Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий УДК 681.2 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-6-103-112

# Исследование структуры зерна пшеницы методом цифровой рентгенографии

Р. Ю. Антонов<sup>⊠</sup>

Научная статья

ООО "Экан", Санкт-Петербург, Россия

<sup>™</sup>roman.ekan@yandex.ru

#### Аннотация

**Введение.** Анализ качества зерна пшеницы инструментальными методами является актуальной задачей ввиду ежегодного увеличения объемов его производства и экспорта. Метод цифровой рентгенографии перспективен для исследования внутренней структуры зерна пшеницы, так как является неразрушающим и совместно с другими методами дает возможность наиболее полно описать параметры зерна.

**Цель работы.** Определить возможности цифровой рентгенографии для исследования структуры зерна пшеницы. **Материалы и методы.** Для получения цифровых рентгеновских изображений использована многофункциональная передвижная рентгенодиагностическая установка производства ЗАО "ЭЛТЕХ-Мед". Напряжение на трубке установки – 9 кВ. В статье использованы образцы зерна твердой пшеницы разных сортов. Для автоматизации операций по обработке изображений зерна применялись разработанные скрипты на языке Руthon с использованием библиотек numpy, opency.

**Результаты.** Исследовано ослабление рентгеновского излучения материалом зерна. Показано, что оболочка зерна обладает большим коэффициентом ослабления, чем эндосперм. Найдено обоснование явления, которое заключается в большей концентрации калия и фосфора в оболочке пшеницы. Полученное расчетным путем отношение коэффициентов ослабления оболочки к эндосперму составило 1.27, экспериментальным – 1.36. Показано влияние геометрической формы зерна пшеницы на формирование рентгеновского изображения зерна. Приведен способ описания геометрической формы зерна с использованием кривых второго порядка. Построена математическая модель прохождения рентгеновского излучения в зерне пшеницы с учетом его сложной формы и неоднородного распределения макроэлементов в нем. Модель позволяет неразрушающим методом оценить коэффициенты ослабления эндосперма и оболочки зерна.

Заключение. Метод цифровой рентгенографии для исследования пшеницы рационально применять в научных исследованиях и задачах селекции. Предложенную модель прохождения рентгеновского излучения в зерне пшеницы можно использовать для численного определения некоторых показателей качества зерна.

Ключевые слова: цифровая рентгенография, микрофокусная рентгенография, пшеница, зерно, семена

Для цитирования: Антонов Р. Ю. Исследование структуры зерна пшеницы методом цифровой рентгенографии // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 103–112. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-103-112

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.10.2023; принята к публикации после рецензирования 20.11.2023; опубликована онлайн 28.12.2023



Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product

Original article

# Study of Wheat Grain Structure by Digital Radiography

Roman Yu. Antonov $^{\square}$ 

"Ekan" Ltd, St Petersburg, Russia

<sup>™</sup>roman.ekan@yandex.ru

#### Abstract

*Introduction.* Analysis of the quality of wheat grain using instrumental methods is an important task due to the permanent growth in annual wheat production and export. Digital radiography is a promising method for studying the internal structure of wheat grain. Along with other methods, digital radiography allows non-destructive testing and comprehensive description of grain parameters.

Aim. To determine the capabilities of digital radiography for studying the structure of wheat grain.

*Materials and methods.* Digital X-ray images were obtained using a multifunctional mobile x-ray diagnostic unit produced by JSC "ELTECH-Med" was used with the installation tube voltage of 9 kV. Durum wheat grain samples of different varieties were used. Operations for processing grain images were automated using the scripts developed in Python using the numpy and opencv libraries.

**Results.** The attenuation of X-ray radiation by grain material was studied. Wheat bran was found to exhibit a greater attenuation coefficient than the endosperm, assumably due to the higher concentration of potassium and phosphorus in the wheat outer layer. The calculated ratio of the attenuation coefficients of the bran to the endosperm was 1.27, compared to the experimentally obtained value of 1.36. The influence of the geometric shape of wheat grain on the formation of its X-ray image was determined. A method for describing the geometric shape of wheat grain using second-order curves was presented. A mathematical model for the transmission of X-ray radiation in wheat grain was constructed, taking into account its complex shape and the heterogeneous distribution of macroelements therein. This model allows estimation of the attenuation coefficients of the grain endosperm and outer layer using a non-destructive method.

*Conclusion.* Digital radiography is an effective method for studying wheat when carrying out research and breeding tasks. The proposed model for the transmission of X-ray radiation in wheat grain can be used to numerically determine some indicators of grain quality.

