

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 635.21.073-02:631.362.3-52
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-3-257-264>

Поступила в редакцию 20.02.2024
Received 20.02.2024

**Н. Г. Бакач¹, В. В. Азаренко², В. В. Голдыбан¹, В. П. Селиванова¹,
Н. А. Антипович³, М. И. Курилович¹, А. С. Воробей¹**

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь

²Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Минск, Республика Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА**

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований определения внутренних дефектов клубней картофеля с помощью метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР), дающего доступ к информации о состоянии и распределении воды на клеточном и тканевом уровнях. Для проведения исследований по обнаружению внутренних дефектов были подготовлены три группы клубней картофеля, включающие в себя кондиционные и некондиционные образцы. Общая выборка клубней картофеля составила 38 образцов. 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. Исследуемые клубни картофеля помещались в сильное магнитное поле напряженностью 1,5 Тл. В качестве основного метода анализа полученных результатов был выбран анализ T2 изображений, так как именно при таком способе можно отследить один из важнейших показателей обнаружения внутренних повреждений клубней картофеля – недостаток воды в поврежденных участках мякоти. Дефектные зоны на изображениях клубней имеют темный цвет, в то время как здоровая ткань – светлый. Проведен сравнительный анализ изображений, полученных при помощи ЯМР, и натуральных снимков 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 для детального неинвазивного способа определения скрытых дефектов клубней картофеля на автоматических сортировальных машинах.

Ключевые слова: клубни картофеля, сортировка, внутренние дефекты, ядерный магнитный резонанс, T2 релаксация

Для цитирования: Исследование внутренних дефектов клубней картофеля с использованием метода ядерного магнитного резонанса / Н. Г. Бакач [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2024. – Т. 62, № 3. – С. 257–264. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-3-257-264>

**Nikolay G. Bakach¹, Vladimir V. Azarenko², Viktor V. Goldyban¹, Valeryia P. Selivanova¹,
Nadzeia A. Antsipovich³, Maksim I. Kurylovich¹, Aliaksandr S. Verabei¹**

¹Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization, Minsk, Belarus

²Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Republican Research and Clinical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus

**RESEARCH ON INTERNAL DEFECTS OF POTATO TUBERS USING
THE NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE METHOD**

Abstract. The results of experimental studies are presented, determining the internal defects of potato tubers using nuclear magnetic resonance (NMR) method, which provide access to information about the state and distribution of water at the cellular and tissue levels. In order to carry out internal defect detection studies, three groups of potato tubers were prepared, comprising conditioned and unconditioned samples. The total sampling of potato tubers amounted to 38 samples. To create hidden defects in the form of darkening of tuber pulp, the method of controlled impact on a hard surface was used.

Methodology for conducting experimental studies and time parameters of NMR are described. The studied potato tubers were placed in a strong magnetic field with intensity of 1.5 Tesla. Analysis of T2 images was chosen as the main method for analyzing the obtained results, since this method allows to trace one of the most important indicators of detecting internal damage of potato tubers – lack of water in the damaged areas of the pulp. The damaged areas in the images of tubers have a dark color, while the healthy tissue is light. A comparative analysis of images obtained using NMR and full-scale images of tubers' section was carried out, allowing to determine with high accuracy the coincidence of location of defects detected by non-invasive method with their actual location in the tuber. The study showed the value of NMR for a detailed non-invasive method for determining hidden defects in potato tubers on automatic grading machines.

Keywords: potato tubers, sorting, internal defects, nuclear magnetic resonance, T2 relaxation

For citation: Bakach N. G., Azarenko V. V., Goldyban V. V., Selivanova V. P., Antsipovich N. A., Kurylovich M. I., Verabei A. S. Research on internal defects of potato tubers using the nuclear magnetic resonance method. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 3, pp. 257–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-3-257-264>

Введение. Картофель является одним из основных продуктов питания. Поэтому валовому производству картофеля и его качеству уделяется большое внимание¹ [1].

