

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО/GENERAL AGRICULTURE AND CROP PRODUCTION

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.3>

ОНТОЛОГИЯ КЛАССОВ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ПРОЦЕССЕ ВЕГЕТАЦИИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Научная статья

Токарев К.Е.^{1,*}, Рогачев А.Ф.², Чамурлиев Г.О.³

¹ ORCID : 0000-0002-5548-5637;

² ORCID : 0000-0002-3077-6622;

³ ORCID : 0000-0002-6410-8438;

^{1, 2, 3} Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Российская Федерация

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

Аннотация

Актуальность исследования. Развитие цифровых информационных технологий, методов искусственного интеллекта и искусственных нейронных сетей обуславливает возможность их прикладного применения в различных отраслях народного хозяйства, в том числе сельском.

Объект исследования. Объектом исследования являются цветные изображения посевов озимых зерновых культур в процессе вегетации (фаза — кущение) и экспертно-аналитический анализ инфографических признаков наличия отклонений и дефектов их развития.

Материалы и методы. Для формирования обучающей, тестовой и проверочной выборок использовались цветные изображения высокого разрешения, полученные с использованием камер 4K. Описание классов базируется на типовых признаках роста и развития озимой пшеницы в одну из критических фаз роста (кущение), а также цветоколеристических признаках, идентифицированных в ходе экспертно-аналитического анализа имеющегося набора изображений.

Результаты и выводы. В ходе исследования сформирована онтология классов RGB-изображений посевов озимой пшеницы для обучения моделей ИИ (с учетом признаков дефектов развития), включающая следующие классы: оптимальное развитие («optimal plants»), локальное компенсаторное развитие («local compensatory development»), ослабленные, угнетенные растения и/или их частичное отсутствие («oppressed plants»).

Ключевые слова: онтология классов, агрофитоценозы, инфографические признаки, искусственный интеллект, нейронные сети.

CLASS ONTOLOGY OF COLOURED IMAGES OF GRAIN CROPS DURING VEGETATION FOR TRAINING AND TESTING NEURAL NETWORK MODELS

Research article

Tokarev K.E.^{1,*}, Rogachev A.F.², Chamurliev G.O.³

¹ ORCID : 0000-0002-5548-5637;

² ORCID : 0000-0002-3077-6622;

³ ORCID : 0000-0002-6410-8438;

^{1, 2, 3} Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russian Federation

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

Abstract

Research relevance. The development of digital information technologies, artificial intelligence methods, and artificial neural networks has led to their practical application in various sectors of the economy, including agriculture.

Research object. The object of the study is colour images of winter grain crops during vegetation (tillering phase) and expert analytical analysis of infographic signs of deviations and defects in their development.

Materials and methods. High-resolution colour images obtained using 4K cameras were used to generate training, test and verification samples. The description of the classes is based on typical signs of growth and development of winter wheat in one of the critical growth phases (tillering), as well as colour characteristics identified during expert analysis of the available set of images.

Results and conclusions. During the study, an ontology of RGB image classes of winter wheat crops was formed for training AI models (taking into account signs of developmental defects), including the following classes: optimal development ('optimal plants'), local compensatory development ('local compensatory development'), weakened, oppressed plants and/or their partial absence ('oppressed plants').

Keywords: class ontology, agrophytocenoses, infographic features, artificial intelligence, neural networks.

Введение

Развитие цифровых информационных технологий, методов искусственного интеллекта (ИИ) и искусственных нейронных сетей (ИНС) обуславливает возможность их прикладного применения в различных отраслях народного хозяйства, в том числе сельском. В Российской Федерации реализуется целый ряд государственных программ для развития современного высокоэффективного сельского хозяйства, в частности, ключевой задачей является переход к цифровому сельскому хозяйству, точному земледелию, активному использованию интеллектуальных технологий в

АПК. Согласно посланию Президента Российской Федерации Федеральному Собранию от 29.02.2024 «В современных условиях повышение эффективности всех сфер производительности труда неразрывно связано с цифровизацией, с использованием технологий искусственного интеллекта» и национального проекта «Экономика данных» важнейшим вектором развития и интенсификации сельскохозяйственного производства является разработка и внедрение систем искусственного интеллекта все отрасли народного хозяйства, в том числе сельского [1], [2], [3].

