

УДК 539.264

Метод микрофокусной рентгенографии для выявления скрытых дефектов и оценки качества орехов культурных сортов

А. Д. СЕВАСТЬЯНОВА^{1*}, д-р техн. наук Ю. Г. БАЗАРНОВА¹, канд. техн. наук Н. С. ПРИЯТКИН²

¹Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого

²Агрофизический научно-исследовательский институт

*E-mail: anna-julija@rambler.ru

Перспективным направлением усовершенствования методов контроля качества сельскохозяйственной продукции является изучение возможности выявления скрытых (внутренних) дефектов сельскохозяйственной продукции путем применения неразрушающих методов, например методов спектрального анализа, в том числе, метода микрофокусной рентгенографии, который позволяет выявить дефекты орехов культурных сортов благодаря визуализации внутренней их внутренней структуры. Целью работы являлось установление корреляционной взаимосвязи между параметрами рентгенографических проекций и внутренними дефектами грецкого ореха и орехов миндаля и возможности использования метода микрофокусной рентгенографии для контроля качества цельных орехов культурных сортов. В качестве объектов исследования использовали образцы ореха грецкого (*Juglans regia* L.) и миндаля (*Prunus amygdalus* Batsch), выращенные на опытной станции Никитского ботанического сада (Республика Крым), урожаями 2020 и 2021 гг. Для получения рентгенографических цифровых изображений орехов применяли многофункциональную передвижную рентгенографическую установку ПРДУ-02. Анализ полученных цифровых рентгенографических изображений орехов проводили в 2 этапа. На этапе интегральной обработки цифровых рентгенографических изображений рассчитывали среднюю яркость рентген-проекции (E , ед. яркости) и площадь рентген-проекции (S , см²), на этапе фазового анализа устанавливали долю площади пустот и долю суммарной площади ядра со скорлупой от общей площади рентген-проекции ($S_{\text{пуст}}/S$, % и $S_{\text{я+с}}/S$, %). Полученные значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о высокой корреляции массы и параметров рентгеновских изображений E и S для грецкого ореха. Умеренная корреляция параметров E ($R_{XY}=0,64$) и S ($R_{XY}=0,61$) выявлена для орехов миндаля. Корреляция массы орехов и доли суммарной площади ядра и скорлупы от общей площади рентген-проекции, $S_{\text{я+с}}/S$ менее выражена, что можно объяснить наложением погрешности фазового анализа, в результате которого получены значения $S_{\text{я+с}}/S$.

Ключевые слова: неразрушающие методы контроля качества, грецкий орех, орех миндаля, внутренние дефекты, микрофокусная рентгенография, параметры рентгеновских проекций, корреляционная взаимосвязь, масса орехов.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 05.03.2024, одобрена после рецензирования 21.03.2024, принята к печати 25.03.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-64-71

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Севастьянова А. Д., Базарнова Ю. Г., Прияткин Н. С. Метод микрофокусной рентгенографии для выявления скрытых дефектов и оценки качества орехов культурных сортов // Вестник Международной академии холода. 2024. № 2. С. 64–71. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-64-71

Microfocus radiography method for detecting hidden defects and assessing the quality of nuts cultivars

A. D. SEVASTYANOVA^{1*}, D. Sc. Yu. G. BAZARNOVA¹, Ph. D. N. S. PRYATKIN²

¹Peter the Great Saint-Petersburg University

²Agrophysical Research Institute

*E-mail: anna-julija@rambler.ru

A promising direction for improving methods for quality control of agricultural products is to study the possibility of identifying hidden (internal) defects in agricultural products through the use of non-destructive methods, for example, spectral analysis methods, including the method of microfocus radiography, which allows to identify defects in nuts cultivars through visualization of their internal structure. The aim of the study was to establish a correlation between the parameters of radiographic projections and internal defects of walnut and almond and the possibility of using the microfocus radiography method to control the quality of whole nuts cultivars. The objects of study were the samples of walnut (*Juglans regia* L.)

and almond (*Prunus amygdalus* Batsch), grown at the experimental station of the Nikitsky Botanical Garden (Republic of Crimea), the harvest of 2020 and 2021. To obtain radiographic digital images of nuts, a multifunctional mobile radiographic installation PRDU-02 was used. The analysis of the obtained digital radiographic images of nuts was carried out in two stages. At the stage of integral processing of digital radiographic images, the average brightness of the X-ray projection (E , brightness unit) and the area of the X-ray projection (S , cm^2) were calculated. At the stage of phase analysis, the proportion of the void area was determined and the proportion of the total area of the nucleus with the shell from the total area of the X-ray projection (S_{blank}/S , % and $S_{\text{a+c}}/S$, %). The obtained values of the correlation coefficients indicate a high correlation between the mass and the X-ray image parameters E and S for the walnut. A moderate correlation of parameters E ($R_{XY}=0.64$) and S ($R_{XY}=0.61$) was found for almond. The correlation between the mass of nuts and the proportion of the total area of the kernel and shell from the total area of the X-ray projection, $S_{\text{a+c}}/S$, is less pronounced, which can be explained by the imposition of an error in the phase analysis, as a result of which the values of $S_{\text{a+c}}/S$ were obtained.

