

Научная статья
УДК 004.8 ; 631.361:635
DOI 10.66783/2782-3172.2026.76.44.009

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СОРТИРОВКИ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ ПО РАЗМЕРУ И ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Алексей Генрихович Иванов, Марат Фирдависович Гадлгареев, Альберт Ильсурович Галимов
Удмуртский государственный аграрный университет, Ижевск, Россия
Автор, ответственный за переписку: Алексей Генрихович Иванов, ivalgen@inbox.ru

Аннотация

В статье представлен обзор существующих технологий сортировки клубней картофеля и обосновывается перспективность применения методов искусственного интеллекта (ИИ) и компьютерного зрения для автоматизации данного процесса. Рассмотрена архитектура системы на основе RGB-камеры, осуществляющей анализ объёма, определение размерных категорий и идентификацию дефектных клубней в режиме реального времени. Описан подход к формированию обучаемой модели на базе свёрточных нейронных сетей, а также концепция дистилляции знаний – создания детерминированной базы решающих правил, способной функционировать без нейросетевого модуля. Показано, что точность классификации современных систем на базе ИИ превышает 95 %, что существенно превосходит возможности ручного сортирования.

Ключевые слова: искусственный интеллект, компьютерное зрение, сортировка картофеля, свёрточные нейронные сети, определение размеров, детекция дефектов, дистилляция знаний

Финансирование: исследование, на основе результатов которого написана данная статья, финансировалось за счет собственных средств авторов

Для цитирования: Иванов А. Г., Гадлгареев М. Ф., Галимов А. И. Применение технологий искусственного интеллекта для автоматизированной сортировки клубней картофеля по размеру и выявления дефектов на основе компьютерного зрения // Вестник Вятского ГАТУ. 2026. № 3. С. 88–94. DOI: 10.66783/2782-3172.2026.76.44.009.

APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR AUTOMATED SIZE-BASED SORTING OF POTATO TUBERS AND DEFECT DETECTION USING COMPUTER VISION

Alexey G. Ivanov, Marat F. Gadlgareev, Albert I. Galimov
Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia
Corresponding author: Alexey G. Ivanov, ivalgen@inbox.ru

Abstract

The article presents the review of existing potato tubers sorting technologies and substantiates the prospects of applying artificial intelligence (AI) and computer vision methods for automating this

process. The authors consider the architecture of the system based on the RGB camera, which performs the volume analysis, size category determination, and identification of defective tubers in real time. The approach to developing a trainable model based on convolutional neural networks is described, as well as the concept of knowledge distillation — the creation of a deterministic decision rule base capable of functioning without a neural network module. It is shown that the classification accuracy of modern AI-based systems exceeds 95 %, which significantly surpasses the capabilities of manual sorting.

Keywords: artificial intelligence, computer vision, potato sorting, convolutional neural networks, size determination, defect detection, knowledge distillation

Funding: the research on which this article is based was funded by the authors' own funds

For citation: Ivanov AG, Gadlgareev MF, Galimov AI. Applying artificial intelligence technologies for automated size-based sorting of potato tubers and defect detection using computer vision. Vestnik Vyatskogo GATU. 2026;(3):88–94. DOI: 10.66783/2782-3172.2026.76.44.009. (In Russ.).

Введение. Картофель является одной из ключевых продовольственных культур в мире. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), глобальное производство картофеля превышает 370 млн тонн ежегодно, при этом послеуборочные потери, обусловленные неэффективной сортировкой, некорректным хранением и механическими повреждениями, составляют от 10 до 25 % в зависимости от региона [1]. Сортировка является одним из критических этапов послеуборочной обработки, определяющим товарные качества продукции и её соответствие стандартам пищевой безопасности.

