

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.9>

**ПРОБЛЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ОРОШАЕМЫХ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ
РИСКОВАННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИИ**

Научная статья

Токарев К.Е.^{1,*}, Рогачев А.Ф.², Попов А.Ю.³, Назаров Е.А.⁴, Коновалов П.В.⁵

¹ORCID : 0000-0002-5548-5637;

²ORCID : 0000-0002-3077-6622;

³ORCID : 0009-0006-7789-717X;

⁴ORCID : 0000-0003-2456-8998;

⁵ORCID : 0009-0004-8924-5246;

^{1, 2, 3, 4, 5} Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Российская Федерация

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

Аннотация

Актуальность исследования проблем оперативного мониторинга орошаемых агрофитоценозов обусловлена возросшей необходимостью обеспечения устойчивого сельскохозяйственного производства в условиях рискованного земледелия, характеризующегося высокой изменчивостью климатических и водных ресурсов.

Объектом исследования являются теоретические и прикладные знания в области интеграции искусственного интеллекта в аграрное производство.

Материалы и методы включали обоснование методики отбора релевантных научно-технических и патентных источников, их анализ с критическим разбором с акцентом на методики проведения мониторинга, используемые алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ), проблемы внедрения в сельскохозяйственное производство и нормативные ограничения.

В ходе исследования показано, что современные методы оперативного мониторинга с использованием средств ИИ и нейросетевых технологий позволяют существенно повысить точность и оперативность оценки состояния орошаемых агрофитоценозов в условиях рискованного земледелия. В условиях рискованного земледелия особое внимание должно уделяться мониторингу мелиоративного состояния земель и предотвращению деградационных процессов, что влияет на устойчивость и продуктивность агрофитоценозов. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с обработкой получаемых изображений методами глубокого обучения для мониторинга и управления водным режимом, почвенно-химическими характеристиками и продуктивностью агроценозов, позволяет выявлять дефекты развития растений, стрессовые состояния и патологические изменения. Основными ограничениями современных систем остаются требования к качеству и объему исходных данных, необходимость адаптации алгоритмов ИИ к локальным региональным условиям, а также все еще высокая стоимость внедрения и поддержки технологий.

В процессе совершенствования агроэкологического мониторинга необходима разработка гибридных систем, объединяющих спутниковые и БПЛА-данные, локальные сенсоры и климатическую информацию для более комплексного и адаптивного управления орошением в рискованных условиях. Это позволит повысить экономическую эффективность аграрного производства, снизить затраты на ресурсы и добиться устойчивого высокопродуктивного земледелия с соблюдением экологических норм и стандартов возможность оперативной корректировки агротехнических мероприятий.

Ключевые слова: агрофитоценоз, оперативный мониторинг, рискованное земледелия, искусственный интеллект.

**PROBLEMS OF OPERATIONAL MONITORING OF IRRIGATED AGROPHYTOCENOSES IN CONDITIONS OF
RISKY FARMING USING AI ALGORITHMS**

Research article

Tokarev K.E.^{1,*}, Rogachev A.F.², Popov A.Y.³, Nazarov E.A.⁴, Konovalov P.V.⁵

¹ORCID : 0000-0002-5548-5637;

²ORCID : 0000-0002-3077-6622;

³ORCID : 0009-0006-7789-717X;

⁴ORCID : 0000-0003-2456-8998;

⁵ORCID : 0009-0004-8924-5246;

^{1, 2, 3, 4, 5} Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russian Federation

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

Abstract

The relevance of studying the issues of operational monitoring of irrigated agrophytocenoses is due to the increased necessity to ensure sustainable agricultural production in conditions of risky farming, characterised by high variability of climatic and water resources.

The object of the study is theoretical and applied knowledge in the field of integrating artificial intelligence into agricultural production.

Materials and methods included substantiation of the methodology for selecting relevant scientific, technical, and patent sources, their analysis with critical review focusing on monitoring methodologies, artificial intelligence (AI) algorithms used, problems of implementation in agricultural production, and regulatory restrictions.

The research shows that modern methods of operational monitoring using AI and neural network technologies can significantly improve the accuracy and speed of assessing the condition of irrigated agrophytocenoses in risky farming conditions. In such conditions, special attention should be paid to monitoring the ameliorative condition of land and preventing degradation processes that affect the sustainability and productivity of agrophytocenoses. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) with deep learning methods for processing the images obtained to monitor and manage the water regime, soil chemical characteristics and productivity of agroecosystems allows the identification of plant development defects, stress conditions and pathological changes. The main limitations of modern systems remain the requirements for the quality and volume of source data, the necessity to adapt AI algorithms to local regional conditions, and the still high cost of implementing and supporting technologies.

In the process of improving agro-ecological monitoring, it is necessary to develop hybrid systems that combine satellite and UAV data, local sensors and climate information for more complex and adaptive irrigation management in risky conditions. This will increase the economic efficiency of agricultural production, reduce resource costs, and achieve sustainable, highly productive agriculture in compliance with environmental norms and standards, as well as enable the rapid adjustment of agrotechnical measures.