Keywords: non-destructive quality control methods, walnut, almond, internal defects, microfocus radiography, X-ray projection parameters, correlation, nut weight.

Article info:

Received 05/03/2024, approved after reviewing 21/03/2024, accepted 25/03/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-64-71

Article in Russian

For citation:

Sevastyanova A. D., Bazarnova Yu. G., Pryatkin N. S. Microfocus radiography method for detecting hidden defects and assessing the quality of nuts cultivars. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 2. p. 64-71. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-64-71

Введение

Согласно действующим нормативным документам, качество цельных не очищенных от скорлупы орехов культурных сортов, предназначенных для употребления в пищу непосредственно без дальнейшей переработки, оценивается путем внешнего осмотра и калибровки после обнаружения дефектов^{1,2}.

Комплексная оценка внешнего вида скорлупы и ядра (после удаления скорлупы) проводится исключительно путем осмотра и сводится к выявлению наличия орехов других помолологических сортов, отсутствия живых сельскохозяйственных вредителей, посторонних примесей, дефектов внешнего вида скорлупы, ядер с плесенью. После сортировки орехов их освобождают от скорлупы для выявления внутренних дефектов ядра, к которым относятся «усыхание», наличие плесени, гнили и повреждений сельскохозяйственными вредителями^{1,2}. Таким образом, комплексная оценка качества орехов является длительной и трудоемкой процедурой, требующей привлечения значительного количества персонала.

В настоящее время все большую популярность приобретают неразрушающие методы контроля качества сельскохозяйственной продукции, в основе которых лежит оценка морфологических признаков и скрытых дефектов плодов с использованием современных инстру-

ментальных методов. Преимущество физических методов неразрушающего контроля заключается в том, что подобные методы позволяют визуализировать форму, размер и дефекты деталей внутренней структуры исследуемого объекта, не нарушая его целостности [1].

Например, метод трансмиссионной электронной микроскопии, в основе которого лежит способность электронов проходить через тонкий слой образца, позволяет получить двухмерную картину внутренней структуры биологических объектов, а метод рентгеновской микротомографии — трехмерное изображение внутренней структуры объекта. К измерительным методам, используемым для анализа морфологии и структуры объектов, относятся также конфокальная сканирующая лазерная микроскопия, ультразвук, сканирующая электронная микроскопия и атомно-силовая микроскопия, которые позволяют визуализировать поверхность образца [2].

Одним из преимуществ методов неразрушающего контроля сельскохозяйственной продукции является их высокая информативность: помимо констатации факта низкого качества объекта исследования можно выявить непосредственную причину его порчи, а также проследить за качеством в процессе хранения, регистрируя и составляя архив полученной информации [3].

¹ ГОСТ 32874–2014 Орехи грецкие. Технические условия (UNECE STANDARD DDP-01:2013, Concerning the marketing and commercial quality control of Inshell Walnuts, MOD): межгосударственный стандарт: издание официальное: принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 30 июля 2014 г. № 68-П: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 октября 2014 г. № 1464-ст: введен впервые: дата введения 2016-01-01 / подготовлен Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр «Кубаньагростандарт». Москва: Стандартинформ, 2015. III, 11 с.

² ГОСТ 32811–2014 Орехи миндаля сладкого в скорлупе. Технические условия (UNECE STANDARD DDP-18:2007, Concerning the marketing and commercial quality control of Inshell Almonds, MOD): межгосударственный стандарт: издание официальное: принят межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 25 июня 2014 г. № 45–2014: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 августа 2014 г. № 927-ст: введен впервые: дата введения 2015-07-01 / подготовлен Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр «Кубаньагростандарт». Москва: Стандартинформ, 2015. III, 11 с.

Для снижения трудоемкости традиционных методов оценки жизнеспособности и всхожести семян, авторами Rajabi-Sarkhani и др. предложено использовать спектроскопию видимого и ближнего инфракрасного диапазона (500–1030 нм) в качестве неразрушающего метода определения жизнеспособности семян арахиса [4].

Авторы Hacisalihoglu и др. [5] опубликовали обзор последних достижений в области неразрушающего контроля качества семян с использованием методов БИК-спектроскопии с преобразованием Фурье (FT-NIR), одноядерной БИК-спектроскопии (SKNIR), БИК-спектроскопии на микроэлектромеханических системах (MEMS-NIR) и на дисперсионной диодной матрице (DANIR). Показано, что методы БИК-спектроскопии имеют значительные преимущества, включая скорость, удобство для пользователя и неразрушающий характер.

Мульти- и гиперспектральная визуализация – это новые технологии неразрушающего контроля, которые в последние годы постепенно используются в области контроля качества семян. Данные методы необходимы для быстрого и крупномасштабного определения жизнеспособности и энергии семян и играют решающую роль в определении урожайности [6]–[8].

