 © Авторы статьи / Authors of the article

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО/GENERAL AGRICULTURE AND CROP PRODUCTION

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.7 EDN: VHABMM

ПОВЫШЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ЭТАПОВ ОНТОГЕНЕЗА В УСЛОВИЯХ ЮГА РОССИИ

Научная статья

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

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

Предложена: 29.09.2026; Принята: 22.10.2026; Опубликована: 19.11.2026

Аннотация

Статья посвящена решению комплексной проблеме повышения продуктивности орошаемых и неполивных агрофитоценозов в условиях динамических климатических и антропогенных трансформаций агроэкосистем Юга России (ЮФО, Волгоградская область). Обобщены результаты серии исследований по созданию интеллектуальной технологии оперативного мониторинга посевов с использованием камер 4K, онтологической систематизации графических признаков и гибридных нейросетевых архитектур (14-слойная комбинированная ИНС, Conv2D, Swin-Transformer). Обосновано применение детерминированного подхода к инициализации весов искусственной нейронной сети (ИНС) для стабильного обучения на ограниченных агрономических выборках. Сформулированы практические рекомендации по дифференцированному управлению продукционным процессом и биозащите в критические фенологические фазы.

Ключевые слова: фитоагроценоз, Волгоградская область, оперативный мониторинг, онтогенез, глубокое обучение, детерминированная инициализация, фенологические фазы.

INCREASING THE PRODUCTIVITY OF AGRO-PLANT COMMUNITIES THROUGH REAL-TIME MONITORING AND INTELLIGENT ANALYTICAL SYSTEMS FOR CRITICAL STAGES OF ONTOGENESIS IN SOUTHERN RUSSIA

Research article

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

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

Suggested: 29.09.2026; Accepted: 22.10.2026; Published: 19.11.2026

Abstract

The article is devoted to addressing the complex issue of increasing the productivity of irrigated and non-irrigated agrophytocenoses in the context of dynamic climatic and anthropogenic transformations of agroecosystems in southern Russia (Southern Federal District, Volgograd Oblast). The results of a series of studies on the development of an intelligent technology for real-time crop monitoring using 4K cameras, ontological classification of graphical features and hybrid neural network architectures (a 14-layer combined ANN, Conv2D, Swin-Transformer) are summarised. The application of a deterministic approach to the initialisation of artificial neural network (ANN) weights for stable training on limited agronomic samples is substantiated. Practical recommendations are formulated for differentiated management of the production process and biological control during critical phenological phases.

Keywords: phytoagrocenosis, Volgograd Oblast, real-time monitoring, ontogenesis, deep learning, deterministic initialisation, phenological phases.

Введение

Агропромышленный комплекс Южного федерального округа (ЮФО), и в частности Волгоградской области, функционирует в условиях высокой изменчивости климатических факторов, выражающейся в нарастании засушливости, дефиците водных ресурсов и неравномерности осадков в ключевые периоды вегетации сельскохозяйственных культур. Обеспечение устойчивого роста урожайности зерновых и пропашных культур требует перехода от традиционных нормативных технологий к системам точного земледелия и адаптивно-интегрированного управления агрофитоценозами. В соответствии с положениями Доктрины продовольственной безопасности РФ и национального проекта «Экономика данных», внедрение искусственного интеллекта (ИИ) и беспилотных летательных аппаратов является ключевым вектором интенсификации аграрного производства.

Формирование конечной продуктивности посевов зерновых культур (например, озимой пшеницы) в аридных условиях Нижнего Поволжья в решающей степени определяется их состоянием в критические фенологические фазы

 © Авторы статьи / Authors of the article

(кущение, выход в трубку). Именно после перезимовки посевы демонстрируют высокую пространственную неоднородность, связанную с локальными вымоканиями, вымерзанием, дефицитом питательных элементов и развитием сорной растительности. Традиционный наземный визуальный мониторинг на больших площадях (сотни и тысячи гектаров) трудоемок, субъективен и не обеспечивает необходимой оперативности для принятия корректирующих агротехнических решений.

