

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.63.12>**МЕТА-АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ ИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ОРОШАЕМЫХ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ ЗАСУШЛИВОГО КЛИМАТА**

Научная статья

Рогачев А.Ф.¹, Токарев К.Е.²*¹ORCID : 0000-0002-3077-6622;²ORCID : 0000-0002-5548-5637;^{1,2}Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tke.vgsha[at]mail.ru)

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена тем, что современные цифровые технологии, наряду с методами искусственного интеллекта (ИИ), широко используются в сельском хозяйстве для повышения его эффективности, продуктивности орошаемых агрофитоценозов в условиях засушливого климата. Опубликованные ранее обзоры являются слишком широкими и охватывают период до 2021 г. Современные аналитические исследования ограничены преимущественно использованием интеллектуальных применений дронов в сельском хозяйстве.

Материалы и методы включали мета-анализ технологий и методов ИИ, обеспечивающих повышение продуктивности орошаемых агрофитоценозов, ориентированных преимущественно на технические решения, защищенные патентами.

Результаты исследования позволили выявить ключевые направления использования информационных технологий ИИ, включая методы управления выращиванием, а также способы применения методов ML для подбора оптимальных параметров выращивания растений.

Ключевые слова: агрофитоценоз, цифровые технологии, засушливый климат, искусственный интеллект.

META-ANALYSIS OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND AI METHODS FOR INCREASING PRODUCTIVITY OF IRRIGATED AGROPHYTOCENOSES IN ARID CLIMATE

Research article

Rogachev A.F.¹, Tokarev K.E.²*¹ORCID : 0000-0002-3077-6622;²ORCID : 0000-0002-5548-5637;^{1,2}Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russian Federation

* Corresponding author (tke.vgsha[at]mail.ru)

Abstract

The relevance of the research is due to the fact that modern digital technologies, along with artificial intelligence (AI) methods, are widely used in agriculture to increase its efficiency and productivity of irrigated agrophytocenoses in arid climate. The previously published reviews are too broad and cover the period up to 2021. Modern analytical research is limited mainly to the application of intelligent drone applications in agriculture.

The materials and methods included a meta-analysis of AI technologies and methods that increase the productivity of irrigated agrophytocenoses, focused primarily on patent-protected technical solutions.

The results of the study made it possible to identify key areas of application of AI information technologies, including methods of crop management, as well as ways to use ML methods to select optimal parameters for growing plants.

Keywords: agrophytocenosis, digital technologies, arid climate, artificial intelligence.

Введение*Обоснование актуальности и постановка проблемы*

Современные цифровые технологии, наряду с методами ИИ, широко используются в сельском хозяйстве для повышения его эффективности. Разнообразие технологических приемов, биологических особенностей сортов, образующих агрофитоценозы, климатических особенностей природных зон возделывания требует соответствующего информационно-аналитического обеспечения [1], [2]. Это обуславливает необходимость и актуальность подготовки соответствующих тематических обзоров [3], [4], [6].

Опубликованные ранее обширные обзоры, например, авторов L.F.P. Oliveira, A.P. Moreira, M.F. Silva, являются слишком широкими и охватывает период до 2021 г. [7], а современное аналитическое исследование E. Khatab, H. Fawzy, A. Elbraway и др. [8] ограничено применением интеллектуальных применений дронов в сельском хозяйстве.

Отмеченные обстоятельства обусловили актуальность подготовки настоящего аналитического обзора, охватывающего современные цифровые технологии, и методы ИИ для повышения эффективности сельскохозяйственного производства.

Мета-анализ проблем повышения продуктивности орошаемых агрофитоценозов

Мета-анализ, как и систематический обзор, является элементом научной методологии. При его проведении интегрируются результаты различных исследований с целью выявления или проверки нескольких гипотез, для чего можно использовать опубликованные результаты, а также для выявления общих закономерностей [11].

В условиях засушливого климата, характерного для регионов Юга России [2], проблемы обеспечения устойчивости и повышения продуктивности орошаемых агрофитоценозов приобретают особое значение. Для решения этих проблем можно использовать цифровые технологии (ЦТ) точного земледелия и методы ИИ.

2.1. Обзор цифровых технологий повышения продуктивности орошаемых агрофитоценозов

Проведенный патентно-информационный поиск выявил, как наиболее релевантные, технические и технологические подходы к оценке и повышению урожайности сельскохозяйственных культур, представленные в таблице 1.