В исследовании Nadimi и др. представлено сочетание оптических методов, а именно гиперспектральной визуализации (HSI) и двумерной (2D) рентгеновской визуализации, основанных на системах машинного обучения, с целью автоматизированной комплексной оценки повреждений льяного семени. Благодаря комплексному подходу в исследовании была достигнута точность классификации, превышающая 87 % для всех методов [9].

Однако современные технологии фенотипирования растений, основанные на мульти- гиперспектральных изображениях, захватывают в основном поверхность исследуемого объекта и ограничены в возможности проникновения излучения в среду роста, а также в его внутренние ткани и структуры. 3D-рентгеновская компьютерная томография (КТ) устраняет эти недостатки, обеспечивая неразрушающую визуализацию оптически недоступных структур растений, позволяя осуществлять 3D-реконструкцию и измерение объектов с высоким разрешением и высокой пропускной способностью [10].

В работе Claussen et. al. [10] представлен ряд полностью автоматизированных, промышленно проверенных технологий на основе 3D-рентгеновской КТ, которые позволяют визуальное и количественно отслеживать весь цикл развития растений. Авторы подчеркивают неразрушающее, полностью автоматизированное 3D-фенотипирование семян и прорастающих сеянцев, а также их внутренних органов. Представленные технологии, универсально применимые ко всем видам растений и сельскохозяйственных культур, позволяют количественно, объективно и воспроизводимо оценивать морфологические характеристики семян и рассады в режиме 4D.

Для оценки качества семян зерновых культур Подвижной О. А. и др. [11] предложен метод микрофокусной рентгенографии, в основе которого лежит свойство поврежденных и неповрежденных участков семян в разной степени поглощать рентгеновское излучение: нормальные семена, то есть полностью сформированные и без дефек-

тов, способны хорошо поглощать излучение, поэтому их изображения на рентгенограммах светлые, а пустоты и дефекты развития из-за слабого поглощения излучения образуют темные участки рентгенограмм. В итоге рентгеновское изображение внутренней структуры семян позволяет выявить их неполноценность, а также механические травмы и повреждения, вызываемые насекомыми и патогенами.

Важными достоинствами рентгенографического метода являются также его экспрессность и безопасность. Анализ одной партии образцов занимает не более 30 мин и за счет низкого напряжения на рентгеновской трубке, используемой при съемке, не оказывает лучевого воздействия на объект и оператора. Благодаря применению микрофокусных излучателей возможно получать рентгеновские снимки высокого качества [12].

Актуальным является расширение возможностей применения неразрушающего контроля сельскохозяйственной продукции, в том числе, метода микрофокусной рентгенографии, для выявления скрытых дефектов и определения сортности орехов культурных сортов.

Цель работы: установить корреляционную взаимосвязь между параметрами рентгенографических проекций и внутренними дефектами грецкого ореха и миндаля и возможности использования метода микрофокусной рентгенографии для контроля качества цельных орехов культурных сортов.

Методы и материалы

В качестве объектов исследования использовали образцы ореха грецкого (*Juglans regia* L.) и миндаля (*Prunus amygdalus* Batsch), выращенные на опытной станции Никитского ботанического сада (Республика Крым), урожаем 2020 и 2021 гг.

Объединенную пробу формировали из нескольких партий орехов, масса лабораторной пробы составляла 2,5 кг. Массу (m , г) отдельных образцов орехов, отобранных для анализа, определяли с точностью до 0,001 г.

Для неразрушающего контроля цельных орехов применяли многофункциональную передвижную рентгенографическую установку (ПРДУ-02, Россия). Для получения рентгеновских проекций использовали следующий режим съемки: анодное напряжение — 20 кВ, анодный ток — 0,1 мА, размер фокусного пятна — менее 0,03 мм, расстояние от источника рентгеновского излучения до приемника — 400 мм, коэффициент увеличения $1 \times$ [13].

Для рентгеновской съемки орехи фиксировали с помощью липкой ленты на картонных карточках размером 80×75 мм. Образцы грецкого ореха раскладывали на карточке в 3 ряда по 6 штук, образцы миндаля – в 3 ряда по 10 штук в каждом. Такой план раскладки образцов орехов целесообразен для удобства дальнейшего анализа полученных рентгеновских изображений (рис. 1).

Цифровые изображения рентгенограмм с размером пикселя — 0,1 мм выводили на экран персонального компьютера для дальнейшей обработки. Обработку цифровых рентгеновских изображений орехов осуществляли с помощью программы «ВидеоТест-Морфология 5.2.» (ООО «АргусСофт», Россия). Статистическую обработку проводили с помощью пакета анализа программы Microsoft Excel [14].

