий).

Разработанный в НИУ ВШЭ подход предполагает активное участие стейкхолдеров в процессе создания ТДК через серии экспертных панелей и Делфи-опросов, что обеспечивает не только техническую, но и социальную обоснованность карты. Для агросектора они предлагают фокусироваться на построении «экосистемы цифровизации», где технологии, данные, кадры и регуляторика развиваются синхронно.

Международный опыт предлагает богатый материал для анализа. Одной из наиболее продвинутых является «Цифровая дорожная карта сельского хозяйства Нидерландов». Ее отличительная черта — акцент на создании открытых платформ и стандартов данных (например, проект «JoinData») для обеспечения интероперабельности между решениями разных вендоров [15].

Стратегия «Farming 4.0» в Германии делает ставку на поддержку малых и средних семейных хозяйств. Ее ключевой элемент — создание сети «цифровых испытательных полей», где фермеры могут тестировать технологии без крупных первоначальных инвестиций. Особое внимание уделяется кибербезопасности и защите данных [7].

Сельскохозяйственная технологическая дорожная карта США, разработанная при поддержке USDA, имеет ярко выраженный рыночный характер. Она нацелена на поддержку глобальной конкурентоспособности американских агрохолдингов через фокус на таких прорывных областях, как геномика, робототехника и прецизионное земледелие [18].

Китайская инициатива «Цифровая деревня» демонстрирует этатистский подход, где цифровизация АПК является частью общегосударственной программы. Акцент делается на создании централизованных платформ мониторинга и управления, масштабных инфраструктурных проектах (5G в сельской местности) и импортозамещении критических технологий [21].

Анализ показывает, что не существует международной универсальной модели технологических дорожных карт. Успешные ТДК глубоко контекстуальны и отражают специфику национальной аграрной системы, институтов и приоритетов [5, 10, 11]. Однако изучение мирового и российского опыта позволяет разработать универсальный для российского агропромышленного комплекса шаблон ТДК цифровой трансформации.

**Этапы цифровой трансформации сельского хозяйства в ТДК.**

Технологическая дорожная карта цифровой трансформации сельского хозяйства строится на основе последовательного прохождения шести этапов. Каждый этап характеризуется глубокой взаимосвязью пяти фундаментальных элементов: внедряемых технологий, необходимых управленческих решений, системы показателей для оценки эффективности, доступных инструментов поддержки и объема требуемых ресурсов. Важно понимать, что эти этапы не являются жесткими и изолированными. Крупное и технологически подготовленное хозяйство может стартовать сразу со второго или третьего этапа, в то время как небольшое фермерское предприятие будет проходить первый этап более продолжительное время.

На основе проведенных ранее исследований [2] нами разработана шестиступенчатая модель технологической дорожной карты. Каждый этап детализирован для микро-, мезо- и макроуровня по следующим элементам: цель, ключевые технологии, управленческие решения, система показателей, инструменты поддержки и необходимые ресурсы (финансовые, интеллектуальные, технические, инфраструктурные).

**Этап 1. Спецификация.**

Цель: осознание необходимости изменений, оценка текущего состояния и формирование стратегического видения цифровой трансформации.

Микроуровень (хозяйство): проведение IT-аудита, оценка технологической готовности, определение стратегических целей (рост урожайности, снижение издержек). Формирование рабочей группы.

Мезоуровень (регион): проведение мониторинга уровня цифровизации сельхозпредприятий региона, выявление «точек роста» и проблемных зон. Разработка региональной программы поддержки цифровизации.

Макроуровень (страна): формирование национальной стратегии цифровой трансформации АПК, определение приоритетных технологических направлений и ключевых показателей эффективности (KPI) для отрасли.

Ключевые технологии: системы управления, методики стратегического анализа и аудита.

Управленческие решения: оценка текущих процессов и технологий; определение стратегии; выбор технологий и инструментов; разработка плана управления изменениями; формирование команды; определение потребностей в обучении.

Показатели: индекс цифровой готовности хозяйства/региона; доля хозяйств, разработавших стратегию цифровизации.

Ресурсы: экспертные компетенции (консультанты), время на проведение аудита и стратегических сессий.

Первый этап, спецификация, является фундаментальным и определяющим для всего последующего процесса цифровой трансформации. Его основная цель — осознание необходимости изменений, всесторонняя оценка текущего состояния хозяйствующего субъекта (будь то отдельное предприятие, регион или страна в целом) и формирование четкого стратегического видения будущего. На микроуровне, уровне отдельного хозяйства, это подразумевает проведение комплексного IT-аудита, в ходе которого оценивается существующая технологическая инфраструктура, программное обеспечение, уровень цифровых компетенций сотрудников и готовность бизнес-процессов к изменениям. По итогам аудита определяются стратегические цели цифровизации, такие как повышение урожайности на определенном процент, снижение издержек на ГСМ и удобрения или увеличение продуктивности в животноводстве. Ключевым управленческим решением на этом этапе является формирование рабочей группы или назначение ответственного за цифровую трансформацию, который будет курировать весь процесс.

На мезоуровне, уровне региона, задача заключается в проведении масштабного мониторинга и диагностики уровня цифровизации всех сельхозпредприятий. Это позволяет выявить «точки роста» — передовые хозяйства, которые могут стать центрами компетенций, и проблемные зоны, требующие особой поддержки.



