 © Авторы статьи / Authors of the article

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО/GENERAL AGRICULTURE AND CROP PRODUCTION

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19 EDN: QFHONK

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ФИТОСАНИТАРНОГО СОСТОЯНИЯ АГРОБИОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКОГО РИСКА: НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ

Научная статья

Токарев К.Е.[1,] *, Воробьева Н.С.[2], Моторин В.А.[3], Гапич Д.С.[4], Александрина Н.А.[5]

[1] ORCID : 0000-0002-5548-5637;

[2] ORCID : 0000-0001-9035-6382;

[4] ORCID : 0000-0002-5048-1397;

[5] ORCID : 0009-0006-2782-6779;

[1, 2, 3, 5] Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Российская Федерация

[2] Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Российская Федерация

[4] Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

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

Предложена: 21.10.2026; Принята: 11.11.2026; Опубликована: 19.11.2026

Аннотация

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода от унифицированных агротехнологий к пространственно дифференцированным решениям в условиях рискованного земледелия.

Цель исследования — разработка и научно-методическое обоснование концептуального решения для рационального использования агробиоценозов, обеспечивающее устойчивость растениеводства в условиях рискованного земледелия, сохранение почвенного плодородия и получение растительного сырья с заданными показателями безопасности и технологического качества.

Объектом исследования являются агробиоценозы полевых культур в условиях повышенной погодной и пространственной изменчивости.

Методологическую основу составляют совместная обработка данных средств беспилотных автоматизированных систем, наземных фитосанитарных обследований и агрометеорологических наблюдений, а также сверточные нейронные сети, алгоритмы геопространственного анализа.

Разработана концептуальная архитектура интеллектуальной системы дистанционного мониторинга развития и фитосанитарного состояния агробиоценозов в период активной вегетации. Система предназначена для выявления сорной растительности, локализации очагов её распространения, обнаружения визуальных признаков повреждения культур вредителями и болезнями, а также формирования пространственно дифференцированных рекомендаций по биозащите. Предложена трёхуровневая схема мониторинга, включающая обзорный, детализирующий и подтверждающий уровни наблюдений. Предложен алгоритм преобразования результатов классификации и сегментации в карты-задания для локального внесения средств защиты растений с учётом экономических порогов вредоносности, регламентов применения препаратов и технических ограничений оборудования.

Ключевые слова: агробиоценоз, дистанционный мониторинг, точное земледелие, компьютерное зрение, фитосанитарное состояние, сорная растительность, дифференцированное внесение.

AN INTELLIGENT SYSTEM FOR THE REMOTE MONITORING OF THE PHYTOSANITARY STATE OF AGROBIOCENOSES UNDER CONDITIONS OF NATURAL AND CLIMATIC RISK: SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL SUBSTANTIATION AND DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE

Research article

Tokarev K.E.[1,] *, Vorobeva N.S.[2], Motorin V.A.[3], Gapich D.S.[4], Aleksandrina N.A.[5]

[1] ORCID : 0000-0002-5548-5637;

[2] ORCID : 0000-0001-9035-6382;

[4] ORCID : 0000-0002-5048-1397;

[5] ORCID : 0009-0006-2782-6779;

[1, 2, 3, 5] Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russian Federation

[2] Kazan Federal University - Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

[4] Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

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

Suggested: 21.10.2026; Accepted: 11.11.2026; Published: 19.11.2026

Abstract

The relevance of the research is due to the need to move away from standardised agricultural practices towards spatially differentiated solutions in the context of risky farming.

 © Авторы статьи / Authors of the article

The aim of the study is to develop and provide a scientific and methodological basis for a conceptual approach to the rational use of agrobiocenoses, ensuring the sustainability of crop production under conditions of high-risk farming, the preservation of soil fertility, and the production of plant-based raw materials meeting specified safety and processing quality standards.

The subject of the study is the agrobiocenoses of arable crops under conditions of increased climatic and spatial variability.

The methodological framework consists of the joint processing of data from unmanned automated systems, ground-based phytosanitary surveys and agrometeorological observations, as well as convolutional neural networks and geospatial analysis algorithms.

A conceptual architecture has been developed for an intelligent system for the remote monitoring of the development and phytosanitary state of agrobiocenoses during the active growing season. The system is designed to identify weeds, localise foci of their spread, detect visual signs of crop damage caused by pests and diseases, and generate spatially differentiated recommendations for biological control. A three-tier monitoring scheme has been suggested, comprising overview, detailed and confirmatory levels of observation. An algorithm is offered for converting classification and segmentation results into application maps for the local application of plant protection products, taking into account economic damage thresholds, product application regulations and technical limitations of the equipment.