Современные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на базе БПЛА в сочетании с алгоритмами компьютерного зрения (CV) и глубокого обучения (Deep Learning, DL) позволяют в режиме реального времени получать спектральные и ортофотопланы с пространственным разрешением до единиц сантиметров. Однако практическое развертывание нейросетевых моделей на бортовых вычислителях БПЛА и мобильных киберфизических системах (КФС) сталкивается с рядом фундаментальных ограничений: высокой вычислительной сложностью глубоких архитектур, проблемой переобучения на ограниченных агрономических обучающих выборках и неустойчивостью обучения из-за стохастического выбора начальных весов нейросети [1], [2], [3].

1.1. Научная гипотеза

Применение гибридной нейросетевой архитектуры (сочетающей сверточные слои и механизмы внимания Vision Transformer) в комбинации с онтологической систематизацией признаков и детерминированным методом инициализации весов позволит минимизировать влияние стохастичности обучения, устранить проблему «зависания» в локальных минимумах и обеспечить точность классификации состояний посевов выше 90–95% даже в условиях дефицита обучающих данных, что создаст основу для оперативной оптимизации агроприемов в рискованных условиях земледелия.

Целью исследования является разработка и обобщение научных основ, алгоритмического обеспечения и практических рекомендаций по созданию высокоточных интеллектуальных систем оперативного мониторинга состояния посевов в критические фазы вегетации для адаптации агроэкосистем Волгоградской области и регионов ЮФО к климатическим рискам.

Материалы и методы

2.1. Объект исследования и аппаратурно-программное обеспечение

Экспериментальные исследования проводились на опытных полях УНПЦ «Горная поляна» Волгоградского ГАУ (Волгоградская область, ЮФО). Объектом исследования являлись посевы озимой пшеницы и однолетних полевых культур в критическую фазу вегетации (кущение). Сбор высокодетализированных графических данных осуществлялся с помощью бесплотных летальных аппаратов, оснащенных 4K RGB-камерами высокого разрешения. Аэрофотосъемка проводилась на высотах 15–50 метров, что обеспечивало пространственное разрешение от 0.5 до 2 см/пиксель [4], [5].

2.2. Онтология классов агрофитоценозов и база данных

На основе экспертно-аналитического анализа цветоколористических, текстурных и морфологических признаков растений была сформирована системная онтология классов RGB-изображений посевов озимой пшеницы после перезимовки [6], [7]:

- оптимальное развитие: участки с равномерным зеленым покровом высокой интенсивности и максимальной вегетационной активностью, характеризующиеся: плотным и однородным стоянием растений; насыщенным зеленым цветом (индикатор высокого содержания хлорофилла); отсутствием видимых проплешин и разреженности; равномерным распределением биомассы по площади.

- локальное компенсаторное развитие: участки с пятнистой, неоднородной структурой растительного покрова, но без явных признаков дефекта развития, характеризующиеся чередованием зон с разной плотностью и интенсивностью развития, наличием как здоровых, так и ослабленных растений в пределах одной зоны, а также переходными областями между оптимальными и дефектными участками.

- ослабленные, угнетенные растения: участки с разреженным светло-зеленым или желтоватым покровом, характеризующиеся разреженным стоянием, низкой плотностью биомассы, а также отставанием в росте и развитии.

- дефектные участки: зоны с полным или частичным отсутствием растительности, вызванные болезнями, вредителями, технологическими нарушениями или неблагоприятными почвенными условиями, включающие видимые проплешины коричневого цвета (открытая почва), отсутствие всходов или гибель растений, резкие границы между здоровыми и поврежденными участками.

Для систематизации аэрофотоснимков разработана реляционная база данных (Свидетельство о гос. регистрации БД № 2026622000), содержащая таблицы групп культур, фаз вегетации, сезонов и аннотированных фрагментов. Предобработка включала нормализацию цветовых RGB-каналов и масштабирование изображений к размеру 300×300 и 500×500 пикселей [8].