Результатом этой работы становится разработка региональной программы поддержки цифровизации, которая должна быть согласована с отраслевыми союзами и ассоциациями.

На макроуровне, национальном, этап спецификации воплощается в формировании национальной стратегии цифровой трансформации АПК. Федеральные органы власти, при участии экспертного и научного сообщества, определяют приоритетные технологические направления (например, роботизация, точное земледелие, большие данные), разрабатывают систему ключевых показателей эффективности для отрасли и создают рабочие группы для реализации стратегии.

Ключевым показателем данного этапа выступает индекс цифровой готовности (ИЦГ), который выполняет роль «диагностического инструмента» для объективной оценки текущего состояния предприятия, региона или страны перед началом цифровой трансформации.

Расчет ИЦГ проводится по методу взвешенного индекса. Для каждого критерия ( $K_n$ ) выставляется балл ( $B_n$ ) (например, от 0 до 5, где 0 — полное отсутствие, 5 — передовой уровень), который затем умножается на вес критерия и суммируется:

$$\text{ИЦГ} = \frac{(K_1 \times B_1 + K_2 \times B_2 + \dots + K_n \times B_n) \times 100}{\text{Максимально возможный балл}}$$

где:  $K_1...K_n$  — балл по каждому критерию;  
 $B_1...B_n$  — вес каждого критерия (сумма всех весов = 1).

Максимальный балл — 5.

К критериям для оценки на этапе спецификации отнесем:

1. Технологическая инфраструктура — наличие компьютеров, серверов, локальной сети. Скорость и стабильность интернета. Наличие датчиков, GPS на технике — вес 0,20.
2. Программное обеспечение и данные — использование ERP-систем (1С), электронного документооборота. Наличие оцифрованных карт полей, истории севооборотов. Ведутся ли данные в цифровом виде — вес 0,15.
3. Кадровый потенциал — наличие IT-специалиста или аутсорсинга. Цифровая грамотность руководителя и сотрудников (умение работать с данными, приложениями). Готовность к изменениям — вес 0,25.
4. Управление и процессы — наличие цифровой стратегии или плана. Понимание KPI (что хотим улучшить: урожайность, затраты и т.д.). Процессы принятия решений (на основе данных или «по опыту») — вес 0,20.
5. Финансовые ресурсы — выделен ли бюджет на цифровизацию. Понимание стоимости владения решениями. Доступ к грантам и субсидиям на эти цели — вес 0,20.

Результаты расчета интерпретируются следующим образом:

0-20%: низкая готовность — требуется масштабная работа по всем направлениям, начинать необходимо с базовой информатизации и обучения сотрудников.

21-50%: средняя готовность — есть базис для старта, но ключевые проблемы — в кадрах и недостатке инфраструктуры. Необходимо разработать детальный план и оценить необходимый объем инвестиций.

51-75%: высокая готовность — хозяйство готово к внедрению продвинутых решений (точное земледелие, IoT). Нужно сфокусироваться на интеграции систем и работе с данными.

76-100%: передовой уровень — хозяйство готово к переходу на этап цифровой экосистемы, экспериментирует с AI и предиктивной аналитикой.

Для мезо- и макроуровня методика аналогична, но критерии меняются:

Мезоуровень: процент хозяйств, имеющих интернет, доля площадей, охваченных точным земледелием, наличие региональных центров компетенций, программы поддержки.

Макроуровень: качество нормативной базы (законы о БПЛА, данные), развитие национальной IT-инфраструктуры в селах, государственные программы софинансирования, количество выпускников по агроцифровым специальностям.

Таким образом, расчет индекса цифровой готовности на этапе «спецификация» — это первый и обязательный шаг, который позволяет избежать ошибок, выбрать реалистичный «маршрут» трансформации и обосновать необходимые инвестиции.

### Этап 2. Информатизация.

Цель: создание базовой цифровой инфраструктуры и систем управления данными.

Микроуровень: внедрение бухгалтерских и учетных систем (1С), систем электронного документооборота, создание локальных сетей.

Мезоуровень: развитие телекоммуникационной инфраструктуры в сельской местности (подключение к интернету), создание региональных центров компетенций для консультационной поддержки.

Макроуровень: реализация национальных программ по ликвидации цифрового неравенства, разработка и внедрение отраслевых стандартов данных.

Ключевые технологии: информационные системы; системы электронного документооборота; системы защиты информации.

Управленческие решения: разработка подходов к сбору, хранению и анализу данных; принятие мер по обеспечению безопасности данных и систем; обучение и развитие кадров.

Показатели: уровень использования электронного документооборота, доля рабочих мест, оборудованных компьютерами/ноутбуками и подключенных к локальной сети предприятия, доля хозяйств, использующих учетные системы; уровень проникновения широкополосного интернета в сельской местности.

Ресурсы: инвестиции в программное обеспечение и оборудование, IT-специалисты.

Второй этап, информатизация, направлен на создание базовой цифровой инфраструктуры, без которой невозможно дальнейшее развитие. Например, на региональном уровне фокус смещается на развитие телекоммуникационной инфраструктуры в сельской местности. Многие сельскохозяйственные организации находятся в зонах с плохим покрытием интернета, что является критическим барьером для цифровизации. Поэтому ключевой задачей властей становится обеспечение высокоскоростным и стабильным интернет-подключением удаленных районов. Параллельно создаются региональные центры компетенций или «цифровые кластеры», где фермеры могут получить консультационную и техническую поддержку.