Keywords: agrobiocenosis, remote monitoring, precision farming, computer vision, phytosanitary state, weeds, targeted application.

Введение

Земледелие в условиях повышенного природно-климатического риска характеризуется нестабильностью урожайности, дефицитом или избытком влаги, температурными стрессами и рисками деградации почв. Унифицированные агротехнологии не всегда учитывают пространственную неоднородность полей и изменчивость погодных условий. Повышение устойчивости растениеводства в условиях континентального климата требует перехода от усредненного управления полем к пространственным и дифференцированным решениям. Неравномерность увлажнения, изменчивость температурного режима, неоднородность почвенного покрова и различия в развитии растений формируют внутри одного агробиоценоза участки с неодинаковой продуктивностью и фитосанитарной нагрузкой. Сплошная обработка таких участков по единой схеме не всегда соответствует фактической потребности в защитных мероприятиях [1].

Традиционные маршрутные обследования сохраняют диагностическую ценность, однако ограничены трудоемкостью и пространственным охватом. Дистанционный мониторинг позволяет чаще оценивать состояние агробиоценоза и локализовать неоднородности не обеспечивая достоверного установления их причин. Схожие изменения окраски и структуры растительного покрова могут быть связаны с засухой, дефицитом питания, болезнями, повреждением вредителями или нарушением агротехнологии. Применение методов цифрового мониторинга, алгоритмов прогнозной аналитики и дифференцированного управление агротехническими операциями позволяют адаптировать сельскохозяйственное производство к складывающимся условиям природно-климатических рисков [2].

Уход с рынка ряда зарубежных операторов программного обеспечения для точного земледелия и ограничения на использование зарубежных облачных сервисов диктуют необходимость создания отечественных аппаратно-программных комплексов, учитывающих локальную агрономическую специфику и нормативную базу. Внедрение подобных интеллектуальных систем наиболее экономически обосновано для крупных и средних сельскохозяйственных предприятий, возделывающих высокомаржинальные культуры, где стоимость беспилотного мониторинга и ИИ-аналитики многократно окупается за счет экономии средств защиты растений (СЗР) и сохранения урожая [3].

Методы и принципы исследования

Предлагается трехуровневая схема мониторинга, включающая:

- обзорный уровень — выявление неоднородностей развития посевов и зон потенциального неблагополучия;
- детализирующий уровень — съемка с пространственным разрешением, достаточным для распознавания целевых объектов;
- подтверждающий уровень — наземное обследование, учет вредных организмов и, при необходимости, лабораторная диагностика.

Спутниковые изображения могут использоваться для общего анализа динамики растительного покрова. Основным источником данных для распознавания отдельных растений и локальных повреждений предполагается беспилотная и наземная съемка. Возможность обнаружения конкретного объекта должна устанавливаться экспериментально с учетом его размера, контрастности и фактического пространственного разрешения [4].

Состав и структура информационно-аналитической базы представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Состав и структура информационно-аналитической базы

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.1

Группа данных	Содержание	Назначение
RGB-изображения	Цветные изображения посевов и отдельных растений	Распознавание культурной и сорной растительности, видимых повреждений
Мультиспектральные данные	Спектральные каналы, включая	Анализ неоднородности

 © Авторы статьи / Authors of the article

Группа данных	Содержание	Назначение
	ближний инфракрасный и канал красного края при наличии соответствующего сенсора	растительного покрова и признаков стресса
Наземные обследования	Видовой состав, плотность сорняков, численность вредителей, распространенность и развитие болезней	Формирование эталонной разметки и подтверждение диагностики
Агрометеорологические данные	Температура, осадки, влажность, ветер и другие доступные показатели	Интерпретация динамики состояния растений и ограничение условий обработки
Агротехнологические данные	Культура, сорт, сроки сева, предшественник, внесенные удобрения и средства защиты	Учет истории поля и возможных причин наблюдаемых изменений
Геопространственные данные	Границы поля, рельеф, защитные зоны, препятствия	Построение карт и планирование операций
Данные исполнительной техники	Рабочая ширина, характеристики секций или форсунок, задержки управления, точность навигации	Адаптация карты-задания к фактическим возможностям обработки

Примечание: по ист. [5], [6], [7], [8]

Алгоритм, представленный на рисунке 1 отражает принцип последовательного уточнения диагностики от общего обзора к точечной верификации, что снижает риск ложных срабатываний системы. На верхнем уровне осуществляется обзорный мониторинг с использованием спутниковых снимков и обзорных полетов БПЛА для выявления зон потенциального стресса. На среднем уровне выполняется детализирующая съемка с высоким пространственным разрешением для распознавания объектов и локальных повреждений. На нижнем уровне проводится наземное обследование и лабораторная диагностика для верификации причин аномалий и формирования эталонной разметки [9], [10].

