

АГРАРНЫЕ НАУКИ**AGRARIAN SCIENCES**

УДК 631.362.36/635.156

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-168-176>

Поступило в редакцию 28.10.2024

Received 28.10.2024

Член-корреспондент В. В. Азаренко¹, М. И. Курилович², В. В. Голдыбан²¹*Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*²*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь***ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В КЛУБНЯХ КАРТОФЕЛЯ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИХ СОРТИРОВКИ**

Аннотация. Предложен и описан способ идентификации и отделения некондиционных клубней картофеля из общего вороха на основе систем технического зрения и автоматической инспекции. Для сегментации внешних дефектов клубней картофеля на фоне транспортирующего конвейера в режиме реального времени использован метод, основанный на вычислении цветового порога. Для трекинга движущихся клубней картофеля использовался алгоритм центроидного трекинга. Для обучения искусственной нейронной сети был создан собственный набор данных, состоящий из изображений товарных и дефектных клубней картофеля. Представлены результаты экспериментальных исследований определения внутренних дефектов клубней картофеля с помощью метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и компьютерной томографии (КТ). Для создания скрытых дефектов в виде потемнений мякоти клубней был использован метод регулируемого удара о твердую поверхность. Описана методика проведения экспериментальных исследований и режимные параметры ЯМР и КТ. Проведен сравнительный анализ изображений, полученных при помощи ЯМР и КТ, с натурными снимками клубней в разрезе, что позволило с высокой точностью определить совпадение местоположения дефектов, выявленных неинвазивным методом с их реальным расположением в клубне. Работа продемонстрировала ценность ЯМР и КТ для детального неинвазивного способа определения скрытых дефектов клубней картофеля на автоматических сортировальных машинах.

Ключевые слова: клубни картофеля, сортировка, внутренние дефекты, внешние дефекты, искусственная нейронная сеть, ядерный магнитный резонанс, T_2 релаксация

Для цитирования. Азаренко, В. В. Идентификация дефектов в клубнях картофеля для автоматизации процесса их сортировки / В. В. Азаренко, М. И. Курилович, В. В. Голдыбан // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 2. – С. 168–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-168-176>

Corresponding Member Vladimir V. Azarenko¹, Maksim I. Kurylovich², Viktor V. Goldyban²¹*Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization, Minsk, Republic of Belarus***IDENTIFICATION METHODS OF DEFECTS IN POTATO TUBERS TO AUTOMATE
THE PROCESS OF THEIR SORTING**

Abstract. A method for identifying and separating substandard potato tubers from a common pile based on machine vision and automatic inspection systems is proposed and described. A method based on calculating the color threshold is used for segmenting external defects of potato tubers against the background of a transport conveyor in real time. A centroid tracking algorithm is used to track moving potato tubers. A proprietary dataset consisting of images of commercial and defective potato tubers is created to train the artificial neural network. The results of experimental studies of determining internal defects of potato tubers using nuclear magnetic resonance (NMR) and computed tomography (CT) are presented.

A method of controlled impact on a hard surface is used to create hidden defects in the form of darkening of the tuber pulp. The methodology for conducting experimental studies and the operating parameters of NMR and CT are described. A comparative analysis of images obtained using NMR and CT with natural images of tubers in section was carried out, which made it possible to determine with high accuracy the coincidence of the location of defects detected by a non-invasive method with their real location in the tuber. The work demonstrated the value of NMR and CT for a detailed non-invasive method for determining hidden defects of potato tubers on automatic sorting machines.

Keywords: nuclear magnetic resonance, internal defects, external defects, artificial neural network, wireworm, deep processing of potatoes

For citation. Azarenko V. V., Kurylovich M. I., Goldyban V. V. Identification methods of defects in potato tubers to automate the process of their sorting. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 2, pp. 168–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-2-168-176>

Введение. Картофель – важная часть продовольственного обеспечения в большинстве стран мира, и максимальным фактором его рыночной цены является внешний вид. В процессе предпродажной доработки картофеля отечественной промышленностью применяют механические сортировочные столы различных типов, позволяющие разделять материал по внешним признакам визуально, а удаление некондиции производится вручную. Ручная сортировка всегда характеризуется субъективностью, утомляемостью и высокой стоимостью труда работников. Использование автоматических сортировальных машин для идентификации и отделения некондиционных клубней картофеля из общего вороха позволит улучшить эффективность сортировки, повысить производительность и качество получаемого продукта.