Одной из проблем при производстве картофеля является наличие в клубне скрытых внутренних дефектов. Клубни с внутренними скрытыми дефектами (почернение сердцевинки, дуплистость, некроз и др.) негативно влияют на выбор покупателя и могут испортить внешний вид полуфабрикатов из картофеля. И наоборот, отсортированный здоровый картофель, с чистой кожурой, без следов повреждений продается по более высокой цене, принося дополнительный доход предпринимателю, пользуется повышенным спросом у оптовых покупателей. Внутренние дефекты картофеля возникают из-за повреждений, наносимых вредителями и рабочими органами машин, а также вследствие нарушения технологии возделывания и хранения, болезни семенного материала.

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.

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.

Оценка внутренних дефектов обычно проводится с помощью разрушающего метода, который предполагает индивидуальную сортировку клубней картофеля после их разрезания в определенных местах. Такой подход дает лишь частичную информацию о качестве клубней, поскольку ограничивается дефектами, наблюдаемыми на анализируемых участках. В связи с этим был разработан ряд неинвазивных аналитических методов, позволяющих улучшить характеристику дефектов клубней картофеля.

В качестве оптического неразрушающего метода обнаружения ржавых пятен на картофеле была предложена спектроскопия отражения с временным разрешением. Этот метод показал относительно низкие результаты, поскольку он правильно определял только те клубни, которые были поражены сильными пятнами ржавчины, и требовал индивидуальной калибровки для каждого сорта картофеля.

При этом полые сердцевинки были обнаружены в клубнях картофеля с помощью рентгеновской съемки и инфракрасной гиперспектральной съемки. Последний метод также использовался для обнаружения различных дефектов в картофеле. Однако гиперспектральные изображения, полученные в вышеупомянутых исследованиях, не показывали детальной структуры тканей картофеля.

Наиболее часто при определении качества сельскохозяйственной продукции исследователями применяются методы, основанные на изучении свойств объекта поглощать или отражать различные виды энергии (традиционная визуализация, визуализация с обратным лазерным рассеянием, ультразвуковая визуализация, ядерный магнитный резонанс, рентгеновская визуализация,

¹ Республика Беларусь: стат. ежегодник, 2023 / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2023. 322 с.

флуоресцентная визуализация, микроволновая визуализация, визуализация запаха, акустический ударный метод и др.).

В литературе широко представлены также оптические методы, в которых используется зависимость между составом и оптическими свойствами вещества (фотометрические методы, нефелометрия и турбидиметрия, рефрактометрия, поляриметрия, спектроскопия, спектральный и люминесцентный анализы) [2–6]. Для наблюдения за процессом роста и созревания фруктов применялась ЯМР-релаксометрия [7–9]

Для изучения внутренних дефектов клубней картофеля предложено использовать метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Метод основан на измерении энергии атомных ядер водорода (H^+) в тканях картофеля, помещенного в сильное постоянное магнитное поле. В магнитном поле протоны в ядрах водорода меняют свою пространственную ориентацию. Так, если поместить протон во внешнее магнитное поле, то его магнитный момент будет либо сонаправлен, либо противоположно направлен магнитному полю, причем во втором случае его энергия будет выше. При воздействии на исследуемую область электромагнитным излучением определенной частоты часть протонов поменяют свой магнитный момент на противоположный, а потом вернуться в исходное положение. При этом системой сбора данных томографа регистрируется выделение энергии во время релаксации предварительно возбужденных протонов и преобразование томографом на экран компьютера [8].

Материалы и методы исследований. Для проведения исследований по обнаружению внутренних дефектов были подготовлены клубни картофеля: группа 1 – кондиционные клубни; группа 2 – клубни с внутренними дефектами, созданными искусственно; группа 3 – клубни картофеля, пораженные проволочником. Общая выборка экспериментальных образцов составила 38 клубней картофеля, разделенных на 3 группы: в первых двух по 15 штук, в третьей – 8 (рис. 1).