Проблемы повышения продуктивности агрофитоценозов с использованием методов ИИ и цифровых технологий рассмотрены в работах ведущих исследователей, в том числе академиков и член-корреспондентов РАН А.И. Иванова [4], [5], В.В. Бородычева [6], [7], Д.А. Иванова [8], [9], В.В. Якушева [10], [11], В.Е. Щедрина [12] проф. И.М. Михайленко [13], В.И. Трухачева [14], а также других отечественных и зарубежных ученых. Несмотря на широкое освещение рассматриваемой проблемы, дополнительного обоснования требует практическая реализация интеллектуальных технологий оперативного мониторинга роста и развития агрофитоценозов с применением БПЛА в условиях рискованного земледелия с применением ИНС.

В отечественном растениеводстве задачи дистанционного мониторинга состояния посевов полевых культур с применением БПЛА различного типа приобретают все большее значение для оперативного выявления проблемных (имеющих отклонения развития) участков различного происхождения и принятия своевременных управленческих решений по организации агротехнологических мероприятий. Использование моделей ИИ, в том числе нейронных сетей, для анализа данных дистанционного мониторинга по цветным или мультиспектральным изображениям посевов является весьма эффективным методом оперативного контроля роста и развития агрокультур, особенно в критические фазы развития, однако требует формирования качественных и структурированных наборов данных (обучающих и валидационных выборок).

В работах [15], [16] представлено обоснование эффективности применения онтологического подхода в некоторых предметных областях. В то же время, вопросы применения онтологического подхода для решения задач оптимизации различных систем, требуют дальнейшего решения.

Качество и разнообразие обучающих данных напрямую влияют на эффективность обучения моделей ИИ, в том числе нейронных сетей. Для успешного обучения моделей искусственных нейронных сетей, способных решать задачи классификации, обнаружения и сегментации объектов на изображениях посевов полевых однолетних культур, получаемых с БПЛА, необходимо сформировать определенные классы, отражающие различные состояния растений, а также понимать их иерархию и взаимосвязи.

Материалы и методы

Для формирования обучающей, тестовой и проверочной выборок использовались цветные изображения высокого разрешения, полученные с использованием камер 4К. Типовые изображения посевов озимой пшеницы (фаза кущение), формируемого набора данных представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 - Типовые изображения посевов озимой пшеницы на опытных участках УНПЦ «Горная поляна»

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.3.1>

Формирование набора данных для обучения и тестирования моделей машинного обучения и ИНС в растениеводстве является критически важным этапом, определяющим уровень достоверности и оперативности получаемых результатов в задачах оперативного мониторинга посевов однолетних полевых культур, в том числе озимой пшеницы (рисунок 2).