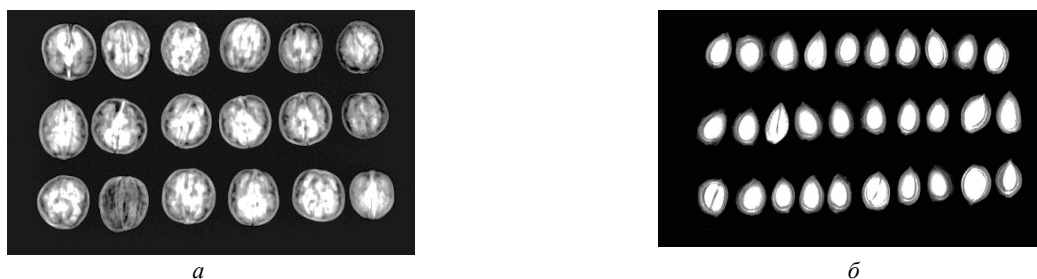


Рис. 1. Цифровые изображения полученных рентгеновских проекций: а — *Juglans regia* L.; б — *Prunus amygdalus* Batsch
 Fig. 1. Digital images of the resulting X-ray projections: a — *Juglans regia* L.; б — *Prunus amygdalus* Batsch

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных цифровых рентгенографических изображений исследуемых образцов грецкого ореха и миндаля проводили в 2 этапа:

1 этап. Интегральная оценка цифровых рентгенографических изображений исследуемых объектов включала выделение области интереса, выделение рентген-образа объекта по пороговой яркости, расчет значений параметров полученных изображений.

2 этап. Фазовый анализ цифровых рентгенографических изображений исследуемых объектов заключался в выделении областей, соответствующих пустотам и ядру орехов [15].

На этапе интегральной обработки цифровых рентгенографических изображений рассчитывали среднюю яркость рентген-проекции (E , ед. яркости) и площадь рентген-проекции (S , см²).

В процессе этапа фазового анализа устанавливали долю площади пустот и долю суммарной площади ядра

со скорлупой от общей площади рентген-проекции ($S_{пуст}/S$, % и $S_{я+с}/S$, %).

В табл. 1 и 2 приведены параметры полученных цифровых рентгеновских изображений исследуемых образцов грецкого ореха и миндаля – средняя яркость рентген-проекции (E , ед. яркости), площадь рентген-проекции (S , см²), доля суммарной площади ядра и скорлупы ($S_{я+с}/S$, %)

Таблица 2

Параметры рентгенографических цифровых изображений образцов миндаля

Table 2

Parameters of radiographic digital images of almond samples

№	Средняя яркость рентген-проекции (E , ед. яркости)	Площадь рентген-проекции (S , см ²)	$\frac{S_{я+с}}{S}$, %	$\frac{S_{пуст}}{S}$, %
1	121	4	76	24
2	94	5	71	29
3	104	4	73	27
4	130	4	81	19
5	113	4	76	24
6	103	5	74	26
7	104	5	73	27
8	129	4	88	12
9	87	4	67	33
10	129	4	82	18
11	95	5	73	27
12	106	5	74	26
13	155	6	93	7
14	95	4	77	23
15	100	5	74	26
16	99	4	70	30
17	119	4	74	26
18	120	4	78	22
19	140	5	88	12
20	126	5	82	18
21	113	4	72	28
22	102	4	89	11
23	112	4	77	23
24	109	4	76	24
25	104	5	75	25
26	134	5	81	19
27	113	4	73	27
28	88	5	80	20
29	148	6	95	5
30	113	4	66	34

Таблица 1

Параметры рентгенографических цифровых изображений образцов грецкого ореха

Table 1

Parameters of radiographic digital images of walnut samples

№	Средняя яркость рентген-проекции (E , ед. яркости)	Площадь рентген-проекции (S , см ²)	$\frac{S_{я+с}}{S}$, %	$\frac{S_{пуст}}{S}$, %
1	135	10	74	26
2	153	10	87	13
3	156	10	84	16
4	144	10	79	21
5	118	8	74	26
6	111	9	74	26
7	147	10	83	17
8	136	11	74	26
9	144	10	83	17
10	146	10	79	21
11	133	10	75	25
12	102	8	73	27
13	146	10	80	20
14	80	7	60	40
15	148	11	81	19
16	148	10	78	22
17	154	10	86	14
18	153	11	86	14

и площади выявленных пустот, ($S_{пуст}/S, \%$) от общей площади рентген-проекции.

Согласно действующим нормативам, к некондиционным — недостаточно развившимся, усохшим или сморщенным — образцам орехов относят образцы с ядрами, имеющими участки усыхания или отвердения, суммарная площадь которых составляет более 25 % от площади ядра. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что количество некондиционных образцов в исследуемых лабораторных пробах составило 6 из 18 (грецкий орех) и 13 из 30 (орех миндаля).

Масса цельного ореха и масса ядра являются показателями качества орехов культурных сортов. В результате хранения орехов в ненадлежащих условиях ядро подвергается процессу дегидратации, в результате чего сморщивается и усыхает [1, 2]. В партии могут встречаться пустые орехи, ядра которых не сформировались. Орехи с подобными дефектами могут быть выявлены путем взвешивания, поскольку они отличаются пониженной массой.

