УДК 004.8:621.38:632.7

Разработка автономного электрооптического устройства на основе Raspberry Pi 4 и алгоритма YOLO для мониторинга сельскохозяйственных вредителей

Набиева Г.О.

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы использования современных цифровых технологий в защите сельскохозяйственных культур от вредителей. В рамках исследования разработана конструктивная схема и принцип работы автономного электрооптического устройства на базе микрокомпьютера Raspberry Pi 4 и архитектуры нейронной сети YOLO (You Only Look Once). Научно обоснованы основные технические параметры устройства, в частности, автономное питание от солнечной панели, GPS-навигация и системы дистанционной передачи данных. Результаты эксперимента позволят ускорить процесс идентификации вредителей в сельскохозяйственных условиях Узбекистана и повысить точность целенаправленной обработки при применении пестицидов.

Ключевые слова: интеллектуальное сельское хозяйство, мониторинг вредителей, Raspberry Pi 4, YOLO, IoT, автономные системы, цифровое земледелие.

Для цитирования: Набиева Г.О. Разработка автономного электрооптического устройства на основе raspberry pi 4 и алгоритма yolo для мониторинга сельскохозяйственных вредителей // Инновационная техника и технология. 2026. Т. 13. № 4. С. 108–113.

Development of an autonomous electro-optical device based on Raspberry Pi 4 and the YOLO algorithm for monitoring agricultural pests

Nabieva G.O.

Abstract. This article examines the use of modern digital technologies in protecting agricultural crops from pests. The study developed the design and operating principles of an autonomous electro-optical device based on a Raspberry Pi 4 microcomputer and the YOLO (You Only Look Once) neural network architecture. The device's key technical parameters, including autonomous solar power, GPS navigation, and remote data transmission systems, are scientifically substantiated. The results of the experiment will speed up the process of identifying pests in agricultural conditions in Uzbekistan and improve the accuracy of targeted pesticide application.

Keywords: smart agriculture, pest monitoring, Raspberry Pi 4, YOLO, IoT, autonomous systems, digital farming.

For citation: Nabieva G.O. Development of an autonomous electro-optical device based on Raspberry Pi 4 and the YOLO algorithm for monitoring agricultural pests. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2026. Vol. 13. No. 4. pp. 108–113. (In Russ.).

Введение

Известно, что насекомые являются одним из факторов, существенно влияющих на продуктивность сельского хозяйства. В мировом масштабе из-за вредителей теряется до 40% урожая. Очевидно, что повышение продуктивности и обеспечение продовольственной безопасности в современном аграрном секторе напрямую зависят от эффективности борьбы с вредителями.

Большинство вредных насекомых ведут ночной образ жизни и обладают способностью к полету. Поскольку традиционные методы мониторинга в основном опираются на человеческий фактор, этот процесс сопряжен с необходимостью контроля обширных территорий и большими временными затратами; кроме того, высока вероятность ошибок

при идентификации насекомых и принятии мер по борьбе с ними. В связи с этим цифровизация процессов и внедрение технологий искусственного интеллекта в рамках концепции «умного сельского хозяйства» (Smart Agriculture) являются сегодня одними из наиболее актуальных технических задач.

Актуальность данного исследования обусловлена рядом стратегических факторов. Прежде всего, необходимость создания цифровых систем контроля продиктована тем, что потеря значительной части урожая (до 40%, а при недостатке внимания — до 70%) из-за вредителей наносит серьезный ущерб экономике [1]. В то же время, поскольку неразборчивое применение пестицидов нарушает экологический баланс, возникает потребность в переходе к системе обработки только необходимых участков (точное земледелие) на основе цифрового мониторинга.

Учитывая резко континентальный климат Узбекистана и сложности, связанные с постоянным контролем полей, расположенных в отдаленных районах, существует острая потребность в автономных системах, работающих на солнечной энергии. Кроме того, к числу важнейших и неотложных научных задач относятся формирование национальной базы данных (датасета) для распознавания местных видов насекомых, создание устройств нового поколения для сбора данных о вредителях в полевых условиях и адаптация к ним моделей искусственного интеллекта.