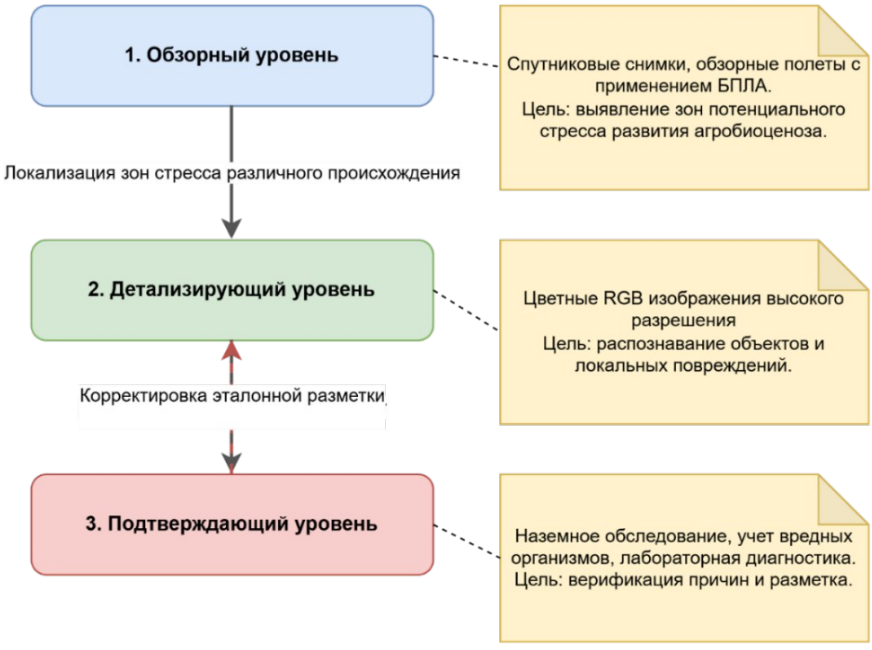


Рисунок 1 - Трехуровневый алгоритм мониторинга фитосанитарного состояния агробиоценозов
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.2

Диаграмма, представленная на рисунке 2, отражает структуру центрального хранилища данных и семь взаимосвязанных групп данных, поступающих в систему. Желтые блоки слева представляют данные дистанционного зондирования и наземных наблюдений (RGB-изображения, мультиспектральные данные, наземные обследования, агрометеоданные). Фиолетовые блоки справа содержат контекстуальную и техническую информацию (агротехнологическая история, геопространственные данные, параметры исполнительной техники). Все данные привязываются к единой системе координат и временным меткам для обеспечения согласованности анализа.

 © Авторы статьи / Authors of the article

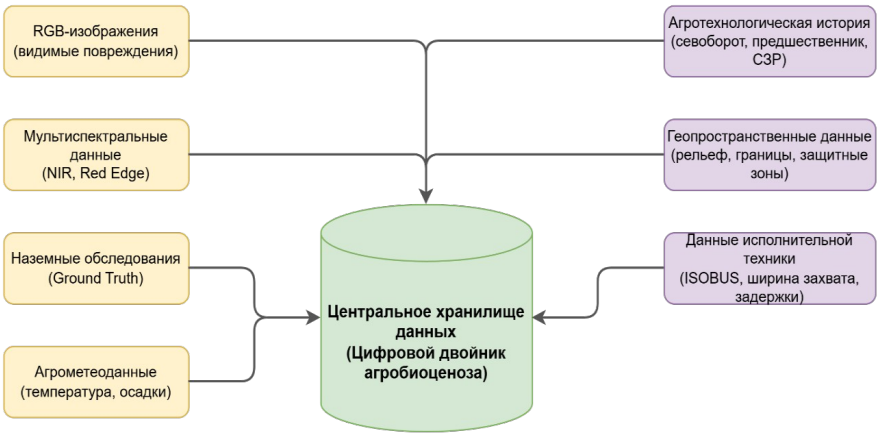


Рисунок 2 - Состав и взаимосвязь исходных данных интеллектуальной системы
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.3

Интеграция разнородных данных позволяет учитывать не только визуальные признаки, но и историю поля, условия выращивания и технические возможности оборудования при принятии решений [11].

