

Кутырёв А.И., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;
Потапенков Н.А., магистрант, инженер
*ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,
г. Москва, Российская Федерация*

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИДЕОСЪЁМКИ И РЕЖИМА РАБОТЫ КОНВЕЙЕРА ДЛЯ СОРТИРОВКИ ПЛОДОВ ЯБЛОНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального обоснования параметров системы компьютерного зрения для сортировки плодов яблони на конвейерной линии. Проведено сравнение моделей детекции и сегментации YOLO12s и YOLO11m-seg. Построены поверхности отклика точности распознавания. Полученные зависимости и рекомендованные параметры могут быть использованы при проектировании промышленных систем сортировки плодов, основанных на современных алгоритмах глубокого обучения (архитектуры YOLO).

Abstract. The paper presents experimentally substantiated parameters of a computer vision system for sorting apple fruits on a conveyor line. YOLO12s and YOLO11m-seg detection and segmentation models were compared. Response surfaces of recognition accuracy were constructed. The obtained dependencies and recommended parameters can be used for designing industrial fruit sorting systems based on modern deep learning algorithms (YOLO architectures).

Ключевые слова: компьютерное зрение, сортировка плодов яблони, YOLO, трекинг, реальное время.

Keywords: computer vision, apple fruit sorting, YOLO, tracking, real time.

Современные методы решения задач сортировки плодов яблони основываются на глубоких нейронных сетях, в частности на архитектурах семейства YOLO (You Only Look Once), обеспечивающих высокую скорость и точность детекции [1-3]. Однако эффективность системы компьютерного зрения на сортировочной линии зависит не только от выбора модели нейронной сети, но и от условий видеосъёмки и режима работы конвейера [4]. Основными регулируемыми параметрами являются высота установки камеры над лентой, скорость движения конвейера и частота кадров. Неоптимальные значения этих параметров приводят к потере резкости изображения, потере текстурных признаков, ошибкам трекинга (отслеживания) и многократному учёту одних и тех же объектов, что снижает точность распознавания [5, 6].

Целью исследования является экспериментальное обоснование оптимальных параметров видеосъёмки и режима работы конвейера, обеспечивающих оптимальную точность распознавания плодов яблони в системе компьютерного зрения. В статье представлены результаты эксперимен-

тальных исследований, поверхности отклика точности распознавания, контурные диаграммы качества трекинга.

Для проведения эксперимента использовалась программа компьютерного зрения, разработанная на языке Python, которая использует модели сверточных нейронных сетей YOLO12 и YOLO11-seg для сегментации плодов яблони и их распознавания в ограничивающих рамках [7]. Программа позволяет распознавать различные типы дефектов плодов, выполнять сегментацию, оценивать степень зрелости по цветовым характеристикам в пространстве HSV, а также измерять линейные размеры объектов (рисунок 1).