Таблица 1 - Технические решения повышения продуктивности агрофитоценозов
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.63.12.1>

№ РИД	Авторы	Технологический подход к оценке и повышению урожайности сельскохозяйственных культур
2439873	Е. Кондратенко и др., 2012	Урожайность яровой пшеницы: измеряют среднесуточную активную температуру и осадки в прогнозируемом периоде до даты прогноза
2661829	О. Рулева и др., 2018	Урожай и продуктивность орошаемых культур в лесозащищенных ландшафтах
2281644, A01G7/00	В. Потанин и др., 2006	$Y = Y_{\max} \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n K_{\phi} \cdot \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{W_i - W_{\min}}{W_{oi} - W_{\min}} \right)^{\alpha_1}} \right\}^2 + \left[1 - \left(\frac{t_i - t_{\min}}{t_{oi} - t_{\min}} \right)^{\alpha_2} \right]^2 \cdot K \right\}$
2770821	В. Романенков, В. Павлова, 2022	Учет комплекса метеопараметров в суточном разрешении $\lambda = \frac{1 + \frac{N_2}{N_2 + 1} (\bar{x} - x^{(2)}) \cdot C^{-1} (\bar{x} - x^{(2)})}{1 + \frac{N_1}{N_1 + 1} (\bar{x} - x^{(0)}) \cdot C^{-1} (\bar{x} - x^{(0)})}$
2733293, A01G7/00	В. Михельман и др., 2020	$Y = \left(\frac{v1}{v_{ср}} \times \frac{a1}{a_{ср}} \right) \times U_{ср} = (I_{п} \times I_{в}) \times U_{ср} = I_{общ} \times U_{ср}$
2 822 743, G06F17/40	А. Нечаев и др., 2024	Управление возделыванием зерновых с использованием ЦТ
2 758 768, G06Q10/06	С. Огнивцев, 2021	Управление производственными процессами с экспертными системами $\Theta = \{\Theta_1, \dots, \Theta_T-1\}$, содержащими пополняемые и модифицируемые базы знаний каждого из этапов

Отметим, что часть из них используют математические модели и числовые схемы для их реализации, включая ежесуточные.

2.2. Обзор методов ИИ, обеспечивающих повышение продуктивности орошаемых агрофитоценозов

Иерархия основных методов ИИ, обеспечивающие повышение продуктивности орошаемых агрофитоценозов [3], представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 - Применение методов ИИ в отраслях АПК

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.63.12.2>

Сфера применения методов ИИ в сельском хозяйстве постоянно растет. Глобальный рынок ИИ в сельском хозяйстве в 2022 году составлял \$1,25 млрд [3], а к 2030-му его размер прогнозируется в 8,3 млрд (рис. 2).

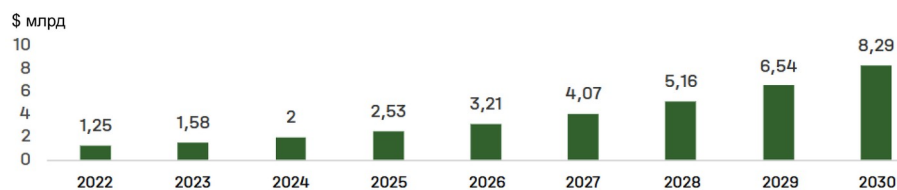


Рисунок 2 - Прогноз объема рынка ИИ в сельском хозяйстве

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.63.12.3>

Характерно, что наряду с созданием программно-аппаратных комплексов для реализации методов ИИ в сельском хозяйстве, появляются и патентуемые технические решения, использующие методы интеллектуального управления и ML (табл. 2).

Таблица 2 - Технические решения, защищающие применение методов ИИ для повышения продуктивности агрофитоценозов

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.63.12.4>

№ патента / а.с.	Авторы	Подход к оценке урожайности сельскохозяйственных культур
2723189, A01G7/00, G06N5/00	А. Никитин и др., 2019	Подбор оптимальных параметров выращивания растений методами ML
2688234, G06Q10/06	Сюй Цзисян, 2019	Интеллектуальное управление выращиванием: предусматривает стадии сбора данных, классификации-маркировки и стадию регулирования
2724075, G06F21/50; G06N20/00; G05B23/0243	А. Лаврентьев и др., 2020	Система и способ определения источника аномалии в кибер-физической системе, обладающей определенными характеристиками

Следовательно, можно ожидать появление новых патентов, в том числе на изобретения в области кибер-физических систем (КФС), обеспечивающих более надежную защиту авторских прав, чем регистрация программ для ЭВМ.

Основные результаты

Анализ и систематизация выявленных технических решений позволили выявить следующие направления использования ЦТ:

- прогнозирование урожайности зерновых культур (для яровой пшеницы – измеряют среднесуточную активную температуру и осадки в прогнозируемом периоде до даты прогноза);
- в лесозащищенных ландшафтах — повышение урожая и продуктивности орошаемых культур; учет комплекса метеопараметров в суточном разрешении на основе отношения правдоподобия;
- поэтапное управление производственными процессами с экспертными системами, содержащими пополняемые и модифицируемые базы знаний каждого из этапов [12].