На макроуровне государство реализует национальные программы, направленные на устранение цифрового неравенства, и разрабатывает единые отраслевые стандарты данных. Управленческие решения на этом этапе связаны с разработкой политик безопасности данных,

обучением персонала работе с новыми системами и планированием инвестиций в ПО и оборудование. Ключевыми показателями эффективности служат доля хозяйств, использующих учетные системы, и уровень проникновения широкополосного интернета в сельской местности.

### Этап 3. Автоматизация/роботизация.

Цель: повышение эффективности за счет автоматизации рутинных операций и механизации труда.

Микроуровень: внедрение систем параллельного вождения, датчиков уровня топлива и урожайности, автоматизация раздачи кормов на животноводческих комплексах.

Мезоуровень: создание сервисных центров по прокату и обслуживанию роботизированной техники, поддержка кооперации мелких хозяйств для совместного использования дорогостоящего оборудования.

Макроуровень: стимулирование отечественного производства элементов роботизированной техники и сенсоров, актуализация образовательных стандартов для подготовки операторов и сервисных инженеров.

Ключевые технологии: системы параллельного вождения; датчики и сенсоры; роботизированные системы; автоматизированные системы управления производственными процессами.

Управленческие решения: автоматизация производственных процессов; внедрение систем мониторинга и управления; оптимизация использования ресурсов; повышение производительности труда.

Показатели: уровень автоматизации производственных процессов; производительность труда; экономия ресурсов (топливо, удобрения).

Ресурсы: капитальные вложения в технику и оборудование, инженерные компетенции.

Цель третьего этапа — повышение операционной эффективности за счет автоматизации рутинных и трудоемких операций, а также механизации труда. На мезоуровне остро встает вопрос доступности высокотехнологичной роботизированной техники для малых и средних хозяйств, которые не могут позволить себе крупные капиталовложения. Решением становится создание сервисных центров по прокату и обслуживанию такой техники, а также поддержка кооперации — несколько хозяйств могут совместно приобретать и использовать дорогостоящее оборудование (например, беспилотные опрыскиватели или умные комбайны). На макроуровне государство стимулирует отечественное производство элементов роботизированной техники, сенсоров и систем управления, чтобы снизить зависимость от импорта и обеспечить технологический суверенитет.

Результативность этапа измеряется уровнем автоматизации процессов, ростом производительности и конкретной экономией ресурсов (топлива, удобрений, кормов).

### Этап 4. Оцифровка.

Цель: массовый сбор и оцифровка данных обо всех аспектах производственного процесса для последующего анализа.

Микроуровень: активное использование датчиков IoT (влажность почвы, состояние животных, микроклимат), БПЛА для мультиспектральной съемки, GPS-трекеров.

Мезоуровень: создание региональных платформ для агрегации анонимизированных данных (например, данные о состоянии почв, фитосанитарной обстановке), что позволяет формировать ценную аналитику для всех участников.





Макроуровень: разработка и внедрение межотраслевых протоколов обмена данными (онтологий), обеспечение кибербезопасности, регулирование вопросов права собственности на агроданные.

Ключевые технологии: интернет вещей (IoT); беспилотные летательные аппараты (БПЛА); геоинформационные системы (ГИС); технологии больших данных.

Управленческие решения: создание систем сбора и хранения данных; разработка политик управления данными; обеспечение качества данных; интеграция данных из различных источников.

Показатели: объем собираемых данных; количество подключенных сенсоров на гектар/голову скота.

Ресурсы: сенсоры, БПЛА, системы хранения и обработки данных, аналитики.

Четвертый этап, оцифровка, является логическим продолжением автоматизации и фокусируется на массовом сборе и преобразовании в цифровой формат данных обо всех аспектах производственного процесса. Цель — накопление достаточного объема качественных данных для их последующего глубокого анализа и использования в прогностических моделях.

На мезоуровне данные, собираемые отдельными хозяйствами, приобретают новую ценность при их агрегации и анонимизированном анализе. Объединенные данные с множества полей позволяют строить гораздо более точные и ценные аналитические модели, полезные для всех фермеров в регионе. Например, можно прогнозировать вспышки заболеваний или давать рекомендации по оптимальным срокам сева для разных культур.

На макроуровне главными задачами становятся разработка и внедрение единых межотраслевых протоколов и онтологий для обмена данными. Это необходимо, чтобы системы разных производителей и в разных регионах могли «понимать» друг друга. Одновременно регулируются сложные вопросы права собственности на агроданные и обеспечивается кибербезопасность всего data-ландшафта отрасли.

Показатели для этапа «оцифровка» на мезо- и макроуровне фокусируются на измерении не просто объема собранных данных, а их качества, доступности, стандартизации и полезности для всей экосистемы АПК. На этом этапе ключевая задача властей — превратить разрозненные данные отдельных хозяйств в ценный общепромышленный актив. К ключевым показателям можно отнести количество/доля хозяйств, подключенных к региональной платформе обмена данными, доля агроданных, хранящихся и обрабатываемых на отечественных платформах/в дата-центрах и др.

#### **Этап 5. Цифровизация.**

Цель: преобразование бизнес-моделей и процессов на основе анализа больших данных и прогностических моделей.

Макроуровень: внедрение систем поддержки принятия решений (DSS) для расчета норм внесения удобрений, прогнозирования урожайности, управления селекционно-племенной работой. Переход к прецизионному (точному) земледелию и животноводству.