2.3. Архитектура нейронной сети и детерминированная инициализация весов

В качестве базовой модели разработана 14-слойная комбинированная искусственная нейронная сеть (43 млн обучаемых параметров), включающая сверточные слои Conv2D(32, (3,3), activation='relu'), слои субдискретизации MaxPooling2D(2,2), слои регуляризации Dropout(0.25) и выходной полносвязный слой Dense(4, activation='softmax'). Дополнительно исследована гибридная архитектура, объединяющая ветвь CNN для локальных текстур и блок Vision Transformer (Swin-Transformer) с механизмами внимания в сдвигающихся окнах для учета глобального контекста агроландшафта. Главной проблемой при обучении глубоких нейросетей на ограниченных выборках является стохастичность случайной инициализации весов, ведущая к «зависанию» целевой функции в окрестностях локальных минимумов. Для устранения этого эффекта при использовании полулинейной функции активации $ReLU(x) = max(0, x)$ применим детерминированный подход к расчету начальных весов W, учитывающий детерминированный коэффициент инициализации весовой матрицы слоя; количество нейронов на текущем слое и количество нейронов на следующем слое [9].

 © Авторы статьи / Authors of the article

Оценка надежности предсказаний модели на мобильных устройствах осуществлялась с помощью показателей энтропии H(p) и максимальной вероятности Softmax (MSP), где низкие значения энтропии свидетельствуют о высокой уверенности модели в распознанном классе.

Основные результаты

Проведенная серия вычислительных экспериментов на обучающей (80%), проверочной (10%) и тестовой (10%) выборках подтвердила высокую эффективность разработанной гибридной ИНС и метода детерминированной инициализации. Сравнительные результаты параметризации разработанной архитектуры с использованием детерминированной инициализации весов ИНС для стабильного обучения на ограниченных агрономических выборках, представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты параметризации нейросетевой модели

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.7.1

Выборка / Модель	Средняя точность (Accuracy)	Макс. точность	Функция потерь (Loss)	Время сходимости, эпохи
Обучающая выборка	0,958	0,967	0,14 - 0,18	12 эпох
Проверочная (валидация)	0,912	0,926	0,23 - 0,28	8 - 10 эпох

Анализ матриц рассеяния (Confusion Matrix) показал, что применение аугментации (повороты, вариации яркости ±10%, кадрирование) и нормализованной инициализации весов позволило снизить системную путаницу между сложными классами («ослабленные растения» и «локальное компенсаторное развитие») с 24% до 14%. Точность классификации эталонного класса A («Оптимальное развитие») достигла 96%, а класса C («Ослабленные посевы») — 86%.

На основе полученных научных результатов авторами сформирован комплекс программно-аналитических систем и зарегистрированы следующие интеллектуальные продукты:

1. Программа для ЭВМ № 2025618970: «Информационно-аналитическая система для идентификации болезней культурных растений с WEB-интерфейсом» [10].
2. Программа для ЭВМ № 2025619912: «Поддержка принятия решений по активизации роста культурных растений с формированием рекомендаций по их биозащите» [11].
3. Программа для ЭВМ № 2026661030: «Генерация аугментированных наборов данных цветных изображений для обучения систем компьютерного зрения в растениеводстве» [12].
4. База данных № 2026622000: «Набор исходных и аугментированных оптических изображений посевов однолетних полевых культур для обучения и тестирования систем компьютерного зрения» [8].

Обсуждение

Сравнительный мета-анализ полученных результатов с данными мировых исследований (Kamilaris et al., Cao et al., Srihith) показывает высокую конкурентоспособность разработанного подхода. В таблице 2 приведено сопоставление характеристик различных нейросетевых архитектур, используемых в мировом агромониторинге [13], [15], [16], [18].

Таблица 2 - Сопоставление характеристик различных нейросетевых архитектур, используемых в мировом агромониторинге

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.7.2

Архитектура ИНС	Область применения в агросекторе	Точность (Accuracy / mAP), %	Особенности и ограничения
VGG16 / VGG19	Классификация стрессов зерновых, болезни риса/картофеля	92,89 - 97,8	Высокая точность, но массивность параметров и падение до 60% при малых выборках
Inception V2 / V3	Детекция сорняков, болезни яблони и томатов	95,4 - 98,0	Эффективные блоки параллельных сверток, низкий риск переобучения
Swin-Transformer + YOLOv5s	Детекция малых объектов на аэроснимках (БПЛА)	mAP 74,7 (до 81,9 P)	Отличный учет глобального контекста через сдвигающиеся окна внимания
Предлагаемая гибридная ИНС	Мониторинг агрофитоценозов ЮФО,	91,2 (валидация), до 96 класс	Детерминированная инициализация весов,

 © Авторы статьи / Authors of the article

Архитектура ИНС	Область применения в агросекторе	Точность (Accuracy / mAP), %	Особенности и ограничения
	дефекты кущения		адаптация к БПЛА и малым выборкам