Традиционно сортировка картофеля осуществляется тремя основными способами: ручным, механическим и оптико-электронным. Ручная сортировка в виде переборки вороха картофеля для выделения примесей и некондиционных клубней по-прежнему доминирует на малых и средних предприятиях, однако характеризуется низкой производительностью (0,5–1,5 т/ч на одного оператора), субъективностью оценок и высокой зависимостью от квалификации персонала. Механическая сортировка (на основе калибровочных решёт, барабанных и роликовых сепараторов) обеспечивает разделение по размеру, но не способна выявлять качественные дефекты: позеленение, гниль, механические повреждения, прорастание. Оптико-электронные системы первого поколения, использующие пороговую обработку цветowych каналов, обладают ограниченной адаптивностью к естественной биологической вариативности сырья и сезонным изменениям [2].

В 2024–2025 годах наблюдается качественный скачок в развитии систем автоматизированного контроля качества сельскохозяйственной продукции, обусловленный прогрессом в области глубокого обучения (Deep Learning), доступностью высокопроизводительных модулей периферийных вычислений (edge computing) и снижением стоимости аппаратных средств машинного зрения. Рынок роботизированной сортировки картофеля с применением ИИ в 2025 году оценивался в 1,8 млрд долларов США при прогнозируемом среднегодовом темпе роста 9,4 %. Современные промышленные системы (Tomra, Key Technology, SiftAI и др.) способны обрабатывать более 20 т/ч при точности обнаружения дефектов выше 98,5 % [3].

Цель настоящей работы – обзор технологического стека для построения системы автоматизированной сортировки клубней картофеля на основе RGB-камеры и методов искусственного интеллекта, выполняющей одновременно определение размерных категорий (калибровку) и детекцию дефектных клубней, а также обоснование концепции формирования детерминированной базы решающих правил по результатам обучения нейросетевой модели.

Материалы и методы.

Архитектура предлагаемой системы. Предлагаемая система представляет собой модуль, устанавливаемый над конвейерной лентой сортировочной линии (рисунок 1). Архитектура включает следующие функциональные блоки:

1. Блок захвата изображений – промышленная RGB-камера с разрешением не менее 1384×1032 пикселей (например, GS3-U3-15S5C-C), оснащённая системой контролируемого светодиодного освещения для обеспечения стабильных условий съёмки. Камера фиксирует изображения клубней сверху при их движении по конвейеру. Для повышения точности определения объёма рекомендуется дополнительная боковая камера.
2. Блок обработки данных (вычислительный модуль) – промышленный компьютер, выполняющий инференс нейросетевых моделей в реальном времени. Модуль реализует периферийные вычисления (edge computing), что исключает необходимость передачи данных на удалённый сервер и обеспечивает минимальную задержку.
3. Блок принятия решений и исполнительных механизмов – контроллер, получающий от вычислительного модуля классификационную метку каждого клубня и активирующий соответствующий исполнительный механизм (пневматические воздушные форсунки или откидные планки) для направления клубня в одну из выходных категорий: крупный, средний, мелкий, дефектный.

