

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ/ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.48>

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО, И ОПТИМИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРАКТИК

Научная статья

Аджиева А.А.^{1,*}, Шаповалов В.А.², Нирова М.С.³, Бачиев Б.А.⁴

¹ ORCID : 0000-0002-1047-8417;

² ORCID : 0000-0002-9701-6820;

³ ORCID : 0009-0008-7388-0922;

⁴ ORCID : 0009-0006-1818-3505;

¹ Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, Нальчик, Российская Федерация

² Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

³ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Российская Федерация

⁴ Дагестанский государственный аграрный университет им. М.М. Джамбулатова, Махачкала, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aida-adzhieva[at]mail.ru)

Аннотация

Сельское хозяйство как одна из наиболее уязвимых отраслей экономики сталкивается с возрастающими климатическими рисками, что делает прогнозирование погодных условий и адаптацию к ним важнейшими задачами. В данной статье рассматриваются современные методы искусственного интеллекта, применяемые для анализа и прогнозирования агрометеорологических параметров, а также оптимизации производственных сельскохозяйственных процессов. Особое внимание уделено интеграции моделей машинного обучения с сенсорной инфраструктурой, применению нейросетей и байесовских подходов, а также их использованию в управлении поливом, защите растений, агротехническими решениями и минимизацией климатических рисков. Проводится систематизация существующих исследований, обсуждаются проблемы и перспективы развития данного направления.

Ключевые слова: искусственный интеллект, агрометеорология, машинное обучение, прогнозирование урожайности, управление поливом, фитосанитарный мониторинг, IoT в сельском хозяйстве, устойчивое земледелие, цифровые агротехнологии.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR FORECASTING WEATHER CONDITIONS AFFECTING AGRICULTURE AND OPTIMISATION OF AGRICULTURAL PRACTICES

Research article

Adzhieva A.A.^{1,*}, Shapovalov V.A.², Nirova M.S.³, Bachiev B.A.⁴

¹ ORCID : 0000-0002-1047-8417;

² ORCID : 0000-0002-9701-6820;

³ ORCID : 0009-0008-7388-0922;

⁴ ORCID : 0009-0006-1818-3505;

¹ Kabardino-Balkarian State Agrarian University, Nalchik, Russian Federation

² High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

³ Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russian Federation

⁴ Dagestan State Agrarian University named after M.M. Dzhambulatov, Makhachkala, Russian Federation

* Corresponding author (aida-adzhieva[at]mail.ru)

Abstract

Agriculture, as one of the most vulnerable sectors of the economy, faces increasing climate risks, making weather forecasting and adaptation to these risks critical tasks. This article examines modern artificial intelligence methods used to analyse and predict agrometeorological parameters, as well as to optimise agricultural production processes. Particular attention is paid to the integration of machine learning models with sensor infrastructure, the application of neural networks and Bayesian approaches, and their use in irrigation management, plant protection, agrotechnical solutions, and climate risk minimisation. Existing research is systematised, and the problems and prospects for the development of this area are discussed.

Keywords: artificial intelligence, agrometeorology, machine learning, yield forecasting, irrigation management, phytosanitary monitoring, IoT in agriculture, sustainable farming, digital agrotechnologies.

Введение

Современное сельское хозяйство находится на пересечении двух глобальных вызовов: изменения климата и роста мирового спроса на продовольствие. Согласно прогнозам Продовольственной и сельскохозяйственной организаций ООН (FAO), к 2050 году мировое производство продуктов питания должно увеличиться не менее чем на 70% для удовлетворения потребностей населения. Одновременно усиливаются экстремальные климатические явления — засухи, аномальные осадки, экстремальные температуры, которые нарушают агротехнологические циклы и снижают аграрную устойчивость. Традиционные методы агрометеорологического прогнозирования (основывающиеся на детерминированных моделях атмосферной динамики) становятся недостаточными для решения задач локального масштаба, особенно в условиях разреженной метеорологической сети наблюдений и высоко вариативных локальных