Модульная архитектура интеллектуальной системы мониторинга, представленная на рисунке 3, включает следующие модули: прием и хранение данных, контроль качества и предобработка нейросетевой анализ и пространственно-временной анализ, оценка неопределенности, агротехнологический модуль поддержки решений, модуль формирования карт-заданий.

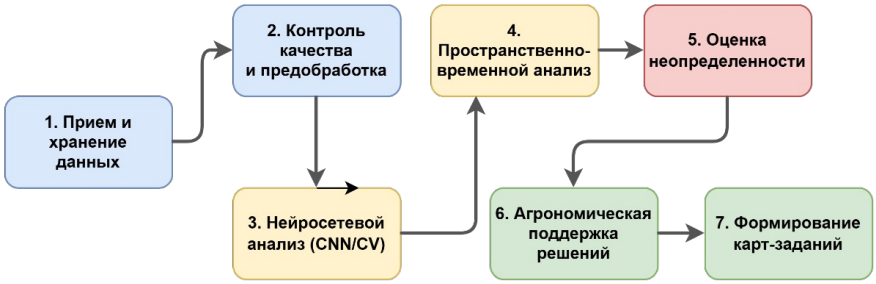


Рисунок 3 - Модульная архитектура интеллектуальной системы мониторинга агробиоценоза
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.4

 © Авторы статьи / Authors of the article

Принципиальным является разделение модуля «распознавание» и модуля «принятие решений», что предотвращает автоматическое назначение обработок без агрономической верификаци [12].

Алгоритм обработки входного RGB-изображения высокого разрешения представлен на рисунке 4. Параллельно выполняются сегментация (выделение маски признаков «Растительность, Фон, Сорняк») и детекция (поиск дефектов развития). После геоинформационной привязки и наложения масок система оценивает точность модели. При точности («accuracy») более 75% объект переводится в категорию «Вероятный объект» для включения в карту-задание. При точности менее 75% формируется задание на наземную проверку. Результатом является формирование карт геопространственных аномалий развития агробиоценоза. Порог точности классификации «accuracy» более 75% для перевода объекта в категорию «Вероятный объект» для карты-задания обоснован экспертной оценкой агрономов: при более высоком пороге (например, 90%) система будет генерировать избыточные задания на наземную проверку, сводя на нет экономию труда; при более низком — возрастет риск ложноположительных срабатываний и неоправданного внесения химии [13].

 © Авторы статьи / Authors of the article

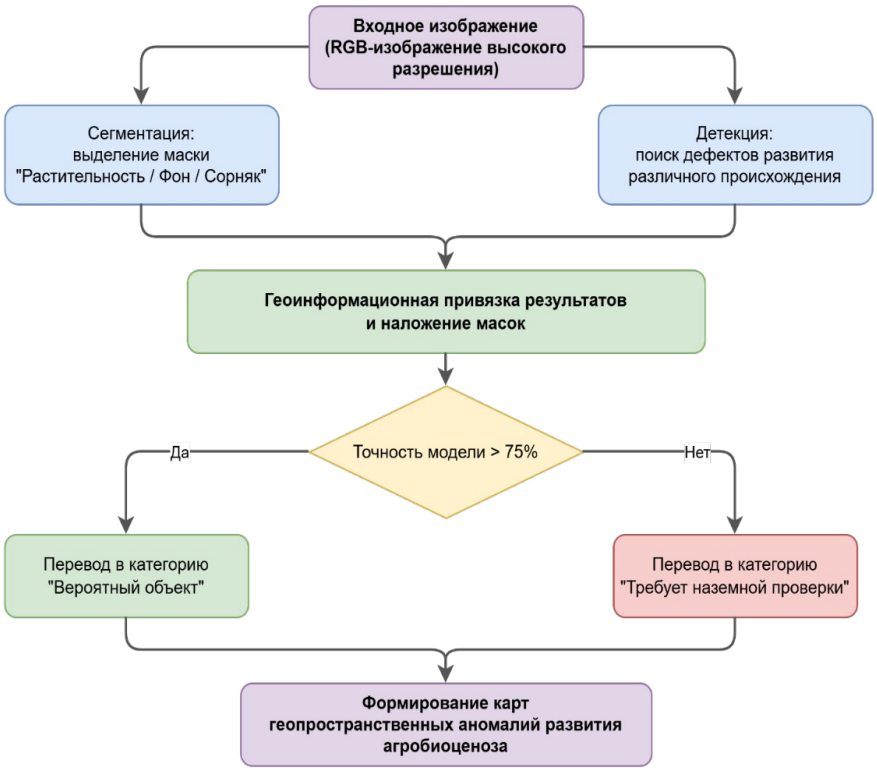


Рисунок 4 - Алгоритм применения методов компьютерного зрения для диагностики фитосанитарного состояния
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.5