Keywords: agrophytocenosis, operational monitoring, risky farming, artificial intelligence.

Введение

Актуальность исследования проблем оперативного мониторинга орошаемых агрофитоценозов обусловлена возросшей необходимостью обеспечения устойчивого сельскохозяйственного производства в условиях рискованного земледелия, характеризующегося высокой изменчивостью климатических и водных ресурсов. Основной целью агроэкологического мониторинга является создание высокоэффективных и экологически сбалансированных агроценозов на основе рационального использования и расширенного воспроизводства природно-ресурсного потенциала, включая влияние природных и агротехнических факторов на длительную динамику агрохимических свойств, а также оценку экономико-экологической эффективности адаптивных технологий [1], [2].

В условиях рискованного земледелия ключевым фактором стабилизации и повышения продуктивности агроэкосистем является орошение. Однако эффективное использование водных ресурсов требует оперативного и точного контроля состояния агрофитоценозов. В последнее десятилетие активное внедрение методов искусственного интеллекта (ИИ) в аграрную сферу открывает новые возможности для автоматизации и повышения точности оперативного мониторинга, особенно в условиях, где традиционные методы оказываются недостаточно эффективными [3], [4].

Методология организации агроэкологического мониторинга, представляющая собой систему наблюдений за динамикой состояния агроэкологических систем, как компонента биосферного мониторинга, разрабатывается в РФ с конца прошлого века [5]. Научная методология мониторинга позволяет определить оптимальные в экологическом аспекте системы внесения удобрения, а также оценивать роль компонентов систем земледелия в комплексном воздействии на окружающую среду. Проводимые полевые исследования были направлены на отработку локальных индикаторов для характеристики состояния почвенного плодородия, что гарантировало применение экологически оправданных доз удобрений для оптимального питания растений с учетом почвенно-климатических условий. Сравнение динамики изменения агрохимического состояния почв по результатам агрохимического обследования с данными длительных полевых опытов обеспечивает объективную оценку эффективности современных агротехнологий [6], [7].

Обзор зарубежных и российских исследований подтверждает развитие методов ИИ и дистанционного зондирования для поддержки решений по управлению орошением, однако сохраняется ряд нерешенных проблем. Среди них — адаптация алгоритмов к условиям климатической нестабильности, высокие требования к качеству и объему данных, а также дефицит интеграции междисциплинарных подходов. Российские работы подчеркивают значимость создания локализованных моделей, учитывающих особенности регионального риска и агроэкологических условий [8], [10], [13], [15].

В связи с этим целью настоящего исследования является анализ ключевых проблем оперативного мониторинга орошаемых агрофитоценозов с использованием ИИ в условиях рискованного земледелия и выявление перспективных направлений развития технологий для повышения устойчивости аграрных систем. Задачи исследования включают систематизацию современных методов и алгоритмов ИИ, оценку их применимости и ограничений в условиях нестабильных климатических факторов и ограниченных ресурсов, а также формулировку рекомендаций для практического внедрения.

Таким образом, исследование направлено на расширение теоретических и прикладных знаний в области интеграции искусственного интеллекта в аграрное производство, с акцентом на повышение эффективности управленческих решений в орошаемом земледелии при рискованных условиях.

Методы и принципы исследования

Для выполнения аналитического обзора, отвечающего принципам объективности, структурированности и комплексности и обеспечивающего выявление пробелов в исследуемой области мониторинга орошаемых агрофитоценозов в условиях рискованного земледелия. Это обеспечивает формирование рекомендаций для проведения дальнейших научных исследований. В процессе методического обеспечения мониторинга реализованы следующие этапы [16], [17], [18]:

1. Определение ключевых слов и терминов.

На первом этапе формировался набор ключевых слов и терминов, максимально отражающих тематику исследования, в том числе «оперативный мониторинг орошаемых агрофитоценозов», «искусственный интеллект в сельском хозяйстве», «рискованное земледелие и ИИ», «патентный анализ в агротехнологиях» и пр.

2. Поиск литературы в специализированных базах данных.

Использовались международные (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, Google Scholar), а также российские научные базы (eLIBRARY, CyberLeninka и др.). Для поиска патентной информации — Роспатент, Espacenet, WIPO Patentscope. При этом осуществлялся предварительный отбор и фильтрация списка научных публикаций и патентов.

Фильтрация документов осуществлялась по релевантности и качеству (высокий импакт-фактор журнала, цитируемость, статус авторов, полнота текста) и исключался дублирующий контент. В качестве критериев отбора статей принимались актуальность (публикации за последние 5–7 лет); язык публикации — преимущественно английский и русский; наличие полного текста. Для патентов — полнота описания и дата выдачи.

3. Систематизация и анализ литературы

В процессе анализа публикаций проводился подробный критический разбор выбранных источников с акцентом на методики проведения мониторинга, используемые алгоритмы ИИ, проблемы внедрения и нормативные ограничения.