климатических условий. Раствущие климатические колебания, участившиеся погодные экстремумы и необходимость устойчивого земледелия требуют от аграриев внедрения новых подходов к управлению рисками. Ключевым фактором адаптации сельского хозяйства к этим вызовам является интеграция цифровых технологий, прежде всего методов искусственного интеллекта (ИИ) [1], [2]. Эти методы обобщают современные достижения, включая машинное и глубокое обучение и тем самым предоставляют новые инструменты для анализа больших массивов климатических и агрономических данных. Так, ИИ способен обрабатывать большие объёмы гетерогенных данных (включая спутниковые снимки, данные с полевых сенсоров, исторические метеорологические записи), выявлять скрытые корреляции и прогнозировать поведение сложных агроклиматических систем [3], [4].

В отличие от традиционных статистических методов, ИИ-модели обладают высокой обобщающей способностью, могут быть адаптированы к конкретным агроценозам и корректироваться в быстром темпе [5]. Их применение позволяет переходить от реактивных к проактивным стратегиям управления: не просто реагировать на погодные изменения, а заранее подстраивать агротехнологии и ресурсное обеспечение под ожидаемые условия [6], [7].

Цель настоящей работы — проанализировать современные ИИ-подходы в прогнозировании погодных условий, критически оценить существующие модели и обсудить их применение для повышения устойчивости и эффективности сельского хозяйства.

Методы и принципы исследования

2.1. Искусственный интеллект в агрометеорологии

Применение ИИ в агрометеорологии в первую очередь связано с задачами прогноза погодных параметров, критически важных для ведения сельского хозяйства: осадков, температуры воздуха, влажности почвы, индексов засушливости и т. п. [8] Основу интеллектуальных агропрогностических систем составляют рекуррентные нейронные сети (в частности, архитектуры типа LSTM) и модели, основанные на трансформерах (например, FourCastNet). Эти модели обучаются на исторических погодных рядах в сочетании со спутниковыми данными и измерениями с наземных агрометеостанций [9], [10].

Математическое описание такой задачи прогноза может быть сведено к задаче регрессии в пространстве временных признаков:

$$y_{t+k} = f(x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-n}; \theta),$$

где y_{t+k} — прогнозируемое значение погодного параметра через k шагов времени, x_t — вектор входных признаков в момент времени t , θ — параметры модели, подлежащие оптимизации.

Для повышения устойчивости прогноза используются методы ансамблирования (bagging, boosting), а также регуляризация и байесовский вывод для учёта априорной неопределенности. Валидизация моделей проводится на основе кросс-валидации с разбиением по сезонам и географическим зонам.

2.2. Модели машинного обучения для прогноза агрометеоусловий

Многочисленные исследования показывают, что комбинация численного прогноза погоды (NWP) и машинного обучения (ML) позволяет повысить точность краткосрочных и локальных прогнозов. В частности, ML-модели успешно корректируют систематические ошибки NWP, основываясь на исторических данных и локальных климатических особенностях [11].

Перспективным направлением здесь являются нейросетевые архитектуры. Искусственные нейронные сети (ANN), сверточные (CNN) и рекуррентные сети (LSTM) активно применяются для прогнозирования осадков, температуры, влажности почвы и других метеопараметров. LSTM-модели демонстрируют высокую эффективность при анализе временных рядов [12], однако требуют больших объемов качественных данных и вычислительных ресурсов.

В развитии статистических методов можно выделить Байесовские модели и вероятностное прогнозирование. Байесовские сети позволяют учитывать априорную неопределенность и взаимосвязь между метео- и агропараметрами. Они применяются для оценки риска неблагоприятных условий, моделирования нитратного загрязнения, засоренности сорняками и других задач агроэкологии [13], [14].