На рисунке 5 представлен алгоритм процедур поддержки принятия решения после нейросетевого распознавания фитосанитарного состояния агробиоценозлв. Показаны этапы оценки неопределённости, агрономической верификации и формирования карты-задания с учётом агроэкологических и технических ограничений. После калибровки вероятностей модель проверяет точность предсказания. При недостаточной точности назначается наземное обследование. При высокой точности проводится проверка экономического порога вредоносности с учётом фазы культуры, истории поля и прогноза погоды. При превышении порога формируется карта-задания (выбор препарата, норма внесения, защитные зоны), которая преобразуется в файл формата, совместимого с с.-х. техникой. Алгоритм минимизирует риск ошибочного применения СЗР.

 © Авторы статьи / Authors of the article

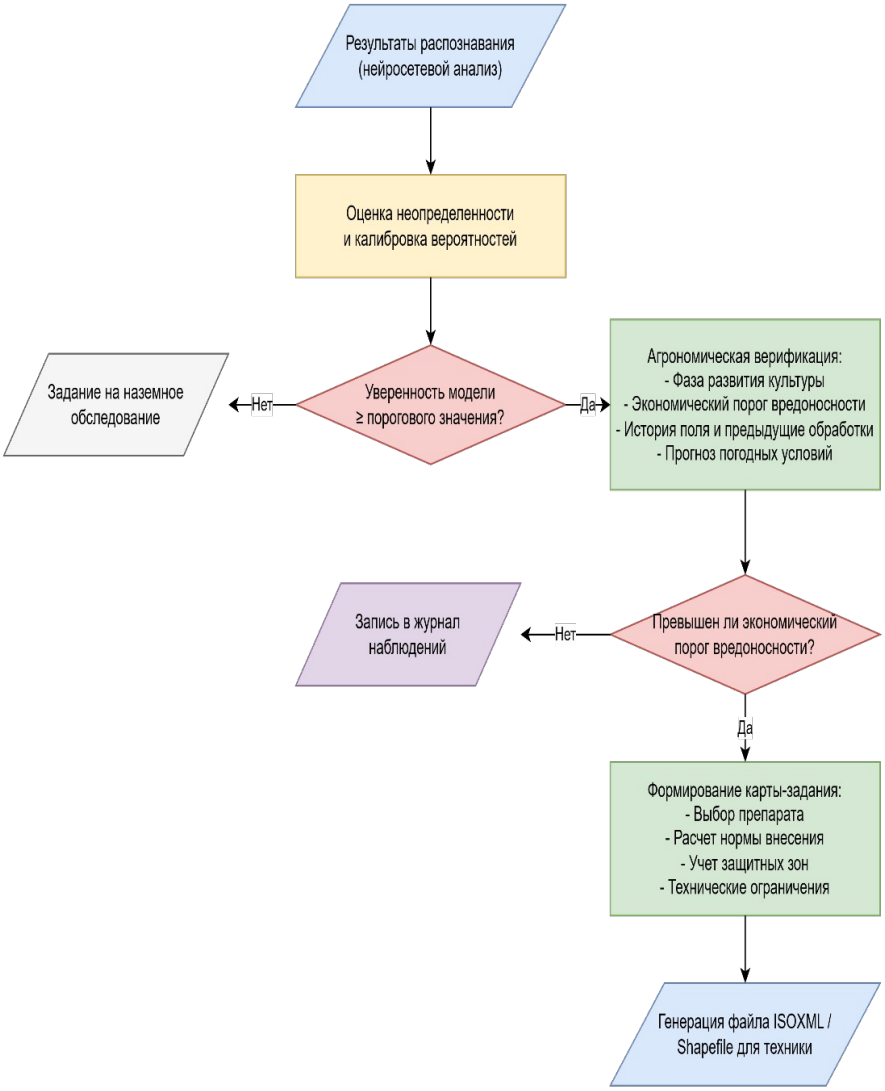


Рисунок 5 - Алгоритм двухступенчатой агрономической верификации результатов нейросетевого анализа
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.6

На рисунке 6 представлена модифицированная архитектура сверточной нейронной сети U-Net с skip-соединениями, используемая для семантической сегментации изображений посевов агроценоза. Показаны блоки энкодера (сжатие) и декодера (восстановление) с указанием размеров фильтров и операций. Энкодер последовательно применяет свёртки 3*3 с ReLU-активацией и max-pooling 2*2. Центральный bottleneck содержит 256 фильтров. Декодер использует up-convolution и skip-соединения для сохранения пространственной точности. Выходная маска формируется с помощью Softmax. Предлагаемая архитектура обеспечивает IoU (метрика пересечения предсказанной и истинной маски сегментации) более 0.85 на тестовых наборах данных.