Keywords: digital radiography, microfocus radiography, wheat, grain, seeds

**For citation:** Antonov R. Yu. Study of Wheat Grain Structure by Digital Radiography. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 6, pp. 103–112. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-103-112

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 13.10.2023; accepted 20.11.2023; published online 28.12.2023

Введение. Актуальность статьи обусловлена тем, что по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН в 2021 г. мировое производство пшеницы составило 771 млн т и имеет тенденцию к увеличению [1–3]. При росте производства и торговли в условиях ограниченных ресурсов (территориальных, энергетических и т. д.) особенно важными становятся задачи выведения новых сортов, селекции пшеницы для эффективного использования имеющихся земель, повышения ее урожайности [4, 5]. Одной из задач, возникающих в ходе этого процесса, является максимально полное исследование семян пшеницы, выявление всех характеристик, определяющих семенные и технологические показатели качества зерна [6]. Один из перспективных инструментальных методов исследования зерна – цифровая рентгенография [7, 8]. Особенно высокой информативностью отличаются снимки, сформированные с использованием микрофокусных источников излучения [9, 10], поскольку объекты на них могут быть сильно увеличены.

В отличие от традиционной рентгенографии цифровая дает возможность получения цифровых изображений, которые могут храниться, тиражироваться и обрабатываться с использованием компьютерных технологий, т. е. такие снимки позволяют использовать всю доступную на данный момент информационную инфраструктуру

.....

Исследование структуры зерна пшеницы методом цифровой рентгенографии Study of Wheat Grain Structure by Digital Radiography

Hameanana	Соотношение,	Белок,	Углеводы, %					Липиды,	Зольность,
паименование	%	%	Всего	Крахмал	Caxap	Клетчатка	Пентозаны	%	%
Целое зерно	100.00	16.06	78.25	63.07	4.32	2.76	8.10	2.24	2.18
Эндосперм	81.60	12.91	85.23	78.82	3.54	0.15	2.72	0.66	0.45
Зародыш	3.24	41.30	37.32	-	25.12	2.46	9.74	15.04	0.32
Оболочки с алейроновым слоем	15.48	28.75	57.03	_	4.18	16.20	36.65	7.78	10.51

*Табл. 1.* Химический состав зерна пшеницы *Tab. 1.* Chemical composition of wheat grain

[11]. Кроме того, рентгенография – неразрушающий метод анализа, что особенно важно при исследовании семенного материала. Проанализированные семена затем могут быть исследованы другими методами, в результате чего получается массив разнообразных, но связанных данных. Метод цифровой рентгенографии сейчас стандартизирован (ГОСТ Р 59603-2021) и успешно применяется для решения задачи поиска скрытых дефектов семенного материала [12]. Однако перспективной является идея восстановления внутренней структуры зерна пшеницы по его рентгеновскому снимку, так как реализация такого способа анализа позволит оценивать неразрушающим методом ряд важных параметров зерна (например, стекловидность, плотность и т. д.). Таким образом, цель статьи – исследование структуры зерна пшеницы методом цифровой рентгенографии.

В рамках поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Исследовать взаимодействие рентгеновского излучения с отдельными частями зерна пшеницы.

2. Построить математическую модель данного процесса.

Формирование рентгеновского изображения зерна с учетом распределения химических элементов, входящих в него. Известно, что интенсивность рентгеновского излучения экспоненциально убывает в зависимости от пройденного им пути в поглощающем слое:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

где  $I_0$  – начальная интенсивность рентгеновского излучения;  $\mu$  – коэффициент, в грубом приближении пропорциональный  $Z^3\lambda^3$ ; Z – атомный номер элемента;  $\lambda$  – длина волны; d – толщина слоя.

Химический состав зерна пшеницы [13] приведен в табл. 1.

Исходя из данных табл. 1, можно заключить, что зерно пшеницы состоит из органических соединений, включающих в себя углерод, кислород, водород и азот. Содержание прочих элементов существенно меньше. Атомные номера углерода, кислорода и азота близки (Z = 6, 8, 7 соответственно) и существенно больше водорода (Z = 1), поэтому, в основном, именно эти элементы определяют коэффициент ослабления рентгеновского излучения зерном. Для первоначального исследования использовалось излучение с наибольшей длиной волны, так как это позволяет получить наиболее контрастное изображение.