Основные результаты

Отечественные учёные на протяжении многих десятилетий вносят значительный вклад в разработку теоретических и прикладных основ повышения почвенного плодородия. В фундаментальных научных работах В.Р. Вильямса [19], Н.А. Димо [20], А.Г. Дояренко [21] и других классиков отечественной агрономии были заложены основы рационального использования почвенного потенциала, включая севообороты, органическое земледелие и агротехнические приёмы, способствующие накоплению гумуса и улучшению структуры почвы. В последующие годы исследования В.П. Казаринова [22], Г.А. Лапина [23], А.И. Попова [24] и других позволили развить представления о динамике плодородия и разработать научно обоснованные системы агротехники, адаптированные к конкретным природно-климатическим условиям. Особое внимание уделялось формированию устойчивых агроценозов, в которых повышение урожайности достигается не за счёт экстенсивного применения химических средств, а за счёт оптимизации биологических процессов в почве.

Мониторинг агрофитоценозов является важнейшим элементом рационального управления сельскохозяйственными ресурсами, особенно в условиях рискованного земледелия с его повышенной климатической и гидрологической нестабильностью.

Агроэкологический мониторинг представляет собой систему непрерывных и комплексных наблюдений за состоянием земель и агроэкосистем с целью рационального использования почвенных ресурсов и сохранения их плодородия. В отличие от традиционных почвенных и агрохимических исследований, мониторинг обеспечивает более широкую, интегрированную оценку состояния земель и процессов, происходящих в агрофитоценозах, что особенно важно в условиях изменяющегося климата и ограниченного влагообеспечения.

Особое значение в мониторинге орошаемых агроценозов приобретают дистанционные методы, включая спутниковые снимки и аэрокосмическую съемку с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Эти технологии позволяют оперативно оценивать состояние посевов, выявлять зоны повреждений, рассчитывать вегетационные индексы (например, NDVI), что способствует более точному прогнозированию урожайности и своевременному принятию агротехнических решений. Применение БПЛА обеспечивает высокое разрешение графических данных и гибкость мониторинга в зависимости от времени и условий съемки, что особенно важно для адаптации технологий к специфике рискованного земледелия [2], [18].

В рамках теоретических основ следует выделить ключевые процессы, влияющие на состояние оросительных систем и агрофитоценозов: деградация почв, нарушение водно-солевого баланса, антропогенное воздействие, изменение почвенной реакции и др. Агроэкологический мониторинг позволяет выявлять и прогнозировать эти процессы, что даёт основу для разработки технологий восстановления и оптимизации водных режимов в условиях лиманного и других видов орошаемого земледелия [26].

Появление и развитие методов ИИ в последние годы существенно расширяет возможности моделирования и анализа многомерных данных, поступающих с различных сенсоров. ИИ-алгоритмы способствуют не только обработке больших массивов данных, но и повышению точности прогнозов состояния агрофитоценозов и выявлению скрытых взаимосвязей между экологическими и технологическими факторами. Это открывает перспективы создания адаптивных систем управления орошением, способных самостоятельно регулировать водоподачу с учётом изменения условий среды и состояния растений [27].

Таким образом, теоретические основы мониторинга в рискованных условиях земледелия строятся на интеграции агроэкологических принципов, современных методов дистанционного зондирования и интеллектуального анализа данных, что создаёт комплексную основу для устойчивого управления ресурсами и повышения продуктивности орошаемых агрофитоценозов.

Оперативный мониторинг орошаемых агрофитоценозов является ключевым инструментом для обеспечения устойчивого и эффективного земледелия в условиях риска, связанных с климатической изменчивостью и ограниченными ресурсами. Современные методы охватывают сочетание традиционного полевого контроля, дистанционного зондирования и интеллектуальных технологий обработки данных.

Основные методики мониторинга включают:

1. Дистанционное зондирование и аэрофотосъемка, в том числе использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Эти технологии позволяют оперативно получать детализированные изображения полей, выявлять стрессовые зоны на посевах и формировать вегетационные индексы, такие как NDVI, для оценки состояния растений. Высокое разрешение снимков позволяет учитывать локальные дефекты и быстрее реагировать на изменения агроэкосистем [3], [12], [26].

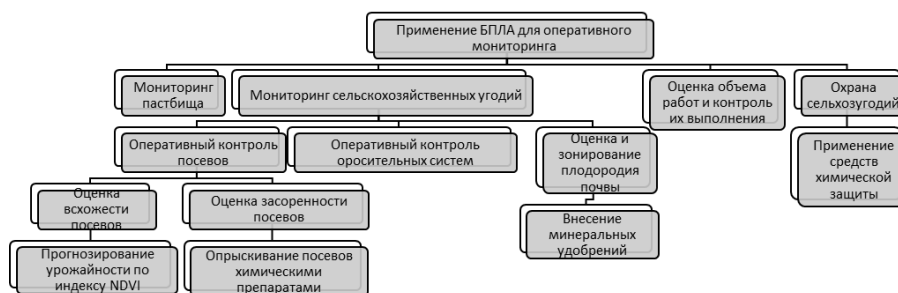


Рисунок 1 - Применение БПЛА для оперативного мониторинга орошаемых агрофитоценозов
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.9.1>

2. Геоинформационные системы (ГИС) и картографирование. Использование ГИС-технологий способствует пространственному анализу параметров почвы, увлажненности и состояния культуры, что важно для принятия решений по управлению водными ресурсами и оптимизации орошения [8], [10], [12], [17].