2.3. Модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур

Прогнозирование для планирования урожайности осуществляется на основе мультифакторных моделей, включающих в себя как метеорологические параметры, так и агрохимические, фенологические и спектральные характеристики культур [15]. Важным является выбор информативных признаков и обеспечение интерпретируемости. Например, в работе [16] для оценки урожайности используются метеопараметры, состав почвы, уровень агротехники.

Чаще всего применяются методы:

- Случайного леса (Random Forest).
- Градиентного бустинга над решающими деревьями (XGBoost, LightGBM).
- Глубоких нейронных сетей с вниманием (Attention-based DNN).
- Генеративных моделей для имитации развития агрофитоценоза (GANS).

Формально задача может быть представлена как задача регрессии:

$$Y = \mathcal{F}(M, S, A; \beta),$$

где Y — вектор урожайности, M — метеорологические данные, S — почвенные и топографические параметры, A — агротехнические приёмы, β — обучаемые коэффициенты модели F .

Модели проходят предварительное обучение на исторических данных, а затем уточняются на данных конкретного хозяйства (fine-tuning). В качестве метрик качества применяются RMSE, MAE и коэффициент детерминации R^2 , вычисляемые по валидационному набору [17].

Основные результаты

3.1. Применение ИИ для оптимизации агропрактик

3.1.1. Интеллектуальные системы управления поливом

Одним из ключевых факторов в повышении эффективности сельскохозяйственного производства является оптимизация водопользования. Модели машинного обучения позволяют точно рассчитывать потребность в воде на основе прогноза осадков, состояния почвы и культуры. Это ведет к снижению водопотребления на 20–30% [18], [19]. Что особенно актуально в условиях ограниченных водных ресурсов и усиливающейся климатической нестабильности.

Системы реализуются на основе гибридных моделей:

- Регрессионных алгоритмов (Support Vector Regression, Gaussian Process Regression).
- Глубокообученных автоэнкодеров для обнаружения латентных зависимостей.
- Обучения с подкреплением (reinforcement learning) для оптимального управления поливом на длительном горизонте.

Формализованная задача управления имеет вид:

$$\min_{u(t)} \mathbb{E} \left[\int_0^T (C_w(u(t)) + \lambda \cdot L(y(t), y^*(t))) dt \right],$$

где $u(t)$ — стратегия полива, $C_w(u)$ — издержки на водоподачу, $y(t)$ — влажность почвы, $y^*(t)$ — оптимальный уровень, $L(\cdot)$ — функция потерь, λ — весовой коэффициент.

Интеллектуальные системы управления ирригацией позволяют адаптивно регулировать водоснабжение на основе предсказаний потребности культур во влаге, с учётом прогноза осадков, температуры, стадии вегетации и гидрофизических свойств почв, они позволяют реализовать так называемый «прецзионный полив», сводя к минимуму перерасход воды и переувлажнение, что влечёт за собой не только экологические, но и экономические эффекты [20], [21].

3.1.2. Автоматизированный фитосанитарный мониторинг на основе ИИ

Фитосанитарные риски, включая вспышки заболеваний и инвазии вредителей, наносят значительный ущерб агросистемам [22].

ИИ-подходы применяются в защите растений и обработке посевов для:

- Прогнозирования вспышек заболеваний (на основе метеоусловий и исторических данных).
- Диагностики болезней с помощью компьютерного зрения.
- Определения оптимального времени и дозы обработки [18].

ИИ-решения реализуются в виде:

- Сверточных нейронных сетей (CNN) для анализа изображений листьев, стеблей и плодов (задачи классификации и сегментации).
- Моделей обнаружения объектов (YOLO, Faster R-CNN) для локализации источников заражения на аэрофотоснимках.
- Временных моделей для предсказания вспышек (e.g., TCN, LSTM) на основе климатических и биологических индикаторов.

Верификация моделей проводится с использованием сводных матриц ошибок, ROC-кривых, F1-score. При этом особое внимание уделяется устойчивости моделей к шуму и доминированию фона (data augmentation, adversarial training).