Для создания скрытых дефектов в виде потемнений мякоти клубней был использован полый цилиндр высотой 1000 мм и диаметром поперечного сечения 125 мм (рис. 2). На дне цилиндра был размещен ударный элемент диаметром 25 мм. Клубни сбрасывались с одинаковой высоты и ударялись об ударный элемент, обращенный к основанию клубня. Предпочтительное место соприкосновения клубня и ударника – рубец от столона на основании 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.

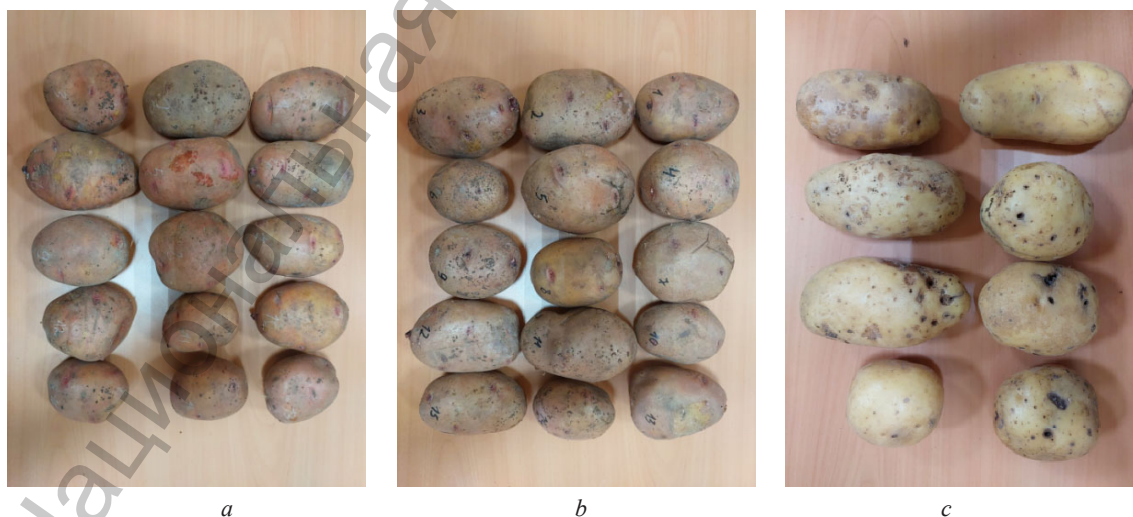


Рис. 1. Исследуемые образцы клубней картофеля: *a* – кондиционные клубни картофеля; *b* – некондиционные клубни картофеля с внутренними дефектами, созданными искусственно; *c* – клубни картофеля, пораженные проволочником

Fig. 1. Examined samples of potato tubers: *a* – standard potato tubers; *b* – substandard potato tubers with internal defects created artificially; *c* – potato tubers infested with wireworm

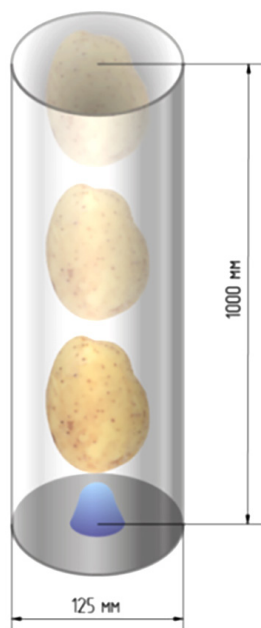


Рис. 2. Схема создания внутренних дефектов клубней картофеля

Fig. 2. Scheme for creating internal defects in potato tubers

Сущность исследований 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 релаксация бывает поперечной T2 и продольной T1, при патологических процессах изменение содержания воды в тканях картофеля приводит к увеличению интенсивности сигнала на T1 изображениях и уменьшению интенсивности сигнала на T2 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 (гипоинтенсивный) – более темные. Эти характеристики сигнала мы использовали, чтобы установить, патологическими или нормальными являются области в полученном изображении.