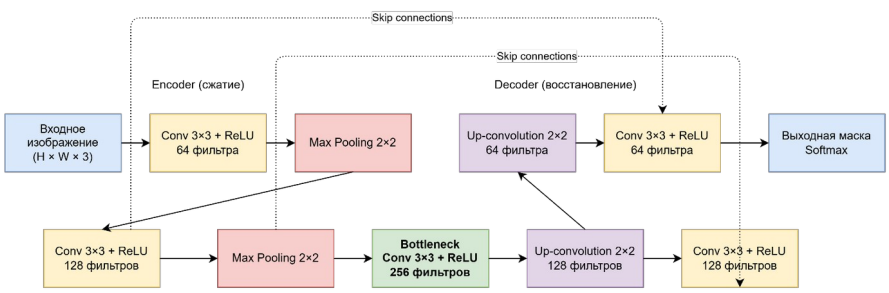


Рисунок 6 - Архитектура нейронной сети U-Net для семантической сегментации агробиоценозов
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.7

 © Авторы статьи / Authors of the article

В таблице 2 систематизированы ключевые показатели оценки результативности предлагаемой системы по шести направлениям. Диагностическое направление включает полноту обнаружения значимых очагов, частоту ложных срабатываний и качество локализации. Технологическое — долю корректно выполненного задания, пропуски, перекрытия и отклонение фактической дозы. Агрономическое направление охватывает эффективность подавления вредных объектов, состояние культуры, урожайность и качество сырья. Ресурсное учитывает обработанную площадь, расход препарата, воды, топлива и затраты труда. Экономическое направление оценивает совокупные затраты, стоимость сохранённой продукции и изменение экономического результата. Экологическое — массу действующих веществ, показатели риска для нецелевых объектов и остаточные количества в продукции. Такой комплексный подход позволяет оценивать систему не только по точности распознавания, но и по реальной агрономической, ресурсной и экологической эффективности.

Таблица 2 - Критерии технологической, экономической и экологической оценки интеллектуальной системы мониторинга агробиоценозов

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.75.19.8

Направление	Показатели
Диагностическое	Полнота обнаружения значимых очагов, частота ложных срабатываний, качество локализации
Технологическое	Доля корректно выполненного задания, пропуски, перекрытия, отклонение фактической дозы
Агрономическое	Эффективность подавления вредных объектов, состояние культуры, урожайность и качество сырья
Ресурсное	Обработанная площадь, расход препарата, воды, топлива, затраты труда
Экономическое	Совокупные затраты, стоимость сохраненной продукции, изменение экономического результата
Экологическое	Масса действующих веществ, показатели риска для нецелевых объектов, остаточные количества в продукции

Заключение

Предложена архитектура интеллектуальной системы дистанционного мониторинга развития и фитосанитарного состояния агробиоценозов, объединяющая беспилотную съемку, наземные обследования, сверточные нейронные сети и геопространственный анализ. Основой системы является последовательное разделение задач обнаружения признаков, подтверждения их причин и принятия решения о защитном мероприятии. Такой подход позволяет учитывать ограничения компьютерного зрения и снижать риск необоснованного применения средств защиты растений. Для поиска сорной растительности предложена схема семантической сегментации с последующим выделением очагов и анализом их многовременной динамики. Для мониторинга болезней и повреждений вредителями предусмотрено сочетание дистанционного выявления подозрительных участков с уточняющей диагностикой. Формирование карт-заданий должно выполняться с учетом агротехнологической необходимости, действующих регламентов, неопределенности распознавания и технических возможностей оборудования. Обязательным элементом является контроль фактического выполнения и последующей биологической эффективности. Результативность системы подлежит подтверждению в независимых полевых испытаниях. Критерием ее успешности следует считать не только точность распознавания, но и обоснованность решений, сохранение урожайности и качества сырья, ресурсную эффективность и подтвержденное снижение негативного воздействия на окружающую среду.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Финансирование

Исследования проведены в рамках выполнения тематического плана-задания на выполнение научно-исследовательских работ федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет» по заказу Министерства науки и высшего образования РФ за счет средств федерального бюджета в 2026 году по теме «Разработка ресурсосберегающих машин для возделывания сельскохозяйственных культур и систем рационального использования агробиоценозов на основе инновационных цифровых технологий в условиях рискованного земледелия для получения экологически чистых продуктов переработки растительного сырья», по соглашению № 075-03-2026-541/6 от 20.08.2026 г.