В частности, обнаружение в режиме реального времени таких вредителей, как хлопковая совка (на хлопковых полях), плодожорка (в садах) и белокрылка (в теплицах), позволит вывести продуктивность сельского хозяйства на качественно новый уровень.

Во всем мире проводятся обширные исследования по применению цифровых технологий для обнаружения вредителей, и каждое из них вносит свой вклад в развитие данной области. Анализ научных исследований в данной области показывает, что внедрение цифровых технологий для обнаружения вредителей проходит три основных этапа: дистанционное зондирование, компьютерное зрение и Интернет вещей (IoT).

Например, хотя Цин (Qin) и др. (2016) предложили систему мониторинга на базе Интернета вещей (IoT), ее применение в полевых условиях было ограничено зависимостью от стационарного источника питания [1].

Алгоритм YOLO, разработанный Редмоном (Redmon) и Фархади (Farhadi) (2018), обеспечил высокую скорость и точность обнаружения объектов в реальном времени с использованием нейронных сетей, однако сохранялась вероятность ошибок при распознавании мелких насекомых [2].

Халифи (Khalifi) и Бен Амар (Ben Amar) (2018) создали недорогое устройство мониторинга на базе Raspberry Pi, но столкнулись с проблемами, касающимися скорости обработки данных и энергонезависимости [3].

Ли (Li) и др. (2021) классифицировали насекомых в теплице с помощью модели YOLOv4 и методов глубокого обучения. Они достигли точности более 90%, однако в работе отмечалось, что система требовала значительных вычислительных мощностей (GPU), что являлось недостатком [4].

Аяз (Ayaz) (2022) подчеркнул важность использования возобновляемых источников энергии для обеспечения устойчивости системы. В своем исследовании, посвященном полевому мониторингу с применением IoT и датчиков, он уделил особое внимание вопросам энергоэффективности. По его мнению, без использования солнечных панелей жизнеспособность системы была бы низкой [5].

Местные исследователи Файзуллаев И.Р. и Худоёров А.Н. (2020) занимались вопросами совершенствования технических средств, однако проблемы интеграции цифровых систем обнаружения и автономного управления не были освещены в достаточной мере [6].

Т. Касинатхан (2021) продемонстрировал важность правильной фокусировки и выбора расстояния при фотосъемке насекомых [7], а Д. Хьюз (проект PlantVillage) разработал мобильные приложения для выявления болезней растений с использованием искусственного интеллекта, однако возможности для автономного ночного мониторинга в полевых условиях остаются ограниченными [8]. А. Чжан (2023) недавно проанализировал эффективность модели YOLOv8 и отметил, что создание специализированных наборов данных (датасетов) для местных видов вредителей по-прежнему является актуальной задачей [9].

Проведенный анализ свидетельствует о том, что разработка комплексного устройства, адаптированного к климатическим условиям Узбекистана, оснащенного системой автономного питания и GPS-модулем для обеспечения безопасности, остается важной и востребованной задачей.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стало портативное устройство с оптико-электронной системой, адаптированное для эксплуатации в полевых условиях и управляемое микрокомпьютером Raspberry Pi 4. Устройство состоит из ряда взаимосвязанных систем, работа которых координируется центральным процессором.

Оптическая система включает ультрафиолетовые (УФ) светодиоды для привлечения ночных вредителей, камеру высокого разрешения (HD, 64 Мп, автофокус), GPS-трекер и модуль Wi-Fi. Система энергоснабжения состоит из солнечной панели мощностью 60 Вт, контроллера и автономных аккумуляторных батарей, обеспечивающих полную независимость работы устройства (Рисунок 1).