Задача ранней диагностики и локализации опасностей является важным элементом устойчивого управления урожаем [23].

Применение таких систем обеспечивает:

- Автоматическое оповещение агрономов.
- Построение карт фитосанитарного риска.
- Выбор наилучшей стратегии обработки и карантинных мероприятий.

3.2. Интеграция ИИ с IoT и сенсорными системами

Развитие Интернета вещей (IoT) обеспечило появление плотных сенсорных сетей, фиксирующих параметры среды в режиме реального времени: температура, влажность воздуха и почвы, освещенность, содержание CO_2 и т.д. [24], [25]. Интеграция этих данных с ИИ-платформами позволяет:

- Выявлять локальные микроклиматические аномалии.
- Оперативно реагировать на угрозы (например, заморозки или перегрев) [26].
- Осуществлять мониторинг, управлять ирригацией и внесением удобрений, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов [27].

Примером является система AgWeatherNet (США), в которой совмещаются датчики, метеостанции и нейросетевые модели, предоставляющие фермерам рекомендации на уровне отдельных полей.

Проблемы, ограничения и перспективы внедрения методов ИИ

Среди проблем и ограничений стоит выделить:

- Качество данных — часто агрометеоданные неполные, зашумленные или собраны с разной частотой.
- Недостаток инфраструктуры — в сельских регионах может отсутствовать доступ к быстрому интернету и вычислительным ресурсам.
- Сложность интерпретации результатов ИИ-моделей, особенно при вынесении критически важных рекомендаций сельхозпроизводителю.
- Правовые и этические аспекты, например, защита персональных и экологических данных, вопросы доверия к рекомендациям ИИ.

В качестве перспективных направлений исследований можно отметить:

- Создание открытых высококачественных агрометеодатасетов.

- Разработку объясняющих цепочки рассуждений моделей ИИ (explainable AI или XAI) для повышения прозрачности принимаемых решений.
- Создание локальных моделей — с обработкой данных на устройстве (on-edge), тем самым снижая зависимость от облака.
- Интеграцию цикла разработки ML и физико-механистических моделей (погодных, биофизических).
- Развитие платформ комплексного управления умным хозяйством (Smart Farms) [28].

Заключение

Искусственный интеллект становится неотъемлемым компонентом современного устойчивого сельского хозяйства. Его применение в прогнозировании погодных условий и управлении агротехническими мерами способствует повышению продуктивности, снижению экологических рисков и адаптации к изменению климата. Однако реализация его потенциала требует преодоления проблем с данными, повышением доверия пользователей и развитием инфраструктуры.

Внедрение ИИ в агрометеорологию и агротехнологии предоставляет фундаментальные преимущества в условиях изменяющегося климата и растущих требований к устойчивости сельского хозяйства. Среди основных достижений следует отметить:

- Значительное улучшение точности прогнозов метеоусловий и урожайности.
- Повышение эффективности управления ресурсами (вода, удобрения, средства защиты).
- Оперативное принятие решений на основе объективных данных и вероятностных оценок.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией ИИ-моделей в цифровые платформы агропроизводства, разработкой мультиагентных систем для управления крупными хозяйствами и систем ИИ с формализацией объяснений (explainable AI) — для прозрачности в принятии решений.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Черкасов Р.И., Российский технологический университет МИРЭА, Москва Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.48.1>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Cherkasov R.I., MIREA - Russian Technological University, Moscow Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.159.48.1>