На рис. 2 и 3 приведены диаграммы корреляции массы и параметров рентгенографических изображений исследуемых образцов грецкого ореха и миндаля. Значения полученных коэффициентов корреляции приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции массы и рентгенографических параметров образцов грецкого ореха и миндаля

Table 3

Correlation coefficients of mass and radiographic parameters for walnut and almond samples

X	Y	R_{XY}	
		Грецкий орех	Миндаль
$m, \text{ г}$	$E, \text{ ед. яркости}$	0,94	0,64
$m, \text{ г}$	$S, \text{ см}^2$	0,90	0,61
$m, \text{ г}$	$S_{я+с}/S, \%$	0,78	0,56

Полученные значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о высокой корреляции массы и параметров рентгеновских изображений E и S для грецкого ореха. Умеренная корреляция параметров E ($R_{XY}=0,64$) и S ($R_{XY}=0,61$) выявлена для орехов миндаля.

Корреляция массы орехов и доли суммарной площади ядра и скорлупы от общей площади рентген-проекции, $S_{я+с}/S$ менее выражена, что можно объяснить наложением погрешности фазового анализа, в результате которого получены значения $S_{я+с}/S$. Определение средней яркости рентген-проекции E и площади рент-

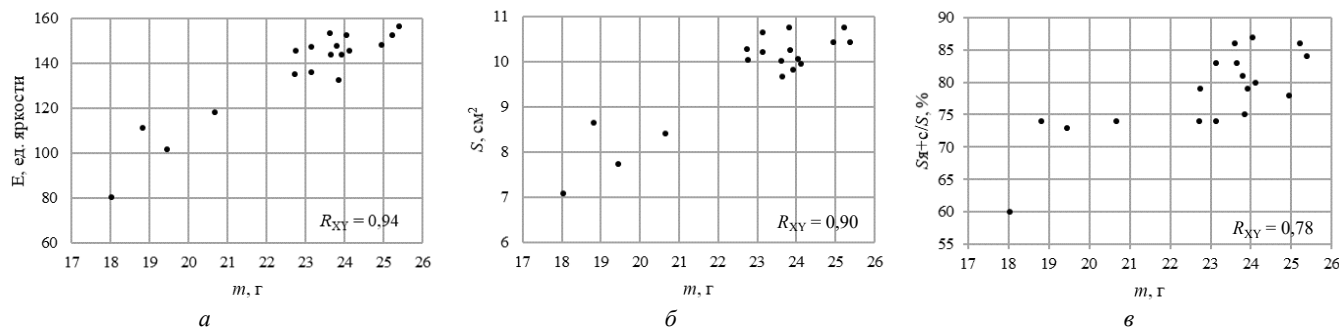


Рис. 2. Поле корреляции массы образцов грецкого ореха и параметров цифровых рентгенографических изображений: а — средняя яркость рентген-проекции; б — площадь рентген-проекции; в — доля суммарной площади ядра со скорлупой от общей площади рентген-проекции

Fig. 2. Field of correlation between the mass of walnut samples and the parameters of digital radiographic images: а — average brightness of X-ray projection; б — X-ray projection area; в — proportion of the total area of the kernel with shell from the total area X-ray projections

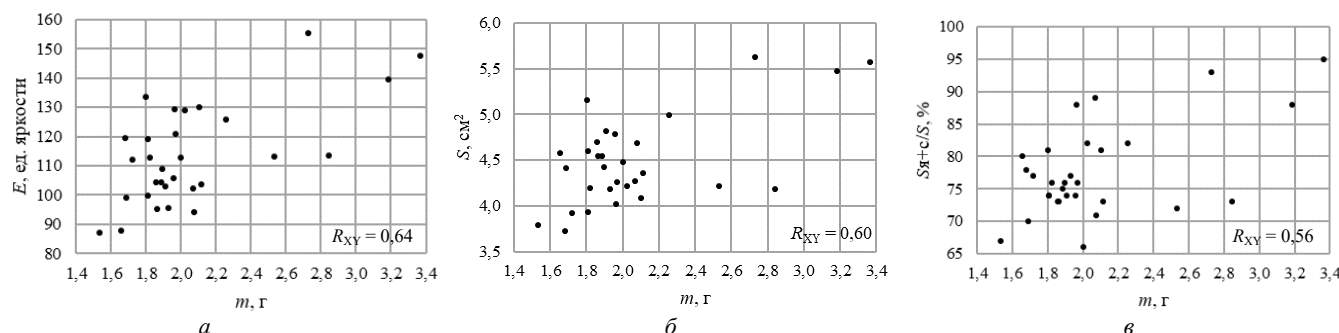


Рис. 3. Корреляция массы образцов миндаля и параметров цифровых рентгенографических изображений: а — средняя яркость рентген-проекции; б — площадь рентген-проекции; в — доля суммарной площади ядра со скорлупой от общей площади рентген-проекции

Fig. 3. Correlation of the mass of almond samples and the parameters of digital radiographic images: а — average brightness of X-ray projection; б — X-ray projection area; в — proportion of the total area of the kernel with shell from the total area X-ray projections

ген-проекции S проводится в автоматическом режиме и не требует дополнительных операций.