T2 изображения оптимально показывают жидкости в тканях, при этом вода проявляется в T2 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 T2 изображений.

Последовательность мультиспинового эха (MSE) использовалась для измерения параметров поперечной релаксации T2. Под спиновым эхом понимается спонтанное возникновение сигнала ядерного магнитного резонанса через некоторое время после подачи на образец последовательности импульсов радиочастотного поля.

В исследования 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) $260 \text{ Гц/пиксель}^{-1}$ и 2 усреднения. Минимальный объем повреждений, возможный к обнаружению, – 1 мм^3 .

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 представлены результаты исследования внутренней структуры кондиционных клубней картофеля с помощью ЯМР. Для удобства восприятия результат может быть отображен на экране в различной цветовой гамме.

На полученных с помощью ЯМР изображениях 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 (рис. 4). На изображениях, полученных с помощью ЯМР, отчетливо видны внутренние дефекты клубней и характер изменения дефектной зоны в зависимости от глубины поражения клубня. Дефектные зоны на изображениях клубней имеют темный

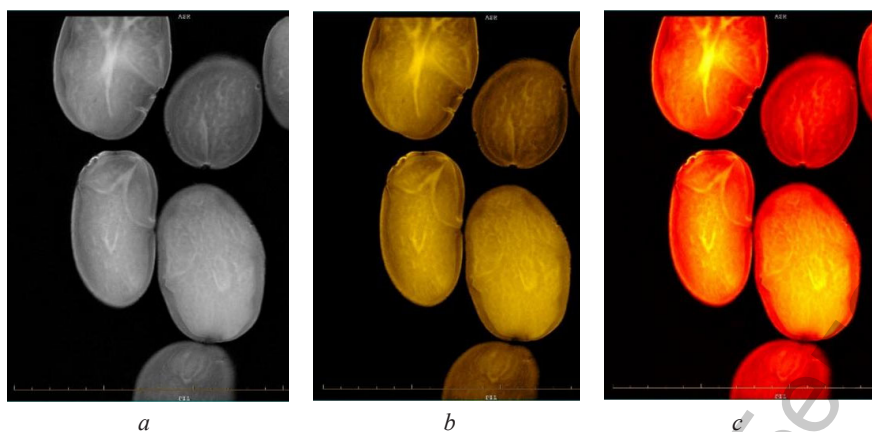


Рис. 3. Результаты применения ЯМР для изучения внутренней структуры клубня картофеля (кондиционные клубни):
a – изображение в оттенках серого; *b* – изображение в оттенках золотого трехмерного;
c – изображение в оттенках раскаленного металла

Fig. 3. Results of using NMR to study the internal structure of a potato tuber (standard tubers):
a – grayscale image; *b* – image in shades of gold three-dimensional; *c* – an image in shades of hot metal

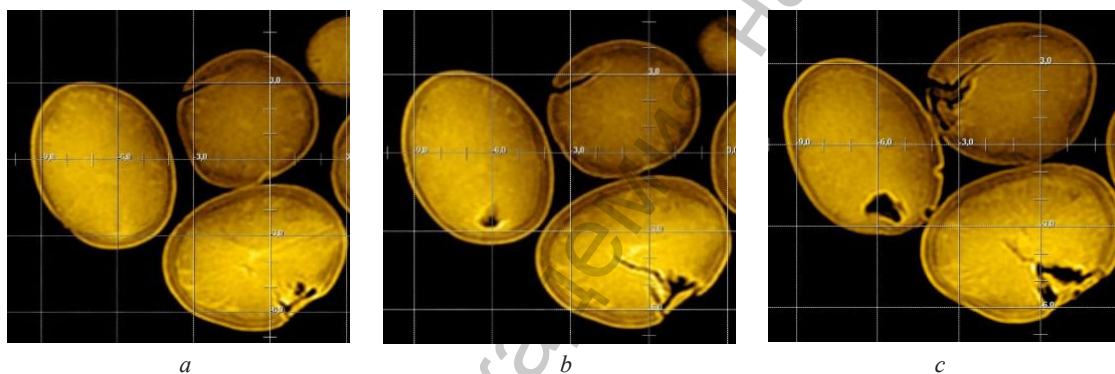


Рис. 4. Изменение параметров дефектной зоны в зависимости от глубины поражения клубня:
a – начало появления дефектных областей; *b* – срез слоя через 3 мм; *c* – срез слоя через 6 мм