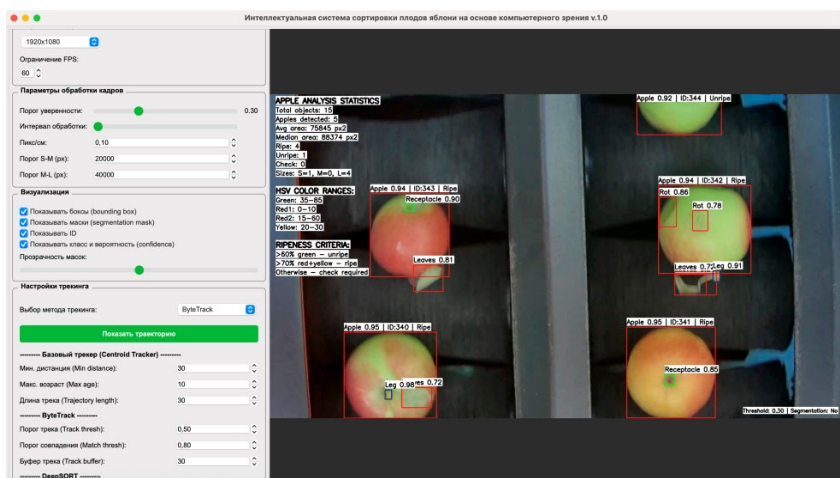


Рисунок 1 – Пример работы программы для сортировки плодов яблони

В программе реализована поддержка прямого подключения камер и сетевых RTSP-трансляций с возможностью коррекции параметров изображения. Для хранения результатов применяется встроенная база данных SQLite, а для последующего анализа предусмотрен экспорт данных в форматы CSV, JSON и Excel. Архитектура программы построена на библиотеках OpenCV (захват и предобработка видеопотока), PyQt5 (графический интерфейс с настройкой разрешения, выбора модели, частоты кадров и режимов визуализации), Pygame (аудиоповещение о дефектах), NumPy (математические расчёты, анализ HSV-гистограмм, вычисление площадей масок и статистические оценки), а также Pillow (преобразование форматов изображений). В программу встроены алгоритмы трекинга для непрерывного сопровождения перемещения плодов в зоне видимости камеры, а также система зонального подсчёта, которая обеспечивает точный учёт продукции и позволяет прогнозировать урожайность.

Дополнительно предусмотрены инструменты для анализа цветиметрических показателей, статистики размеров плодов и пространственного распределения объектов. Разработанная программа предназначена для контроля качества сельскохозяйственной продукции, что позволяет повысить эффективность производственных процессов и минимизировать влияние человеческого фактора [8, 9]. Для проведения экспериментов использована промышленная сортировочная линия электронно-оптического сортировщика Wamel Perfect. Сортировка проводилась по четырём параллельным линиям с максимальной скоростью 3 чашки в секунду на линию, что обеспечивает высокоскоростную обработку плодов в диапазоне диаметров 35-120 мм. Для регистрации видеопоследовательностей использовалась камера DJI Action 5, закреплённая стационарно над конвейерной лентой. Камера оснащена 1/1.3-дюймовым CMOS-датчиком и диафрагмой f/2.8, что в сочетании со встроенной стабилизацией RockSteady 3.0 обеспечивало получение детализированных изображений движущихся плодов.

Эксперимент проводился на тестовой видеопоследовательности, содержащей 100 эталонных плодов яблони с различными сортовыми признаками и дефектами. Варьировались три фактора: высота камеры (150, 300 и 450 мм), скорость конвейера (0,5; 1,0 и 1,5 м/с) и частота кадров (30, 60 и 90 fps). Полный факторный эксперимент $3 \times 3 \times 3$ составил 27 комбинаций. Для каждой из них выполнялось по три повторных измерения. Полученные результаты позволили выявить характер зависимости точности распознавания от каждого фактора и определить их рациональные значения для эксплуатации системы. Для визуализации влияния высоты установки камеры и скорости конвейерной ленты на точность распознавания были построены трёхмерные поверхности отклика. Показана зависимость количества верно распознанных плодов из 100 для моделей YOLO12s и YOLO11m-seg (рисунки 2,3).