Сравнение классических подходов и методов машинного обучения (SVM, SIFT, HOG), чувствительных к изменениям освещенности и сложности фонового покрова, гибридная сверточно-трансформерная сеть обеспечивает устойчивое извлечение признаков в плотных агроландшафтных сценах. Детерминированный метод инициализации весов устраняет необходимость в трудоемком предварительном обучении (pre-training) на миллионных датасетах и предотвращает зависание модели в локальных минимумах. В то же время ограничением применимости описанного подхода является необходимость его дополнительного исследования на конкретных датасетах в рамках проблемы «domain shift».

Основными преимуществами детерминированной инициации весов являются контроль сравнений (ablation studies), при этом исключается дисперсия, вносимая случайной инициализацией. Это позволяет атрибутировать наблюдаемые различия метрик непосредственно варьируемым факторам. Кроме того, снижается общая дисперсия оценок качества модели; упрощается анализ чувствительности метода оптимизации к прочим источникам стохастичности.

Однако недостатками такого подхода является проблема симметрии, когда детерминированная константная инициализация (включая нулевую) не нарушает перестановочную симметрию нейронов одного слоя. Также результат, полученный при одной инициализации, не позволяет судить об устойчивости (робастности) метода. Возможна также потеря эффектов стохастической регуляризации, когда ансамблевый эффект, вносимый случайной инициализацией (неявный ансамбль по пространству начальных условий), не реализуется.

На рисунке 1 представлен алгоритм принятия управленческих решений в системе точного земледелия, обеспечивающий переход от оперативного мониторинга к практической реализации дифференцированных агротехнологий.

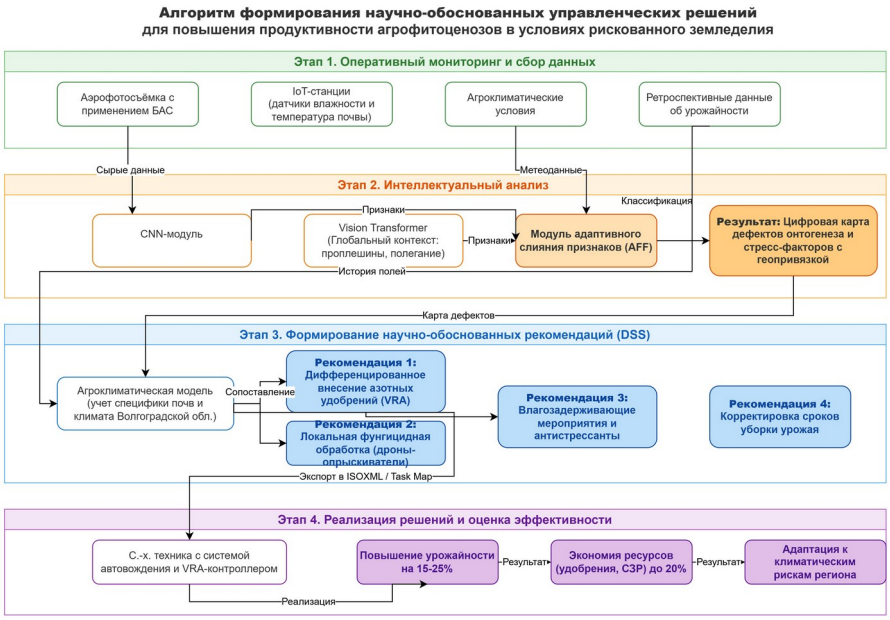


Рисунок 1 - Алгоритм формирования научно-обоснованных управленческих решений в условиях рискованного земледелия

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.7.3

Представленная алгоритм реализует замкнутый контур управления агроэкосистемой, где интеллектуальный анализ данных дистанционного мониторинга трансформируется в исполняемые агротехнологические предписания, обеспечивая переход от реактивного к превентивному управлению продукционностью агрофитоценозов в условиях рискованного земледелия ЮФО, включая Волгоградскую область.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили состоятельность сформулированной научной гипотезы: сочетание онтологического моделирования классов агрофитоценозов, гибридной нейросетевой архитектуры и детерминированной инициализации весов обеспечивает оперативное выявление дефектов развития посевов с точностью выше 91.2%.