Более высокие коэффициенты корреляции массы и параметров рентгеновской проекции грецких орехов обусловлены более высокой контрастностью изображений грецкого ореха относительно рентгенограмм миндаля, поэтому для повышения корреляции параметров рентгенографических изображений миндаля необходимо использовать рентгенозащитную камеру с более высокой разрешающей способностью.

Заключение

Перспективным направлением поиска неразрушающих методов контроля качества сельскохозяйственной продукции является изучение возможности выявления скрытых (внутренних) дефектов орехов культурных сортов путем применения высокотехнологичных методов спектрального анализа, в том числе, метода микрофокусной рентгенографии, который позволяет выявить дефекты ядер грецкого ореха и ореха миндаля благодаря визуализации внутренней структуры орехов.

Помимо возможности визуализации внутренней структуры орехов с помощью полученных цифровых рентгенографических изображений можно рассчитать параметры яркости рентген-проекции и площадь рентген-проекции, а также вычислить долю суммарной площади ядра со скорлупой от общей площади рентген-проекции.

Изучена корреляционная взаимосвязь параметров рентгеновских проекций орехов грецкого и миндаля. Установлена высокая корреляция массы грецких орехов и параметров их рентгеновских проекций, которая обусловлена высокой контрастностью изображений грецкого ореха относительно рентгенограмм миндаля, что подтверждается значениями коэффициентов корреляции. Для повышения корреляции параметров рентгенографических изображений миндаля рекомендуется использовать рентгенозащитную камеру с более высокой разрешающей способностью.

Микрофокусная рентгенография является эффективным методом неразрушающего контроля орехов культурных сортов, поскольку позволяет визуально провести дефектный анализ, а также диагностику дефектных образцов по рентгенографическим параметрам их изображений.

Литература

1. Микрофокусная рентгенография: результаты исследований Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, В. Б. Бессонов, Ю. Н. Потрахов // Территория NDT. 2016. № 3. С. 54–57.
2. Этлеш С. Методы анализа пищевых продуктов. Определение компонентов и пищевых добавок. Пер. с англ. СПб.: Профессия, 2016. 564 с.
3. Применение инструментальных методов анализа качества семян овощных культур / Ф. Б. Мусаев, М. С. Антошкина, Н. Н. Потрахов, А. В. Гончаров // Растениеводство и луговое хозяйство: сборник статей Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 18–19 октября 2020 года. М.: ЭИПиСиПабблишинг, 2020. С. 723–726.
4. Rajabi-Sarkhani M., Abbaspour-Gilandeh Y., Moeinfar A., Tahmasebi M., Martinez M., Hernandez Hernandez M., Hernandez Hernandez J. L. Identifying Optimal Wavelengths from Near Infrared Spectroscopy Using Meta-heuristic Algorithms to Assess Peanut Seed Viability. // *Agronomy*. 2023. 13 (12):2939. DOI: 10.20944/preprints202311.0733.v1
5. Hacisalihoglu G., Armstrong P. Crop Seed Phenomics: Focus on non-destructive functional trait phenotyping methods and applications. // *Plants*. 2023. 12 (5):1177. DOI: 10.3390/plants12051177
6. Shuangfeng Y., Shuheng Zh., Kun Y., Kai W., Hanguo Z., Jia Zh., Peisheng M., Xu H., Manli L. Rapid non-destructive testing of smooth brome grass (*Bromus inermis*) seed vigour using multispectral imaging. // *Grass Research*. 2023. 3 (1):12. DOI: 10.48130/GR-2023-0012
7. Thomas S., Kuska M. T., Bohnenkamp D., Brugger A., Alisaac E., Wahabzada M. Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: A technical perspective. // *J. Plant Dis. Prot.*, 2017. 125 (3), pp. 5–20. DOI: 10.1007/s41348-017-0124-6
8. Fan Y., An T., Wang Q., Yang G., Huang W., Wang Z., Zhao C., Tian X. Non-destructive detection of single-seed viability