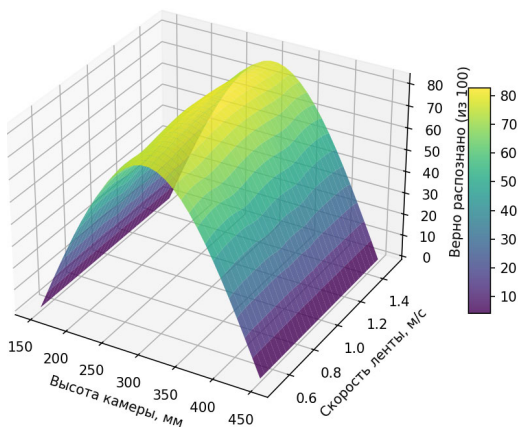


Рисунок 2 – Поверхность отклика для модели YOLO12s

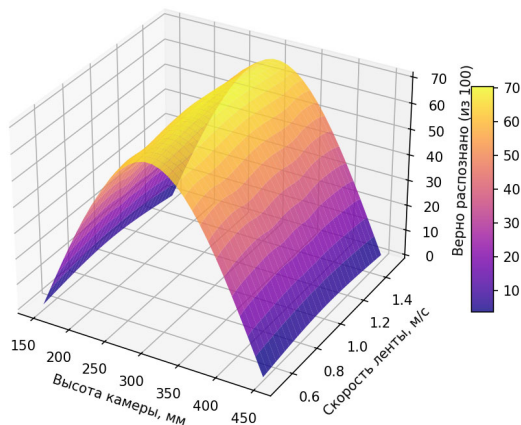


Рисунок 3 – Поверхность отклика для модели YOLO11m-seg

Поверхность имеет выпуклую форму с максимумом в области высоты 300 мм и скоростей 0,9-1,1 м/с. Максимальное зафиксированное значение составляет 82 верных распознаваний из 100. При отклонении высоты от оптимального диапазона точность снижается: на высоте камеры 150 мм количество верных распознаваний снижается до 68, а на высоте 450 мм – до 65. Установлено, что скорость конвейера оказывает существенное влияние. При увеличении скорости от 1,0 до 1,5 м/с количество верно распознанных плодов снижается с 82 до 67 (снижение на 18%). Причина – размытие движущихся объектов, приводящее к потере чёткости границ и текстурных признаков. При скорости 0,5 м/с точность также несколько ниже (74). Из-за медленного движения плоды дольше находятся в зоне съёмки, что повышает вероятность их многократного учёта при трекинге. Для модели YOLO12s оптимальна комбинация высоты камеры 300 мм и скорости ленты 1,0 м/с, обеспечивающая максимальную точность распознавания (82 из 100).

Поверхность отклика модели инстанс-сегментации YOLO11m-seg (рисунок 3) также имеет выпуклую форму, но с менее выраженным максимумом и более низкими абсолютными значениями. Максимальное количество верно распознанных плодов составляет 71 из 100 (на 13 % ниже, чем у YOLO12s). Оптимальные значения высоты и скорости сохраняются в тех же диапазонах ($H = 300$ мм, $v = 1,0$ м/с), однако поверхность более пологая, особенно в направлении высоты.

Для оценки устойчивости алгоритмов трекинга к изменению параметров видеосъёмки был проведён анализ метрики MOTA (Multiple Object Tracking Accuracy), которая учитывает пропуски объектов, ложные обнаружения и переключения идентификаторов (ID) распознаваемых объектов (рисунок 4).

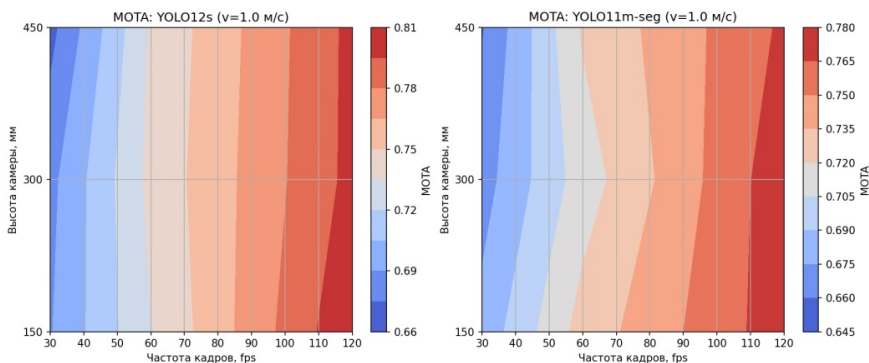


Рисунок 4 – Контурные диаграммы качества трекинга MOTA для моделей YOLO12s и YOLO11m-seg

Зависимость метрики MOTA от частоты кадров носит монотонный возрастающий характер для обеих моделей: при 30 fps значение MOTA составляет 0,66, при 60 fps – 0,72, при 90 fps – 0,765, а при 120 fps достигает 0,81. Наиболее существенный прирост точности наблюдается в диапазоне от 30 до 60 fps (+0,06), тогда как дальнейшее повышение частоты до 90 и 120 fps даёт меньший относительный прирост (+0,045 на каждые 30 fps). Увеличение частоты кадров пропорционально повышает вычислительную нагрузку на систему. При переходе с 60 на 120 fps нагрузка возрастает в 1,5–2 раза. Кроме того, при скорости конвейера 1,0 м/с и частоте 60 fps межкадровое смещение плодов составляет около 17 пикселей, что достаточно для надёжного сопоставления объектов по метрике IoU. С учётом этих факторов частота 60 fps признана оптимальной для промышленной эксплуатации.