Мезоуровень: развитие региональных сервисов на основе данных (прогнозы погоды, рекомендации по севооборотам, мониторинг распространения болезней и вредителей), создание цифровых кооперативов.

Макроуровень: запуск федеральной отраслевой цифровой платформы как единой точки входа для фермеров, интеграция с государственными информационными системами (ФГИС «Меркурий»).

Ключевые технологии: большие данные и аналитика; искусственный интеллект и машинное обучение; системы поддержки принятия решений (DSS); предиктивная аналитика.

Управленческие решения: внедрение систем предиктивной аналитики; оптимизация бизнес-процессов на основе данных; разработка новых продуктов и услуг; создание экосистемы данных.

Показатели: доля управленческих решений, принимаемых на основе данных; экономический эффект от внедрения DSS.

Ресурсы: мощные вычислительные ресурсы, дата-аналитики, алгоритмы ИИ.

Пятый этап, цифровизация, представляет собой качественный переход от простого сбора данных к их глубокому анализу и использованию для преобразования бизнес-моделей и процессов, переход к управлению, основанному на данных. Цель — интегрировать разрозненные данные и системы в единую платформу и начать использовать прогностические модели для автоматизации принятия решений. На микроуровне хозяйство внедряет сложные системы поддержки принятия решений. Эти системы на основе анализа больших данных и алгоритмов искусственного интеллекта рассчитывают оптимальные нормы внесения удобрений и средств защиты растений для каждого участка поля (дифференцированное внесение), прогнозируют урожайность, управляют селекционно-племенной работой в животноводстве.

На мезоуровне развиваются региональные сервисы на основе данных: платформы с точными прогнозами погоды для конкретных полей, рекомендации по севооборотам с учетом состояния почв и рыночной конъюнктуры, системы мониторинга и оповещения о распространении болезней и вредителей. Это стимулирует создание «цифровых кооперативов» — добровольных объединений фермеров для совместного использования дорогостоящих цифровых сервисов и аналитики.

На макроуровне ключевым результатом становится запуск федеральной отраслевой платформы, которая выступает единой точкой входа для фермеров и интегрируется с государственными информационными системами (такими как ФГИС «Меркурий» для ветеринарии).

Инструменты господдержки эволюционируют от субсидий на технику к грантам на внедрение сложного ПО и создание безопасных площадок для обмена анонимизированными данными (дата-маркетплейсов). Требуемые ресурсы резко возрастают: нужны мощные вычислительные мощности, дорогостоящие алгоритмы ИИ и высококвалифицированные кадры — дата-аналитики и IT-специалисты.

#### **Этап 6. Цифровая экосистема.**

Цель: формирование открытой, межкоммуникационной среды, где данные, сервисы и участники свободно взаимодействуют, создавая новую ценность.

Макроуровень: хозяйство становится узлом в экосистеме: автоматически обменивается данными с поставщиками, банками, страховыми компаниями, потребителями (например, через блокчейн для прослеживаемости).

Мезоуровень: регион становится платформой для взаимодействия всех участников АПК,

обеспечивая сквозную цифровизацию цепочек создания стоимости от поля до прилавка.

Макроуровень: интеграция национальной агроплатформы с международными системами, формирование цифровых экспортных коридоров, достижение полной технологической автономии в ключевых направлениях.

Ключевые технологии: блокчейн; облачные вычисления; цифровые платформы; открытые API.

Управленческие решения: создание и участие в цифровых платформах; разработка стратегий взаимодействия в экосистеме; управление цифровыми активами; обеспечение интероперабельности систем.

Показатели: количество подключенных к экосистеме хозяйств; доля продукции с полной цифровой прослеживаемостью, «цифровая рентабельность».

Ресурсы: партнерские сети, открытые стандарты, кросс-отраслевые компетенции.

Шестой и заключительный этап — формирование целостной цифровой экосистемы АПК. Это конечная цель трансформации, где происходит переход к автономным, самоуправляемым хозяйствам с предиктивным управлением и полностью интегрированными цепями создания стоимости. На микроуровне хозяйство окончательно трансформируется, становясь узлом в единой цифровой сети. Внедряются прорывные технологии: полностью автономная техника, управляемая ИИ; интернет вещей (IoT), где каждый объект (растение, животное, агрегат) является источником данных в реальном времени; блокчейн для обеспечения стопроцентной прослеживаемости продукции от поля до прилавка, что становится мощным маркетинговым инструментом и гарантией качества для потребителя.

Меняются сами бизнес-модели: хозяйство может продавать не просто сырье, а, например, гарантированные качественные характеристики продукции, подтвержденные данными, или даже сами агрегированные и анонимизированные данные о состоянии почв и урожаях.

На мезоуровне регион становится полноценной платформой для взаимодействия всех участников АПК: производителей, переработчиков, логистов, ритейлеров, банков и страховых компаний. Обеспечивается сквозная цифровизация цепочек поставок, что радикально повышает их эффективность, прозрачность и снижает потери.

На макроуровне задача государства — создать правовое и технологическое поле для существования такой глобальной экосистемы. Управленческие усилия направлены на интеграцию национальной платформы с глобальными системами и активное участие в формировании международных стандартов «умного» сельского хозяйства. Инструменты поддержки принимают форму прямого финансирования прорывных НИОКР и создания венчурных фондов для инвестиций в агротех-стартапы. Ресурсы носят стратегический характер и определяют будущее технологического суверенитета страны в сфере продовольствия.