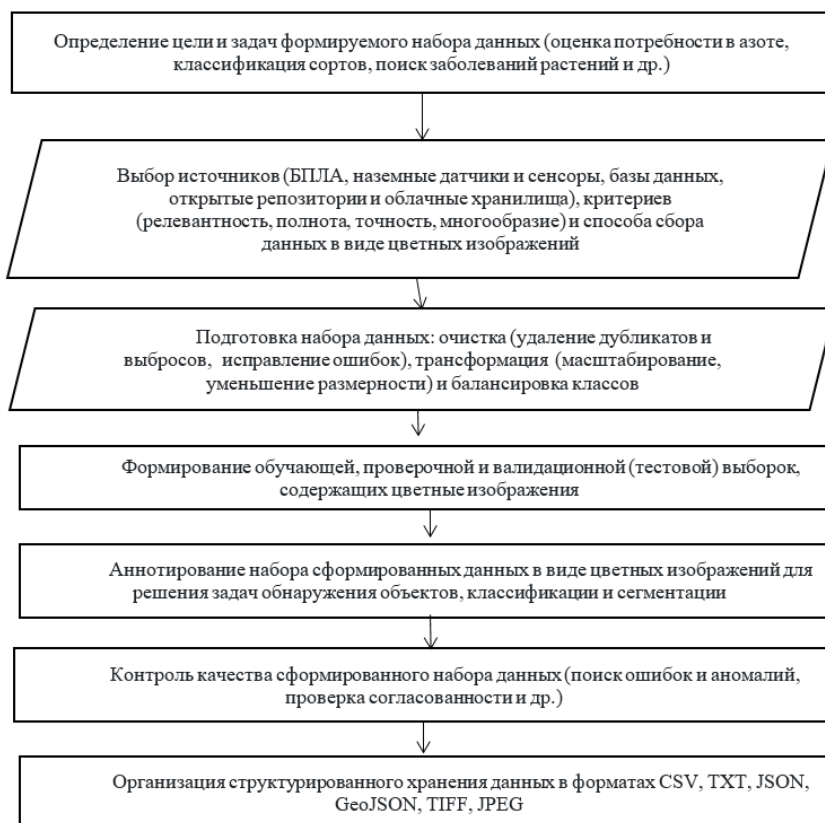


Рисунок 2 - Алгоритм формирования набора данных для обучения моделей ИИ, применяемых в растениеводстве
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.3.2>

Качество и репрезентативность сформированного набора данных напрямую влияют на точность, надежность и масштабируемость разработанных моделей искусственного интеллекта.

В таблице 1 представлены выделенные классы RGB-изображений посевов озимой пшеницы, предназначенные для формирования обучающей и валидационной выборок. Описание классов базируется на типовых признаках роста и развития озимой пшеницы в одну из критических фаз роста (кущение), а также цветоколеристических признаках, идентифицированных в ходе экспертно-аналитического анализа имеющегося набора изображений.

Таблица 1 - Формируемые классы RGB-изображений посевов озимой пшеницы для обучения моделей ИИ (на основе признаков роста и развития)

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.3.3>

Формируемый класс	Типовые признаки роста и развития	Атрибут	Цветокolorистические признаки
Оптимальное развитие («optimal plants»)	Здоровое развитие растения в критическое фазе роста (кущение, выход в трубку)	Цвет листьев: зеленый (оттенки); Текстура листьев: гладкая Форма растения: характерная для фазы кушения; Наличие признаков заболеваний: отсутствуют; Наличие вредителей: отсутствуют; Наличие признаков угнетения: отсутствуют; Наличие признаков угнетения: отсутствуют.	Равномерные, густые всходы, хорошо выраженное кушение, однородный зелёный цвет.
Локальное компенсаторное развитие («local compensatory development»)	Участки, демонстрирующие более активное развитие (увеличенное число побегов или плотность стеблей) за счёт меньшей конкуренции — компенсация прорех или разреженных участков.	Цвет листьев: зеленый (оттенки); Текстура листьев: гладкая; Форма растения: характерная для фазы кушения, неравномерного кушения; Наличие признаков дефицита питания: отсутствуют; Наличие признаков угнетения: присутствуют.	Сгущение побегов на небольших участках (1–3 м ²), чаще на границах между хорошо развитыми и разреженными зонами, местами осветлённая окраска листьев, локально равномерный зеленый цвет
Ослабленные, угнетенные растения и/или их частичное отсутствие («Oppressed plants»)	Ослабленные, редкие всходы, местами прорехи, разная степень развития кущений, или его отсутствие, варьирующаяся плотность	Цвет листьев: зеленый (оттенки); Текстура листьев: гладкая; Форма растения: характерная для фазы кушения, неравномерного кушения; Наличие признаков дефицита питания: отсутствуют; Наличие признаков стресса/угнетения: присутствуют.	Редкие всходы, осветлённая окраска листьев, слабое кушение или его отсутствие, полностью оголённые участки между рядами или в рядах.

В наиболее общем виде, онтологию можно записать в виде [17], [20]:

$$O = \langle K, R, \Phi \rangle$$

где:

K — множество концептов предметной области;

R — множество отношений между концептами;

Φ — множество интерпретирующих функций.

Ограничениями на компоненты онтологии являются – конечность и не пустота множества K , при этом множества R и Φ в частных случаях могут быть и пустыми.