Fig. 4. Changes in the parameters of the defective zone depending on the depth of tuber damage:
a – appearance of defective areas; *b* – layer cut in 3 mm; *c* – layer cut after 6 mm

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.

В качестве наглядного примера был выбран снимок в фронтальной проекции, представленный на рис. 5, *a*, на котором явно присутствует 2 темных пятна, обозначенных областями 1 и 2, соответствующие областям гнили, образовавшейся в результате механического воздействия на клубни. Для сравнения из исследуемой выборки был отобран нужный клубень и сделано его фото, представленное на рис. 5, *b*, в разрезе в месте локализации повреждения гнилью. Сравнивая полученные при помощи ЯМР снимки внутренних дефектов клубней картофеля, можно сделать вывод о высокой степени точности локализации скрытых дефектов неинвазивным методом.

Третья подборка снимков (рис. 6) иллюстрирует наличие внутренних дефектов в третьей выборке клубней картофеля, предположительно пораженных проволочником. На снимках отмечены области со скрытыми дефектами 1, 2 и 3, которые представляют собой темные пятна по сравнению с окружающей их мякотью. Области интереса – это ходы, проделанные проволочником, локализованные вблизи коры клубня. На рис. 6, *a* представлено графическое отображение полученных результатов сканирования класса клубней картофеля, поврежденных проволочником. Для проверки наличия внутренних дефектов у исследуемого клубня он был разрезан в месте поражения проволочником. На полученном снимке (рис. 6, *b*) можно увидеть внутренние дефекты, обнаруженные предварительно при помощи ядерного магнитного резонанса.

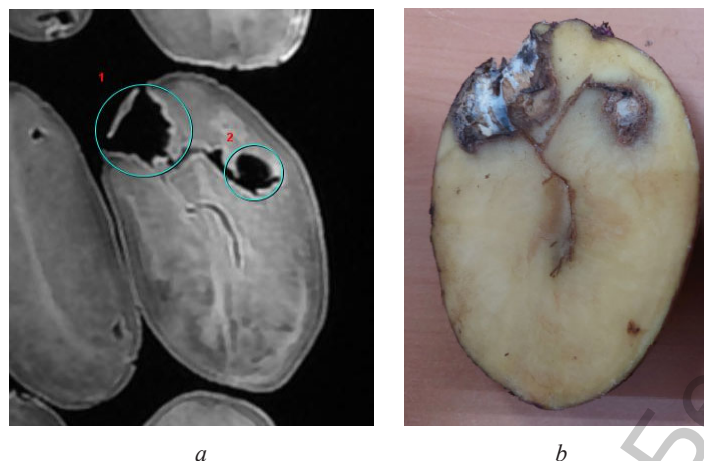


Рис. 5. Результаты сканирования клубней картофеля группы с искусственно созданными повреждениями (a); дефектный клубень картофеля (в разрезе) (b)
 Fig. 5. Scanning results of potato tubers group with artificially created damages (a), defective potato tuber (in section) (b)

