

8. Назарова, М. С. Анализ эффективности функционирования интегрированных формирований в отечественном АПК / М. С. Назарова, Т. И. Ленская // Формирование организационно-экономических условий эффективного функционирования АПК: сб. науч. ст. 9-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-26 мая 2017 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: Г. И. Гануш [и др.]. – Минск, 2017. – С. 435-439.
9. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021-2025 годы: Указ Президента Респ. Беларусь от 29 июля 2021 г. № 292 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100292>. – Дата доступа: 26.02.2026.
10. Рыбалко, Ю. А. Механизм взаимовыгодных отношений в вертикально-интегрированных продуктовых компаниях: монография / Ю. А. Рыбалко; рец.: В. А. Голуб, Е. В. Гусаков; ред. М. И. Запольский; Министерство образования Республики Беларусь, Учреждение образования "Полесский государственный университет". – Пинск: [б. и.], 2021. – 195 с.

УДК 338.43

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Леванов С. Ю.¹, Дорошкевич И. Н.²

¹ – УО «Гродненский государственный аграрный университет»

г. Гродно, Республика Беларусь;

² – Белорусский государственный университет

г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные направления развития научного поиска в аграрной сфере и современные тенденции развития сельского хозяйства в контексте глобальных технологических трансформаций. Авторами выделены три ключевых вектора, определяющих современную парадигму сельского хозяйства: интеллектуальная автоматизация, устойчивая интенсификация и глубокая межотраслевая технологическая интеграция. Проанализированы перспективы внедрения искусственного интеллекта, роботизации, цифровых двойников, точного земледелия, вертикальных ферм и геномного редактирования. Особое внимание уделено конвергенции биотехнологий, информационных технологий и материаловедения как основе, обеспечивающей баланс экономической эффективности, экологической устойчивости и продовольственной безопасности.

Summary. The article examines the current directions of scientific research development in the agricultural sector and modern trends in agricultural development within the context of global technological transformations. The authors identify three key vectors that define the modern paradigm of agriculture: intelligent automation, sustainable intensification, and deep cross-sectoral technological integration. The prospects for implementing artificial intelligence, robotics, digital twins, precision farming, vertical farms, and genome editing are analyzed. Special attention is paid to the convergence of biotechnologies, information technologies, and materials science as the foundation for the formation of Agriculture 5.0, ensuring a balance of economic efficiency, environmental sustainability, and food security.

Ключевые слова: *устойчивость, технологии, цифровизация, сельское хозяйство, конвергенция технологий, точное земледелие.*

Key words: *sustainability, technology, digitalization, agriculture, technological convergence, precision farming.*

В современной экономической науке следование мировым научным трендам перестает быть вопросом академического кругозора и превращается в условие профессиональной состоятельности управленца. Кроме того, понимание содержания научных трендов необходимо для адекватной оценки динамики производительности факторов производства и выработки обоснованных решений в области научно-технической политики и поддержания конкурентоспособности.

Целью исследования является попытка обобщения и анализа наиболее актуальных современных направлений мирового научного поиска в аграрной науке.

Несмотря на значительное количество научных публикаций, на наш взгляд, согласно последним тенденциям в исследованиях 2020-х годов, развитие сельского хозяйства в значительной степени формируется под влиянием конвергенции трех основных направлений: интеллектуальной автоматизации, устойчивой интенсификации и глубокой технологической интеграции.

1. Развитию интеллектуальных и автономных систем уделяется пристальное внимание в трудах аграрных инженеров и IT-специалистов. Стоит обратить внимание, что если ранее IT-специалисты совсем не ассоциировались с сельским хозяйством, то их значение для аграрной отрасли серьезно выросло и проявилось, среди прочего, в их подготовке на базе аграрных вузов многих стран [1].

Если на протяжении последних 100 лет технологические процессы в крупнотоварном сельском хозяйстве заменяли ручные процессы механизацией, а в дальнейшем автоматизацией, то в настоящий момент технологии выводят сельское хозяйство за рамки простой автоматизации в сторону полностью интегрированных автономных систем, способных воспринимать, анализировать, принимать решения и действовать. Канадский агроном, предприниматель и футуролог Р. Сайк в книге «FOOD 5.0: How We Feed The Future» указывает, что именно сейчас то время, когда происходит слияние биотехнологий, точного земледелия, робототехники, сенсоров, искусственного интеллекта и анализа больших данных в единую систему [2].

Более того, благодаря проникновению современных технологий в аграрную отрасль, тенденция смещается от простой «локальной автоматизации» к «полноцепочной автономности», которая охватывает не часть, а весь технологический процесс производства готового продукта как в

растениеводстве, так и в животноводстве. Искусственный интеллект (ИИ) теперь глубоко интегрируется в сложные процессы, такие как дизайнерская селекция культур.