Таблица 2 - Типовые аннотированные изображения посевов озимой пшеницы (стадия кущение) формируемого набора данных

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.3.4>

Формируемый класс	Типовое аннотированное изображение
Оптимальное развитие («optimal plants»)	
Ослабленные, угнетенные растения и/или их частичное отсутствие («Oppressed plants»)	
Локальное компенсаторное развитие («local compensatory development»)	

Для хранения исходных и размеченных RGB-изображений посевов зимой пшеницы осуществлено проектирование реляционной базы данных, концептуальная модель которой представлена на рисунке 3.

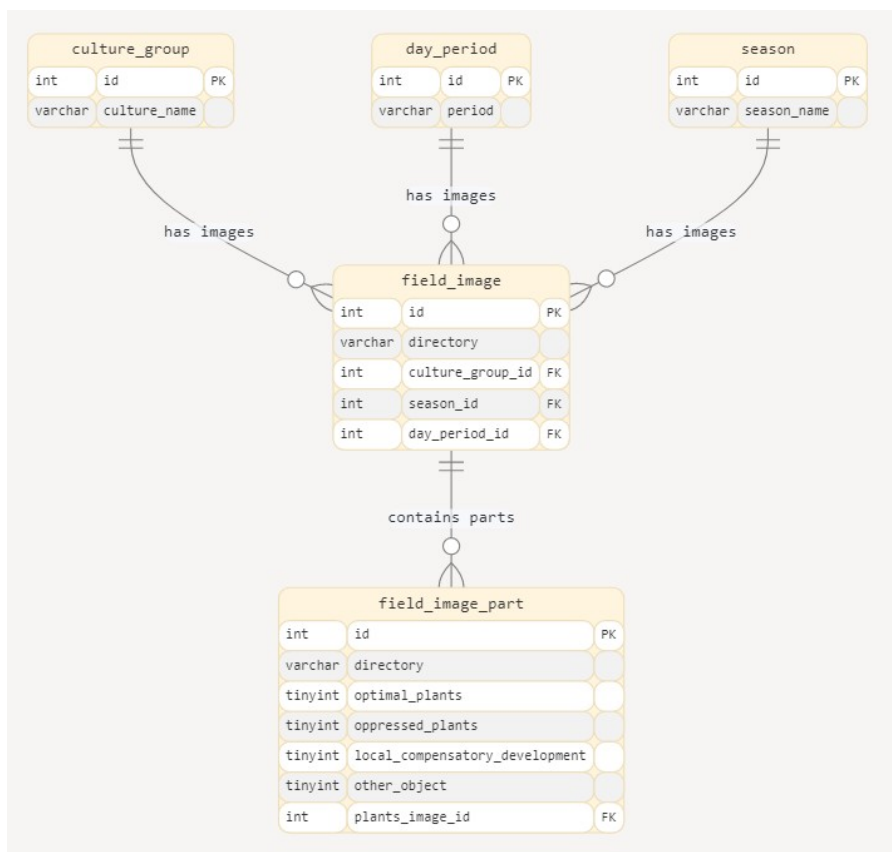


Рисунок 3 - Концептуальная модель базы данных хранения исходных и аннотированных изображений
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.3.5>

Структура формируемой базы данных содержит следующие сущности (таблицы) и атрибуты:

1. Таблица «Группы зерновых культур» (яровая, озимая пшеница, ячмень и др.) хранит информацию о группах культур, включая - «id» — уникальный идентификатор вида культуры; - «culture_name» — название зерновой культуры.

2. Таблица «Фазы вегетации» определяет периоды вегетации и фазы роста культуры, включая: «id» — уникальный идентификатор фазы вегетации; «vegetation period» — фазы вегетации.

3. Таблица «Сезон (период съемки)» — хранит информацию о сезонах и периодах аэрофотосъемки, включая: «id» — идентификатор уникальный идентификатор; - «season_name» — название сезона; «period_name» — название периода.

4. Таблица «Изображения посевов» — хранит информацию об изображениях посевов однолетних полевых культур, включая: «id» — уникальный идентификатор изображения; «directory» — путь к изображению, а также внешние ключи на все остальные таблицы.