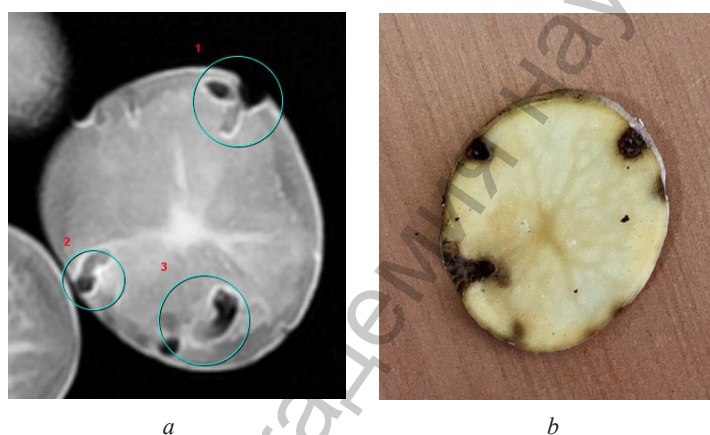


Рис. 6. Результаты сканирования выборки клубней картофеля, поврежденных проволочником (a); дефектный клубень картофеля, поврежденный проволочником (в разрезе) (b)

Fig. 6. Scanning results of a sample of potato tubers damaged by wireworm (a); defective potato tuber damaged by wireworm (in section) (b)

Выводы. Проведены исследования трех групп клубней картофеля на выявление внутренних дефектов при помощи ядерного магнитного резонанса. Были проанализированы полученные изображения, которые позволяют сделать вывод, что метод ЯМР может быть успешно применен 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 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. Также можно говорить о возможности применения метода ЯМР для повышения уровня товарности и переработки картофеля, а также расширения ассортимента готовой продукции. Сама методика проведения ЯМР-анализа клубней картофеля подразумевает высокую автоматизацию процесса поиска внутренних дефектов в клубнях картофеля.

Благодарности. Работа выполнялась в рамках ГПНИ «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Механизация агропроцессов и “точное” сельское хозяйство».

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the State Program of Scientific Research “Agricultural Technologies and Food Security” for 2021–2025, subprogram “Mechanization of Agricultural Processes and Precision Agriculture”.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об объявлении 2024 года Годом качества [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 27 нояб. 2023 г., № 375 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32300375>. – Дата доступа: 23.03.2024.
2. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear / X. Fu [et al.] // *J. Food Eng.* – 2007. – Vol. 83, № 3. – P. 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.041>
3. Development of nondestructive technique for detecting internal defects in Japanese radishes / K. Takizawa [et al.] // *J. Food Eng.* – 2014. – Vol. 126. – P. 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.041>
4. Comparison of X-ray CT and MRI of watercore disorder of different apple cultivars / E. Herremans [et al.] // *Postharvest Biol. Technol.* – 2014. – Vol. 87. – P. 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.008>
5. Quantitative magnetic resonance imaging of tomato fruit [Electronic resource] / M. Musse [et al.] // *Proceeding of the joint annual meeting ISMSM-ESMRMB, Berlin, Germany, 19–25 May 2007 / Europ. Soc. of Magnetic Resonance in Medicine a. Biology, Intern. Soc. of Magnetic Resonance in Medicine.* – Red Hook, 2007. – Mode of access: <https://cds.ismrm.org/protected/07MProceedings/PDFfiles/01789.pdf>. – Date of access: 23.03.2024.
6. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods / F. Xu [et al.] // *Food Res. Int.* – 2017. – Vol. 96. – P. 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.041>
7. Functional imaging of plants: a nuclear magnetic resonance study of a cucumber plant / T. Scheenen [et al.] // *Biophys. J.* – 2002. – Vol. 82, № 1. – P. 481–492. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(02\)75413-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(02)75413-1)
8. Ishida, N. Ontogenetic changes in water in cherry tomato fruits measured by nuclear magnetic resonance imaging / N. Ishida, M. Koizumi, H. Kano // *Sci. Hortic.* – 1994. – Vol. 57, № 4. – P. 335–346. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90116-3)
9. Clark, C. J. Detection of Brownheart in ‘Braeburn’ apple by transmission NIR spectroscopy / C. J. Clark, V. A. McGlone, R. B. Jordan // *Postharvest Biol. Technol.* – 2003. – Vol. 28, № 1. – P. 87–96. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00122-9)