Зависимость метрики MOTA от частоты кадров носит монотонный возрастающий характер для обеих моделей: при 30 fps значение MOTA составляет 0,66, при 60 fps – 0,72, при 90 fps – 0,765, а при 120 fps достигает 0,81. Наиболее существенный прирост точности наблюдается в диапазоне от 30 до 60 fps (+0,06), тогда как дальнейшее повышение частоты до 90 и 120 fps даёт меньший относительный прирост (+0,045 на каждые 30 fps). Увеличение частоты кадров пропорционально повышает вычислительную нагрузку на систему. При переходе с 60 на 120 fps нагрузка возрастает в 1,5–2 раза. Кроме того, при скорости конвейера 1,0 м/с и частоте 60 fps межкадровое смещение плодов составляет около 17 пикселей, что достаточно для надёжного сопоставления объектов по метрике IoU. С учётом этих факторов частота 60 fps признана оптимальной для промышленной эксплуатации.

В результате проведённого исследования установлены оптимальные параметры видеосъёмки и режима работы конвейера: высота камеры 300 мм, скорость ленты 1,0 м/с и частота кадров 60 fps. При этих значениях модель YOLO12s распознаёт 82 плода из 100 эталонных, что на 13% вы-

ше, чем у YOLO11m-seg (71 плод). Полученные зависимости и рекомендованные параметры могут быть использованы при проектировании промышленных систем сортировки плодов, основанных на современных алгоритмах глубокого обучения (архитектуры YOLO).

Список использованной литературы

1. Ribeiro D., Tavares D., Tiradentes E., Santos F., Rodriguez D. Performance Evaluation of YOLOv11 and YOLOv12 Deep Learning Architectures for Automated Detection and Classification of Immature Macauba (*Acrocomia aculeata*) Fruits // *Agriculture*. – 2025. – 15(15). – 1571.
2. Khort D.O., Kutyrev A., Smirnov I., Andriyanov N., Filippov R., Chilikin A., Astashev M.E., Molkova E.A., Sarimov R.M., Matveeva T.A., Gudkov S. Enhancing sustainable automated fruit sorting: hyperspectral analysis and machine learning algorithms // *Sustainability*. – 2024. – Т. 16. – № 22. – С. 10084.
3. Kutyrev A.I., Andriyanov N.A. Apple flower recognition using convolutional neural networks with transfer learning and data augmentation technique // В сборнике: E3S Web of Conferences. International Conference on Advances in Agrobusiness and Biotechnology Research (ABR 2024) // *EDP Sciences*. – 2024. – С. 01006.
4. Rojas Santelices I., Cano S., Moreira F., Peña Fritz Á. Artificial Vision Systems for Fruit Inspection and Classification: Systematic Literature Review // *Sensors*. – 2025. – 25(5). – 1524.
5. Кутырёв А.И., Смирнов И.Г. Сверточная нейронная сеть (Seg-CNN) для распознавания, классификации и сегментации ветвей с плодами яблони и плодоножек на изображениях // *Садоводство и виноградарство*. – 2024. – № 2. – С. 53-62.
6. Хорт Д.О., Кутырев А.И., Смирнов И.Г., Филиппов Р.А., Вершинин Р.В. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. – 2020. – Т. 67. – № 1 (38). – С. 133–141.
7. Кутырев А.И., Потапенков Н.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682457 Российская Федерация. Программа компьютерного зрения для распознавания, классификации и сегментации плодов яблони на линии сортировки с использованием алгоритмов машинного обучения: заявл. 10.07.2025. опубл. 22.08.2025.
8. Потапенков Н.А., Кутырёв А.И. Разработка модели свёрточной нейронной сети для распознавания и классификации плодов яблони на линии сортировки // В сборнике: Инновационные технологии в агропромышленном комплексе в условиях цифровой трансформации. Материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград. – 2025. – С. 225-231.
9. Кутырёв А.И., Потапенков Н.А. Распознавание и подсчет плодов яблони с признаками гнили на сортировочной линии с использованием нейросетевой модели YOLO26 // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2026. – № 217(03). – С. 419–433.

Summary. The experiment substantiated optimal parameters of a computer vision system for apple sorting: camera height 300 mm, conveyor speed 1.0 m/s, frame rate 60 fps. The YOLO12s model achieved 82% accuracy (82 out of 100 fruits), which is 13% higher than YOLO11m-seg. The obtained dependencies are recommended for designing industrial sorters based on deep neural networks.