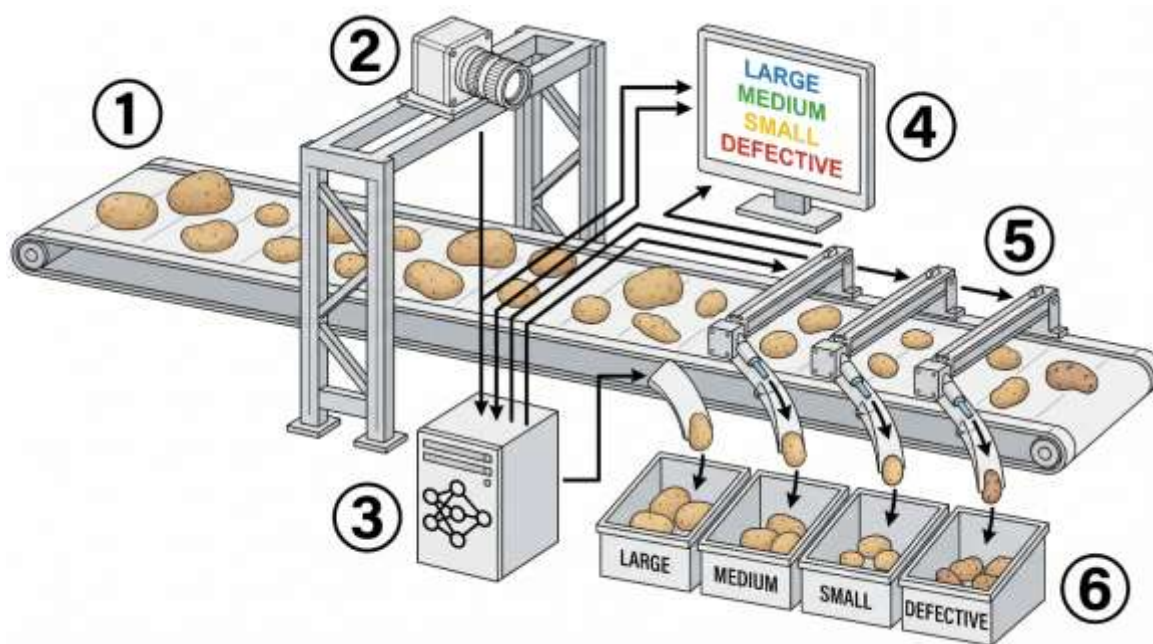


Рисунок 1. Принципиальная схема системы автоматизированной сортировки клубней картофеля на основе ИИ:

- 1 – конвейерная лента подачи клубней; 2 – промышленная RGB-камера высокого разрешения;
3 – вычислительный модуль (блок обработки данных на базе ИИ, edge computing);
4 – дисплей оператора с отображением результатов классификации (крупный / средний / мелкий / дефектный); 5 – исполнительные механизмы (пневматические форсунки / откидные планки); 6 – выходные накопительные бункеры (каналы сброса продукции)

Методы определения размеров и объёма клубней. Определение геометрических параметров клубня по двумерному RGB-изображению осуществляется посредством сегментации клубня от фона; выполняется пороговым методом на основе цветового контраста (фон конвейера выбирается контрастным), вычисление геометрических дескрипторов, оценка объёма, калибровка [1].

Методы детекции дефектов. Для выявления внешних дефектов (позеленение, гниль, прорастание, парша, механические повреждения) применяется сверточная нейронная сеть архитектуры.

Формирование обучающего набора данных. Набор данных формируется в ходе эксплуатации системы по принципу непрерывного обучения:

- на начальном этапе используется предварительно размеченный набор (не менее 5 000 аннотированных изображений с выделением классов: кондиционный клубень, позеленение, гниль, прорастание, парша, механические повреждения);
- в ходе работы система автоматически сохраняет изображения, для которых уровень уверенности классификатора ниже установленного порога (soft labeling), эти изображения передаются оператору для верификации и включения в обучающую выборку;
- периодически (ежемесячно или при смене сорта/сезона) выполняется дообучение (fine-tuning) модели на расширенном наборе данных. Применяется аугментация данных: вращение, отражение, изменение яркости и контраста для повышения робастности модели [3].

Концепция дистилляции знаний: от нейросети к детерминированной базе правил. Ключевой концептуальной идеей данной работы является создание на основе обученной нейросетевой модели детерминированной базы решающих правил, которая может функционировать без нейросетевого модуля на простых программируемых контроллерах.

Процесс дистилляции знаний включает:

- накопление статистики – в процессе работы ИИ-система формирует базу данных, содержащую для каждого клубня его геометрические дескрипторы (L, W, S, C, V), цветовые гистограммы, текстурные признаки и присвоенную классификационную метку;
- извлечение правил – методами интерпретируемого машинного обучения (деревья решений, правила ассоциации) из накопленных данных извлекаются пороговые значения и логические правила вида: «ЕСЛИ $L > 80$ мм И $W > 55$ мм И отсутствие зелёных пикселей $>$ порога θ_1 , ТО категория = "крупный кондиционный"»;
- валидация правил – набор правил проверяется на тестовой выборке и при достижении приемлемой точности (≥ 90 %) передаётся для исполнения на контроллер без нейросетевого блока.