References

1. On declaring 2024 the Year of Quality: Decree of the President of the Republic of Belarus, November 27, 2023, no. 375. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32300375> (accessed 23.03.2024) (in Russian).
2. Fu X., Ying Y., Lu H., Xu H. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear. *Journal of Food Engineering*, 2007, vol. 83, no. 3, pp. 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.041>
3. Takizawa K., Nakano K., Ohashi S., Yoshizawa H., Wang J., Sasaki Y. Development of nondestructive technique for detecting internal defects in Japanese radishes. *Journal of Food Engineering*, 2014, vol. 126, pp. 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.041>
4. 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>
5. Musse M., Quellec S., Devaux M., Lahaye M., Mariette F. Quantitative magnetic resonance imaging of tomato fruit. *Proceeding of the joint annual meeting ISMSM-ESMRMB, Berlin, Germany, 19–25 May 2007*. Red Hook, 2007. Available at: <https://cds.ismrm.org/protected/07MProceedings/PDFfiles/01789.pdf> (accessed 23.03.2024).
6. Xu F., Jin X., Zhang L., Chen X. D. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods. *Food Research International*, 2017, vol. 96, pp. 191–197. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.041>
7. Scheenen T., Heemskerk A., De Jager A., Vergeldt F., Van As H. Functional imaging of plants: a nuclear magnetic resonance study of a cucumber plant. *Biophysical Journal*, 2002, vol. 82, no. 1, pp. 481–492. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(02\)75413-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(02)75413-1)
8. Ishida N., Koizumi M., Kano H. Ontogenetic changes in water in cherry tomato fruits measured by nuclear magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae*, 1994, vol. 57, pp. 335–346. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90116-3)
9. Clark C. J., McGlone V. A., Jordan R. B. Detection of Brownheart in ‘Braeburn’ apple by transmission NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, vol. 28, no. 1, pp. 87–96. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00122-9)

Информация об авторах

Бакач Николай Георгиевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной работе, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-5491-9229>. E-mail: bakachng@yandex.ru

Information about the authors

Nikolay G. Bakach – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director General for Research, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization (1, Knorin Str., 220049, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-5491-9229>. E-mail: bakachng@yandex.ru

Азаренко Владимир Витальевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, доцент, академик-секретарь отделения аграрных наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.basnet.by

Голдыбан Виктор Владимирович – заведующий лабораторией механизации производства овощей и корнеклубнеплодов, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: labpotato@mail.ru

Селиванова Валерия Павловна – младший научный сотрудник лаборатории механизации производства овощей и корнеклубнеплодов, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vel.selivanova@gmail.com

Антипович Надежда Александровна – инженер-электроник, Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии (ул. Ф. Скорины, 24, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: wooff@mail.ru

Курилович Максим Игоревич – научный сотрудник лаборатории механизации производства овощей и корнеклубнеплодов, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: labpotato@mail.ru

Воробей Александр Сергеевич – научный сотрудник лаборатории механизации производства овощей и корнеклубнеплодов, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: labpotato@mail.ru

Vladimir V. Azarenko – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Academic Secretary of the Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.bas-net.by

Viktor V. Goldyban – Head of the Laboratory for Mechanization of Production of Vegetables and Root Crops, 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

Valeryia P. Selivanova – Junior Researcher of the Laboratory for Mechanization of Production of Vegetables and Root Crops, 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: vel.selivanova@gmail.com

Nadzeya A. Antsipovich – Electronic Engineer, Republican Research and Clinical Center of Neurology and Neurosurgery (24, F. Skaryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: wooff@mail.ru

Maksim I. Kurylovich – Researcher of the Laboratory for Mechanization of Production of Vegetables and Root Crops, 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

Aleksandr S. Verabei – Researcher of the Laboratory for Mechanization of Production of Vegetables and Root Crops, 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