Технические решения, защищающие применение методов ИИ для повышения продуктивности агрофитоценозов, включают методы интеллектуального управления выращиванием, предусматривающие стадии сбора данных, классификации-маркировки и стадию регулирования, а также устройства для их реализации.

Кроме того, возможно применение методов ML для подбора оптимальных параметров выращивания растений.

Обсуждение

Проведенные патентно-информационные исследования позволили выполнить аналитический обзор средств ИИ и ЦТ в растениеводстве, результаты которого включают следующие направления их использования:

- поэтапное управление производственными процессами агрофитоценозов с использованием экспертных систем, содержащих пополняемые и модифицируемые базы знаний каждого из этапов;
- прогнозирование урожайности зерновых культур посредством измерения среднесуточных активных температур и осадков в прогнозируемом периоде с учетом даты прогноза [12];
- в лесозащищенных ландшафтах — повышение урожая и продуктивности орошаемых культур.

Заключение

Технические решения, защищающие применение методов ИИ для повышения продуктивности агрофитоценозов, включают методы интеллектуального управления выращиванием, предусматривающие стадии сбора данных, классификации-маркировки и стадию регулирования, а также применение методов ML [9] и нейро-нечетких подходов [10] и КФС для подбора оптимальных параметров выращивания сельскохозяйственных растений.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20019, <https://rscf.ru/project/25-21-20019/> и Волгоградской области.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 25-21-20019, <https://rscf.ru/project/25-21-20019/> and the Volgograd region.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Михайленко И.М. Оценивание параметров состояния биомассы корнеплодных культур по данным дистанционного зондирования Земли / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2025. — Т. 22. — № 3. — С. 161–170. — DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-161-170.
2. Мелихова Е.В. Подготовка ретроспективных данных для нейросетевой системы управления программируемым аграрным производством в засушливых условиях волгоградской области / Е.В. Мелихова, А.Ф. Рогачев // International Agricultural Journal. — 2020. — Т. 63. — № 2. — 19 с. — DOI: 10.24411/2588-0209-2020-10162.
3. Волкова Е.Д. Передовые интеллектуальные решения в сельском хозяйстве : экспертно-аналитический доклад / Е.Д. Волкова, Л.Р. Гимадинова, К.Т. Еременко [и др.]. — Санкт-Петербург, 2023. — 69 с.
4. Соловьев Д.А. Цифровые технологии и интеллектуальные системы управления оросительным комплексом с учетом фактических влагозапасов / Д.А. Соловьев, Г.Н. Камышова, Д.А. Колганов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2021. — № 1 (61). — С. 368–379. — DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-35.
5. Mihalache D.B. Intelligent systems used in modern agriculture / D.B. Mihalache, N.A. Vanghele, A.A. Petre [et al.] // Annals of the University of Craiova. Agriculture, Montanology, Cadastre Series. — 2020. — Vol. 51. — № 2. — P. 367–372. — DOI: 10.52846/aamc.2021.02.44.
6. Aminu R. Improving the performance of machine learning algorithms for detection of individual pests and beneficial insects using feature selection techniques / R. Aminu, S.M. Cook, D. Ljungberg [et al.] // Artificial Intelligence in Agriculture. — 2025. — Vol. 15. — Issue 3. — P. 377–394. — DOI: 10.1016/j.iaia.2025.03.008.
7. Oliveira L.F.P. Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead / L.F.P. Oliveira, A.P. Moreira, M.F. Silva // Robotics. — 2021. — Vol. 10. — № 2. — 52 p. — DOI: 10.3390/robotics10020052.
8. Khatab E. A Systematic Review: Computer Vision Algorithms in Drone Surveillance / E. Khatab, H. Fawzy, A. Elbraway [et al.] // Robotics: Integration, Manufacturing and Control. — 2025. — Vol. 2. — Issue 1. — P. 1–10. — DOI: 10.21622/RIMC.2025.02.1.1149.
9. Tokarev K.E. The intelligent analysis system and remote sensing images segmentation engineering by using methods of advanced machine learning and neural network modeling / K.E. Tokarev, Yu.A. Orlova, A.F. Rogachev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. — Vol. 734. — 12124 p. — DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012124.
10. Tokarev K.E. Crops reclamation management based on hybrid neuro-fuzzy systems / K.E. Tokarev, Yu.A. Orlova, A.F. Rogachev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : conference proceedings. — Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. — Vol. 421. — 42015 p. — DOI: 10.1088/1755-1315/421/4/042015.
11. Martimbiano A.L.C. How to prepare a systematic review and meta-analysis: the methodological approach / A.L.C. Martimbiano // Motriz. Revista de Educacao Fisica. — 2021. — Vol. 27. — DOI: 10.1590/s1980-657420210000227.
12. Кирейчева Л.В. Научное и технологическое развитие комплексных мелиораций / Л.В. Кирейчева, Д.А. Рогачев, В.М. Яшин [и др.]. — Москва : Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова, 2025. — 230 с. — DOI: 10.37738/VNIIGIM.2025.53.94.001.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Mikhailenko I.M. Otsenivanie parametrov sostoyaniya biomassy korneplodnykh kultur po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Estimation of the parameters of the state of biomass of root crops using remote sensing data] / I.M. Mikhailenko, V.N. Timoshin // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space]. — 2025. — Vol. 22. — № 3. — P. 161–170. — DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-161-170. [in Russian]