Список литературы / References

1. Карцхия А.А. Искусственный интеллект как средство управления в условиях глобальных рисков. / А.А. Карцхия // Мониторинг правоприменения. — 2020. — № 1 (34). — С. 45–50.
2. Лагунова Е.С. Использование искусственного интеллекта как инструмента социально-экономического развития / Е.С. Лагунова // Россия в глобальном мире / Под ред. Н.В. Новиковой, Н.В. Костюковича. — Тверь: Тверской государственный университет, 2023. — С. 96–101.
3. Мухамедиева Д.Т. Применения технологии искусственного интеллекта в агропромышленном комплексе / Д.Т. Мухамедиева, Д.Ш. Зиядуллаева, С.Д. Шамсиева [и др.] // Science and innovation. — 2024. — Т. 3. — Спецвыпуск 17 . — С. 583–591.
4. Такмазян Л.А. Потенциал искусственного интеллекта в автоматизированных системах управления аграрным производством. / Л.А. Такмазян, Д.А. Михнович, Н.Н. Лытнев // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. — 2024. — № 6. — С. 125–131.
5. Ben A.R. Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector. / A.R. Ben, M. Hanana // Journal of Food Quality. — 2021. — Vol. 2021. — № 1. — P. 5584754.
6. Skvortsov E.A. Prospects of applying artificial intelligence technologies in the regional agriculture. / E.A. Skvortsov // Economy of Regions. — 2020. — № 2. — P. 563.
7. Shaikh T.A. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming. / T.A. Shaikh, I.T. Rasoo, F.R. Lone // Computers and Electronics in Agriculture. — 2022. — Vol. 198. — P. 107119.
8. Pierre N. AI based real-time weather condition prediction with optimized agricultural resources / N. Pierre, I.I. Viviane, U. Lambert [et al.] // European Journal of Technology. — 2023. — Vol. 7. — № 2. — P. 36–49.
9. Gryshova I. Artificial intelligence in climate smart in agricultural: toward a sustainable farming future / I. Gryshova, A. Balian, I. Antonik [et al.] // Access J. — 2024. — Vol. 5. — № 1. — P. 125–140.
10. Bano A. Enhancing Agriculture Prediction through AI and Parallel Distributed Computing: A Comprehensive Study on the Impact of Weather / A. Bano, Y. Naqvi, A. Ahmed [et al.] // International Journal of Emerging Engineering and Technology. — 2023. — Vol. 2. — № 2. — P. 21–28.
11. Hachimi C.E. Smart weather data management based on artificial intelligence and big data analytics for precision agriculture / C.E. Hachimi, S. Belaqziz, S. Khabba [et al.] // Agriculture. — 2023. — Vol. 13. — № 1. — P. 95.
12. Javaid M. Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector / M. Javaid, A. Haleem, I.H. Khan [et al.] // Advanced Agrochem. — 2023. — Vol. 2. — № 1. — P. 15–30.
13. Каличкин В.К. Использование байесовских сетей для прогнозирования содержания нитратного азота в почвах / В.К. Каличкин, Т.А. Лужных, В.С. Риксен // Труды международной научной онлайн-конференции

«АгроНаука-2020». — Новосибирск: Государственная публичная научно-техническая библиотека СО РАН, 2020. — С. 44–48.

14. Каличкин В.К. Байесовская сеть доверия как инструмент прогнозирования уровня засоренности овсом пустым (овсягом) / В.К. Каличкин, К.Ю. Максимович, Р.Р. Галимов // Труды международной научной онлайн-конференции «АгроНаука-2020». — Новосибирск: Государственная публичная научно-техническая библиотека СО РАН, 2020. — С. 49–54.

15. Сайфетдинов А.Р. Применение машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа данных сельского хозяйства и повышения урожайности / А.Р. Сайфетдинов, А.А. Максименко // Контентус. — 2023. — Т. 8. — № 7S. — С. 28–34.

16. Чиркин С.О. Использование искусственного интеллекта для прогнозирования урожайности / С.О. Чиркин, Н.В. Картечина, Н.П. Брозгунова [и др.] // Наука и Образование. — 2024. — Т. 7. — № 4.

17. Zidan F. Optimizing agricultural yields with artificial intelligence-based climate adaptation strategies / F. Zidan, D.E. Febriyanti // IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI). — 2024. — Vol. 5. — № 2. — P. 136–147.