Funding

The research was carried out as part of the implementation of the thematic task plan for the implementation of research by the Federal State budgetary educational institution of Higher Education Volgograd State Agrarian University commissioned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation at the expense of the federal budget in 2026 on the topic "Development of resource-saving machines for cultivating crops and systems for the rational use of agrobiocenoses in based on innovative digital technologies in risky farming to obtain environmentally friendly products for processing plant raw materials", under Agreement No. 075-03-2026-541/6 dated 08/20/2026.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

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.

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. Кондратьева О.В. Лучшие практики использования информационных технологий в АПК : Аналитический обзор / О.В. Кондратьева, Н.П. Мишуров, А.Д. Федоров [и др.]; Росинформагротех. — Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. — 84 с. — EDN: TEGIDA.

2. Шайтура С.В. Цифровая трансформация сельского хозяйства на основе беспилотных летательных аппаратов / С.В. Шайтура, М.Д. Князева, Л.П. Белю [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. — 2021. — № 7. — С. 174–182. — EDN: UDWFES.

3. Якушев В. П. Состояние и перспективы использования дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве / В.П. Якушев, Ю.Г. Захарян, С.Ю. Блохина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 19. — № 1. — С. 287–294. — DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-287-294. — EDN: GOSLXG.

4. 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.

5. Токарев К.Е. Разработка сверточной нейронной сети для классификации плодовых культур в системах технического зрения роботизированных комплексов послеуборочной обработки / К.Е. Токарев, Н.С. Воробьева, С.Д. Фомин [и др.] // Известия НВ АУК. — 2026. — № 4 (88). — С. 616–626. — DOI: 10.32786/2071-9485-2026-04-68.

6. Ценч Ю.С. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения / Ю.С. Ценч, Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова // Сельскохозяйственные машины и технологии. — 2024. — Т. 18. — № 2. — С. 11–19. — DOI: 10.22314/20737599-2024-18-2-11-19.

7. Альт В.В. Применение БПЛА для мониторинга и ухода за посевами зерновых культур / В.В. Альт, А.А. Солошенко, С.П. Исакова [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. — 2025. — № 19 (4). — С. 49–56. — DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-49-56. — EDN: VWQHJC.

8. Воробьева Н.С. Интеллектуальная система контроля температуры в теплице / Н.С. Воробьева, В.С. Бочарников, Е.Н. Захаров [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2026. — № 2 (86). — С. 516–523. — DOI: 10.32786/2071-9485-2026-02-57. — EDN: ISJBFJ.

9. Dasgupta I. AI crop predictor and weed detector using wireless technologies: A smart application for farmers / I. Dasgupta // Arabian Journal for Science and Engineering. — 2020. — Vol. 45. — № 12. — P. 11115–11127. — DOI: 10.1007/s13369-020-04928-2.

10. Salman Z. Crop-saving with AI: latest trends in deep learning techniques for plant pathology / Z. Salman // Frontiers in Plant Science. — 2023. — Vol. 14. — Art. no. 1224709. — DOI:10.3389/fpls.2023.1224709.

11. Tirkey D. Performance analysis of AI-based solutions for crop disease identification, detection, and classification / D. Tirkey, K.K. Singh, S. Tripathi // Smart Agricultural Technology. — 2023. — Vol. 5. — Art. no. 100238. — DOI: 10.1016/j.atech.2023.100238.

12. Иванов А.Г. Оценка эффективности робототехнического средства со сменными модулями для различных технологических процессов возделывания овощных культур / А.Г. Иванов, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева [и др.] // Мехатроника, автоматика и робототехника. — 2026. — № 17. — С. 38–40. — DOI: 10.26160/2541-8637-2026-17-38-40. — EDN: PWQGOD.

 © Авторы статьи / Authors of the article

13. 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.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kondrateva O.V. Luchshie praktiki ispolzovaniya informatsionnikh tekhnologii v APK : Analiticheskii obzor [Best practices for using information technologies in the agro-industrial complex: Analytical review] / O.V. Kondrateva, N.P. Mishurov, A.D. Fedorov [et al.]; Rosinformagrotekh. — Moscow: Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support for the Agro-Industrial Complex, 2023. — 84 p. — EDN: TEGIDA. [in Russian]