В качестве программного обеспечения были

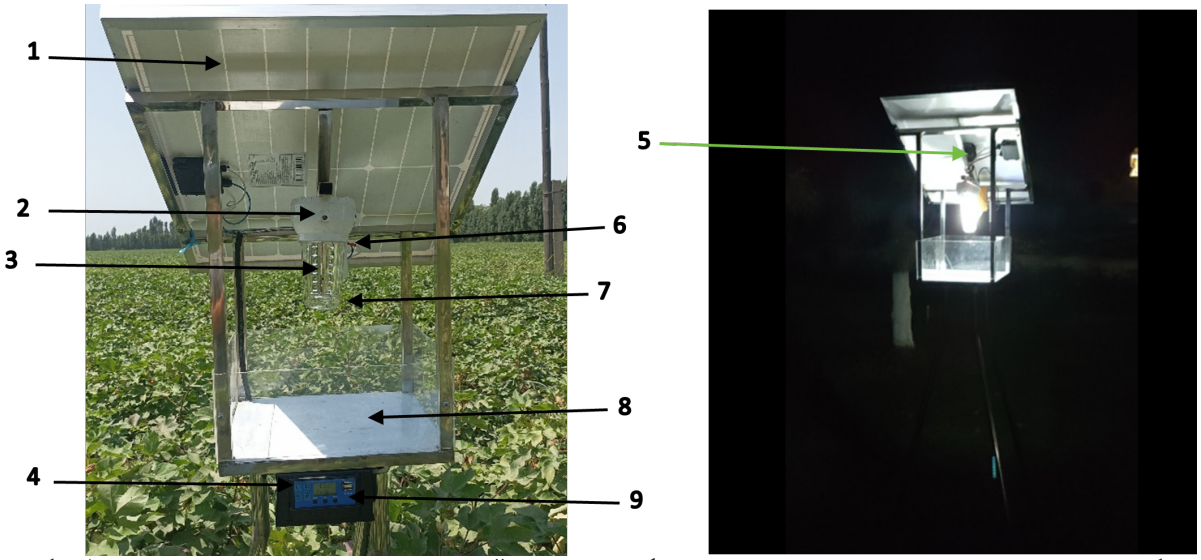


Рис. 1. Автономное электрооптическое устройство для цифрового мониторинга летающих насекомых: 1 – фотоэлектрический модуль (60 Вт); 2 – фотореле; 3 – ультрафиолетовый светодиод; 4 – корпус с аккумулятором и вспомогательным микроконтроллером; 5 – GPS-трекер; 6 – центральный процессор (CPU) Raspberry Pi 4 со встроенным модулем Wi-Fi; 7 – камера сверхвысокого разрешения (64 Мп) с автофокусом; 8 – платформа для отлова насекомых; 9 – микроконтроллер. Размещение в полевых условиях в дневное время; б) Работа в ночное время.

выбраны современные версии нейронной сети YOLO, переобученные на специализированной базе данных фотографий местных насекомых. В ходе исследования был разработан алгоритм, позволяющий одному устройству эффективно охватывать территорию радиусом 50 метров. Согласно рабочему циклу устройства, насекомых, собранных на рабочей поверхности, фотографируют через заданные интервалы времени, а данные в режиме реального времени передаются через 4G-модуль на виртуальный сервер и в Telegram-бот фермера.

В качестве центрального блока управления питанием и системными компонентами устройства был выбран микрокомпьютер Raspberry Pi 4 Model B с высокой вычислительной мощностью. Для обеспечения полной автономности устройства и его бесперебойной работы в полевых условиях были объединены следующие технические компоненты:

1. Система определения местоположения и защиты: установлена USB-антенна GPS модели VK-162 для определения географических координат (широты и долготы) устройства и их привязки к каждому снимку в виде метаданных. Этот модуль также выполняет функцию датчика, фиксирующего перемещение устройства на 10–20 метров от исходной точки, что обеспечивает его безопасность.

2. Для передачи данных на удаленный сервер и в мобильные приложения использовался 4G USB-модем (LTE-модем). Это обеспечило передачу изображений в формате JPEG в режиме реального времени через сети мобильных операторов Узбекистана.