3. Полевые измерения и мониторинг почвенно-водного режима с применением сенсоров уровня грунтовых вод, санитарно-химических анализов воды и почвы. Такие данные помогают контролировать физико-химические характеристики, соленость и водопроницаемость почв, что имеет важное значение в условиях рискованного земледелия для предотвращения деградации орошаемых земель [7], [9], [27], [28].

4. Использование искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа больших массивов данных, получаемых с БПЛА и сенсорных систем. Глубокие нейросети обучаются на цветных 4К изображениях посевов, что позволяет классифицировать состояние растений, выявлять дефекты, стрессовые и патологические изменения, а также оптимизировать агротехнические мероприятия в режиме реального времени [2], [3], [12], [18].

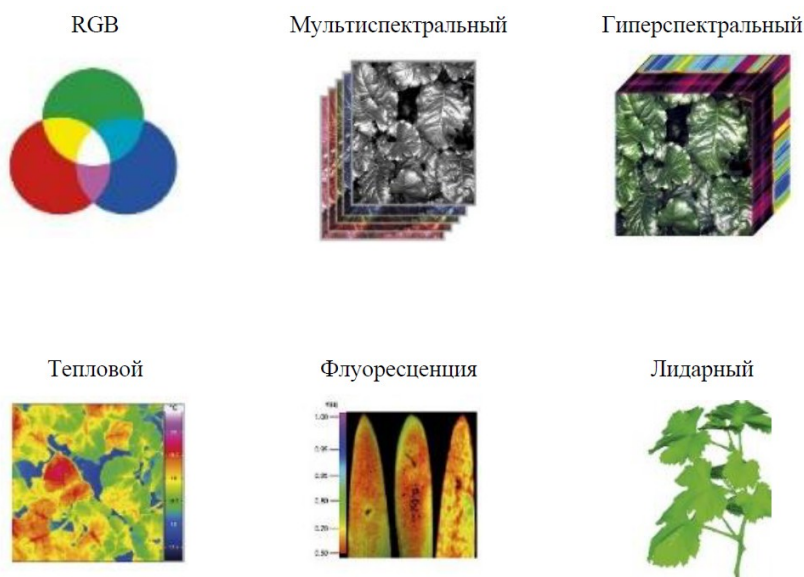


Рисунок 2 - Сенсорные технологии поиска и идентификации состояния орошаемых агрофитоценозов
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.9.2>

Примечание: по ист. [29]

5. Мониторинг мелиоративного состояния земель, включая наблюдения за уровнем и засолением грунтовых вод, плотностью и структурой почвенного покрова, контролем эрозии и других деградационных процессов. Комплексный мониторинг позволяет предупреждать пагубные изменения и принимать меры по восстановлению и сохранению плодородия [9], [12], [16], [25].

В последнее время все большее значение приобретает мультимодальный мониторинг, который представляет собой сочетание спутниковых, БПЛА, наземных сенсоров и климатических данных для комплексной оценки продуктивности и здоровья агрофитоценозов. Этот подход обеспечивает более точные и адаптивные модели управления орошением и агротехникой [17], [18], [19].

Технологии оперативного мониторинга способствуют повышению эффективности использования водных ресурсов, контролю качества сельхозпродукции и снижению экологических рисков. Их внедрение в условиях

рискованного земледелия становится необходимым для устойчивого развития агропромышленного комплекса и обеспечения продовольственной безопасности.

Сравнительный анализ зарубежных и российских исследований позволил выявить ключевые достоинства и недостатки зарубежных подходов, особенности и потенциал российских технологий и исследований, а также провести системное сравнение алгоритмов, моделей и методов оценки эффективности мониторинга.

Результаты сопоставления и характеристики выявленных отличий российских и зарубежных подходов к мониторингу орошаемых агрофитоценозов в условиях рискованного земледелия приведены в таблице.

Таблица 1 - Результаты сопоставления выявленных отличий российских и зарубежных подходов к мониторингу орошаемых агрофитоценозов