В описываемом исследовании использована многофункциональная передвижная рентгенодиагностическая установка производства ЗАО "ЭЛ-ТЕХ-Мед" [14]. Для проведения экспериментов было установлено минимально возможное напряжение на рентгеновской трубке (9 кВ). Рентгенооптическая схема съемки (рис. 1) включает в себя: 1 – источник рентгеновского излучения;



Исследование структуры зерна пшеницы методом цифровой рентгенографии Study of Wheat Grain Structure by Digital Radiography 2 – объект исследования (зерно, показано в разрезе);
 3 – оболочка зерна;
 4 – внутренняя часть зерна;
 5 – пучок рентгеновского излучения;
 6 – приемник рентгеновского излучения.

Для первичной оценки изображений была выполнена съемка с максимальным проекционным увеличением (примерно в 40 раз). Увеличение (m) определяется соотношением расстояний источник – объект ( $f_1$ ) и объект – приемник ( $f_2$ ):

$$m = f_2 / f_1 \approx 40.$$

Для дальнейших рассуждений необходимо описать получаемые изображения. Здесь и далее изображения зерна являются негативными (обратными), на которых более плотные структуры имеют более светлые тона, менее плотные ткани и воздух - темные тона. Для исследования используются цифровые изображения, получаемые с помощью рентгенографии на запоминающих люминофорах. Основными ее элементами являются запоминающие люминофорные пластины, считывающее устройство (сканер) и компьютер. На пластине во время экспозиции формируется скрытое изображение, аналогично скрытому изображению на рентгеновской пленке при традиционной аналоговой рентгенографии. После экспонирования кассета с люминофорной пластиной помещается в считывающее устройство, далее пластина автоматически извлекается из кассеты, скрытое изображение считывается лазером и оцифровывается. Это позволяет в дальнейшем его обрабатывать, просматривать и распечатывать с использованием компьютера. Люминофорные пластины могут использоваться многократно.

После оцифровки получается монохромное изображение с 8-битной шкалой яркости  $(2^8 = 256$  ступеней). Таким образом, область на изображении, соответствующая полностью прозрачному для рентгеновского излучения объекту, будет иметь яркость 0 (черный цвет), а область, полностью поглощающая рентгеновское излучение, будет иметь яркость 255 (белый цвет).

Если рассмотреть изображение зерна, полученное в данных условиях, то можно заключить, что оболочка зерна пшеницы обладает более высоким коэффициентом ослабления, чем внутренняя часть зерна. Об этом свидетельствуют локальные максимумы яркости



*Puc.* 2. Пример изображения с увеличением в 40 раз *Fig.* 2. Example image at 40x magnification

вблизи внешнего контура зерна, а также в области бороздки. Пример такого изображения с максимальным увеличением (m = 40 раз) приведен на рис. 2.

Согласно [13, 15] оболочки и внутренняя часть пшеницы (эндосперм) имеют разный элементный состав. В рамках описываемого исследования наибольшее значение имеет распределение элементов с большими атомными номерами. В первую очередь, это железо (Z = 26), цинк (Z = 30), марганец (Z = 25), магний (Z = 12), калий (Z = 19), фосфор (Z = 15), кальций (Z = 20). На рис. 3 [15] показано распределение химических элементов в зерне пшеницы. Более светлый оттенок соответствует большей концентрации элемента. Видно, что основная часть представленных элементов расположена в оболочке и в алейроновом слое, что обусловливает большее ослабление рентгеновского излучения этими частями зерна.

Разница интенсивностей рентгеновского излучения, прошедшего через одинаковые (по толщине) слои оболочки и эндосперма зерна, определяется выражением

$$\Delta I = I_{\text{обол}} - I_{\text{энд}} =$$
$$= I_0 e^{-\mu_{\text{обол}}d} - I_0 e^{-\mu_{\text{энд}}d},$$

где  $I_{0000}$  – интенсивность рентгеновского излучения, прошедшего через оболочку;  $I_{3HA}$  – интенсивность рентгеновского излучения, прошедшего через эндосперм;  $\mu_{0000}$  – коэффициент ослабления оболочкой;  $\mu_{3HA}$  – коэф-



*Puc. 3.* Карты концентраций элементов в поперечном разрезе пшеницы *Fig. 3.* Elemental maps of a cross section of a wheat sample

фициент ослабления эндоспермом; *d* – толщина ослабляющего слоя (одинакова для оболочки и эндосперма).

Так как исследуемые вещества имеют сложный состав, удобно перейти к использованию массового коэффициента ослабления. Зависимость интенсивности от массового коэффициента ослабления выражается в виде

$$I = I_0 e^{-m\frac{\mu}{\rho}},$$

где *m* – масса ослабляющего вещества; μ/ρ – массовый коэффициент ослабления; ρ – плотность ослабляющего вещества.