References

1. Microfocus radiography: research results of the St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov / N. N. Potrakhov, A. Y. Gryaznov, K. K. Zhamova, V. B. Bessonov, Yu. N. Potrakhov. *Territory NDT*. 2016. No. 3. pp. 54–57. (in Russian)
2. Etlesh S. Methods of food analysis. Determination of components and food additives. St. Petersburg: Profession, 2016. 564 p. (in Russian)
3. Application of instrumental methods for analyzing the quality of vegetable seeds / F. B. Musaev, M. S. Antoshkina, N. N. Potrakhov, A. V. Goncharov. *Crop production and meadow farming: collection of articles of the All-Russian scientific conference with international participation, Moscow, October 18–19, 2020*. Moscow: EiPiSiPublishing, 2020. pp. 723–726. (in Russian)
4. Rajabi-Sarkhani M., Abbaspour-Gilandeh Y., Moeinfar A., Tahmasebi M., Martinez M., Hernandez Hernandez M., Hernandez Hernandez J. L. Identifying Optimal Wavelengths from Near Infrared Spectroscopy Using Meta-heuristic Algorithms to Assess Peanut Seed Viability. *Agronomy*. 2023. 13 (12):2939. DOI: 10.20944/preprints202311.0733.v1
5. Hacisalihoglu G., Armstrong P. Crop Seed Phenomics: Focus on non-destructive functional trait phenotyping methods and applications. *Plants*. 2023. 12 (5):1177. DOI: 10.3390/plants12051177
6. Shuangfeng Y., Shuheng Zh., Kun Y., Kai W., Hanguo Z., Jia Zh., Peisheng M., Xu H., Manli L. Rapid non-destructive testing of smooth brome grass (*Bromus inermis*) seed vigour using multispectral imaging. *Grass Research*. 2023. 3 (1):12. DOI: 10.48130/GR-2023-0012
7. Thomas S., Kuska M. T., Bohnenkamp D., Brugger A., Alisaac E., Wahabzada M. Benefits of hyperspectral imaging for plant disease detection and plant protection: A technical perspective. *J. Plant Dis. Prot.*, 2017. 125 (3), pp. 5–20. DOI: 10.1007/s41348-017-0124-6

- in maize using hyperspectral imaging technology and multi-scale 3D convolutional neural network. // *Frontiers in Plant Science*, 2023. Vol. 14, pp. 1–15. DOI: 10.3389/fpls.2023.1248598
9. Nadimi M., Paliwal J. Optical Techniques for Automated Evaluation of Seed Damage. 15th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy in Agriculture. 31 January 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-51579-8_13
 10. Claussen J., Wolff A., Rehak M. et al. Non-destructive seed phenotyping and time resolved germination testing using X-ray. *ESS Open Archive*. October 30, 2023. DOI: 10.22541/essoar.169868453.35189435/v1
 11. Рентгенографический метод оценки качества семян сахарной свеклы / О. А. Подвигина, Н. Н. Потрахов, Е. Н. Староверов, Ю. Н. Потрахов // *Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век*. 2021. Т. 13. № 2. С. 51–65. DOI: 10.18127/j22250980-202102-06
 12. Отечественные рентгеновские установки для неразрушающего контроля семейства ПРДУ / Н. Н. Потрахов, В. Б. Бессонов, К. К. Гук и др. // *Интеллектуальный пункт пропуска в России и мире: компетентностный подход к созданию: Сборник докладов Международной практической конференции, Санкт-Петербург, 16–17 февраля 2023 года*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2023. С. 12–15.
 13. Исследование структурной целостности семян ореха грецкого (*Juglans regia* L.) селекции Никитского ботанического сада методом микрофокусной рентгенографии и компьютерного анализа изображений / Ю. Г. Базарнова, Т. А. Кузнецова, Н. С. Прияткин и др. // *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2020. № 84. С. 72–78.
 14. Программное обеспечение для обработки и анализа цифровых рентгеновских изображений семян / Н. С. Прияткин, П. А. Щукина, Л. Е. Колесников // *Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург — Пушкин, 25–27 мая 2022 года*. СПб.: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2022. С. 60–62. DOI: 10.21515/1999-1703-84-72-78
 15. Интегральная оценка параметров цифровых рентгеновских изображений плодов *Amygdalus communis* L. для контроля качества семенного материала / А. Д. Севастьянова, С. Ю. Хохлов, Н. С. Прияткин, Ю. Г. Базарнова // *Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства: Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2022 года*. СПб.: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2022. С. 391–397.
 8. Fan Y., An T., Wang Q., Yang G., Huang W., Wang Z., Zhao C., Tian X. Non-destructive detection of single-seed viability in maize using hyperspectral imaging technology and multi-scale 3D convolutional neural network. *Frontiers in Plant Science*, 2023. Vol. 14, pp. 1–15. DOI: 10.3389/fpls.2023.1248598
 9. Nadimi M., Paliwal J. Optical Techniques for Automated Evaluation of Seed Damage. 15th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy in Agriculture. 31 January 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-51579-8_13
 10. Claussen J., Wolff A., Rehak M. et al. Non-destructive seed phenotyping and time resolved germination testing using X-ray. *ESS Open Archive*. October 30, 2023. DOI: 10.22541/essoar.169868453.35189435/v1
 11. Radiographic method for assessing the quality of sugar beet seeds / О. А. Подвигина, Н. Н. Потрахов, Е. Н. Староверов, Ю. Н. Потрахов. *Nanotechnology: development, application — XXI century*. 2021. Vol. 13. No. 2. pp. 51–65. DOI: 10.18127/j22250980-202102-06. (in Russian)
 12. Domestic X-ray installations for non-destructive testing of the PRUDU family / N. N. Potrakhov, V. B. Bessonov, K. K. Guk, etc. Intellectual checkpoint in Russia and the world: a competence-based approach to creation: A collection of reports of the International Practical Conference, St. Petersburg, February 16–17, 2023. St. Petersburg: St. Petersburg State Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin), 2023. pp. 12–15. (in Russian)
 13. Investigation of the structural integrity of walnut seeds (*Juglans regia* L.) of the Nikitsky Botanical Garden selection by microfocus radiography and computer image analysis / Yu. G. Bazarnova, T. A. Kuznetsova, N. S. Pleasant and others. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2020. No. 84. pp. 72–78. (in Russian)
 14. Software for processing and analyzing digital X-ray images of seeds / N. S. Pleasant, P. A. Shchukina, L. E. Kolesnikov. *Scientific support for the development of agriculture in the context of import substitution: a collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference, St. Petersburg — Pushkin, May 25–27, 2022*. St. Petersburg.: St. Petersburg State Agrarian University, 2022. pp. 60–62. DOI: 10.21515/1999-1703-84-72-78 (in Russian)
 15. Integral estimation of parameters of digital X-ray images of fruits of *Amygdalus communis* L. for quality control of seed material / A. D. Sevastyanova, C. Y. Khokhlov, N. S. Pleasant, Yu. G. Bazarnova. *Agrophysical Institute: 90 years in the service of agriculture and crop production: Proceedings of the international scientific conference, St. Petersburg, April 14–15, 2022*. St. Petersburg: Agrophysical Research Institute, 2022. pp. 391–397. (in Russian)