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.62.9.3>

Характеристика	Зарубежные подходы	Российские подходы
Технологии сбора данных	Активное применение спутникового дистанционного зондирования, БПЛА, мультиспектральной съемки. Высокое разрешение и масштабируемость.	Комбинирование спутниковых систем с применением GPS/ГЛОНАСС и локальных сенсорных сетей. Частично менее интенсивное применение БПЛА.
Методы анализа данных	Широкое использование ИИ и машинного обучения, адаптивные модели, прогнозные аналитические системы.	Использование алгоритмов ИИ с фокусом на региональную адаптацию; развитие отечественных моделей и программных решений.
Оценка и мониторинг водных ресурсов	Интегрированные модели водного баланса с учетом климатических изменений; прецизионное управление водоподачей на основе прогнозов.	Усиленный акцент на мелиоративный мониторинг, контроль качества оросительной воды и деградации почвы.
Экологический аспект	Акцент на устойчивость, снижение углеродного следа, оптимизацию использования ресурсов. Реализация международных климатических проектов.	Разработка и внедрение программ по восстановлению и защите почв, локальные проекты по снижению эрозии и деградации.
Инфраструктура и реализация	Масштабные коммерческие и государственные проекты, интеграция с ИТ-платформами отрасли, высокая степень автоматизации.	Часто экспериментальные, региональные проекты, с постепенным масштабированием; развитие отечественной ИТ-инфраструктуры и государственных программ.
Научно-прикладной фокус	Обширные исследования по интеграции новых технологий и алгоритмов в реальные условия, тесное сотрудничество с агропромышленностью.	Фокус на адаптации технологий под российские климатические и экономические условия, разработка локальных методик и практик.
Международное сотрудничество	Активное участие в международных инициативах, обмен опытом и технологиями.	Нацелено на развитие международных связей, но пока ограничено национальными программами и ресурсами.

Российские исследования делают упор на локализацию и адаптацию, что связано с существенным разнообразием почвенно-климатических и экономических условий. В то же время зарубежные проекты часто более технологически продвинуты в части масштабности использования ИИ и спутникового мониторинга. Синергия этих подходов может дать значительный импульс для развития устойчивого в зонах рискованного земледелия России с применением современных цифровых технологий.

В качестве перспективных направлений дальнейшего совершенствования агроэкологического мониторинга можно выделить разработку гибридных моделей мониторинга, включая интеграцию нейросетевых методов ИИ с климатическими и гидрологическими моделями, использование облачных решений в агросекторе, а также применение предиктивных эколого-математических моделей, позволяющих оценивать и прогнозировать социально-экономические эффекты улучшенного мониторинга.

Заключение

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Современные методы оперативного мониторинга с использованием средств ИИ и нейросетевых технологий позволяет существенно повысить точность и оперативность оценки состояния орошаемых агрофитоценозов в условиях рискованного земледелия, в частности Волгоградской области и аналогичных регионов. В условиях рискованного земледелия особое внимание должно уделяться мониторингу мелиоративного состояния земель и предотвращению деградационных процессов, что влияет на устойчивость и продуктивность агрофитоценозов.

2. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с высоким разрешением съемки и обработкой получаемых изображений методами глубокого обучения позволяет в режиме реального выявлять дефекты развития растений, стрессовые состояния и патологические изменения, что обеспечивает возможность оперативной корректировки агротехнических мероприятий.

3. Опубликованные результаты российских и зарубежных исследований подтверждают высокую эффективность комплексного использования дистанционного зондирования, IoT-сенсоров и методов ИИ для мониторинга и управления водным режимом, почвенно-химическими характеристиками и продуктивностью агроценозов.

4. Основными ограничениями современных систем остаются требования к качеству и объему исходных данных, необходимость адаптации алгоритмов ИИ к локальным региональным условиям, а также все еще высокая стоимость внедрения и поддержки технологий.

5. Актуальным направлением совершенствования агроэкологического мониторинга является разработка гибридных систем мониторинга, объединяющих спутниковые данные, данные БПЛА, локальные сенсоры и климатическую информацию для более комплексного и адаптивного управления орошением в рискованных условиях.

Реализация разработанных алгоритмов и технологий позволит повысить экономическую эффективность аграрного производства, снизить затраты на ресурсы и добиться устойчивого высокопродуктивного земледелия с соблюдением экологических норм и стандартов.

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

- Ivanov A.I. Methodology of the Agrophysical Institute's Modern System of Field Experiments / A.I. Ivanov, Zh.A. Ivanova // Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. — Springer Nature Switzerland AG, 2021. — Pt. 26. — P. 529–546. — DOI: 10.1007/978-3-030-67448-9_26.
- Якушев В.П. Интеллектуальные системы поддержки технологических решений в точном земледелии / В.П. Якушев, В.В. Якушев, Д.А. Матвеев // Земледелие. — 2020. — № 1. — С. 33–37.
- Токарев К.Е. Мультиклассовое распознавание посевов сельскохозяйственных культур рекуррентной нейронной сетью глубокого обучения со сверточными слоями по цветным аэрофотоснимкам высокого разрешения / К.Е. Токарев, Н.И. Лебедь // Международный сельскохозяйственный журнал. — 2024. — № 2 (398). — С. 192–195. — DOI: 10.55186/25876740_2024_67_2_192.
- Мелихова Е.В. Нейросетевая технология поиска и диагностики заболеваний полевых культур по RGB изображениям их листьев / Е.В. Мелихова, К.Е. Токарев, С.Д. Фомин [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2025. — № 2 (80). — С. 36–44. — DOI: 10.32786/2071-9485-2025-02-04.
- Холуденева О.Ю. Автоматизированные технологии ведения комплексного мониторинга орошаемых агроландшафтов Поволжья : дис. ... канд. техн. наук / Холуденева Ольга Юрьевна. — Саратов, 2002. — 272 с.
- 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.
- Подлипов В.В. Экспериментальное определение влажности почвы по гиперспектральным изображениям / В.В. Подлипов, В.Н. Щедрин, А.Н. Бабичев [и др.] // Компьютерная оптика. — 2018. — № 5. — Т. 42. — С. 877–884. — DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-877-884.