Практические рекомендации для агропредприятий ЮФО и Волгоградской области:

 © Авторы статьи / Authors of the article

1. Регламент БПЛА-мониторинга в критические фазы: проводить аэрофотосъемку с БПЛА в фазу кущения озимых культур (10-14 дней после возобновления весенней вегетации) на высоте 20-30 м для карты-схемы дефектов.

2. Дифференцированное подкармливание и биозащита: на основе распознанных зон класса С («ослабленные посевы») применять адресное внесение азотных удобрений и микроэлементов, предотвращая перерасход химикатов на 15–20%.

3. Интеграция с веб-системами принятия решений: использовать разработанное ПО (Свидетельства № 2025618970, № 2025619912) для автоматической генерации технологических рекомендаций мелиораторам и агрономам.

4. Адаптация к детекции сорняков: применять стратегию Transfer Learning (заморозка сверточных слоев и дообучение Dense-слоя для расширения ареала и повышения оперативности обнаружения сорной растительности.

5. Детерминированная инициализация целесообразна на этапах отладки, сравнительного анализа и воспроизведения результатов, однако для оценки статистической значимости выводов требуется дополнение стохастическими запусками с варьированием запусков и последующей статистической обработкой (например, доверительными интервалами).

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 funded by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-21-20019, https://rscf.ru/project/25-21-20019/ and Volgograd Oblast.

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. Якушев В.П. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии / В.П. Якушев, В.В. Якушев, Д.А. Матвеенко // Земледелие. — 2020. — № 1. — С. 33–37.

2. 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.

3. 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. — 2017. — № 1 (45). — С. 161–170.

4. Рогачев А.Ф. Системный анализ и нейросетевые методы оперативного мониторинга всходов озимой пшеницы после перезимовки в условиях континентального климата / А.Ф. Рогачев, К.Е. Токарев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. — 2025. — № 4 (82). — С. 474–482. — DOI: 10.32786/2071-9485-2025-04-50.

5. Токарев К.Е. Онтология классов цветных изображений посевов зерновых культур в процессе вегетации для обучения и тестирования нейросетевых моделей / К.Е. Токарев, А.Ф. Рогачев, Г.О. Чамурлиев // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — № 2 (62). — DOI: 10.60797/JAE.2025.62.3.

6. Токарев К.Е. Проблемы оперативного мониторинга орошаемых агрофитоценозов в условиях рискованного земледелия с использованием алгоритмов ИИ / К.Е. Токарев, А.Ф. Рогачев, А.Ю. Попов [и др.] // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — № 2 (62). — DOI: 10.60797/JAE.2025.62.9.

7. Рогачев А.Ф. Мета-анализ цифровых технологий и методов ИИ для повышения продуктивности орошаемых агрофитоценозов в условиях засушливого климата / А.Ф. Рогачев, К.Е. Токарев // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — № 3 (63). — DOI: 10.60797/JAE.2025.63.12.

8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Российская Федерация. Набор исходных и аугментированных оптических изображений посевов однолетних полевых культур для обучения и тестирования систем компьютерного зрения в системе прецизионного земледелия 2026 / К.Е. Токарев ; заявитель ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. — № 2026622000; заявл. 22.04.2026 : опубл. 04.05.2026.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Искусственная нейронная сеть со сверточными слоями для множественной классификации развития агрофитоценозов однолетних полевых культур в фазах активной вегетации / К.Е. Токарев, А.Ф. Рогачев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет». — № 2026682891; заявл. 22.07.2026 : опубл. 27.07.2026.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Информационно-аналитическая система для идентификации болезней культурных растений с WEB-интерфейсом / К.Е. Токарев, Е.В. Мелихова, А.Ф. Рогачев ; заявитель ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. — № 2025618970; заявл. 07.04.2025 : опубл. 11.04.2025.

 © Авторы статьи / Authors of the article

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Российская Федерация. Поддержка принятия решений по активизации роста культурных растений с формированием рекомендаций по их биозащите / Е.В. Мелихова, К.Е. Токарев, А.Ф. Рогачев [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. — № 2025619912; заявл. 07.04.2025 : опубл. 18.04.2025.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Генерация аугментированных наборов данных цветных изображений для обучения систем компьютерного зрения в растениеводстве / К.Е. Токарев, А.Ф. Рогачев ; заявитель ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. — № 2026661030; заявл. 10.04.2026 : опубл. 16.04.2026.