Для вещества, состоящего из нескольких химических элементов, можно записать выражение

$$I = I_0 e^{-m \sum \frac{\mu_i}{\rho_i} p_i}$$

где  $\mu_i / \rho_i$  – массовый коэффициент ослабления *i*-го элемента;  $p_i$  – массовая доля *i*-го элемента в общей массе соединения (причем  $\sum p_i = 1$ ).

Для упрощенного расчета при постоянном спектре излучения рентгеновского источника будем использовать величину  $Z^3$  как оценку коэффициента ослаабления. Такое допущение принято, так как в данном теоретическом расчете интерес представляет соотношение коэффициентов ослабления, а не их абсолютные значения. Исходные данные для расчета взяты из [13, 15–17] и сведены в табл. 2. В таблицу

*Табл.* 2. Исходные данные для расчета массовых коэффициентов ослабления составляющих зерна *Tab.* 2. Source data for calculating the mass attenuation coefficients of grain components

		-		_	-
Элемент	Содержание в оболочке, мг/кг	Содержание в эндосперме, мг/кг	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Ζ	$\mu \sim Z^3$ , m <sup>-1</sup>
Fe	168	11	7874	26	17 576
Zn	91	8	7130	30	27 000
Mn	127	4	7300	25	15 625
Mg	5350	191	1740	12	1728
K	15 840	1500	860	19	6859
Р	15 150	1100	1820	15	3375
Ca	878	178	1540	20	8000
Оболочка <sub>орг</sub>	994 264	0	1100	8	512
Эндосперморг	0	999 786	1350	8	512

Исследование структуры зерна пшеницы методом цифровой рентгенографии Study of Wheat Grain Structure by Digital Radiography

.....

*Табл. 3.* Массовые коэффициенты ослабления составляющих зерна  $\mu/\rho$ ,  $M^2/кг$ 

Fe	Zn	Mn	Mg	K	Р	Ca	Оболочка <sub>орг</sub>	Эндосперморг
2.23	3.79	2.14	0.99	7.98	1.85	5.19	0.47	0.38

*Tab. 3.* Mass attenuation coefficients of grain components  $\mu/\rho$ , m<sup>2</sup>/kg

Табл. 4. Вклад элементов в ослабление рентгеновского излучения оболочкой зерна

Tab. 4. Contribution of elements to the attenuation of X-ray radiation by the grain outer layer

Элемент	Массовая доля элемента	Массовый коэффициент ослабления элемента с учетом массовой доли (μ/ρ) p, м <sup>2</sup> /кг
Fe	0.00017	0.00038
Zn	0.00009	0.00034
Mn	0.00013	0.00027
Mg	0.00535	0.00531
K	0.01584	0.12633
Р	0.01515	0.02809
Ca	0.00088	0.00456
Оболочкаорг	0.96240	0.44795
Сумма	1.00000	0.61324

Табл. 5. Вклад элементов в ослабление рентгеновского излучения эндоспермом зерна Tab. 5. Contribution of elements to the attenuation of X-ray radiation by grain endosperm

Элемент	Массовая доля элемента	Массовый коэффициент ослабления элемента с учетом массовой доли (μ/ρ) p, м <sup>2</sup> /кг
Fe	0.00001	0.00002
Zn	0.00001	0.00003
Mn	0.00000	0.00001
Mg	0.00019	0.00019
K	0.00150	0.01196
Р	0.00110	0.00204
Ca	0.00018	0.00092
Эндосперморг	0.99701	0.37812
Сумма	1.00000	0.39331

введены 2 искусственных элемента - оболочкаорг и эндосперморг. Под первым понимается органическая часть оболочки, под вторым - органическая часть эндосперма (т. е. органические вещества без учета отдельно рассматриваемых микроэлементов - Fe, Zn, Mn, Mg и т. д.). Эти органические части содержат в основном углерод (Z = 6), водород (Z = 1), азот (Z = 7), кислород (Z = 8). Для оценочного расчета коэффициента массового ослабления этих частей использован наибольший возможный атомный номер (Z = 8), т. е. принят максимально возможный коэффициент ослабления.

Результаты расчета представлены в табл. 3-5.

Таким образом,  $\mu_{000}/\rho_{000} \approx 0.61 \, \text{m}^2/\text{kr};$  $\mu_{\rm ЭНД} / \rho_{\rm ЭНД} \approx 0.39 \ {\rm m}^2/{\rm kr}$ . Оценка показывает, что 108

калий и фосфор оказывают наибольшее влияние на поглощение рентгеновского излучения и обусловливают различимую на рентгеновском изображении светлую полосу по краю зерна.