Стандартным набором для сельскохозяйственной организации становится использование целого комплекса технологий, включая датчики интернета вещей (IoT) для мониторинга почвы, погоды и посевов в реальном времени, а также облачные вычисления для обработки данных и ИИ/машинное обучение для прогнозной аналитики погоды, болезней растений и животных, а также потребностей в удобрениях. Контент-анализ современных публикаций показывает, что в статьях о современном сельском хозяйстве помимо упоминания человека и животных основные направления исследований формируются вокруг понятий «генная инженерия», «цифровизация», «нанотехнологии».

Одним из направлений, которое еще не получило активного применения в сельском хозяйстве является технология цифровых двойников (ЦД). Такой подход позволяет ускорять исследования и тестировать объекты и процессы в цифровой среде. При этом разработанная технология цифровых двойников позволяет оставлять цифровую тень, иметь двухстороннюю связь между ЦД и испытываемым физическим объектом. Сейчас она тестируется преимущественно при производстве сельскохозяйственных машин, изделий, технологий и систем, особенно в области животноводства. Например, доильный робот запрашивает данные по конкретным коровам, или данные с метеостанции поступают на внутренний контроллер, который анализирует предыдущий опыт, текущую ситуацию и изменяет режимы работы исполнительных механизмов. Построение виртуального полигона на основании реальной фермы дает возможность проводить виртуальные испытания [3].

Точное земледелие продолжает представлять собой актуальное направление в современном сельском хозяйстве. Множество исследований для оптимизации сельскохозяйственных практик ведется в рамках использования передовых технологии GPS-навигации, дронов и дистанционного зондирования. Ожидания от их применения – снижение затрат на ресурсы, щадящее воздействие на окружающую среду, рационализация использования удобрений и средств защиты растений.

Интересным опытом являются исследования по внедрению машинного зрения для сельского хозяйства. Например, роботы для уборки урожая, такие как сборщик клубники от Agrobot и сборщик яблок от FFRobotics, используют 3D-камеры, роботизированные манипуляторы и классификаторы на основе ИИ для идентификации спелых плодов и манипуляторы их сбора без повреждений, решая проблему ежегодного дефицита рабочей силы в производстве фруктов и овощей, составляющую 30 млрд долл. США [4].

Еще более передовыми становятся работы по внедрению роевых технологий в сельском хозяйстве, использованию периферийного ИИ и интеграции человек-робот. Роевые технологии находят применение чаще всего в области автоматизации прополок и борьбы с сорняками в растениеводстве. В отличие от них периферийный ИИ позволяет работать машинам и механизмам без использования облачной технологии в регионах со слабым покрытием сетей.

Использование технологий больших данных (Big Data) в сельском хозяйстве часто упоминается в контексте прогнозирования погодных условий. Их использование позволяет прогнозировать потенциальную урожайность, вспышки болезней и потребности в орошении.

2. В рамках формирования устойчивой интенсификации исследования в значительной степени сосредоточены на том, чтобы сделать сельское хозяйство адаптивным к изменению климата, одновременно снижая его отрицательное воздействие на окружающую среду. Здесь во многом происходит интеграция аграрной науки, экономики и экологии.

Актуальными в этом направлении считаются исследования по построению эффективных вертикальных и городских систем земледелия, включая гидропонику, аэропонику, а также сельское хозяйство контролируемой среды (часто это сити-фермы), что позволяет выращивать культуры круглый год в городских районах с минимальным использованием земли и воды. Экономически такой подход обоснован необходимостью переноса места производства ближе к месту потребления. Социальная составляющая позволяет привлекать в процесс производства продуктов питания городское население. Данные исследований показали, что аэропоника перспективный ресурсоэффективный вариант, который позволяет сократить потребление воды на 95 % и ускорить темпы роста растений на 30 %. Также данные демонстрируют, что размещение ферм в городах позволяет сократить выбросы от транспортировки листовой зелени на 90 % [5]. Проекты Sky Greens в Сингапуре и Infarm в Берлине, показали, что вертикальные фермы могут обеспечивать 10-15 % свежих продуктов питания в городе [6].

Системы точного орошения с поддержкой интернета вещей продемонстрировали потенциал снижения потребления воды на 30 % при одновременном повышении урожайности, отражая двойную выгоду от экономической эффективности и устойчивости [7]

Климатически оптимизированное сельское хозяйство активно отражено в научно-практических трудах, где объединяются задачи повышения продуктивности, адаптации к изменениям и смягчения последствий воздействия на среду. Рассматриваются вопросы управления природными ресурсами (NRM – Natural Resource Management), консервационные технологии (RCTs – Resource Conservation Technologies), такие как

минимальная обработка почвы (no-till), мульчирование пожнивными остатками и контурно-мелиоративное земледелие. По различным данным эти технологии снижают эрозию на 50-90 %, сохраняют влагу и органику, способствуя накоплению углерода в почве и снижению выбросов CO₂ [8].