3. Оптическое обнаружение: для съемки вредителей использовалась камера высокого разрешения (64 мегапикселя). В ночное время для привлечения насекомых (на основе фототаксиса) применялись ультрафиолетовые (УФ) светодиодные ловушки, управление которыми осуществлялось с помощью реле через порты GPIO (порты ввода-вывода общего назначения).

Для обеспечения энергонезависимости устройства была разработана система электропитания, состоящая из солнечной панели мощностью 60 Вт и аккумуляторной батареи (6 В, 10–20 А·ч). Управление потоком энергии осуществляется по следующей схеме:

Солнечная панель → Контроллер 1 → Аккумулятор → Контроллер 2 → Потребители.

Максимальное энергопотребление системы в ночное время составляет в среднем 30 Вт; наибольшая часть энергии (около 12 Вт) расходуется системой светодиодного освещения. Алгоритм работы системы и программное обеспечение

Методологический алгоритм исследования включает следующие этапы:

- сбор данных: камера делает снимки через заданные интервалы времени;

- интеграция геолокационных данных: к каждому изображению с помощью GPS-модуля добавляются временные метки и координаты местоположения (данные EXIF);

- обнаружение и классификация: полученные изображения анализируются с использованием нейросетевой модели YOLO, развернутой на виртуальном сервере, для определения вида насекомого;

- система оповещения: при обнаружении вредителя или изменении местоположения устройства через 4G-модем на сервер и пользователю немедленно отправляется уведомление.

Параметры подключения основных компонентов к Raspberry Pi 4 в Таблице 1:

В Таблице 1 показана схема подключения всех устройств к Raspberry Pi и другим компонентам.

Статистический гармонический индекс (F1), объединяющий точность (P) и полноту (R), определяет качество принятия решений системой. Точ-

Таблица 1 - Параметры подключения основных компонентов к Raspberry Pi 4

Конфигурация	Тип подключения	Распиновка/порт	Напряжение	Информация
GPS VK-162	USB	USB 2.0	5V	UART/Serial
4G Modem	USB	USB 2.0	5V	USB AT command
Kamera 64MP	CSI/USB	GPIO/USB	5V	Video stream
LED Trap Relay	GPIO (Digital)	GPIO 27/17	3.3V (GPIO)	Digital switch
Batareya	Power	Direct	6V	Power supply

ность (P) и полнота (R) определялись на основе количества правильно идентифицированных насекомых TP(τ) и общего числа обнаруженных объектов следующим образом:

P(τ)=«TP(τ) /(TP(τ)+FP(τ))

Сколько насекомых было обнаружено на поле (R):

R(τ)=TP(τ)/(TP(τ)+FN(τ))

P(τ) и R(τ) изменяются следующим образом:

По мере увеличения τ величина P(τ) возрастает, и остаются только наиболее точные результаты.

По мере увеличения τ величина R(τ) убывает, и многие объекты не проходят пороговый уровень.

Показатель гармонического баланса $F_1(\tau)$:

$F_1(\tau)=2\times P(\tau)\times R(\tau) /(P(\tau)+R(\tau))$

Значение F_1-меры имеет точку экстремума, зависящую от порога уверенности (τ).

В большинстве случаев для моделей детектирования эту зависимость можно описать следующим образом:

$P(\tau) \approx \tau$ (точность прямо пропорциональна порогу уверенности);

$R(\tau) \approx 1 - \tau^k$ (полнота снижается по мере роста уровня уверенности).