Данный подход позволяет существенно снизить стоимость серийного оборудования, поскольку на этапе эксплуатации не требуется дорогостоящий GPU-модуль – достаточно простого промышленного контроллера с камерой.

Результаты. На основании анализа литературных данных и рыночных решений систематизированы основные характеристики технологий сортировки картофеля (таблица 1).

Анализ показывает, что системы на базе ИИ превосходят все альтернативные подходы по совокупности параметров.

Промышленная система подтверждает возможность практического применения описанного подхода: система фиксирует распределение по размерам, логирует обнаруженные дефекты и автоматически сохраняет изображения для дальнейшего дообучения.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов сортировки клубней картофеля

Параметр	Ручная сортировка	Механическая сортировка (решёта)	Оптическая (пороговая) сортировка	ИИ + компьютерное зрение
Производительность, т/ч	0,5–1,5	5–15	10–20	20–30
Точность калибровки по размеру, мм	±5–10	±3–5	±1–2	±0,5
Детекция внешних дефектов	Да (субъективно)	Нет	Частичная	Да (> 50 типов)
Детекция внутренних дефектов	Нет	Нет	Нет	Возможна (мульти-спектральные датчики)
Точность определения дефектов, %	70–85	-	80–90	95–99,5
Адаптивность к сортам/сезонам	Высокая (оператор)	Низкая	Низкая	Высокая (дообучение)
Число операторов на линию	6–10	1–2	1	0–1

Обсуждение. Полученные результаты обзора позволяют выделить несколько ключевых аспектов.

Во-первых, применение свёрточных нейронных сетей архитектуры для одновременного решения задач детекции и классификации дефектов является на сегодняшний день наиболее эффективным подходом. Однако точность единичного детектора может быть недостаточной для промышленных стандартов, что обуславливает необходимость каскадных архитектур с реклассификацией и экспертными правилами [2].

Во-вторых, определение объёма клубня по одному верхнему изображению является задачей с потерей информации (проекция трёхмерного объекта на плоскость). Использование эмпирических регрессионных зависимостей для оценки высоты клубня обеспечивает приемлемую точность для массовой калибровки, однако для прецизионных задач (например, определение массы с точностью $\pm 0,1$ г) рекомендуется использование стереопары или структурированной подсветки [3].

В-третьих, предложенная концепция дистилляции знаний представляет значительный практический интерес. Обученная нейросеть, работая в течение нескольких сезонов, накапливает обширную базу решений, которая отражает специфику конкретного предприятия (сорта, условия хранения, типичные дефекты). Преобразование этих знаний в набор интерпретируемых правил решает несколько задач: (а) снижение стоимости серийного оборудования – вместо GPU-модуля стоимостью 500–1500 USD достаточно контроллера стоимостью 50–100 USD; (б) повышение прозрачности принятия решений, что важно для сертификации в пищевой отрасли; (в) обеспечение работоспособности при отсутствии интернет-соединения и ограниченном энергоснабжении. При этом необходимо учитывать, что детерминированная база правил неизбежно уступает нейросети по гибкости и точности в граничных случаях, поэтому рекомендуется периодическая актуализация правил с привлечением ИИ-модуля.

В-четвёртых, рыночные данные подтверждают экономическую эффективность внедрения: окупаемость составляет 18–24 месяца при сокращении отходов на 4–7 % и замене 6–10 операторов одной установкой [3]. Вместе с тем приведённые оценки относятся к предприятиям с уже подготовленной инфраструктурой; для хозяйств, требующих дополнительных капитальных вложений в обустройство помещения и систем защиты оборудования, реальный срок окупаемости может увеличиться. Снижение стоимости аппаратных средств (на 52 % за период 2020–2025 гг.) тем не менее делает технологию доступной и для средних хозяйств.