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. Бородычев В.В. Обобщенная модель автоматизированной информационной системы мониторинга и управления орошением в режиме реального времени / В.В. Бородычев, М.Н. Лытов // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. — 2017. — № 1 (45). — С. 161–170.
10. 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.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614442 Российская Федерация. Информационная система диагностики состава биологических образцов почвы на основе нейросетевой модели: № 2023613269 : заявлено 21.02.2023 : опубликовано 01.03.2023 / Трухачев В.И., Белоухов С.Л., Худякова Е.В. [и др.].
12. 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 НВ АУК. — 2025. — № 4 (82). — С. 474–482. — DOI: 10.32786/2071-9485-2025-04-50.
13. Smith J. Integrating Artificial Intelligence into an Automated Irrigation System / J. Smith, T. Nguyen, R. Patel // Sensors. — 2025. — № 25 (4). — P. 1478.
14. Li X. Sentinel-2 and Machine Learning-Based Irrigation Mapping in Semi-Arid Regions / X. Li, L. Zhang, S. Wang // Remote Sensing. — 2025. — № 17 (6). — P. 1322.
15. Kumar P. AI-Driven Predictive Analytics for Irrigation Scheduling Under Water-Scarce Conditions / P. Kumar [et al.] // Agricultural Water Management. — 2025. — № 260. — Art. 107252.
16. Пахомов А.А. Мониторинг нарушенных земель и основные диагностические показатели деградационных явлений на орошаемых черноземах / А.А. Пахомов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2016. — № 10 (144). — С. 41–45.
17. Васильев С.М. Мониторинг орошаемого агроландшафта с учетом калибровки данных дистанционного зондирования в рамках геоинформационных технологий / С.М. Васильев, Л.А. Митяева // Научный журнал КубГАУ. — 2017. — № 131 (07). — С. 1–16.
18. Галкин А.И. Применение больших данных и нейросетей в точном земледелии для повышения урожайности и устойчивости сельскохозяйственного производства / А.И. Галкин // Аграрная наука. — 2025. — № 3. — С. 150–154. — DOI: 10.32634/0869-8155-2025-392-03-150-154.
19. Вильямс В.Р. Избранные сочинения: в 5 т / В.Р. Вильямс. — Москва: Сельхозгиз, 1950. — Т. 1. Учение о почве и растениях. — 584 с.
20. Димо Н.А. Плодородие почвы и его регулирование / Н.А. Димо. — Москва: Колос, 1975. — 320 с.
21. Дояренко А.Г. Водопроницаемость почв и грунтов как фактор плодородия полей / А.Г. Дояренко. — 1963. — С. 79–91.
22. Казаринов В.П. Научные основы повышения плодородия почв / В.П. Казаринов. — Москва: Россельхозиздат, 1983. — 256 с.
23. Лапин Г.А. Агротехника и почвенное плодородие / Г.А. Лапин. — Москва: Агропромиздат, 1987. — 288 с.
24. Попов А.И. Повышение эффективности агротехнических приёмов в земледелии / А.И. Попов. — Москва: Колос, 1999. — 304 с.
25. Рогачев А.Ф. Методические подходы к получению и обработке данных дистанционного зондирования для обоснования мелиоративных мероприятий / А.Ф. Рогачев // Известия НВ АУК. — 2018. — № 4. — С. 332–339.
26. Мелихова Е.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве / Е.В. Мелихова, Д.А. Мелихов // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. — 2019. — № 3. — С. 29. — EDN: FGYPJT.
27. Шевченко В.А. Совершенствование мониторинга мелиорированных сельскохозяйственных земель / В.А. Шевченко, С.Д. Исаева // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. — 2018. — № 2 (50). — С. 72–78.
28. Овчинников А.С. Концептуальные подходы к созданию систем мониторинга и управления орошением / А.С. Овчинников, В.В. Бородычев, М.Н. Лытов [и др.] // Известия НВ АУК. — 2019. — № 2 (54). — С. 26–39. — DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-2.
29. Мифтахов И.Р. Разработка диагностической платформы на базе БПЛА для определения заболеваний растений на основе глубокого обучения : дис. ... канд. техн. наук / Мифтахов Ильнур Ринатович. — Уфа, 2024. — 263 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ivanov A.I. Methodology of the Agrophysical Institute's Modern System of Field Experiments / A.I. Ivanov, Zh.A. Ivanova // Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes. — Springer Nature Switzerland AG, 2021. — Pt. 26. — P. 529–546. — DOI: 10.1007/978-3-030-67448-9_26.
2. Jakushev V.P. Intel'ktual'nye sistemy podderzhki tehnologicheskikh reshenij v tochnom zemledelii [Intelligent systems for supporting technological solutions in precision farming] / V.P. Jakushev, V.V. Jakushev, D.A. Matveenko // Zemledelie [Agriculture]. — 2020. — № 1. — P. 33–37. [in Russian]
3. Tokarev K.E. Mul'tiklassovoe raspoznavanie posevov sel'skhozajstvennykh kul'tur rekurrentnoj nejronnoj set'ju glubokogo obucheniya so svertochnymi slojami po cvetnym ajerofotosnimkam vysokogo razresheniya [Multi-class recognition of agricultural crops using a recurrent deep learning neural network with convolutional layers based on high-resolution colour aerial photographs] / K.E. Tokarev, N.I. Lebed' // Mezhdunarodnyj sel'skhozajstvennyj zhurnal [International Agricultural Journal]. — 2024. — № 2 (398). — P. 192–195. — DOI: 10.55186/25876740_2024_67_2_192. [in Russian]