2. Shaitura S.V. Tsifrovaya transformatsiya selskogo khozyaistva na osnove bespilotnikh letatelnikh apparatov [Digital transformation of agriculture based on unmanned aerial vehicles] / S.V. Shaitura, M.D. Knyazeva, L.P. Belyu [et al.] // Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi selskokhozyaistvennoi akademii [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy]. — 2021. — № 7. — P. 174–182. — EDN: UDWFES. [in Russian]

3. Yakushev V. P. Sostoyanie i perspektivi ispolzovaniya distantsionnogo zondirovaniya Zemli v selskom khozyaistve [The State and Prospects of Using Remote Sensing of the Earth in Agriculture] / V.P. Yakushev, Yu.G. Zakharyan, S.Yu. Blokhina // Sovremennie problemi distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. — 2022. — Vol. 19. — № 1. — P. 287–294. — DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-287-294. — EDN: GOSLXG. [in Russian]

4. Mikhailenko I.M. Otsenivanie parametrov sostoyaniya biomassi korneplodnikh kultur po dannim distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Estimating 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]

5. Tokarev K.E. Razrabotka svertochnoi neironnoi seti dlya klassifikatsii plodovikh kultur v sistemakh tekhnicheskogo zreniya robotizirovannikh kompleksov posleuborochnoi obrabotki [Development of a convolutional neural network for classifying fruit crops in the vision systems of robotic post-harvest complexes processing] / K.E. Tokarev, N.S. Vorobeva, S.D. Fomin [et al.] // Izvestiya NV AUK [Proceedings of NV AUK]. — 2026. — № 4 (88). — P. 616–626. — DOI: 10.32786/2071-9485-2026-04-68. [in Russian]

6. Tsench Yu.S. Razvitie sistem upravleniya poletom i sredstv aerofotosemki bespilotnikh vozdushnikh sudov selskokhozyaistvennogo naznacheniya [Development of flight control systems and aerial photography equipment for unmanned aerial vehicles for agricultural purposes] / Yu.S. Tsench, R.K. Kurbanov, N.I. Zakharova // Selskokhozyaistvennie mashini i tekhnologii [Agricultural Machinery and Technologies]. — 2024. — Vol. 18. — № 2. — P. 11–19. — DOI: 10.22314/20737599-2024-18-2-11-19. [in Russian]

7. Alt V.V. Primenenie BPLA dlya monitoringa i ukhoda za posevami zernovikh kultur [The use of UAVs for monitoring and caring for grain crops] / V.V. Alt, A.A. Soloshenko, S.P. Isakova [et al.] // Selskokhozyaistvennie mashini i tekhnologii [Agricultural Machinery and Technologies]. — 2025. — № 19 (4). — P. 49–56. — DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-49-56. — EDN: VWQHJC. [in Russian]

8. Vorobeva N.S. Intellektualnaya sistema kontrolya temperaturi v teplitse [Intelligent temperature control system in a greenhouse] / N.S. Vorobeva, V.S. Bocharnikov, Ye.N. Zakharov [et al.] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i visshee professionalnoe obrazovanie [Procceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education]. — 2026. — № 2 (86). — P. 516–523. — DOI: 10.32786/2071-9485-2026-02-57. — EDN: ISJBFJ. [in Russian]

9. Dasgupta I. AI crop predictor and weed detector using wireless technologies: A smart application for farmers / I. Dasgupta // Arabian Journal for Science and Engineering. — 2020. — Vol. 45. — № 12. — P. 11115–11127. — DOI: 10.1007/s13369-020-04928-2.

10. Salman Z. Crop-saving with AI: latest trends in deep learning techniques for plant pathology / Z. Salman // Frontiers in Plant Science. — 2023. — Vol. 14. — Art. no. 1224709. — DOI:10.3389/fpls.2023.1224709.

11. Tirkey D. Performance analysis of AI-based solutions for crop disease identification, detection, and classification / D. Tirkey, K.K. Singh, S. Tripathi // Smart Agricultural Technology. — 2023. — Vol. 5. — Art. no. 100238. — DOI: 10.1016/j.atech.2023.100238.

12. Ivanov A.G. Otsenka effektivnosti robototekhnicheskogo sredstva so smennimi modulyami dlya razlichnikh tekhnologicheskikh protsessov vozdelivaniya ovoshchnikh kultur [Assessment of the effectiveness of a robotic tool with interchangeable modules for various technological processes in the cultivation of vegetable crops] / A.G. Ivanov, I.A. Nesmiyanov, N.S. Vorobeva [et al.] // Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika [Mechatronics, Automation and Robotics]. — 2026. — № 17. — P. 38–40. — DOI: 10.26160/2541-8637-2026-17-38-40. — EDN: PWQGOD. [in Russian]

13. 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]