#### *Универсальный шаблон для выбора маршрута цифровой трансформации.*

Предложенная шестизатпапная модель не является строго линейной. Хозяйства и регионы могут находиться на разных этапах одновременно в разных сегментах своей деятельности. Для выбора индивидуального маршрута



предлагается универсальный шаблон, основанный на оценке двух ключевых параметров:

1. Уровень технологической зрелости (от низкого к высокому).
2. Готовность к организационным изменениям (от низкой к высокой).

Данный шаблон позволяет диагностировать текущее состояние и выбрать реалистичный «маршрут» движения, определяя приоритетные задачи на каждом этапе (рис. 1).

Движение по дорожной карте для микроуровня представляет собой поэтапный путь отдельного хозяйства от осознания необходимости изменений через построение базовой ИТ-инфраструктуры и автоматизацию процессов к тотальному сбору данных, их анализу для принятия управленческих решений и, наконец, интеграции в цифровую экосистему для создания максимальной добавленной стоимости. Для мезоуровня траектория заключается в трансформации из пассивного наблюдателя в активного организатора и платформообразующего интегратора: от мониторинга и создания программ поддержки через развитие инфраструктуры и сервисных центров к агрегации данных и созданию региональных аналитических

сервисов, участвующих в формировании сквозных цифровых цепочек создания стоимости. Макроуровень эволюционирует от разработки общей национальной стратегии через устранение цифрового неравенства и создание регуляторных стимулов к формированию единого правового и технологического пространства для безопасного обмена данными, запуску федеральной цифровой платформы и, в конечном итоге, обеспечению технологического суверенитета и интеграции в глобальные пищевые цепочки. Схема наглядно иллюстрирует, что успех трансформации на любом уровне невозможен без прогресса на других, требуя постоянной синхронизации и координации усилий. Реализация полного цикла цифровой трансформации от этапа спецификации до формирования цифровой экосистемы является длительным процессом, требующим последовательных инвестиций и институциональных изменений.

На основе проведенных исследований можно предположить следующие временные рамки для достижения целевого состояния (Этап 6) различными типами хозяйств. Передовые интегрированные агрохолдинги, уже находящиеся на этапах автоматизации и оцифровки

(Этапы 3-4), потенциально могут достичь уровня зрелой цифровой экосистемы в горизонте 5-7 лет. Хозяйства со средним уровнем готовности (ИЦГ в диапазоне 21-50%), составляющие значительную долю российского АПК, нуждаются в периоде 7-10 лет для прохождения всего пути трансформации. Для хозяйств с низким уровнем готовности (ИЦГ <20%) данный период может превысить 10-15 лет и потребует активной внешней поддержки как со стороны регионов, так и федерального центра. Достижение синергетического эффекта на мезо- и макроуровне, характеризующееся появлением устойчивых сквозных цифровых цепочек создания стоимости и полноценной национальной агроэкосистемы, оценивается экспертами как достижимое к 2035-2040 гг.

**Заключение.** Проведенное исследование подтвердило актуальность и необходимость разработки комплексного инструмента стратегического планирования для цифровой трансформации российского агросектора. Предложенная универсальная шестиэтапная технологическая дорожная карта позволяет систематизировать и синхронизировать процессы цифровизации на микро-, мезо- и макроуровне, обеспечивая их согласованность и синергетический эффект.

Ключевым выводом работы является положение о том, что цифровая трансформация в сельском хозяйстве — это не просто последовательное внедрение технологических новинок, а глубокий системный процесс, требующий параллельных изменений в управлении, регулировании, подготовке кадров и развитии инфраструктуры. Разработанная модель подчеркивает итеративность и вариативность пути цифровизации: каждое хозяйство и регион могут выбрать индивидуальную траекторию в зависимости от исходного уровня готовности и стратегических приоритетов, используя предложенный диагностический инструмент в виде индекса цифровой готовности.

Важнейшая практическая значимость исследования заключается в создании структурированного и адаптируемого шаблона, который может быть использован:

- руководителями агропредприятий — в качестве пошагового руководства для минимизации рисков и оптимизации инвестиций в цифровые технологии;
- региональными органами управления АПК — для формирования адресных программ поддержки, развития инфраструктуры и стимулирования кооперации;
- федеральными ведомствами — в качестве основы для формирования скоординированной отраслевой политики, устранения нормативных барьеров и объективной оценки прогресса в достижении национальных целей.

Перспективы дальнейших исследований видятся в детализации предложенной модели применительно к отдельным подотраслям растениеводства и животноводства, а также в разработке методических рекомендаций по оценке экономической эффективности цифровой трансформации на основе показателя «цифровой рентабельности».

**Список источников**

1. Абдрахманова, Г.И., Вишневецкий, К.О., Гохберг, Л.М. и др. (2022). Цифровая трансформация: ожидания и реальность: доклад к XXIII Ясинской (Апрельской) международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества. Москва: Издательский дом Высшей школы экономики.