Одной из проблем при производстве картофеля является наличие в клубнях скрытых внутренних дефектов. Внутренние дефекты невозможно выявить на инспекционных столах визуально без предварительного разрушения клубней. Существующие способы определения внутренних дефектов предусматривают предварительный случайный отбор образцов, их резку и визуальный осмотр. Этот метод весьма трудоемок и малоэффективен.

Для изучения внутренних дефектов клубней картофеля предложено использовать метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и компьютерной томографии (КТ), а для определения внешних дефектов оптический метод распознавания.

Исследования по определению внешних дефектов проводились учеными J. C. Noordam, G. W. Otten, T. J. M. Timmermans, B. H. van Zwol (Нидерланды) [1], A. Golmohammadi, F. Bejaei, H. Behfar (Иран) [2], R. Martelli (Италия) [3], M. Tavakoli, N. Mohsen (Иран) [4].

С целью повышения эффективности процесса сортировки необходима разработка неразрушающих методов оценки качества клубней картофеля на стадии переработки и предпродажной доработки, обеспечивающих достаточно высокую скорость и точность анализа. В связи с этим был разработан ряд неинвазивных аналитических методов, позволяющих улучшить характеристику дефектов клубней картофеля. Группа специалистов из Бельгии использовали метод ядерного магнитного резонанса и компьютерной томографии для обнаружения внутренних дефектов яблок. Среднее значение и дисперсия частотного распределения влаги на снимках ЯМР и интенсивности рентгеновского излучения на КТ являются параметрами, позволяющими отличить здоровые яблоки от пораженных. Автоматическая обработка изображений, основанная на установлении порогового значения, привела к сопоставимой точности классификации методом компьютерной томографии – до 89 % и 79 % – для ЯМР [5].

Широкое распространение метод компьютерной томографии нашел в почвоведении [6]. С помощью метода КТ изучается плотность сложения почв [7], структура крупных пор зоогенного происхождения [8], содержание воды [9] и пространственное распределение влажности в почве [10].

Рентгеновская компьютерная томография является эффективным неинвазивным инструментом для визуализации внутренних компонентов и показателей качества свежей сельскохозяйственной продукции.

На макроуровне применение рентгеновской КТ использовалось для исследования изменения структуры ткани вследствие развития мучнистости у груши [11] или нарушения потемнения и полостей у груши и яблока [12]. На микромасштабе рентгеновская КТ использовалась для визуализации и оценки пористости сельскохозяйственных продуктов, таких как манго [13], яблоко [14]. Метод КТ применяют для исследования развития клубней картофеля от начала до сбора урожая

в условиях стресса (жара, засуха) с целью координации селекционных усилий по улучшению устойчивости генотипов картофеля к абиотическому стрессу.

Цель работы – изучить возможность применения ЯМР и КТ для определения внутренних дефектов клубней картофеля и предложить методику его реализации, а также рассмотреть возможность использования оптического метода распознавания внешних дефектов.

Материалы и методы исследований. Для сортировки продовольственного картофеля по внешним дефектам РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» разработан и изготовлен макетный образец для автоматической инспекции клубней картофеля, внешний вид которого представлен на рис. 1¹.



Рис. 1. Макетный образец автоматической сортировальной машины

Fig. 1. Model of an automatic sorting machine

Макетный образец состоит из рамы, вальцово-подающего конвейера, механизмов привода, системы распознавания, состоящей из видеокамеры и персонального компьютера, и пневматической системы отделения.