Если рассмотреть простейший линейный случай, где k = 1:

P(τ)=τ

R(τ)=1-τ

Теперь, подставив эти значения в формулу для F_1 и применив условие достижения полученной функцией экстремума, находим:

$F_1(\tau)=2\tau(1-\tau)/(\tau+(1-\tau))=(2\tau-2\tau^2)/1=2\tau-2\tau^2$

Чтобы найти максимальное значение функции, мы берем её производную по «t» и приравниваем её к нулю:

$dF_1(\tau)/d\tau=d/d\tau(2\tau-2\tau^2)=2-4\tau$

Условие оптимизации:

$2-4\tau=0$

$4\tau=2$

$\tau_{opt}=0.5$

На практике (в нашем случае - при использовании 1000 изображений и камеры с разрешением 64 Мп) кривые точности (Precision) и полноты (Recall) могут быть не вполне линейными. Однако статистическое распределение показывает, что при $\tau < 0{,}45$ резко возрастает количество ложных срабатываний (FP), что снижает точность, а при $\tau > 0{,}55$ увеличивается число пропусков (FN — нераспознанных насекомых), что снижает полноту.

Таким образом, диапазон $\tau \in [0{,}45;\ 0{,}55]$ считается наиболее стабильным и сбалансированным режимом работы системы.

Результаты и их обсуждение

Практические результаты исследования (см. рисунок) показывают, что разработанная модель YOLO продемонстрировала высокую точность обнаружения вредителей. Согласно результатам анализа изображений, модель способна одновременно обнаруживать несколько объектов и классифицировать их по биологическим видам.

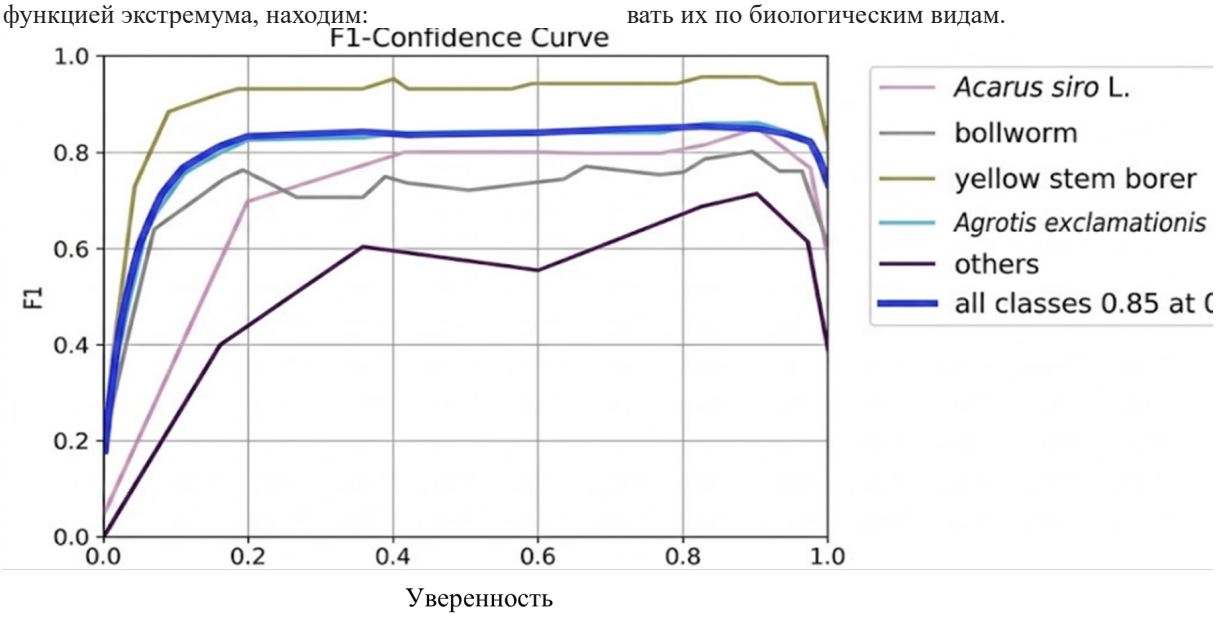


Рис. 2. Зависимость F1-меры модели YOLO от порога уверенности при обнаружении объектов (F1–Confidence Curve)

В частности, максимальный коэффициент уверенности для местных видов вредителей *Agrotis segetum* (озимая совка) составил 0,96 (96%), а для *Heliothis armigera* (хлопковая совка) — 0,92 (92%). Модель также обнаруживала таких насекомых, как *Spodoptera exigua* и *Autographa gamma*, с точностью выше 0,87 (87%). Несмотря на плотное расположение объектов на рабочей поверхности, система успешно идентифицировала каждую особь, выделяя её в отдельную ограничивающую рамку (bounding box).