13. Tokarev K. Monitoring and Intelligent Management of Agrophytocenosis Productivity Based on Deep Neural Network Algorithms / K. Tokarev // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2023. — Vol. 569. — P. 678–689. — DOI: 10.1007/978-3-031-19958-5_65.

14. Cao X. Swin-Transformer-Based YOLOv5 for Small-Object Detection in Remote Sensing Images / X. Cao, Y. Zhang, S. Lang [et al.] // Sensors. — 2023. — Vol. 23. — Art. 3634. — DOI: 10.3390/s23073634.

15. Srihith I.V.D. A Short Review on Deep Learning in Agriculture / I.V.D. Srihith // Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence & It's Applications. — 2024. — Vol. 1 (3). — P. 23–39. — DOI: 10.5281/zenodo.11612440.

16. Kamilaris A. Deep learning in agriculture: A survey / A. Kamilaris, F.X. Prenafeta-Boldú // Computers and Electronics in Agriculture. — 2018. — Vol. 147. — P. 70–90.

17. He K. Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification / K. He, X. Zhang, S. Ren [et al.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). — 2015. — P. 1026–1034. — DOI: 10.1109/ICCV.2015.123.

18. Szegedy C. Going Deeper with Convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — 2015. — P. 1–9. — DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298594.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Yakushev V.P. Intellektualnie sistemi podderzhki tekhnologicheskikh reshenii v tochnom zemledelii [Intelligent systems for supporting technological decisions in precision agriculture] / V.P. Yakushev, V.V. Yakushev, D.A. Matveenko // Zemledelie [Agriculture]. — 2020. — № 1. — P. 33–37. [in Russian]

2. Mikhailenko I.M. Otsenivanie parametrov sostoyaniya biomassi korneplodnikh kultur po dannim distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Estimation of the parameters of the biomass state of root crops based on Earth remote sensing data] / I.M. Mikhailenko, V.N. Timoshin // Sovremennie problemi 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]

3. Borodichev V.V. Obobshchennaya model avtomatizirovannoi informatsionnoi sistemi monitoringa i upravleniya orosheniem v rezhime realnogo vremeni [Generalized model of an automated information system for monitoring and managing irrigation in real time] / V.V. Borodichev, M.N. Litov // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa [Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agrouniversity Complex]. — 2017. — № 1 (45). — P. 161–170. [in Russian]

4. Rogachev A.F. Sistemnii analiz i neirosetevie metodi operativnogo monitoringa vskhodov ozimoi pshenitsi posle perezimovki v usloviyakh kontinentalnogo klimata [System analysis and neural network methods for operational monitoring of winter wheat seedlings after overwintering under continental climate conditions] / A.F. Rogachev, K.E. Tokarev // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i visshee professionalnoe obrazovanie [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2025. — № 4 (82). — P. 474–482. — DOI: 10.32786/2071-9485-2025-04-50. [in Russian]

5. Tokarev K.E. Ontologiya klassov tsvetnikh izobrazhenii posevov zernovikh kultur v protsesse vegetatsii dlya obucheniya i testirovaniya neirosetevikh modelei [Ontology of classes of color images of grain crops during the growing season for training and testing neural network models] / K.E. Tokarev, A.F. Rogachev, G.O. Chamurliev // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — № 2 (62). — DOI: 10.60797/JAE.2025.62.3. [in Russian]

6. Tokarev K.E. Problemi operativnogo monitoringa oroshaemikh agrofitotsenozov v usloviyakh riskovannogo zemledeliya s ispolzovaniem algoritmov II [Problems of operational monitoring of irrigated agrophytocenoses under conditions of risky farming using AI algorithms] / K.E. Tokarev, A.F. Rogachev, A.Yu. Popov [et al.] // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — № 2 (62). — DOI: 10.60797/JAE.2025.62.9. [in Russian]

7. Rogachev A.F. Meta-analiz tsifrovikh tekhnologii i metodov II dlya povisheniya produktivnosti oroshaemikh agrofitotsenozov v usloviyakh zasushlivogo klimata [Meta-analysis of digital technologies and AI methods to increase the productivity of irrigated agrophytocenoses in arid climates] / A.F. Rogachev, K.E. Tokarev // Journal of Agriculture and Environment. — 2025. — № 3 (63). — DOI: 10.60797/JAE.2025.63.12. [in Russian]