Принцип действия разработанного макетного образца автоматической сортировальной машины заключается в следующем. Картофель, поступающий на вальцовый подающий конвейер, перемещается в зону системы распознавания, где ему придается вращение посредством ременного привода. В зоне распознавания картофель успевает попасть на несколько кадров. Чтобы не перепутать клубни картофеля между собой, в систему встраивается алгоритм трекинга движущихся объектов (рис. 2). Клубни картофеля, снятые видеокамерой, обрабатываются компьютерной программой. Идентифицированные клубни как некондиционные, перемещаясь вальцовым транспортирующим устройством к системе отделения, удаляются с вальцового конвейера струей сжатого воздуха. Не отделенные клубни продолжают движение по технологической линии.

Принцип распознавания внешних дефектов основан на обучении искусственной нейронной сети (ИНС), для этого был использован классификатор ResNet. Обучающая выборка была разделена на кондиционный и некондиционный картофель. Для тестирования результатов 20 % объема данных было отделено от обучающих. В результате тестирования обученной сети точность и полнота были равны более 0,99. Несмотря на это, на реальных данных сеть постоянно ошибалась. Это происходит из-за различия яркости и баланса белого на изображениях из обучающих данных и на реальных изображениях. Чтобы проверить это, во время обучения ИНС была добав-

¹ Патент ВУ 24103. Способ автоматической сортировки клубней картофеля и машина для их сортировки: № а20200166 : заявлено 12.06.2020 : опубл. 30.10.2023 / В. В. Голдыбан, А. Н. Антоненко, М. И. Курилович.



Рис. 2. Результат работы алгоритма трекинга объектов

Fig. 2. Result of the object tracking algorithm

лена аугментация данных, при которой случайным образом изменялись яркость и баланс белого обучающих изображений. В результате тестирования на данных, отделенных от обучающих, были получены следующие значения точности и полноты: 0,92 и 0,92 соответственно.

Для проведения исследований по обнаружению внутренних дефектов были подготовлены клубни картофеля с искусственно созданными в них скрытыми дефектами в виде потемнений мякоти. Для создания скрытых дефектов был использован полый цилиндр высотой 1000 мм и диаметром поперечного сечения 125 мм. На дне цилиндра был размещен ударный элемент диаметром 25 мм. Клубни сбрасывались с одинаковой высоты и ударялись об ударный элемент, обращенный к основанию клубня. Клубни падали и ударялись о полусферическую головку, прикрепленную к круглой плоской пластине. Расчетная энергия удара варьировалась от 303 до 994 мДж в зависимости от массы картофеля. После удара клубни хранили в течение двух недель для проявления повреждений.

Исследования по определению скрытых дефектов проводились двумя способами: ядерным магнитным резонансом и компьютерной томографией.

Сущность исследований ядерным магнитным резонансом заключалась в следующем. Исследуемые клубни картофеля помещались в сильное магнитное поле напряженностью 1,5 Тл, при этом магнитные моменты атомов водорода, находящихся в воде тканей картофеля, выстраиваются вдоль магнитного поля. Далее в область исследований подавался радиочастотный импульс, который менял направление магнитных моментов атомов водорода от первоначального направления «по полю» на некоторый угол. При выключении радиочастотного импульса происходило восстановление первоначального направления «по полю» – релаксация. Это самое время релаксации или другими словами – быстрота восстановления направления магнитных моментов атомов водорода к первоначальному направлению «по полю» изменяется в зависимости от однородности тканей картофеля. Это различие времен релаксации использовалось, чтобы отличить нормальные и дефектные области в тканях картофеля.

Так как время релаксации бывает поперечным T_2 и продольным T_1 , то при патологических процессах изменение содержания воды в тканях картофеля приводит к увеличению интенсивности сигнала на T_1 изображениях и уменьшению интенсивности сигнала на T_2 изображениях. Результатом исследований является отображенное на экране компьютера изображение клубня картофеля в виде темных (низкий сигнал) и светлых (высокий сигнал) участков. Усиленный сигнал (гиперинтенсивный) – это более светлые участки изображения, а ослабленный сигнал (гипоин-

тенсивный) – более темные. Эти характеристики сигнала мы использовали, чтобы установить патологическими или нормальными являются области в полученном изображении.