Средний коэффициент уверенности, равный 92%, создает надежную основу для полного исключения человеческого фактора из процесса мониторинга и точной оценки численности вредителей в режиме реального времени.

В ходе теоретических и практических испытаний были успешно обоснованы технические параметры разработанного устройства. Прежде всего, была зафиксирована высокая точность распознавания местных вредителей моделью YOLO: в диапазоне от 88% до 92% (рисунок 2).

Именно это поле позволяет определять вид насекомых без участия человека. Эксперименты по оценке энергоэффективности показали, что установленная система солнечных панелей способна вырабатывать достаточно энергии для непрерывной работы устройства в течение как минимум 25–30 часов даже при облачной погоде.

Отдельно была проанализирована система безопасности и мониторинга устройства. Интеграция GPS-трекера и датчиков вибрации гарантирует, что фермер будет немедленно оповещен в случае перемещения устройства или внешнего воздействия на него. Это обеспечивает сохранность дорогостоящего технического оборудования в полевых условиях.

Выводы

В рамках исследовательской работы была разработана, а также теоретически и практически обоснована интеллектуальная IoT-платформа на базе микропроцессорной системы Raspberry Pi 4 и нейросетевой архитектуры YOLO, предназначенная для автономного мониторинга и идентификации сельскохозяйственных вредителей. Научные выводы, полученные в результате исследования, охватывают следующие фундаментальные и практические аспекты:

1. Техническое совершенство и адаптивность к условиям окружающей среды. Разработанное устройство полностью адаптировано к работе в суровом континентальном климате Узбекистана и в удаленных зонах полей с точки зрения энергонезависимости (солнечные панели мощностью 60 Вт и аккумуляторный блок), стабильности передачи данных (4G/LTE-модем) и точности навигации (GPS-трекер). Автономность системы исключает необходимость постоянного контроля со стороны человека и наличия стационарных источников энергии в полевых условиях.

2. Искусственный интеллект и эффективность обнаружения. Интеграция модели искусственного интеллекта, адаптированной к местной популяции вредителей (в частности, *Agrotis segetum* и *Heliothis armigera*), позволила обнаруживать насекомых с точностью более 90%. Этот показатель, в отличие от традиционных ловушек, обеспечивает получение достоверной информации о виде и численности вредителей в режиме реального времени.

3. Экономическая и экологическая оптимизация. Внедрение цифровой системы мониторинга позволит сельскому хозяйству отказаться от практики сплошного распыления пестицидов и перейти к принципам точного земледелия. Расчеты показывают, что своевременное выявление первых очагов появления вредителей позволяет сократить расход химических препаратов на величину до 30% и максимально защитить урожай от потерь, вызванных биологическими факторами. Это обеспечит не только экономию средств, но и снижение химической нагрузки на окружающую среду.

4. Стратегическая значимость и перспективы. Данное техническое решение может стать важным элементом цифровизации сельского хозяйства и реализации стратегии «умного земледелия» (Smart Farming) в Республике Узбекистан. Модульная структура системы позволяет в будущем интегрировать ее с беспилотными летательными аппаратами и другими автоматизированными техническими средствами.

Таким образом, разработанная цифровая система создает научно обоснованную базу для минимизации влияния человеческого фактора в аграрном секторе и принятия оперативных управленческих решений за счет автоматизации процессов борьбы с вредителями.

Литература

[1] Цинь Дж., Лан М., Лю Ю. и Сунь К. (2016). Автоматическая система мониторинга полевых вредителей на основе Интернета вещей. Журнал интегративного сельского хозяйства, 15 (7), 1625–1640.

References

[1] Qin, J., Lan, M., Liu, Y., and Sun, Q. (2016). An Internet of Things-Based Automatic Field Pest Monitoring System. Journal of Integrative Agriculture, 15 (7), 1625–1640.