Сведения об авторах

Севастьянова Анна Дмитриевна

Аспирант Высшей школы биотехнологий и пищевых производств Института биомедицинских систем и биотехнологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 48–50, anna-julija@rambler.ru

Базарнова Юлия Генриховна

Д. т. н., профессор, директор Высшей школы биотехнологий и пищевых производств Института биомедицинских систем и биотехнологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 48–50, j.bazarnowa2012@yandex.ru

Прияткин Николай Сергеевич

К. т. н., зав. сектором, с. н. с. сектора биофизики растений, Агрофизический научно-исследовательский институт, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, prini@mail.ru

Information about authors

Sevastyanova Anna D.

Graduate student of the Graduate School of Biotechnology and Food Science of Institute of Biomedical Systems and Biotechnologies of Peter the Great Saint-Petersburg University, Russia, 194021, Saint-Petersburg, Novorossiyskaya str., 48–50, anna-julija@rambler.ru

Bazarnova Yulia G.

D. Sc., Professor of the Graduate School of Biotechnology and Food Science of Institute of Biomedical Systems and Biotechnologies of Peter the Great Saint-Petersburg University, Russia, 194021, Saint-Petersburg, Novorossiyskaya str., 48–50, j.bazarnowa2012@yandex.ru

Pryatkin Nikolay S.

Ph. D., Head sector, senior researcher of plant biophysics sector of Agrophysical Research Institute, Russia, 195220, Saint-Petersburg, Grazhdanskiy pr., 14, prini@mail.ru



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



АГРОРУСЬ

33 международная агропромышленная выставка-ярмарка **АГРОРУСЬ-2024**

Выставка «АГРОРУСЬ»

28 – 30 августа 2024 г.

Ярмарка региональных продуктов «АГРОРУСЬ»

28 августа – 8 сентября 2024 г.

Международная агропромышленная выставка «Агрорусь» – одно из крупнейших специализированных мероприятий СЗФО в сфере АПК. Выставка входит в число приоритетных проектов Министерства сельского хозяйства Российской Федерации и традиционно проводится в конгрессно-выставочном центре «Экспофорум» в Санкт-Петербурге.

Актуальные темы выставки «АГРОРУСЬ-2024»:

- оборудование для перерабатывающей промышленности (в т. ч. для малых форм хозяйствования АПК);
- зоотехния: питание (комбикорма, кормовые добавки), разведение, содержание (ветеринария, средства по уходу);
- растениеводство: селекция, удобрения, средства защиты растений;
- IT-решения в сфере АПК;
- услуги по упаковке, хранению, транспортировке, утилизации.

Тематические зоны ярмарки:

- ✓ Мед.
- ✓ Грибы и ягоды.
- ✓ Овощи и фрукты.
- ✓ Мясо. Рыба.
- ✓ Товары для сада.

<http://agrorus.expoforum.ru/>

Организатор выставки-ярмарки:

Министерство сельского хозяйства РФ,
при официальной поддержке Правительств
Санкт-Петербурга и Ленинградской
области.

Место проведения:

КВЦ «Экспофорум»
Петербургское шоссе 64, корпус 1