T_2 изображения оптимально показывают жидкости в тканях, при этом вода проявляется в T_2 изображениях относительно яркими тонами, а ее недостаток – темными. В связи с чем в исследованиях для анализа скрытых дефектов в клубнях картофеля достаточным и необходимым является анализ T_2 изображений.

Последовательность мультиспинового эха (MSE) использовалась для измерения параметров поперечной релаксации T_2 . Под спиновым эхом понимается спонтанное возникновение сигнала ядерного магнитного резонанса через некоторое время после подачи на образец последовательности импульсов радиочастотного поля.

В исследовании применялись следующие характеристики MSE: матрица изображения 256×256 , поле зрения (FOV) 256×256 мм, толщина среза 3 мм, TR 2000 мс, TE 104 мс, количество эхосигналов 256, полоса пропускания (BW) 260 Гц пиксель⁻¹ и 2 усреднения. Минимальный объем повреждений, возможный к обнаружению – 1 мм³.

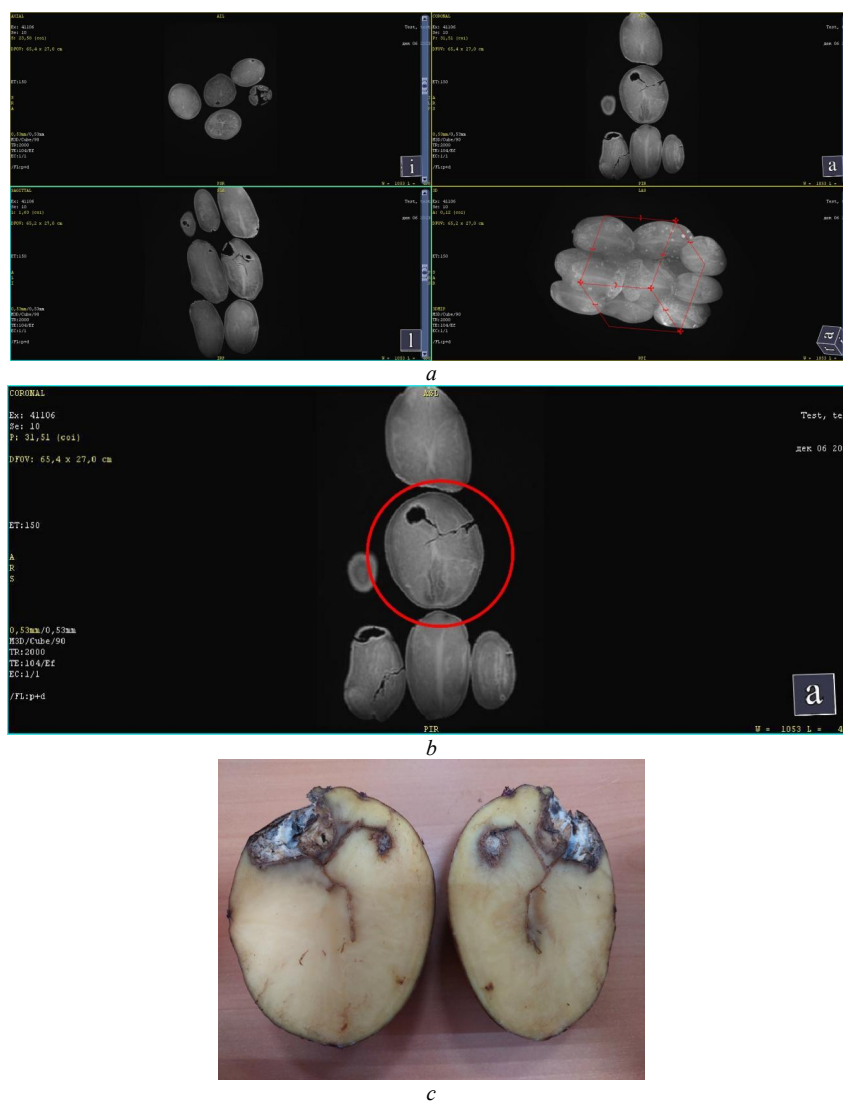


Рис. 3. Результаты применения ЯМР для клубней картофеля с искусственно созданными дефектами: *a* – общий вид программы и настроек; *b* – выделенный клубень картофеля с обнаруженными внутренними дефектами; *c* – дефектный клубень картофеля в разрезе