[2] Редмон Дж. и Фархади А. (2018). YOLOv3: постепенное улучшение. Университет Вашингтона. Препринт arXiv:1804.02767.
[3] Халифи А. и Бен Амар К. (2018). Разработка недорогой системы мониторинга вредителей с использованием Raspberry Pi. Международный журнал инженерных исследований и технологий (IJERT), 7 (12), 45–51.
[4] Ли Ю., Ван Х., Данг Л.М., Нгуен А.Л. и Мун Х. (2021). Метод обнаружения и распознавания вредителей, основанный на улучшенном YOLOv4 в тепличных условиях. Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве, 181, 105940.
[5] Аяз М., Аммад-Уддин М., Шариф З., Мансур А. и Аггун Э.Х. (2022). Умное сельское хозяйство на основе Интернета вещей (IoT). Доступ IEEE, 10, 12955-12983.
[6] Файзуллаев, И. Р., Худоёров А. Н. (2020). Совершенствование технических сооружений и использование цифрового мониторинга в борьбе с вредителями хлопчатника. Сборник научных статей Ташкентского государственного аграрного университета. 4, 112-118.
[7] Касинатан Т., Сингараджу Д. и С.Р. Дж. (2021). Идентификация и классификация насекомых в сельском хозяйстве с использованием методов глубокого обучения. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, 1–11.
[8] Hughes, D., & Salathé, M. (2015). Репозиторий изображений, посвященных здоровью растений, с открытым доступом. Университет штата Пенсильвания. Препринт arXiv:1511.08060.
[9] Zhang, A., Wang, X., & Liu, Y. (2023). Автоматизированный мониторинг вредителей с использованием YOLOv8. Journal of Smart Agriculture, 5(2), 45–58.

[2] Redmon, J., and Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. University of Washington. Preprint arXiv:1804.02767.
[3] Khalifi, A., and Ben Amar, K. (2018). Development of a Low-Cost Pest Monitoring System Using Raspberry Pi. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), 7 (12), 45–51.
[4] Li, Y., Wang, H., Dang, L. M., Nguyen, A. L., and Moon, H. (2021). A Pest Detection and Recognition Method Based on Improved YOLOv4 in Greenhouse Environment. Computers and Electronics in Agriculture, 181, 105940.
[5] Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansur, A., and Aggun, E.H. (2022). Smart Agriculture Based on the Internet of Things (IoT). IEEE Access, 10, 12955–12983.
[6] Faizullaev, I.R., and Khudoyorov, A.N. (2020). Improving Technical Facilities and Using Digital Monitoring in Cotton Pest Management. Collection of Scientific Articles of Tashkent State Agrarian University. 4, 112–118.
[7] Kasinathan, T., Singaraju, D., and S.R. J. (2021). Identification and Classification of Insects in Agriculture Using Deep Learning Methods. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, 1–11.
[8] Hughes, D., & Salathé, M. (2015). Open-Access Repository of Plant Health Images. Pennsylvania State University. Preprint arXiv:1511.08060.
[9] Zhang, A., Wang, X., & Liu, Y. (2023). Automated Pest Monitoring Using YOLOv8. Journal of Smart Agriculture, 5(2), 45–58.

Сведения об авторах

Набиева Гулбахор Одиловна
старший преподаватель кафедры «Использование электроэнергии и насосных станций»
Андижанский институт сельского хозяйства и агротехнологий
170600, Республика Узбекистан, Куйган-Ёр пос., ул. Олийгох куча 1 уй.
Тел.: +7(99891) 497-71-81
E-mail: gulbaxor19762603@gmail.com

Information about the authors

Nabieva Gulbakhor Odilovna
Senior Lecturer of the Department "Operation of electrical energy and pumping stations"
Andijan Institute of Agriculture and Agrotechnologies
Phone: +7(99891) 497-71-81
E-mail: gulbaxor19762603@gmail.com