Устойчивость в зарубежных исследованиях часто отражается в использовании интегрированных систем (IFS, ICM, INM). Так, разнообразие системы IFS (Integrated Farming Systems) как комбинация растениеводства, животноводства и аквакультуры для замкнутого цикла (отходы = удобрения) часто упоминается на примере успешного интегрированного выращивания риса и карпа или «деревни Фуси». Данная технология с 2005 г. признана Системой сельскохозяйственного наследия мирового значения [9].

Помимо индустриальных решений, до настоящего момента многие исследования подчеркивают ценность мелкомасштабного, биоразнообразного фермерства. Такие системы дружелюбны к среде, превосходны в накоплении углерода в почве и устойчивы к потрясениям. Ключевые направления там включают регенеративное сельское хозяйство, органическое земледелие и агролесоводство [2, 3]. Актуальными в рамках устойчивости являются работы, направленные на выявление вызовов и угроз аграрной сфере, а также поддержанию продовольственной безопасности [10].

3. Самые прорывные достижения происходят в рамках глубокой технологической межотраслевой интеграции на стыке биологии, медицины, материаловедения и некоторых других наук.

Учеными обозначено, что парадигма конвергенции формируется через цепочку прорывных технологий и инноваций в биотехнологии, информационных технологиях, материаловедении. Это ярко проявляется в таких областях, как цифровой дизайн вкуса и интеллектуальный дизайн микробных штаммов. Аддитивные технологии, смешанные с биоинжинирингом, способны сформировать новый класс «просьюмеров» (prosumers), то есть потребителей, которые активно участвуют в создании нужных им продуктов [2].

Видное место в аграрных исследованиях занимают технология точного редактирования генома CRISPR и синтетическая биология для высокопродуктивных, устойчивых к вредителям культур. Такая технология позволяет ученым находить, вырезать и изменять определенные участки ДНК у живых организмов. Значительное количество публикаций связано с тем, что сейчас технология отрабатывается на различных культурах научными коллективами нескольких стран. Глобальный метаанализ показал, что внедрение ГМ-культур сократило использование пестицидов на 37 %, увеличило урожайность на 22 % и прибыль фермеров на 68 % по сравнению с традиционными культурами [11].

Отдельного внимания заслуживают исследования точной селекции. Если ранее значительное место такой технологии уделялось в растениеводстве, то в настоящий момент растет количество научных публикаций по данной теме в животноводстве.

Таким образом, современная научная мысль работает над проникновением цифровых интегрированных технологий во все сельскохозяйственные процессы, что должно значительно интенсифицировать производства при условии поддержания устойчивости и баланса интересов общества, экономики и окружающей среды. Исследования показывают, что, по сути, уже сейчас будущее высококонкурентного и устойчивого сельского хозяйства – это интеллектуальные, устойчивые и глубоко междисциплинарные подходы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимирязевка в ТОП 20 вузов России, получивших право на подготовку топ-специалистов в сфере ИИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.timacad.ru/news/timiriavezka-v-top-20-vuzov-rossii-poluchivshikh-pravo-na-podgotovku-top-spetsialistov-v-sfere-ii>. – Дата доступа: 21.04.2025.
2. Saik, R.D. FOOD 5.0: How We Feed The Future. [S.l.] : Lioncrest, 2019. 246 p.
3. Дорохов, А. С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения [Электронный ресурс] / А. С. Дорохов, Д. Ю. Павкин, С. С. Юрочка // *Агроинженерия*. 2023. №4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-tsifrovyyh-dvoynikov-v-selskom-hozyaystve-perspektivy-primeneniya>. – Дата доступа: 21.04.2025.
4. Bac C. W. van Henten E. J. Hemming J. Edan Y. (2021). Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. *Biosyst. Eng.* 204, 126–146. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2021.02.011.
5. Lam W. Y. Sim S. Kulak M. van Zelm R. Schipper A. M. Huijbregts M. A. J. et al. (2021). Drivers of variability in greenhouse gas footprints of crop production. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128121. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128121.
6. Sanyé-Mengual E. Specht K. Krikser T. Vanni C. Pennisi G. Orsini F. et al. (2023). Social acceptance and perceived ecosystem services of urban agriculture. *Nat. Sustainability* 6, 221–230. doi: 10.1038/s41893-022-01025-0.
7. Duguma, A.L., Bai, X. How the internet of things technology improves agricultural efficiency. *Artif Intell Rev* 58, 63 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>.
8. Kumar, A., Singh, V. K., Singh, Y., Singh, S. K., & Kumar, P. (Eds.). (2025). *Modern Technology for Sustainable Agriculture*. Springer Nature Switzerland.
9. Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fao.org/giahs/around-the-world/detail/china-rice-fish/en> – Дата доступа: 21.04.2025.
10. Rawte, Suman, and Ritu R. Saxena. 2025. “Tackling Agriculture’s Modern Struggles”. *Journal of Experimental Agriculture International* 47 (5):1-8. <https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i53391>.
11. Klümper W. Qaim M. (2014). A Meta-Analysis of the Impacts of Genetically Modified Crops. *Plos One*, 9(11), e111629. doi: 10.1371/journal.pone.0111629.