Fig. 3. Results of NMR application for potato tubers with artificially created defects: *a* – general view of the program and settings; *b* – selected potato tuber with detected internal defects; *c* – defective potato tuber in cross-section

На полученных с помощью ЯМР изображениях первой группы картофеля очень четко просматриваются структуры клубня в различных его сечениях: особенно видна сердцевина, кора и сосудистые пучки. При детальном изучении полученных снимков не было выявлено областей, отличающихся от общей массы мякоти клубней. Полученные результаты позволили сделать вывод об отсутствии внутренних дефектов в данной выборке клубней картофеля. При дальнейших исследованиях изображения кондиционных клубней картофеля использовались в качестве эталонных при определении наличия внутренних дефектов в других классах.

В следующем опыте были получены изображения и трехмерная модель второй группы клубней картофеля. Детальное изучение снимков проводилось покадрово для каждой полученной трехмерной модели изображения. На изображениях, полученных с помощью ЯМР, отчетливо видны внутренние дефекты клубней и характер изменения дефектной зоны в зависимости от глубины поражения клубня (рис. 3). Дефектные зоны на изображениях клубней имеют темный цвет, в то время как здоровая ткань – светлый. Отличие такого сигнала ЯМР от сигнала стандартного вещества позволяет определить так называемые биохимические сдвиги в тканях клубней.

На рис. 3, *b* просматриваются темные пятна, соответствующие областям гнили, образовавшейся в результате механического воздействия на клубни. Для сравнения из исследуемой выборки был отобран нужный клубень и сделано фото, представленное на рис. 3, *c*. Сравнивая полученные при помощи ЯМР снимки внутренних дефектов клубней картофеля, можно сделать вывод о высокой степени точности локализации скрытых дефектов неинвазивным методом.

Для определения скрытых внутренних дефектов способом компьютерной томографии был отобран 21 клубень картофеля. Клубни были подвержены механическому воздействию, аналогичному, как и при их подготовке к методу ЯМР. После чего они выдерживались при температуре 3–5° в темном помещении.

Исследования проводились на компьютерном томографе Discovery CT750 HD. Основные режимные параметры томографа в период проведения исследований: напряжение на рентгеновской трубке 120 кВ, анодный ток 10 мА, толщина одного среза 1,25 мм, время одного среза 0,6 с, количество срезов 70.

За время экспозиции томограф фиксирует 70 срезов клубней картофеля в поперечной и продольной проекции. Затем компьютер обрабатывает снимки и строит 3D-модель клубня картофеля. На рис. 4 представлены результаты обнаружения скрытых дефектов на примере клубня № 2. С целью раскрытия возможностей программы результаты выведены в оттенках оранжевого. Дефектные области на изображениях клубней отображены темным цветом, здоровая ткань –