5. Таблица размеченных (аннотированных) изображений — хранит детальную информацию о частях изображений, включая специализированные поля (выделенные классы): «optimal plants» — оптимальные растения, «oppressed plants» — угнетенные растения, «local compensatory development» — местное компенсаторное развитие, «other object» — другие объекты и др.

Таким образом, сформирована онтология классов RGB-изображений посевов зерновых культур в критические фазы роста, которую можно использовать для обучения и тестирования нейросетевых моделей, ориентированных на распознавание состояния всходов растения озимых культур после перезимовки.

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие результаты:

1. На основе применения системного подхода выявлены основные классы, характеризующие состояние озимых зерновых культур, которые необходимо учитывать при построении и оптимизации интеллектуальной системы.

2. Сформирована системная онтология классов RGB-изображений посевов озимых зерновых культур в процессе вегетации (включающая критические фазы роста), которую можно использовать для обучения и тестирования нейросетевых моделей, ориентированных на распознавание состояния всходов растения озимых культур после перезимовки.

3. Сформированная системная онтология классов цветных изображений посевов озимой пшеницы, позволяет реализовать интеллектуальную систему мультиклассового распознавания агрономического состояния посевов по изображениям, получаемым с БПЛА.

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 study was supported by the Russian Science Foundation grant 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. Токарев К.Е. Онтология классов цветных изображений посевов сельскохозяйственных культур для обучения и тестирования моделей искусственных нейронных сетей со сверточными слоями / К.Е. Токарев, Н.И. Лебедь, Е.В. Токарева [и др.] // *Journal of Agriculture and Environment*. — 2023. — № 12(40). — DOI: 10.23649/JAE.2023.40.30.
2. Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 29.02.2024 «Послание Президента Федеральному Собранию». — URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/messages/73585> (дата обращения: 29.06.2024).
3. Токарев К.Е. Проектирование интеллектуальной цифровой платформы по идентификации болезней растений и нормализации их роста «Агромир»: разработка визуальных компонентов и формирование datasets / К.Е. Токарев, Н.И. Лебедь, Н.А. Александрова [и др.] // *Journal of Agriculture and Environment*. — 2024. — № 4(44). — DOI: 10.23649/JAE.2024.44.4.
4. Ivanov A.I. Methodology of the Agrophysical Institute's Modern System of Field Experiments / A.I. Ivanov, Z.A. Ivanova // *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*. — P. 529–546. — ISBN 978-3-030-67448-9. — DOI: 10.1007/978-3-030-67448-9_26.
5. Ivanov A.I. Environmental Landscape Conditions of the Russian Northwest, the Fertility of Sod-Podsolic Soils and the Efficiency of Precise Fertilizer Systems / A.I. Ivanov, Z.A. Ivanova, A.A. Konashev // *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes*. — P. 349–372. — ISBN 978-3-030-67448-9. — DOI: 10.1007/978-3-030-67448-9_15.
6. Бородычев В.В. Обобщенная модель автоматизированной информационной системы мониторинга и управления орошением в режиме реального времени / В.В. Бородычев, М.Н. Лытов // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. — 2017. — № 1(45). — С. 161–170.
7. Бородычев В.В. Варианты системной компоновки конструктивно-функциональных модулей системы мониторинга и управления орошением в режиме реального времени / В.В. Бородычев, М.Н. Лытов, О.В. Бочарникова // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. — 2019. — № 3(55). — С. 369–380. — DOI 10.32786/2071-9485-2019-03-46.
8. Иванов Д.А. Прогнозирование размещения посевов льна на основе данных мониторинга и ГИС-технологий / Д.А. Иванов, М.В. Рублюк, О.Н. Анциферова // *Земледелие*. — 2023. — № 7. — С. 3–6. — DOI 10.24412/0044-3913-2023-7-3-6.
9. Иванов Д.А. Исследование динамики урожайности трав в пределах агроландшафта на основе долговременного мониторинга / Д.А. Иванов, О.В. Карасева, М.В. Рублюк [и др.] // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. — 2022. — Т. 23, № 2. — С. 221–229. — DOI 10.30766/2072-9081.2022.23.2.221-229.
10. Якушев В.В. Структуризация агротехнологических знаний для построения онтологий в растениеводстве / В.В. Якушев // *Земледелие*. — 2022. — № 7. — С. 3–7. — DOI 10.24412/0044-3913-2022-7-3-7.
11. Якушев В.В. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии / В.В. Якушев, В.П. Якушев, Д.А. Матвеев // *Земледелие*. — 2020. — № 1. — С. 33–37.
12. Подлипов В.В. Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям / В.В. Подлипов, В.Н. Щедрин, А.Н. Бабичев [и др.] // *Компьютерная оптика*. — 2018. — Т. 42, № 5. — С. 877–884. — DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-877-884.
13. Михайленко И.М. Развитие методов и средств применения данных дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве / И.М. Михайленко // *Тенденции развития науки и образования*. — 2018. — № 41-3. — С. 70–83.
14. Бородычев В.В. Обобщенная модель автоматизированной информационной системы мониторинга и управления орошением в режиме реального времени / В.В. Бородычев, М.Н. Лытов // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. — 2017. — № 1(45). — С. 161–170.
15. Скобелев П.О. Прогнозирование развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений / П.О. Скобелев, В.А. Галузин, А.В. Галицкая // *Онтология проектирования*. — 2025. — Т. 15, № 2(56). — С. 211–227.
16. Skobelev P. Multi-agent digital twin of broccoli: development and test evaluation / P. Skobelev, A. Tabachinskiy, E. Simonova [et al.] // *Procedia Computer Science*. — 2025. — Vol. 252. — P. 674–683. — DOI 10.1016/j.procs.2025.01.027.
17. Rogachev A.F. A systematic approach to ontology construction for automating the scheduling of a multilevel university / A.F. Rogachev, D.S. Zakharov // *PFUR Journal of Engineering Research*. — 2025. — Vol. 26, № 1. — P. 39–51. — DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-39-51.
18. Tokarev K. Monitoring and Intelligent Management of Agrophytocenosis Productivity Based on Deep Neural Network Algorithms / K. Tokarev [et al.] // *Intelligent Computing & Optimization. ICO 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*. — 2023. — Vol. 569. — P. 678–689. — DOI: 10.1007/978-3-031-19958-5_65.