8. Certificate of state registration of the database. Russian Federation. Nabor iskhodnikh i augmentirovannikh opticheskikh izobrazhenii posevov odnoletnikh polevikh kultur dlya obucheniya i testirovaniya sistem kompyuternogo zreniya v sisteme pretsizionnogo zemledeliya 2026 [A set of original and augmented optical images of crops of annual field crops for training and testing computer vision systems in precision agriculture] / K.E. Tokarev ; applicant FSBEI HE Volgograd State Agrarian University. — № 2026622000; appl. 22.04.2026 : publ. 04.05.2026. [in Russian]

9. Certificate of state registration of a computer program. Russian Federation. Iskusstvennaya neironnaya set so svertochnimi sloyami dlya mnozhestvennoi klassifikatsii razvitiya agrofitotsenozov odnoletnikh polevikh kultur v fazakh aktivnoi vegetatsii [Artificial neural network with convolutional layers for multiple classification of the development of agrophytocenoses of annual field crops in the phases of active vegetation] / K.E. Tokarev, A.F. Rogachev ; applicant: Federal

 © Авторы статьи / Authors of the article

State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volgograd State Agrarian University”. — № 2026682891; appl. 22.07.2026 : publ. 27.07.2026. [in Russian]

10. Certificate of state registration of a computer program. Russian Federation. Informatsionno-analiticheskaya sistema dlya identifikatsii boleznei kulturnikh rastenii s WEB-interfeisom [Information and analytical system for identifying diseases of cultivated plants with a WEB interface] / K.E. Tokarev, Ye.V. Melikhova, A.F. Rogachev ; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volgograd State Agrarian University. — № 2025618970; appl. 07.04.2025 : publ. 11.04.2025. [in Russian]

11. Certificate of state registration of a computer program. Russian Federation. Podderzhka prinyatiya reshenii po aktivizatsii rosta kulturnikh rastenii s formirovaniem rekomendatsii po ikh biozashchite [Support for decision-making to enhance the growth of cultivated plants and to develop recommendations for their biological protection] / Ye.V. Melikhova, K.E. Tokarev, A.F. Rogachev [et al.] ; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volgograd State Agrarian University”. — № 2025619912; appl. 07.04.2025 : publ. 18.04.2025. [in Russian]

12. Certificate of state registration of a computer program. Russian Federation. Generatsiya augmentirovannikh naborov dannikh tsvetnikh izobrazhenii dlya obucheniya sistem kompyuternogo zreniya v rastenievodstve [Generation of augmented datasets of color images for training computer vision systems in crop production] / K.E. Tokarev, A.F. Rogachev ; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Volgograd State Agrarian University”. — № 2026661030; appl. 10.04.2026 : publ. 16.04.2026. [in Russian]

13. Tokarev K. Monitoring and Intelligent Management of Agrophytocenosis Productivity Based on Deep Neural Network Algorithms / K. Tokarev // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2023. — Vol. 569. — P. 678–689. — DOI: 10.1007/978-3-031-19958-5_65.

14. Cao X. Swin-Transformer-Based YOLOv5 for Small-Object Detection in Remote Sensing Images / X. Cao, Y. Zhang, S. Lang [et al.] // Sensors. — 2023. — Vol. 23. — Art. 3634. — DOI: 10.3390/s23073634.

15. Srihith I.V.D. A Short Review on Deep Learning in Agriculture / I.V.D. Srihith // Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence & It's Applications. — 2024. — Vol. 1 (3). — P. 23–39. — DOI: 10.5281/zenodo.11612440.

16. Kamilaris A. Deep learning in agriculture: A survey / A. Kamilaris, F.X. Prenafeta-Boldú // Computers and Electronics in Agriculture. — 2018. — Vol. 147. — P. 70–90.

17. He K. Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification / K. He, X. Zhang, S. Ren [et al.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). — 2015. — P. 1026–1034. — DOI: 10.1109/ICCV.2015.123.

18. Szegedy C. Going Deeper with Convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). — 2015. — P. 1–9. — DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298594.