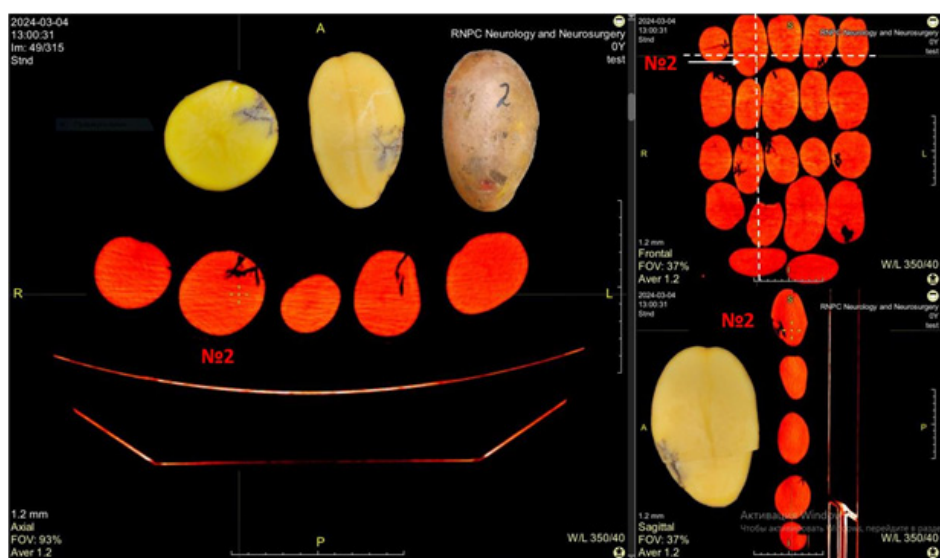


Рис. 4. Результаты компьютерной томографии по обнаружению внутренних дефектов клубней картофеля

Fig. 4. Results of computed tomography for detection of internal defects of potato tubers

оранжевым. Штрихпунктирная белая линия показывает горизонтальную и вертикальную проекцию среза. На рис. 4 показана горизонтальная проекция среза, в правом нижнем углу – вертикальная. В верхнем правом углу четко видно, что клубень под номером 2 внешне выглядит здоровым и его можно с определенной долей вероятности отнести к кондиционным. Однако вертикальные и горизонтальные срезы, полученные с помощью КТ, указывают на наличие скрытых дефектов, вызванных приложенными ранее механическими нагрузками.

Имея большой набор обучающих данных из томографических изображений кондиционных и некондиционных клубней картофеля, можно построить сверточную нейронную сеть, которая будет сегментировать данные компьютерной томографии клубней картофеля в автоматическом режиме, что имеет большое значение при проектировании автоматических сортировальных машин.

С целью сокращения времени идентификации внутренних дефектов в клубнях картофеля следует уменьшить количество срезов до 10, увеличив их шаг до 5 мм, что является достаточным для обнаружения скрытых дефектов.

Закключение. Разработан макетный образец автоматической сортировальной машины, в основу работы которого положена концепция интеллектуального анализа данных, согласно которой полученные с видеокамеры изображения клубней картофеля обрабатываются и формируются в образы с последующим распознаванием и выдачей сигнала исполнительному устройству системы автоматической инспекции в виде единичного импульсного сигнала при определении клубня как некондиционного.

Проведены исследования клубней картофеля на выявление внутренних дефектов при помощи ядерного магнитного резонанса и компьютерной томографии. Были проанализированы полученные изображения, которые позволяют сделать вывод, что методы ЯМР и КТ могут быть успешно применены для обнаружения и характеристики внутренних повреждений в клубнях картофеля. Так, в зависимости от расположения в клубне обнаруженные дефекты можно классифицировать по потенциальному происхождению и отслеживать их состояние без разрушения с использованием следующих характеристик ЯМР: матрица изображения 256×256 , поле зрения (FOV) 256×256 мм, толщина среза 3 мм, TR 2000 мс, TE 104 мс, количество эхосигналов 256, полоса пропускания (BW) 260 Гц пиксель⁻¹ и 2 усреднения. Минимальный объем повреждений, возможный к обнаружению, 1 мм³. Для КТ основные режимные параметры томографа в период проведения исследований должны быть следующими: напряжение на рентгеновской трубке 120 кВ, анодный ток 10 мА, толщина одного среза 1,25 мм, время одного среза 0,6 с, количество срезов 70. Также можно говорить о возможности применения метода ЯМР и КТ для повышения уровня товарности и переработки картофеля, а также расширения ассортимента готовой продукции. Сама методика проведения ЯМР и КТ анализа клубней картофеля подразумевает высокую автоматизацию процесса поиска внутренних дефектов в клубнях картофеля.