Среди ограничений следует отметить: зависимость качества детекции от условий освещения и загрязнённости конвейера; необходимость формирования обучающего набора данных для каждого нового сорта; чувствительность к окклюзиям при плотном расположении клубней на ленте. Дополнительным практическим ограничением является высокая чувствительность вычислительного оборудования к условиям эксплуатации: для обеспечения штатной работы ИИ-модуля необходимы защищённый шкаф, принудительная вентиляция и бесперебойное электроснабжение, что требует соответствующих капитальных вложений и напрямую влияет на реальный срок окупаемости системы.

Заключение. Проведён обзор существующих технологий сортировки клубней картофеля – от ручных и механических до современных систем на базе искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Показано, что ИИ-системы обеспечивают принципиально более высокую точность (95–99,5 %) и производительность (до 30 т/ч) по сравнению с традиционными методами.

Обоснована архитектура системы автоматизированной сортировки на основе RGB-камеры и свёрточных нейронных сетей, выполняющей одновременно калибровку клубней по размеру (точность $\pm 0,5$ мм) и детекцию внешних дефектов шести типов.

Предложена концепция дистилляции знаний – формирования детерминированной базы решающих правил по результатам работы обученной нейросети. Данный подход позволяет в дальнейшем осуществлять сортировку без нейросетевого модуля, что существенно снижает стоимость серийного оборудования и повышает его доступность для средних и малых сельскохозяйственных предприятий.

Определены направления дальнейших исследований: экспериментальная верификация предложенной архитектуры на реальной сортировочной линии; количественная оценка потери точности при переходе от нейросети к детерминированным правилам; разработка адаптивных алгоритмов дообучения при смене сорта и сезона.

Список источников

1. FAO. Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Rome: FAO, 2019. 38 p.
2. Reducing soil, stones, and defects: Advances in potato sorting and screening // Potato News Today. 2026. URL: <https://www.potatonewstoday.com> (дата обращения: 09.09.2026).
3. SiftAI® Multi-Lane Potato Sorting, Sizing, & Grading System // KPM Analytics. URL: <https://www.kpmanalytics.com> (дата обращения: 09.09.2026).

References

1. FAO. Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Rome: FAO, 2019. 38 p.
2. Reducing soil, stones, and defects: Advances in potato sorting and screening. Potato News Today. 2026. URL: <https://www.potatonewstoday.com> [Accessed 09 September 2026].
3. Sift AI. Multi-Lane Potato Sorting, Sizing, & Grading System. KPM Analytics. URL: <https://www.kpmanalytics.com> [Accessed 09 September 2026].

Информация об авторах

Иванов Алексей Генрихович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», Студенческая ул., д. 9, г. Ижевск, Российская Федерация, 426069

e-mail: ivalgen@inbox.ru

Гадлгареев Марат Фирдависович, аспирант кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», Студенческая ул., 9, г. Ижевск, Российская Федерация, 426069

Галимов Альберт Ильсурович, аспирант кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный аграрный университет», Студенческая ул., 9, г. Ижевск, Российская Федерация, 426069

Information about the authors

Ivanov Alexey Genrikhovich, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Udmurt State Agricultural University», 9 Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, the Russian Federation
e-mail: ivalgen@inbox.ru

Gadlgareev Marat Firdavisovich, postgraduate student, department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Udmurt State Agricultural University», 9 Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, the Russian Federation

Galimov Albert Isurovich, postgraduate student, department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Udmurt State Agricultural University», 9 Studencheskaya Street, Izhevsk, 426069, the Russian Federation

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: the authors declared that there was no conflict of interest

Статья / The article

поступила в редакцию / was received	10.09.2026
одобрена после рецензирования / approved after reviewing	15.09.2026
принята к публикации / accepted for publication	21.09.2026