18. Talaviya T. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides / T. Talaviya, D. Shah, N. Patel [et al.] // Artificial intelligence in agriculture. — 2020. — Vol. 4. — P. 58–73.

19. Fawait A.B. Applications of Artificial Intelligence in Weather Prediction and Agricultural Risk Management in India / A.B. Fawait, P. Aprilani, S. Sugiarto [et al.] // Techno Agriculturae Studium of Research. — 2024. — Vol. 1. — № 3. — P. 163–174.

20. Поленов Д.Ю. Система интеллектуального управления водоснабжением объектов растениеводства / Д.Ю. Поленов // Информационно-технологический вестник. — 2019. — № 4. — С. 91–97.

21. Кизимова Т.А. Нейросетевое прогнозирование запасов продуктивной влаги в почве перед посевом зерновых культур. / Т.А. Кизимова, Н.В. Васильева, В.А. Шпак // Инновации и продовольственная безопасность. — 2025. — № 4. — С. 91–102.

22. Алибалаева Л.И. Совершенствование системы защиты виноградников от вредителей на основе гибридных интеллектуальных моделей и интернета вещей / Л.И. Алибалаева, А.З. Магомедов, А.С. Самородская [и др.] // Цифровые технологии в АПК: состояние, потенциал и перспективы развития / Под ред. М.А. Овчинникова. — Махачкала: Типография Алеф, 2019. — С. 33–38.

23. Delfani P. Integrative approaches in modern agriculture: IoT, ML and AI for disease forecasting amidst climate change / P. Delfani, V. Thuraga, B. Banerjee [et al.] // Precision Agriculture. — 2024. — Vol. 25. — № 5. — P. 2589–2613.

24. Шутьев А.А. Будущее искусственного интеллекта, нейросетей и цифровых технологий в АПК / А.А. Шутьев, А.Н. Анищенко // Экономика и социум: современные модели развития. — 2019. — Т. 9. — № 4. — С. 508–522.

25. Jha K. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence / K. Jha, A. Doshi, P. Patel [et al.] // Artificial Intelligence in Agriculture. — 2019. — Vol. 2. — P. 1–12.

26. Roshan S.H. Artificial intelligence aided agricultural sensors for plant frostbite protection. / S.H. Roshan, J. Kazemitar, G. Kheradmandian // Applied Artificial Intelligence. — 2022. — Vol. 36. — № 1. — P. 2031814.

27. Ринас Н.А. Анализ интеллектуальных систем мониторинга состояния почвы с использованием беспилотных летательных аппаратов. / Н.А. Ринас, М.С. Косников // Региональная и отраслевая экономика. — 2025. — № 1. — С. 17–23.

28. Sun W. The future research directions of artificial intelligence in crop growth prediction. / W. Sun, S. Wang // Geographical Research Bulletin. — 2024. — Vol. 3. — P. 251–254.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Karczxiya A.A. Iskusstvennyj intellekt kak sredstvo upravleniya v usloviyah global'nyx riskov [Artificial intelligence as a means of management in the context of global risks]. / A.A. Karczxiya // Monitoring of law enforcement. — 2020. — № 1 (34). — P. 45–50. [in Russian]

2. Lagunova Ye.S. Ispolzovanie iskusstvennogo intellekta kak instrumenta sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya [Using artificial intelligence as a tool for socio-economic development] / Ye.S. Lagunova // Russia in the global world / Ed. by N.V. Novikova, N.V. Kostyukovich. — Tver: Tver State University, 2023. — P. 96–101. [in Russian]

3. Mukhamedieva D.T. Primeneniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta v agropromishlennom komplekse [Applications of artificial intelligence technology in the agro-industrial complex] / D.T. Mukhamedieva, D.Sh. Ziyadullaeva, S.D. Shamsieva [et al.] // Science and innovation [Science and innovation]. — 2024. — Vol. 3. — Special Issue 17. — P. 583–591. [in Russian]

4. Takmazyan L.A. Potencial iskusstvennogo intellekta v avtomatizirovannyx sistemakh upravleniya agrarnym proizvodstvom [Potential of artificial intelligence in automated agricultural production control systems]. / L.A. Takmazyan, D.A. Mixnovich, N.N. Ly'tnev // Innovative economy: information, analytics, forecasts. — 2024. — № 6. — P. 125–131. [in Russian]

5. Ben A.R. Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector. / A.R. Ben, M. Hanana // Journal of Food Quality. — 2021. — Vol. 2021. — № 1. — P. 5584754.