Список использованных источников

1. High speed potato grading and quality inspection based on a color vision system / J. C. Noordam, G. W. Otten, A. J. M. Timmermans, B. H. van Zwol // *Control Systems*. – 2017. – P. 15–24.
2. Golmohammadi, A. Design, development and evaluation of an online potato sorting system using machine vision / A. Golmohammadi, F. Bejaei, H. Behfar // *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. – 2013. – Vol. 6, N 7. – P. 396–402.
3. Caprara, C. Image analysis implementation for evaluation of external potato damage / C. Caprara, R. Martelli // *Applied Mathematical Sciences*. – 2015. – Vol. 9, N 81. – P. 4029–4041. <https://doi.org/10.12988/ams.2015.52170>
4. Tavakoli, M. Application of the image processing technique for sepa-rating sprouted potatoes in the sorting line / M. Tavakoli, N. Mohsen // *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*. – 2015. – Vol. 4, N 11S. – P. 223–227.
5. Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of different apple cultivars / E. Herremans, A. Melado-Herberos, T. Defraeye [et al.] // *Postharvest Biology and Technology*. – 2014. – Vol. 87. – P. 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.008>
6. Томография в почвоведении: от первых опытов к современным методам (обзор) / К. Н. Абросимов, К. М. Герке, Д. С. Фомин [и др.] // *Почвоведение*. – 2021. – Т. 55, № 9. – С. 1097–1112.

7. Petrovic, A. M. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning / A. M. Petrovic, J. E. Siebert, P. E. Rieke // *Soil Science Society of America Journal*. – 1982. – Vol. 46, N 3. – P. 445–450. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600030001x>
8. A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow systems in three dimensions by X-ray computed tomography / M. Joschko, O. Graff, P. C. Muller [et al.] // *Biology and Fertility of Soils*. – 1991. – Vol. 11. – P. 88–92. <https://doi.org/10.1007/bf00336369>
9. Crestana, S. Water physics study on soil using computerized tomography (in Portuguese): Ph. D. Thesis / S. Crestana. – São Paulo, 1985. – 151 p.
10. Hainsworth, J. M. The use of computed assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content / J. M. Hainsworth, L. A. G. Aylmore // *Australian Journal of Soil Research*. – 1983. – Vol. 21, N 4. – P. 435–443. <https://doi.org/10.1071/sr9830435>
11. Microstructure analysis and detection of mealiness in ‘Forelle’ pear (*Pyrus communis* L.) by means of X-ray computed tomography / T. Muziri, K. I. Theron, D. Cantre [et al.] // *Postharvest Biology and Technology*. – 2016. – Vol. 120. – P. 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.06.006>
12. MRI and X-ray CT study of spatial distribution of core breakdown in ‘Conference’ pears / J. Lammertyn, T. Dresselaers, P. Van Hecke [et al.] // *Magnetic Resonance Imaging*. – 2003. – Vol. 21, N 7. – P. 805–815. [https://doi.org/10.1016/s0730-725x\(03\)00105-x](https://doi.org/10.1016/s0730-725x(03)00105-x)
13. Characterization of the 3-D microstructure of mango (*Mangifera indica* L. cv. Carabao) during ripening using X-ray computed microtomography / D. Cantre, E. Herremans, P. Verboven [et al.] // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2014. – Vol. 24. – P. 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.12.008>
14. Multifractal properties of pore-size distribution in apple tissue using X-ray imaging / F. Mendoza, P. Verboven, Q. Tri Ho [et al.] // *Journal of Food Engineering*. – 2010. – Vol. 99, N 2. – P. 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.02.021>