2. Melikhova E.V. Podgotovka retrospektivnykh dannykh dlya neirosetevoi sistemy upravleniya programmiruemym agrarnym proizvodstvom v zasushlivykh usloviyakh volgogradskoi oblasti [Preparation of retrospective data for a neural network management system for programmed agricultural production in arid conditions of the Volgograd region] / E.V. Melikhova, A.F. Rogachev // *International Agricultural Journal*. — 2020. — Vol. 63. — № 2. — 19 p. — DOI: 10.24411/2588-0209-2020-10162. [in Russian]
3. Peredovye intellektual'nye resheniya v sel'skom khozyaistve [Advanced intelligent solutions in agriculture] : expert-analytical report / E.D. Volkova, L.R. Gimadinova, K.T. Eremenko [et al.]. — Saint Petersburg, 2023. — 69 p. [in Russian]
4. Solovyev D.A. Tsifrovye tekhnologii i intellektual'nye sistemy upravleniya orositel'nykh kompleksom s uchetom fakticheskikh vlagozapasov [Digital technologies and intelligent control systems of the irrigation complex taking into account the actual moisture reserves] / D.A. Solovyev, G.N. Kamyshova, D.A. Kolganov [et al.] // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education]. — 2021. — № 1 (61). — P. 368–379. — DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-35. [in Russian]
5. Mihalache D.B. Intelligent systems used in modern agriculture / D.B. Mihalache, N.A. Vanghele, A.A. Petre [et al.] // *Annals of the University of Craiova. Agriculture, Montanology, Cadastre Series*. — 2020. — Vol. 51. — № 2. — P. 367–372. — DOI: 10.52846/aamc.2021.02.44.
6. Aminu R. Improving the performance of machine learning algorithms for detection of individual pests and beneficial insects using feature selection techniques / R. Aminu, S.M. Cook, D. Ljungberg [et al.] // *Artificial Intelligence in Agriculture*. — 2025. — Vol. 15. — Issue 3. — P. 377–394. — DOI: 10.1016/j.aiia.2025.03.008.
7. Oliveira L.F.P. Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead / L.F.P. Oliveira, A.P. Moreira, M.F. Silva // *Robotics*. — 2021. — Vol. 10. — № 2. — 52 p. — DOI: 10.3390/robotics10020052.
8. Khatab E. A Systematic Review: Computer Vision Algorithms in Drone Surveillance / E. Khatab, H. Fawzy, A. Elbraway [et al.] // *Robotics: Integration, Manufacturing and Control*. — 2025. — Vol. 2. — Issue 1. — P. 1–10. — DOI: 10.21622/RIMC.2025.02.1.1149.
9. Tokarev K.E. The intelligent analysis system and remote sensing images segmentation engineering by using methods of advanced machine learning and neural network modeling / K.E. Tokarev, Yu.A. Orlova, A.F. Rogachev [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. — Vol. 734. — 12124 p. — DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012124.
10. Tokarev K.E. Crops reclamation management based on hybrid neuro-fuzzy systems / K.E. Tokarev, Yu.A. Orlova, A.F. Rogachev [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : conference proceedings*. — Krasnoyarsk : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. — Vol. 421. — 42015 p. — DOI: 10.1088/1755-1315/421/4/042015.
11. Martimbianco A.L.C. How to prepare a systematic review and meta-analysis: the methodological approach / A.L.C. Martimbianco // *Motriz. Revista de Educacao Fisica*. — 2021. — Vol. 27. — DOI: 10.1590/s1980-657420210000227.
12. Kireicheva L.V. Nauchnoe i tekhnologicheskoe razvitie kompleksnykh melioratsii [Scientific and technological development of complex land reclamation] / L.V. Kireicheva, D.A. Rogachev, V.M. Yashin [et al.]. — Moscow : Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 2025. — 230 p. — DOI: 10.37738/VNIIGIM.2025.53.94.001. [in Russian]