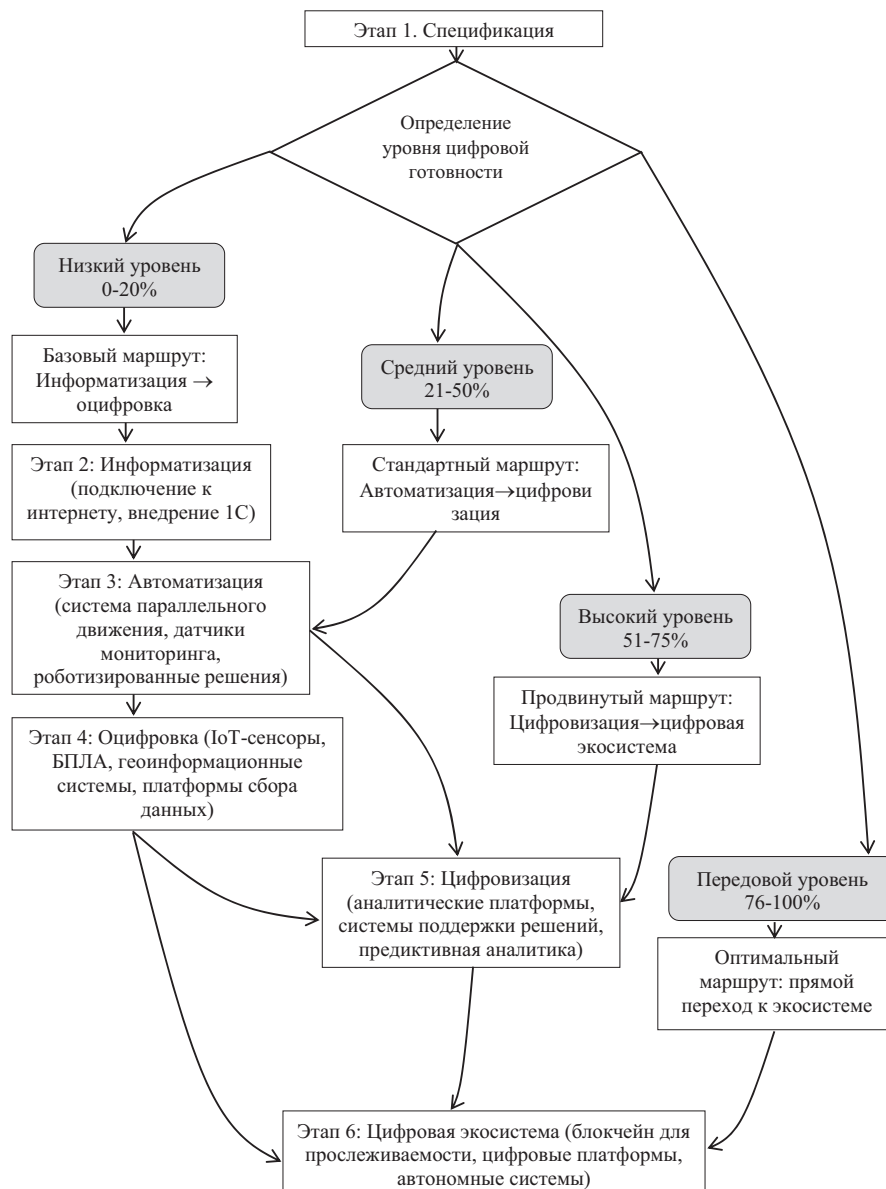


Рисунок 1. Схема маршрута цифровой трансформации в сельском хозяйстве  
Figure 1. A roadmap for digital transformation in agriculture





2. Агафонова, О.В. (2023). Оценка уровня цифровой трансформации сельского хозяйства России в контексте поэтапного перехода // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий, 12(3), с. 61-66.

3. Петухова М.С., Агафонова О.В. (2023). Теоретико-методологический фундамент цифровой трансформации сельского хозяйства России: базовые понятия и этапы // Аграрный вестник Урала, 23(4), с. 79-89.

4. Соколов А.В. (2007). Форсайт: взгляд в будущее // Форсайт, 1(1), с. 8-15.

5. AgriFoodTure (2021). Roadmap for sustainable transformation of the Danish Agri-Food system.

6. Bereznoy, A. (2020). Corporate Foresight in the Era of Digital Transformation, in Chugunov, A., Khodachek, I., Misnikov, Y. and Trutnev, D. (eds.) *Digital Transformation and Global Society*. Cham: Springer, pp. 3-15.

7. Buchenrieder, G., Dufner, S., Grundmann, P. et al. (2021). Farming 4.0: Concepts, Technology, and Perspectives for the German Agricultural Sector, *German Journal of Agricultural Economics*, 70(1), pp. 1-19.

8. Contreras-Medina, D.I., Pardo, M.A., Guevara-Hernández, F., Bravo-Villa, G., Sánchez-Gutiérrez, R.A. and Rodríguez-Larramendi, L.A. (2020). Roadmapping as a Driver for Knowledge Creation: A Proposal for Improving Sustainable Practices in the Coffee Supply Chain from Chiapas, Mexico, Using Emerging Technologies // *Sustainability*, 12(14), 5817. DOI: 10.3390/su12145817.

9. Daribekova, N., et al. (2023). Roadmap for the Transition from Digital Agriculture to Agriculture 4.0 Based on Deep Learning in the Economy of the Future by 2030, in *Food Security in the Economy of the Future*. pp. 123-130.

10. Experiment Station Committee on Organization and Policy (ESCOMP) Science and Technology Committee (2019). *A Science Roadmap for Food & Agriculture*.