19. Рогачев А.Ф. Исследование развития и продуктивности сельскохозяйственных культур с применением беспилотных летательных аппаратов / А.Ф. Рогачев, Е.В. Мелихова, И.С. Белоусов // Известия НВ АУК. — 2020. — № 3(59). — С. 397–406. — DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-49.

20. Рогачев А.Ф. Системный подход к построению онтологии для автоматизации составления расписания многоуровневого вуза / А.Ф. Рогачев, Д.С. Захаров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2025. — Т. 26, № 1. — С. 39–51. — DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-39-51.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618970 Российская Федерация. Информационно-аналитическая система для идентификации болезней культурных растений с WEB-интерфейсом : заявл. 07.04.2025 : опубл. 11.04.2025 / К.Е. Токарев, Е.В. Мелихова, А.Ф. Рогачев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет».

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619912 Российская Федерация. Поддержка принятия решений по активизации роста культурных растений с формированием рекомендаций по их биозащите : заявл. 07.04.2025 : опубл. 18.04.2025 / Е.В. Мелихова, К.Е. Токарев, А.Ф. Рогачев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет».

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tokarev K.E. Ontologiya klassov tsvetnykh izobrazhenii posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur dlya obucheniya i testirovaniya modelei iskusstvennykh neuronnykh setei so svertochemymi sloyami [Ontology of color image classes of agricultural crops for training and testing artificial neural network models with convolutional layers] / K.E. Tokarev, N.I. Lebed', E.V. Tokareva [et al.] // Journal of Agriculture and Environment. — 2023. — № 12(40). — DOI: 10.23649/JAE.2023.40.30. [in Russian]

2. Poslanie Prezidenta RF Federal'nomu Sobraniyu ot 29.02.2024 «Poslanie Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu» [Message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly of February 29, 2024 "Message of the President to the Federal Assembly"]. — URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/messages/73585> (accessed: 29.06.2024). [in Russian]