Примем плотность оболочек зерна 1100 кг/м<sup>3</sup>, эндосперма 1350 кг/м<sup>3</sup> [13] и вычислим отношение линейных коэффициентов ослабления оболочкой и эндоспермом:

$$\frac{\mu_{\rm ofon}}{\mu_{\rm 3HA}} = \frac{\mu_{\rm ofon}}{\rho_{\rm ofon}} \bigg/ \frac{\mu_{\rm 3HA}}{\rho_{\rm 3HA}} = 1.27,$$

где р<sub>обол</sub> – плотность оболочки; р<sub>энд</sub> – плотность эндосперма.

Таким образом, оценочный расчет показывает, что коэффициент ослабления оболочки в 1.27 раза больше коэффициента ослабления эндосперма.



*Puc. 4.* Схема разрезания зерна (*a*) и примеры разрезанных зерен ( $\delta$ , *в*) *Fig. 4.* Scheme of cutting grain (*a*) and examples of cut grains ( $\delta$ , *в*)



*Рис. 5.* Примеры рентгеновских изображений пластин зерна толщиной 3 мм *Fig. 5.* Examples of X-ray images of 3 mm thick grain plates

Далее для проверки теоретических расчетов

было необходимо получить рентгеновские снимки эндосперма и оболочек. Для этого был подготовлен набор из 10 зерен. Каждое зерно было разрезано поперек в двух местах с интервалом 3 мм (рис. 4, a). Таким способом были получены пластины зерна одинаковой толщины (рис. 4,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ).

Далее были получены рентгеновские изображения каждой такой пластины. Плоскости разрезов располагались перпендикулярно распространению излучения. Пример изображений представлен на рис. 5.

С помощью полученных изображений решалась задача проверки теоретического расчета отношения коэффициентов ослабления оболочкой и эндоспермом. Для автоматизации операций по обработке изображений зерна применялись разработанные скрипты на языке Python с использованием библиотек numpy, opency.

Для практических расчетов за оценку интенсивности *I* рентгеновского излучения, прошедшего через определенную часть зерна, примем яркость позитивного рентгеновского изображения этой части.

Табл. 6. Экспериментально вычисленные коэффициенты ослабления

Tab. 6. Experimentally calculated attenuation coefficients

Номер зерна	$\mu_{\rm 3Hz}$ , ${\rm mm}^{-1}$	$\mu_{ m ofon}$ , мм $^{-1}$
1	0.079	0.107
2	0.073	0.100
3	0.086	0.122
4	0.088	0.116
5	0.074	0.098
6	0.086	0.120
7	0.081	0.111
8	0.100	0.135
9	0.093	0.131
10	0.083	0.109

Анализ вычисленных коэффициентов ослабления, представленных в табл. 6, позволяет сделать 2 вывода. Во-первых, теоретический расчет отношения коэффициентов ослабления оболочкой и эндоспермом выполнен исходя из правильного предположения о том, что оно определяется неравномерностью распределения отдельных элементов в объеме зерна. Разница теоретического (1.27) и практического (1.36) значений может быть обусловлена допущениями расчета и погрешностями подготовки образцов.

Формирование рентгеновского изображения с учетом его формы. Для того чтобы учесть неоднородность структуры зерна, вводится модель, описывающая прохождение рентгеновского излучения последовательно через 3 среды (оболочка – внутренняя часть – оболочка). Интенсивность прошедшего излучения описывается следующим образом:

$$I = I_0 e^{-\mu_{0} \delta_{0} \sigma_{0} - \mu_{3} \mu_{d} d_{3} \mu_{d}},$$

где  $d_{0000}$  – длина пути излучения в оболочке;  $d_{9HI}$  – длина пути излучения в эндосперме.



*Рис.* 6. Геометрическая модель формы разреза зерна *Fig.* 6. Geometric model of grain cut shape

Для учета сложной формы зерна его поперечный разрез описывается двумя кривыми второго порядка. Условимся считать часть зерна с бороздой нижней, а противоположную – верхней. За начало координат по оси *X* принят левый край зерна, по оси *Y* – начало бороздки (рис. 6).

Введем обозначения: R – радиус половины зерна; h – толщина оболочки зерна;  $t_u$  – длина пути рентгеновского излучения в верхней части зерна;  $t_b$  – длина пути рентгеновского излучения в нижней части зерна;  $t = t_u + t_b$  – длина пути рентгеновского излучения в оболочке зерна.

Тогда граница верхней части зерна описывается уравнением

$$y_u(x) = \sqrt{4R^2 - (x - 2R)^2};$$

нижней –

$$y_b(x) = -\sqrt{R^2 - (x - R)^2}$$
.