11. Farsani, E.D., Choobchian, S. and Naghani, M.S. (2024). Unlocking Agricultural Innovation: A Roadmap for Growth and Sustainability // *Environmental Research*, 15, pp. 17751-17771.

12. França, R.P., Ziviani, F. and Fernandes De Muylde, C. (2020). Agricultural digitalisation and digital transformation: the future of agricultural competitive excellence in the 4.0 Environment // *Brazilian Journal of Development*, 6(2), pp. 7240-7260.

13. Guilherme, R. and Braghini, J. (2025). Construction of a Roadmap of the Technological Development Barrier and Adaptation of Agricultural Machinery in the Production Chain of Biomass Briquettes and Pellets from Agricultural Waste. [Preprint]. [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5084101](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5084101) (accessed 16.09.2025)

14. Kosasih, A. and Sulaiman, E. (2024). Digital transformation in rural settings: Unlocking opportunities for sustainable economic growth and community empowerment // *Journal of Sustainable Tourism and Entrepreneurship*, 5(2), pp. 129-143.

15. Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality (2022). *Digital Agriculture Roadmap Netherlands*. Доступно по: <http://www.agroconnect.nl>, accessed 15.05.2025.

16. Phaal, R., Farrukh, C.J.P. and Probert, D.R. (2004). Technology roadmapping — A planning framework for evolution and revolution // *Technological Forecasting and Social Change*, 71(1-2), pp. 5-26. DOI: 10.1016/S0040-1625(03)00072-6.

17. Probert, D. and Radnor, M. (2003). Technology roadmapping: frontier experiences from industry-academia consortia // *Research-Technology Management*, 46(2), pp. 44-48.

18. Queensland Government (2023) *Queensland Ag-Tech Roadmap 2023-2028*. Доступно по: <http://daf.qld.gov.au/AgTech>, accessed 12.09.2025.

19. Steiber, A., Alänge, S., Ghosh, S. and Goncalves, D. (2021). Digital transformation of industrial firms: An innovation diffusion perspective // *European Journal of Innovation Management*, 24(3), pp. 799-819.

20. The Mixing Bowl & SVG Ventures (2020). *U.S. Agriculture Technology Roadmap*. Доступно по: <https://www.usagtechroadmap.com>, accessed 15.07.2025.

21. Wei Zhao, W., Chen, H. and Bulis, A. (2025). How are Industry 4.0 technologies transforming a sustainable society across industries? *Digital Transformation and Society*. Emerald Publishing Limited. [http://www.researchgate.net/publication/392326568\\_How\\_are\\_Industry\\_4\\_0\\_technologies\\_transforming\\_a\\_sustainable\\_society\\_across\\_industries](http://www.researchgate.net/publication/392326568_How_are_Industry_4_0_technologies_transforming_a_sustainable_society_across_industries), accessed 01.09.2025.

22. World Bank (2025). *Digital Agriculture Roadmap (DAR) Playbook*. Доступно по: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/099053025063021993/pdf/P508004-f943a09b-c45f-4c93-b554-9dd1dec1e7c.pdf>, accessed 13.09.2025.

23. Zhao, J., Wang, J. and Li, Z. (2022). The Digital Village: A Comprehensive Analysis of China's Digital Agriculture Policy and Practice // *China Agricultural Economic Review*, 14(1), pp. 20-35. DOI: 10.1108/CAER-01-2021-0014.

## References

1. Abdrakhmanova, G. I., Vishnevskii, K. O. & Gokhberg, L. M. (2022). *Tsifrovaya transformatsiya: ozhidaniya i realnost': doklad k XXIII Yasinskoi (Aprel'skoi) mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva [Digital Transformation: Expectations and Reality: Report to the XXIII Yasinskaya (April) International Scientific Conference on Problems of Economic and Social Development]*, Moscow, HSE.

2. Агафонова, О. В. (2023). Otsenka urovnya tsifrovoy transformatsii sel'skogo khozyaistva Rossii v kontekste poehtapnogo perekhoda [Assessment of the Level of Digital Transformation of Russian Agriculture in the Context of Phased Transition]. *Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologii*, vol. 12, no. 3, pp. 61-66.

3. Petukhova, M. S. & Agafonova, O. V. (2023). *Teoretiko-metodologicheskii fundament tsifrovoy transformatsii sel'skogo khozyaistva Rossii: bazovyye ponyatiya i etapy* [Theoretical and Methodological Foundation of Digital Transformation of Russian Agriculture: Basic Concepts and Stages]. *Agrarnyi vestnik Urala*, vol. 23, no. 4, pp. 79-89.

4. Sokolov, A. V. (2007). *Forsait: vzglyad v budushchee [Foresight: A Look into the Future]*. *Forsait*, vol. 1, no. 1, pp. 8-15.

5. AgriFoodTure (2021). *Roadmap for Sustainable Transformation of the Danish Agri-Food System*.

6. Bereznoy, A. (2020). Corporate Foresight in the Era of Digital Transformation. In: Chugunov, A., Khodachek, I., Misnikov, Y. & Trutnev, D. (eds.) *Digital Transformation and Global Society*, Cham, Springer, pp. 3-15.

7. Buchenrieder, G., Dufner, S., Grundmann, P. et al. (2021). Farming 4.0: Concepts, Technology, and Perspectives for the German Agricultural Sector. *German Journal of Agricultural Economics*, vol. 70, no. 1, pp. 1-19.