References

1. Noordam J. C., Otten G. W., Timmermans A. J. M., van Zwol B. H. High speed potato grading and quality inspection based on a color vision system. *Control Systems*, 2017, pp. 15–24.
2. Golmohammadi A., Bejaei F., Behfar H. Design, development and evaluation of an online potato sorting system using machine vision. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2013, vol. 6, no. 7, pp. 396–402.
3. Caprara C., Martelli R. Image analysis implementation for evaluation of external potato damage. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 81, pp. 4029–4041. <https://doi.org/10.12988/ams.2015.52170>
4. Tavakoli M., Mohsen N. Application of the image processing technique for separating sprouted potatoes in the sorting line. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 2015, vol. 4, no. 11S, pp. 223–227.
5. Herremans E., Melado-Herreros A., Defraeye T., Verlinden B., Hertog M., Verboven P., Val J., Fernández-Valle M. E., Bongaers E., Estrade P., Wevers M., Barreiro P., Nicolai B. M. Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of different apple cultivars. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, vol. 87, pp. 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.008>
6. Abrosimov K. N., Fomin D. S., Romanenko K. A., Korost D. V., Gerke K. M. Tomography in soil science: from the first experiments to modern methods (a review). *Eurasian Soil Science*, 2021, vol. 54, no. 9, pp. 1385–1399. <https://doi.org/10.1134/s1064229321090027>
7. Petrovic A. M., Siebert J. E., Rieke P. E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, vol. 46, no. 3, pp. 445–450. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600030001x>
8. Joschko M., Graff O., Muller P.C., Kotzke K., Lindner P., Pretschner D. P., Larink O. A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow systems in three dimensions by X-ray computed tomography. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, vol. 11, pp. 88–92. <https://doi.org/10.1007/bf00336369>
9. Crestana S. *Water physics study on soil using computerized tomography (in Portuguese)* [Ph. D. Thesis]. São Paulo, 1985. 151 p.
10. Hainsworth J. M., Aylmore L. A. G. The use of computed assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Research*, 1983, vol. 21, no. 4, pp. 435–443. <https://doi.org/10.1071/sr9830435>
11. Muziri T., Theron K. I., Cantre D., Wang Z., Verboven P., Nicolai B. M., Crouch E. M. Microstructure analysis and detection of mealiness in ‘Forelle’ pear (*Pyrus communis* L.) by means of X-ray computed tomography. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, vol. 120, pp. 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.06.006>
12. Lammertyn J., Dresselaers T., Van Hecke P., Jancsó P., Wevers M., Nicolai B. M. MRI and X-ray CT study of spatial distribution of core breakdown in ‘Conference’ pears. *Magnetic Resonance Imaging*, 2003, vol. 21, no. 7, pp. 805–815. [https://doi.org/10.1016/s0730-725x\(03\)00105-x](https://doi.org/10.1016/s0730-725x(03)00105-x)
13. Cantre D., Herremans E., Verboven P., Ampofo-Asiama J., Nicolai B. Characterization of the 3-D microstructure of mango (*Mangifera indica* L. cv. Carabao) during ripening using X-ray computed microtomography. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2014, vol. 24, pp. 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.12.008>
14. Mendoza F., Verboven P., Tri Ho Q., Kerckhofs G., Wevers M., Nicolai B. Multifractal properties of pore-size distribution in apple tissue using X-ray imaging. *Journal of Food Engineering*, 2010, vol. 99, no. 2, pp. 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.02.021>

Информация об авторах

Азаренко Владимир Витальевич – член-корреспондент, д-р техн. наук, доцент, академик-секретарь. Отделение аграрных наук НАН Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: azarenko@presidium.basnet.by. ORCID: 0000-0003-2122-3281.

Курилович Максим Игоревич – науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: labpotato@mail.ru.

Голдыбан Виктор Владимирович – заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: labpotato@mail.ru.

Information about the authors

Azarenko Vladimir V. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Academic Secretary. Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: azarenko@presidium.bas-net.by. ORCID: 0000-0003-2122-3281.

Kurylovich Maksim I. – Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization (1, Knorin Str., 220049, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: labpotato@mail.ru.

Goldyban Viktor V. – Head of the Laboratory. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization (1, Knorin Str., 220049, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: labpotato@mail.ru.