При прохождении рентгеновского излучения перпендикулярно оси *X* длина пути в верхней оболочке описывается уравнением

1. Crops and livestock products // FAOSTAT. URL: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (дата обращения 02.10.2023)

2. Анализ состояния мирового рынка пшеницы и перспективы России по расширению экспортного потенциала / Д. И. Жиляков, В. Я. Башкатова, Ю. В. Плахутина, О. В. Петрушина, Д. А. Зюкин // Экономические науки. 2020. № 183. С. 38–43. doi: 10.14451/1.183.38

$$t_{u}(x) = \sqrt{h^{2} + h^{2} [y_{u}'(x)]^{2}} = h \sqrt{\frac{4R^{2}}{4Rx - x^{2}}};$$

в нижней –

$$t_b(x) = \sqrt{h^2 + h^2 \left[ y_b'(x) \right]^2} = h_v \sqrt{\frac{R^2}{2Rx - x^2}}.$$

Тогда длина пути во внутренней части находится как

$$d(x) = y_u(x) + [-y_b(x)] - t_u(x) - t_b(x).$$

Таким образом, интенсивность прошедшего рентгеновского излучения выражается следующим образом:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_{\text{OBOJ}}\left[t_u(x) + t_b(x)\right] - \mu_{\text{3HJ}}d(x)}$$

Система таких уравнений, построенная для множества пикселей цифрового изображения зерна, позволяет оценить отдельно  $\mu_{обол}$  и  $\mu_{энд}$ .

**Выводы.** Исследовано взаимодействие рентгеновского излучения с отдельными частями зерна пшеницы. Выявлена зависимость стекловидности пшеницы от показателя ослабления рентгеновского излучения в эндосперме зерна. Выявлено влияние распределения в зерне ряда химических элементов на разницу коэффициентов ослабления оболочкой и эндоспермом зерна.

Построена математическая модель ослабления рентгеновского излучения цельным зерном пшеницы, учитывающая форму и неоднородность зерна. Потенциально модель может быть использована в практических прикладных целях для анализа значимых параметров зерна пшеницы, например стекловидности, щуплости, плотности.

# Список литературы

3. Зимняков В. М. Тенденции производства пшеницы в России // Инновационная техника и технология. 2020. № 2 (23). С. 48–52.

4. Новые сорта – резерв увеличения урожайности и качества зерна озимой пшеницы / Х. А. Малкандуев, Р. И. Шамурзаев, В. А. Филобок, М. В. Кашукоев, А. Х. Малкандуева, И. М. Ханиева // Изв. Кабардино-Балкарского гос. аграрного ун-та им. В. М. Кокова. 2023. № 2 (40). С. 16–24. doi: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-16-24

5. Use of X-ray micro computed tomography imaging to analyze the morphology of wheat grain through its development / T. D. Q. Le, C. Alvarado, C. Girousse, D. Legland, A.-L. Chateigner-Boutin // Plant Methods. 2019. Vol. 15. P. 84-103. doi: 10.1186/s13007-019-0468-y

6. Genetic Mapping Analysis of Bread-Making Quality Traits in Spring Wheat / K. Simons, J. A. Anderson, M. Mergoum, J. D. Faris, D. L. Klindworth, S. S. Xu, C. Sneller, J.-B. Ohm, G. A. Hareland, M. C. Edwards, S. Chao // Crop Science. 2012. Vol. 52, iss. 5. P. 2182-2197. doi: 10.2135/cropsci2012.03.0175

7. Желудков А. Г., Белецкий С. Л., Потрахов Н. Н. Теоретические аспекты автоматизации рентгенографического метода анализа качества семян и товарного зерна злаковых культур // Инновационные технологии производства И хранения материальных ценностей лля государственных нужд: междунар. сб. науч. тр. ФБГУ НИИПХ Росрезерва. М.: Галея Принт, 2014. C. 106–115.

8. Желудков А. Г., Потрахов Н. Н., Белецкий С. Л. Комплексное решение задач автоматизации рентгенографического метола анализа качества семян и зерна злаковых культур // Хлебопродукты. 2016. № 5. С. 58-61.

9. Потрахов Н. Н. Метод и особенности формирования рентгеновского теневого изображения микрофокусными источниками излучения // Вестн. новых мед. технологий. 2007. T. 14, № 3. C. 167–169.

10. Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю. Метод оценки информативности визуализированных дентальных рентгеновских изображений // Мед. техника. 2009. № 1. С. 16–18.