3. Tokarev K.E. Proektirovanie intellektual'noi tsifrovoy platformy po identifikatsii boleznei rastenii i normalizatsii ikh rosta «Agromir»: razrabotka vizual'nykh komponentov i formirovanie datasets [Designing the intelligent digital platform "Agromir" for plant disease identification and growth normalization: development of visual components and dataset formation] / K.E. Tokarev, N.I. Lebed', N.A. Aleksandrina [et al.] // Journal of Agriculture and Environment. — 2024. — № 4(44). — DOI: 10.23649/JAE.2024.44.4. [in Russian]

4. Ivanov A.I. Methodology of the Agrophysical Institute's Modern System of Field Experiments / A.I. Ivanov, Z.A. Ivanova // Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. — P. 529–546. — ISBN 978-3-030-67448-9. — DOI: 10.1007/978-3-030-67448-9_26.

5. Ivanov A.I. Environmental Landscape Conditions of the Russian Northwest, the Fertility of Sod-Podsolic Soils and the Efficiency of Precise Fertilizer Systems / A.I. Ivanov, Z.A. Ivanova, A.A. Konashev // Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. — P. 349–372. — ISBN 978-3-030-67448-9. — DOI: 10.1007/978-3-030-67448-9_15.

6. Borodychev V.V. Obobshchennaya model' avtomatizirovannoi informatsionnoi sistemy monitoringa i upravleniya orosheniem v rezhime real'nogo vremeni [Generalized model of an automated information system for real-time irrigation monitoring and control] / V.V. Borodychev, M.N. Lytov // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2017. — № 1(45). — P. 161–170. [in Russian]

7. Borodychev V.V. Varianty sistemnoy komponovki konstruktivno-funktsional'nykh moduley sistemy monitoringa i upravleniya orosheniem v rezhime real'nogo vremeni [Options for system configuration of structural and functional modules of a real-time irrigation monitoring and control system] / V.V. Borodychev, M.N. Lytov, O.V. Bocharnikova // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2019. — № 3(55). — P. 369–380. — DOI 10.32786/2071-9485-2019-03-46. [in Russian]

8. Ivanov D.A. Prognozirovanie razmeshcheniya posevov l'na na osnove dannykh monitoringa i GIS-tekhnologiy [Forecasting flax crop placement based on monitoring data and GIS technologies] / D.A. Ivanov, M.V. Rublyuk, O.N. Antsiferova // Zemledelie [Agriculture]. — 2023. — № 7. — P. 3–6. — DOI 10.24412/0044-3913-2023-7-3-6. [in Russian]

9. Ivanov D.A. Issledovanie dinamiki urozhaynosti trav v predelakh agrolandshafta na osnove dolgovremennogo monitoringa [Study of grass yield dynamics within an agricultural landscape based on long-term monitoring] / D.A. Ivanov, O.V. Karaseva, M.V. Rublyuk [et al.] // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka [Agricultural Science of the Euro-North-East]. — 2022. — Vol. 23, № 2. — P. 221–229. — DOI 10.30766/2072-9081.2022.23.2.221-229. [in Russian]

10. Yakushev V.V. Strukturizatsiya agrotekhnologicheskikh znaniy dlya postroeniya ontologiy v rastenievodstve [Structuring agrotechnological knowledge for building ontologies in crop production] / V.V. Yakushev // Zemledelie [Agriculture]. — 2022. — № 7. — P. 3–7. — DOI 10.24412/0044-3913-2022-7-3-7. [in Russian]

11. Yakushev V.V. Intellektual'nye sistemy podderzhki tekhnologicheskikh resheniy v tochnom zemledelii [Intelligent systems for supporting technological decisions in precision agriculture] / V.V. Yakushev, V.P. Yakushev, D.A. Matveenko // Zemledelie [Agriculture]. — 2020. — № 1. — P. 33–37. [in Russian]

12. Podlipnov V.V. Eksperimental'noe opredelenie vlazhnosti pochvy po giperspektral'nym izobrazheniyam [Experimental determination of soil moisture from hyperspectral images] / V.V. Podlipnov, V.N. Shchedrin, A.N. Babichev [et

al.] // Komp'yuternaya optika [Computer Optics]. — 2018. — Vol. 42, № 5. — P. 877–884. — DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-877-884. [in Russian]