6. Skvortsov E.A. Prospects of applying artificial intelligence technologies in the regional agriculture. / E.A. Skvortsov // Economy of Regions. — 2020. — № 2. — P. 563.

7. Shaikh T.A. Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming. / T.A. Shaikh, I.T. Rasoo, F.R. Lone // Computers and Electronics in Agriculture. — 2022. — Vol. 198. — P. 107119.

8. Pierre N. AI based real-time weather condition prediction with optimized agricultural resources / N. Pierre, I.I. Viviane, U. Lambert [et al.] // European Journal of Technology. — 2023. — Vol. 7. — № 2. — P. 36–49.
9. Gryshova I. Artificial intelligence in climate smart in agricultural: toward a sustainable farming future / I. Gryshova, A. Balian, I. Antonik [et al.] // Access J. — 2024. — Vol. 5. — № 1. — P. 125–140.
10. Bano A. Enhancing Agriculture Prediction through AI and Parallel Distributed Computing: A Comprehensive Study on the Impact of Weather / A. Bano, Y. Naqvi, A. Ahmed [et al.] // International Journal of Emerging Engineering and Technology. — 2023. — Vol. 2. — № 2. — P. 21–28.
11. Hachimi C.E. Smart weather data management based on artificial intelligence and big data analytics for precision agriculture / C.E. Hachimi, S. Belaqziz, S. Khabba [et al.] // Agriculture. — 2023. — Vol. 13. — № 1. — P. 95.
12. Javaid M. Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector / M. Javaid, A. Haleem, I.H. Khan [et al.] // Advanced Agrochem. — 2023. — Vol. 2. — № 1. — P. 15–30.
13. Kalichkin V.K. Ispolzovanie baiesovskikh setei dlya prognozirovaniya soderzhaniya nitratnogo azota v pochvakh [Using Bayesian networks to predict the content of nitrate nitrogen in soils] / V.K. Kalichkin, T.A. Luzhnikh, V.S. Riksen // Proceedings of the international scientific online conference "AgroScience-2020". — Novosibirsk: State Public Scientific and Technical Library SB RAS, 2020. — P. 44–48. [in Russian]
14. Kalichkin V.K. Baiesovskaya set doveriya kak instrument prognozirovaniya urovnya zasorennosti ovsom pustim (ovsyugom) [Bayesian belief network as a tool for predicting the level of weed infestation with wild oats] / V.K. Kalichkin, K.Yu. Maksimovich, R.R. Galimov // Proceedings of the international scientific online conference "AgroScience-2020". — Novosibirsk: State Public Scientific and Technical Library SB RAS, 2020. — P. 49–54. [in Russian]
15. Saifetdinov A.R. Primenenie mashinnogo obucheniya i iskusstvennogo intellekta dlya analiza dannikh selskogo khozyaistva i povisheniya urozhainosti [Application of machine learning and artificial intelligence for agricultural data analysis and crop yield improvement] / A.R. Saifetdinov, A.A. Maksimenko // Kontentus [Contentus]. — 2023. — Vol. 8. — № 7S. — P. 28–34. [in Russian]
16. Chirkin S.O. Ispolzovanie iskusstvennogo intellekta dlya prognozirovaniya urozhainosti [Using artificial intelligence to forecast crop yields] / S.O. Chirkin, N.V. Kartechina, N.P. Brozgunova [et al.] // Nauka i Obrazovanie [Science and Education]. — 2024. — Vol. 7. — № 4. [in Russian]
17. Zidan F. Optimizing agricultural yields with artificial intelligence-based climate adaptation strategies / F. Zidan, D.E. Febriyanti // IAIC Transactions on Sustainable Digital Innovation (ITSDI). — 2024. — Vol. 5. — № 2. — P. 136–147.