11. Combining computer vision and deep learning to enable ultra-scale aerial phenotyping and precision agriculture: A case study of lettuce production / A. Bauer, A. G. Bostrom, J. Ball, C. Applegate,

T. Cheng, S. Laycock, S. M. Rojas, J. Kirwan, J. Zhou // Horticulture Research. 2019. Vol. 6. P. 70-82. doi: 10.1038/s41438-019-0151-5

12. X-Ray Computer Methods for Studying the Structural Integrity of Seeds and Their Importance in Modern Seed Science / M. V. Arkhipov, N. S. Priyatkin, L. P. Gusakova, N. N. Potrakhov, A. Yu. Gryaznov, V. B. Bessonov, A. V. Obodovskii, N. E. Staroverov // Tech. Phys. 2019. Vol. 64. P. 582-592. doi: 10.1134/S1063784219040030

13. Козьмина Н. П., Гунькин В. А., Суслянок Г.М. Теоретические основы прогрессивных технологий (Биотехнология). Зерноведение (с основами биохимии растений). М.: Колос, 2006. 307 с.

14. Белецкий С. Л., Иванова Е. В., Фешина Т. В. Современные рентгендиагностические комплексы лля экспресс-оценки качества сырья Практические аспекты исследования и мониторинга качества сырья и продуктов питания для обеспечения продовольственной безопасности России: сб. докл. науч.-практ. семинара / ФГУ НИИПХ Росрезерва. М., 2010. С. 78-83.

15. Distribution of Minerals in Wheat Grains (Triticum aestivum) and in Roller Milling Fractions Affected by Pearling / N. D. Brier, S. V. Gomand, E. Donner, D. Paterson, J. A. Delcour, E. Lombi, E. Smolders // J. of Agricultural and Food Chemistry. 2015. Vol. 63, iss. 4. P. 1276–1285. doi: 10.1021/jf5055485

16. Релина Л. И., Вечерская Л. А., Голик О. В. Содержание белка и минералов в зерне некоторых видов редких тетраплоидных пшениц // Вестн. БарГУ. Сер.: Биологические науки. С.-х. 2019. № 7. C. 130-138.

17. Genetic variability and stability of grain magnesium, zinc and iron concentrations in bread wheat / F.-X. Oury, F. Leenhardt, C. Remesy, E. Chanliaud, B. Duperrier, F. Balfourier, G. Charmet // Europ. J. Agronomy. 2006. Vol. 25. P. 177-185. doi: 10.1016/j.eja.2006.04.011

## Информация об авторе

Антонов Роман Юрьевич – специалист по направлению "Компьютерная безопасность" (2015, СПбГЭТУ "ЛЭТИ"), соискатель кафедры электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), начальник конструкторского отдела ООО "Экан". Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – исследование и разработка методов инструментальной оценки пищевой продукции.

Адрес: ООО "Экан", аллея Академика Лихачева, д. 7, стр. 1, Санкт-Петербург, 194223, Россия E-mail: roman.ekan@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0003-0219-9685

## References

1. Crops and Livestock Products. FAOSTAT. Available at: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (accessed 02.10.2023)

2. Zhilyakov D. I., Bashkatova V. Ya., Plakhutina Yu. V., Petrushina O. V., Zyukin D. A. Analysis of the State of the World Wheat Market and Russia's Prospects for

Expanding Export Potential. Economic Sciences. 2020, no. 183, pp. 38-43. doi: 10.14451/1.183.38 (In Russ.)

3. Zimnyakov V. M. Trends in Wheat Production in Russia. Innovative Equipment and Technology. 2020, no. 2 (23), pp. 48-52. (In Russ.)

4. Malkanduev Kh. A., Shamurzaev R. I., Filo-

bok V. A., Kashukoev M. V., Malkandueva A. Kh., Khanieva I. M. New Varieties are a Reserve for Increasing the Yield and Quality of Winter Wheat Grain. News of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokova. 2023, no. 2 (40), pp. 16–24. doi: 10.55196/2411-3492-2023-2-40-16-24 (In Russ.)