13. Mikhaylenko I.M. Razvitie metodov i sredstv primeneniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli v sel'skom khozyaystve [Development of methods and tools for using remote sensing data in agriculture] / I.M. Mikhaylenko // Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya [Trends in Science and Education Development]. — 2018. — № 41-3. — P. 70–83. [in Russian]

14. Borodychev V.V. Obobshchennaya model' avtomatizirovannoy informatsionnoy sistemy monitoringa i upravleniya orosheniem v rezhime real'nogo vremeni [Generalized model of an automated information system for real-time irrigation monitoring and control] / V.V. Borodychev, M.N. Lytov // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2017. — № 1(45). — P. 161–170. [in Russian]

15. Skobelev P.O. Prognozirovaniye razvitiya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v tsifrovom dvoinike posevov rasteniy [Forecasting the development of agricultural crops in a digital twin of plant crops] / P.O. Skobelev, V.A. Galuzin, A.V. Galitskaya // Ontologiya proektirovaniya [Ontology of Designing]. — 2025. — Vol. 15, № 2(56). — P. 211–227. [in Russian]

16. Skobelev P. Multi-agent digital twin of broccoli: development and test evaluation / P. Skobelev, A. Tabachinskiy, E. Simonova [et al.] // Procedia Computer Science. — 2025. — Vol. 252. — P. 674–683. — DOI 10.1016/j.procs.2025.01.027.

17. Rogachev A.F. A systematic approach to ontology construction for automating the scheduling of a multilevel university / A.F. Rogachev, D.S. Zakharov // PFUR Journal of Engineering Research. — 2025. — Vol. 26, № 1. — P. 39–51. — DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-1-39-51.

18. Tokarev K. Monitoring and Intelligent Management of Agrophytocenosis Productivity Based on Deep Neural Network Algorithms / K. Tokarev [et al.] // Intelligent Computing & Optimization. ICO 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. — 2023. — Vol. 569. — P. 678–689. — DOI: 10.1007/978-3-031-19958-5_65.

19. Rogachev A.F. Issledovanie razvitiya i produktivnosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur s primeneniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Study of the development and productivity of agricultural crops using unmanned aerial vehicles] / A.F. Rogachev, E.V. Melikhova, I.S. Belousov // Izvestiya NV AUK [News of the Lower Volga Agro-University Complex]. — 2020. — № 3(59). — P. 397–406. — DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-49. [in Russian]

20. Rogachev A.F. Sistemnyy podkhod k postroeniyu ontologii dlya avtomatizatsii sostavleniya raspisaniya mnogourovnego vuza [A systematic approach to building an ontology for automating the scheduling of a multilevel university] / A.F. Rogachev, D.S. Zakharov // Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya [PFUR Journal of Engineering Research]. — 2025. — Vol. 26, № 1. — P. 39–51. — DOI 10.22363/2312-8143-2025-26-1-39-51. [in Russian]

21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025618970 Rossiyskaya Federatsiya. Informatsionno-analiticheskaya sistema dlya identifikatsii bolezney kul'turnykh rasteniy s WEB-interfeysom [Certificate of state registration of the computer program No. 2025618970 Russian Federation. Information and analytical system for identifying diseases of cultivated plants with a WEB interface] : filed 07.04.2025 : publ. 11.04.2025 / K.E. Tokarev, E.V. Melikhova, A.F. Rogachev ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Agrarian University". [in Russian]

22. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025619912 Rossiyskaya Federatsiya. Podderzhka prinyatiya resheniy po aktivizatsii rosta kul'turnykh rasteniy s formirovaniem rekomendatsiy po ikh biozashchite : zayavl. 07.04.2025 : opubl. 18.04.2025 / E.V. Melikhova, K.E. Tokarev, A.F. Rogachev [et al.] ; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Volgogradskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet» [Certificate of state registration of the computer program No. 2025619912 Russian Federation. Decision support for activating the growth of cultivated plants with the formation of recommendations for their bioprotection: filed 07.04.2025: publ. 18.04.2025 / E.V. Melikhova, K.E. Tokarev, A.F. Rogachev et al.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Volgograd State Agrarian University"]. [in Russian]