8. Contreras-Medina, D.I., Pardo, M. A., Guevara-Hernández, F., Bravo-Villa, G., Sánchez-Gutiérrez, R. A. & Rodríguez-Larramendi, L. A. (2020). Roadmapping as a Driver for Knowledge Creation: A Proposal for Improving Sustainable Practices in the Coffee Supply Chain from Chiapas, Mexico,

Using Emerging Technologies. *Sustainability*, vol. 12, no. 14, 5817. DOI: 10.3390/su12145817.

9. Daribekova, N. et al. (2023). Roadmap for the Transition from Digital Agriculture to Agriculture 4.0 Based on Deep Learning in the Economy of the Future by 2030. In: *Food Security in the Economy of the Future*. pp. 123-130.

10. Experiment Station Committee on Organization and Policy (ESCOMP) Science and Technology Committee (2019). *A Science Roadmap for Food & Agriculture*.

11. Farsani, E.D., Choobchian, S. & Naghani, M.S. (2024). Unlocking Agricultural Innovation: A Roadmap for Growth and Sustainability. *Environmental Research*, vol. 15, pp. 17751-17771.

12. França, R. P., Ziviani, F. & Fernandes De Muylde, C. (2020). Agricultural Digitalisation and Digital Transformation: The Future of Agricultural Competitive Excellence in the 4.0 Environment. *Brazilian Journal of Development*, vol. 6, no. 2, pp. 7240-7260.

13. Guilherme, R. & Braghini, J. (2025). *Construction of a Roadmap of the Technological Development Barrier and Adaptation of Agricultural Machinery in the Production Chain of Biomass Briquettes and Pellets from Agricultural Waste*. [Preprint]. Available at: [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5084101](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5084101) (accessed 16 September 2025).

14. Kosasih, A. & Sulaiman, E. (2024). Digital Transformation in Rural Settings: Unlocking Opportunities for Sustainable Economic Growth and Community Empowerment. *Journal of Sustainable Tourism and Entrepreneurship*, vol. 5, no. 2, pp. 129-143.

15. Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality (2022). *Digital Agriculture Roadmap Netherlands*. Available at: <https://www.agroconnect.nl> (accessed 15 May 2025).

16. Phaal, R., Farrukh, C. J. P. & Probert, D. R. (2004). Technology Roadmapping — A Planning Framework for Evolution and Revolution. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 71, no. 1-2, pp. 5-26. DOI: 10.1016/S0040-1625(03)00072-6.

17. Probert, D. & Radnor, M. (2003). Technology Roadmapping: Frontier Experiences from Industry-Academia Consortia. *Research-Technology Management*, vol. 46, no. 2, pp. 44-48.

18. Queensland Government (2023). *Queensland Ag-Tech Roadmap 2023-2028*. Available at: <http://daf.qld.gov.au/AgTech> (accessed 12 September 2025).

19. Steiber, A., Alänge, S., Ghosh, S. & Goncalves, D. (2021). Digital Transformation of Industrial Firms: An Innovation Diffusion Perspective. *European Journal of Innovation Management*, vol. 24, no. 3, pp. 799-819.

20. The Mixing Bowl & SVG Ventures (2020). *U.S. Agriculture Technology Roadmap*. Available at: <http://www.usagtechroadmap.com> (accessed 15 July 2025).

21. Wei Zhao, W., Chen, H. & Bulis, A. (2025). How Are Industry 4.0 Technologies Transforming a Sustainable Society Across Industries? *Digital Transformation and Society*. Emerald Publishing Limited. Available at: [http://www.researchgate.net/publication/392326568\\_How\\_are\\_Industry\\_4\\_0\\_technologies\\_transforming\\_a\\_sustainable\\_society\\_across\\_industries](http://www.researchgate.net/publication/392326568_How_are_Industry_4_0_technologies_transforming_a_sustainable_society_across_industries) (accessed 1 September 2025).

22. World Bank (2025). *Digital Agriculture Roadmap (DAR) Playbook*. Available at: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/099053025063021993/pdf/P508004-f943a09b-c45f-4c93-b554-9dd1dec1e7c.pdf> (accessed 13 September 2025).

23. Zhao, J., Wang, J. & Li, Z. (2022). The Digital Village: A Comprehensive Analysis of China's Digital Agriculture Policy and Practice. *China Agricultural Economic Review*, vol. 14, no. 1, pp. 20-35. DOI: 10.1108/CAER-01-2021-0014.

## Информация об авторах:

**Петухова Марина Сергеевна**, доктор экономических наук, проректор по развитию, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0133-2851>, [petuhova\\_ms@edubiotech.ru](mailto:petuhova_ms@edubiotech.ru)

**Агафонова Ольга Витальевна**, кандидат экономических наук, и.о. директора Института цифровых технологий, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5709-359X>, [agafonovaov@edubiotech.ru](mailto:agafonovaov@edubiotech.ru)

## Information about the authors:

**Marina S. Petukhova**, doctor of economic sciences, vice-rector for development, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0133-2851>, [petuhova\\_ms@edubiotech.ru](mailto:petuhova_ms@edubiotech.ru)

**Olga V. Agafonova**, candidate of economic sciences, acting director of the Institute of digital technologies, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5709-359X>, [agafonovaov@edubiotech.ru](mailto:agafonovaov@edubiotech.ru)