5. Le T. D. Q., Alvarado C., Girousse C., Legland D., Chateigner-Boutin A.-L. Use of X-ray Micro Computed Tomography Imaging to Analyze the Morphology of Wheat Grain through Its Development. Plant Methods. 2019, vol. 15, pp. 84–103. doi: 10.1186/s13007-019-0468-y

6. Simons K., Anderson J. A., Mergoum M., Faris J. D., Klindworth D. L., Xu S. S., Sneller C., Ohm J.-B., Hareland G. A., Edwards M. C., Chao S. Genetic Mapping Analysis of Bread-Making Quality Traits in Spring Wheat. Crop Science. 2012, vol. 52, iss. 5, pp. 2182– 2197. doi: 10.2135/cropsci2012.03.0175

7. Zheludkov A. G., Beletsky S. L., Potrahov N. N. Theoretical Aspects of Automation of the Radiographic Method for Analyzing the Quality of Seeds and Commercial Grain of Cereal Crops. Innovative Technologies for the Production and Storage of Material Assets for State Needs: Intern. Sat. scientific tr. FBGU NIIPH Rosrezerva. Moscow, Galeya Print, 2014, pp. 106–115. (In Russ.)

8. Zheludkov A. G., Potrahov N. N., Beletsky S. L. A Comprehensive Solution to the Problems of Automation of the Radiographic Method for Analyzing the Quality of Seeds and Grains of Cereal Crops. Bakery Products. 2016, no. 5, pp. 58–61. (In Russ.)

9. Potrahov N. N. Method and Features of the Formation of Shadow X-Ray Images Using Microfocus Radiation Sources. Bulletin of New Medical Technologies. 2007, vol. 14, no. 3, pp. 167–169. (In Russ.)

10. Potrahov N. N., Gryaznov A. Yu. Method for Assessing the Information Content of Visualized Dental X-Ray Images. Medical Technology, 2009, no. 1, pp. 16–18. (In Russ.)

11. Bauer A., Bostrom A. G., Ball J., Applegate C., Cheng T., Laycock S., Rojas S. M., Kirwan J., Zhou J. Combining Computer Vision and Deep Learning to Enable Ultra-Scale Aerial Phenotyping and Precision Agriculture: a Case Study of Lettuce Production. Horticulture Research. 2019, vol. 6, pp. 70–82. doi: 10.1038/s41438-019-0151-5

12. Arkhipov M. V., Priyatkin N. S., Gusakova L. P., Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Bessonov V. B., Obodovskii A. V., Staroverov N. E. X-Ray Computer Methods for Studying the Structural Integrity of Seeds and Their Importance in Modern Seed Science. Tech. Phys. 2019, vol. 64, pp. 582–592. doi: 10.1134/ S1063784219040030

13. Kozmina N. P., Gunkin V. A., Suslyanok G. M. *Teoreticheskie osnovy progressivnykh tekhnologii (Bio-tekhnologiya). Zernovedenie (s osnovami biokhimii ras-tenii)* [Theoretical Foundations of Progressive Technologies (Biotechnology). Grain Science (with the basics of plant biochemistry)]. Moscow, *Kolos*, 2006, 307 p. (In Russ.)

14. Beletsky S. L., Ivanova E. V., Feshina T. V. Modern X-ray Diagnostic Complexes for Express Assessment of the Quality of Raw Materials. Practical Aspects of Research and Monitoring the Quality of Raw Materials and Food Products to Ensure Food Security in Russia. Moscow, FGU NIIPH Rosrezerva, 2010, pp. 78–83. (In Russ.)

15. Brier N. D., Gomand S. V., Donner E., Paterson D., Delcour J. A., Lombi E., Smolders E. Distribution of Minerals in Wheat Grains (Triticum aestivum) and in Roller Milling Fractions Affected by Pearling. J. of Agricultural and Food Chemistry. 2015, vol. 63, iss. 4, pp. 1276–1285. doi: 10.1021/jf5055485

16. Relina L. I., Vecherskaya L. A., Golik O. V. Content of Protein and Minerals in the Grain of Some Types of Rare Tetraploid Wheat. Bulletin of BarSU. Series: Biological Sciences. Agricultural Sciences. 2019, no. 7, pp. 130– 138. (In Russ.)

17. Oury F.-X., Leenhardt F., Remesy C., Chanliaud E., Duperrier B., Balfourier F., Charmet G. Genetic Variability and Stability of Grain Magnesium, Zinc and Iron Concentrations in Bread Wheat. Europ. J. Agronomy. 2006, vol. 25, pp. 177–185. doi: 10.1016/j.eja.2006.04.011

## Information about the author

**Roman Yu. Antonov,** Specialist in Computer security (2015, Saint Petersburg Electrotechnical University), applicant of the Department of Electronic Instruments and Devices of St. Petersburg Electrotechnical University, head of the design department of "Ekan" Ltd. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: research and development of methods for instrumental analysis of food products.

Address: "Ekan" Ltd, 7 building 1, Academician Likhachev alley, St Petersburg 194223, Russia.

E-mail: roman.ekan@yandex.ru

https://orcid.org/0000-0003-0219-9685