4. Melihova E.V. Nejrosetevaja tehnologija poiska i diagnostiki zabolevanij polevyh kul'tur po RGB izobrazhenijam ih list'ev [Neural network technology for searching and diagnosing diseases in field crops using RGB images of their leaves] / E.V. Melihova, K.E. Tokarev, S.D. Fomin [et al.] // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Lower Volga Agricultural University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2025. — № 2 (80). — P. 36–44. — DOI: 10.32786/2071-9485-2025-02-04. [in Russian]
5. Holudeneva O.Ju. Avtomatizirovannye tehnologii vedenija kompleksnogo monitoringa oroshaemyh agrolandshaftov Povolzh'ja [Automated technologies for comprehensive monitoring of irrigated agricultural landscapes in the Volga region] : diss. ... PhD in Technical Sciences / Holudeneva Ol'ga Jur'evna. — Saratov, 2002. — 272 p. [in Russian]
6. Jakushev V.V. Strukturizacija agrotehnologicheskikh znaniy dlja postroenija ontologij v rastenievodstve [Structuring agrotechnological knowledge for building ontologies in plant growing] / V.V. Jakushev // Zemledelie [Agriculture]. — 2022. — № 7. — P. 3–7. — DOI: 10.24412/0044-3913-2022-7-3-7. [in Russian]
7. Podlipnov V.V. Jeksperimental'noe opredelenie vlazhnosti pochvy po giperspektral'nym izobrazhenijam [Experimental determination of soil moisture using hyperspectral images] / V.V. Podlipnov, V.N. Shhedrin, A.N. Babichev [et al.] // Komp'juternaja optika [Computer Optics]. — 2018. — № 5. — Vol. 42. — P. 877–884. — DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-877-884. [in Russian]
8. Ivanov D.A. Prognozirovanie razmeshhenija posevov l'na na osnove dannyh monitoringa i GIS-tehnologij [Forecasting flax crop placement based on monitoring data and GIS technologies] / D.A. Ivanov, M.V. Rubljuk, O.N. Anciferova // Zemledelie [Agriculture]. — 2023. — № 7. — P. 3–6. — DOI: 10.24412/0044-3913-2023-7-3-6. [in Russian]
9. Borodychev V.V. Obobshhennaja model' avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy monitoringa i upravlenija orosheniem v rezhime real'nogo vremeni [Generalised model of an automated information system for real-time irrigation monitoring and control] / V.V. Borodychev, M.N. Lytov // Izvestija nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Lower Volga Agricultural University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2017. — № 1 (45). — P. 161–170. [in Russian]
10. Mihajlenko I.M. Razvitie metodov i sredstv primenenija dannyh distancionnogo zondirovanija zemli v sel'skom hozjajstve [Development of methods and means of applying remote sensing data in agriculture] / I.M. Mihajlenko // Tendencii razvitiya nauki i obrazovanija [Tendencies in the development of science and education]. — 2018. — № 41-3. — P. 70–83. [in Russian]
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2023614442 Rossijskaja Federacija. Informacionnaja sistema diagnostiki sostava biologicheskikh obrazcov pochvy na osnove nejrosetevoj modeli: № 2023613269 [Certificate of state registration of computer program No. 2023614442 Russian Federation. Information system for diagnosing the composition of biological soil samples based on a neural network model: No. 2023613269] : applied 21.02.2023 : pun:ished 01.03.2023 / Truhachev V.I., Belopuhov S.L., Hudjakova E.V. [et al.]. [in Russian]
12. Rogachev A.F. Sistemnyj analiz i nejrosetevye metody operativnogo monitoringa vshodov ozimoj pshenicy posle perezimovki v uslovijah kontinental'nogo klimata [System analysis and neural network methods for operational monitoring of winter wheat seedlings after overwintering in continental climate conditions] / A.F. Rogachev, K.E. Tokarev // Izvestija NV AUK [Proceedings of the LV AUC]. — 2025. — № 4 (82). — P. 474–482. — DOI: 10.32786/2071-9485-2025-04-50. [in Russian]
13. Smith J. Integrating Artificial Intelligence into an Automated Irrigation System / J. Smith, T. Nguyen, R. Patel // Sensors. — 2025. — № 25 (4). — P. 1478.
14. Li X. Sentinel-2 and Machine Learning-Based Irrigation Mapping in Semi-Arid Regions / X. Li, L. Zhang, S. Wang // Remote Sensing. — 2025. — № 17 (6). — P. 1322.
15. Kumar P. AI-Driven Predictive Analytics for Irrigation Scheduling Under Water-Scarce Conditions / P. Kumar [et al.] // Agricultural Water Management. — 2025. — № 260. — Art. 107252.
16. Pahomov A.A. Monitoring narushennyh zemel' i osnovnye diagnosticheskie pokazateli degradacionnyh javlenij na oroshaemyh chernozemah [Monitoring of disturbed lands and key diagnostic indicators of degradation phenomena on irrigated black soils] / A.A. Pahomov // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Altai State Agrarian University]. — 2016. — № 10 (144). — P. 41–45. [in Russian]
17. Vasil'ev S.M. Monitoring oroshaemogo agrolandshafta s uchetom kalibrovki dannyh distancionnogo zondirovanija v ramkah geoinformacionnyh tehnologij [Monitoring irrigated agricultural landscapes with consideration of remote sensing data calibration within the framework of geoinformation technologies] / S.M. Vasil'ev, L.A. Mitjaeva // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Scientific Journal of Kuban State Agrarian University]. — 2017. — № 131 (07). — P. 1–16. [in Russian]
18. Galkin A.I. Primenenie bol'shikh dannyh i nejrosetej v tochnom zemledelii dlja povyshenija urozhajnosti i ustojchivosti sel'skohozjajstvennogo proizvodstva [The use of big data and neural networks in precision farming to increase crop yields and the sustainability of agricultural production] / A.I. Galkin // Agrarnaja nauka [Agricultural Science]. — 2025. — № 3. — P. 150–154. — DOI: 10.32634/0869-8155-2025-392-03-150-154. [in Russian]
19. Williams V.R. Izbrannye sochinenija: v 5 t [Selected Works: in 5 volumes] / V.R. Williams. — Moscow: Sel'hozgiz, 1950. — Vol. 1. Teachings on Soil and Plants. — 584 p. [in Russian]
20. Dimo N.A. Plodorodie pochvy i ego regulirovanie [Soil fertility and its regulation] / N.A. Dimo. — Moscow: Kolos, 1975. — 320 p. [in Russian]
21. Dojarenko A.G. Vodopronicaemost' pochv i gruntov kak faktor plodorodija polej [Water permeability of soils and ground as a factor in field fertility] / A.G. Dojarenko. — 1963. — P. 79–91. [in Russian]
22. Kazarinov V.P. Nauchnye osnovy povyshenija plodorodija pochv [Scientific basis for improving soil fertility] / V.P. Kazarinov. — Moscow: Rossel'hozizdat, 1983. — 256 p. [in Russian]
23. Lapin G.A. Agrotehnika i pochvennoe plodorodie [Agricultural technology and soil fertility] / G.A. Lapin. — Moscow: Agropromizdat, 1987. — 288 p. [in Russian]