18. Talaviya T. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides / T. Talaviya, D. Shah, N. Patel [et al.] // Artificial intelligence in agriculture. — 2020. — Vol. 4. — P. 58–73.
19. Fawait A.B. Applications of Artificial Intelligence in Weather Prediction and Agricultural Risk Management in India / A.B. Fawait, P. Aprilani, S. Sugiarso [et al.] // Techno Agriculturae Studium of Research. — 2024. — Vol. 1. — № 3. — P. 163–174.
20. Polenov D.Yu. Sistema intellektualnogo upravleniya vodosnabzheniem obektov rastenievodstva [Intelligent water supply management system for plant growing facilities] / D.Yu. Polenov // Informatsionno-tehnologicheskii vestnik [Information Technology Bulletin]. — 2019. — № 4. — P. 91–97. [in Russian]
21. Kizimova T.A. Nejrosetevoe prognozirovaniye zapasov produktivnoj vлаги v pochve pered posevom zernovyx kul'tur [Neural network forecasting of productive moisture reserves in the soil before sowing grain crops]. / T.A. Kizimova, N.V. Vasil'eva, V.A. Shpak // Innovations and food security. — 2025. — № 4. — P. 91–102. [in Russian]
22. Alibalaeva L.I. Sovremenstvovaniye sistemi zashchiti vinogradnikov ot vreditelei na osnove gibriddnikh intellektualnih modelei i interneta veshchei [Improving the system of protecting vineyards from pests based on hybrid intelligent models and the Internet of Things] / L.I. Alibalaeva, A.Z. Magomedov, A.S. Samorodskaya [et al.] // Digital technologies in the agro-industrial complex: state, potential and development prospects / Ed. by M.A. Ovchinnikov. — Makhachkala: Aleph Printing House, 2019. — P. 33–38. [in Russian]
23. Delfani P. Integrative approaches in modern agriculture: IoT, ML and AI for disease forecasting amidst climate change / P. Delfani, V. Thuraga, B. Banerjee [et al.] // Precision Agriculture. — 2024. — Vol. 25. — № 5. — P. 2589–2613.
24. Shutkov A.A. Budushchee iskusstvennogo intellekta, neirosetei i tsifrovikh tekhnologii v APK [The future of artificial intelligence, neural networks and digital technologies in the agro-industrial complex] / A.A. Shutkov, A.N. Anishchenko // Ekonomika i sotsium: sovremennie modeli razvitiya [Economy and society: modern development models]. — 2019. — Vol. 9. — № 4. — P. 508–522. [in Russian]
25. Jha K. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence / K. Jha, A. Doshi, P. Patel [et al.] // Artificial Intelligence in Agriculture. — 2019. — Vol. 2. — P. 1–12.
26. Roshan S.H. Artificial intelligence aided agricultural sensors for plant frostbite protection. / S.H. Roshan, J. Kazemitabar, G. Kheradmandian // Applied Artificial Intelligence. — 2022. — Vol. 36. — № 1. — P. 2031814.
27. Rinas N.A. Analiz intellektual'nyx sistem monitoringa sostoyaniya pochyvy's ispol'zovaniem bespilotnyx letatel'nyx apparatov [Analysis of intelligent systems for monitoring soil conditions using unmanned aerial vehicles]. / N.A. Rinas, M.S. Kosnikov // Regional and industry economics. — 2025. — № 1. — P. 17–23. [in Russian]
28. Sun W. The future research directions of artificial intelligence in crop growth prediction. / W. Sun, S. Wang // Geographical Research Bulletin. — 2024. — Vol. 3. — P. 251–254.