24. Popov A.I. Povyshenie jeffektivnosti agrotehnicheskikh priyomov v zemledelii [Improving the effectiveness of agricultural techniques in farming] / A.I. Popov. — Moscow: Kolos, 1999. — 304 p. [in Russian]
25. Rogachev A.F. Metodicheskie podhody k polucheniju i obrabotke dannyh distancionnogo zondirovaniya dlja obosnovaniya meliorativnyh meroprijatij [Methodological approaches to obtaining and processing remote sensing data for substantiating land reclamation measures] / A.F. Rogachev // Izvestija NV AUK [Proceedings of the LV AUC]. — 2018. — № 4. — P. 332–339. [in Russian]
26. Melihova E.V. Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov v agrarnom proizvodstve [The use of unmanned aerial vehicles in agricultural production] / E.V. Melihova, D.A. Melihov // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh nauk i tehnologij Integral [Integral International Journal of Applied Sciences and Technologies]. — 2019. — № 3. — P. 29. — EDN: FGYPTJ. [in Russian]
27. Shevchenko V.A. Sovershenstvovanie monitoringa meliorirovannyh sel'skohozjajstvennyh zemel' [Improving the monitoring of reclaimed agricultural land] / V.A. Shevchenko, S.D. Isaeva // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie [Proceedings of the Lower Volga Agricultural University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2018. — № 2 (50). — P. 72–78. [in Russian]
28. Ovchinnikov A.S. Konceptual'nye podhody k sozdaniyu sistem monitoringa i upravleniya orosheniem [Conceptual approaches to the creation of irrigation monitoring and control systems] / A.S. Ovchinnikov, V.V. Borodychev, M.N. Lytov [et al.] // Izvestija NV AUK [Proceedings of the LV AUC]. — 2019. — № 2 (54). — P. 26–39. — DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-2. [in Russian]
29. Miftahov I.R. Razrabotka diagnosticheskoy platformy na baze BPLA dlja opredeleniya zabolevanij rastenij na osnove glubokogo obuchenija [Development of a diagnostic platform based on UAVs for detecting plant diseases using deep learning] : diss. ... PhD in Technical Sciences / Miftahov Il'nur Rinatovich. — Ufa, 2024. — 263 p. [in Russian]