

УДК 631.531.011:517

DOI 10.36305/2712-7788-2021-3-160-86-95

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СЕМЯН ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР

Фархад Багадыроглы Мусаев¹, Сергей Леонидович Белецкий²,
Николай Николаевич Потрахов³

¹ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»

Московская область, 143080, Одинцовский район, пос. ВНИИССОК, Селекционная, 14
Email: musayev@bk.ru

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва»

111033, Россия, г. Москва, Волочаевская ул., д. 40, корп. 1

E-mail: info@niipkh.rosreserv.ru

³ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5,

E-mail: prini@mail.ru

Традиционные морфометрические методы анализа качества семян хотя и отличаются точностью, но менее информативны, трудоемки и длительны в исполнении. В современных условиях в семеноведении и семенном контроле требуется применение более информативных и скоростных инструментальных методов. Метод микрофокусной рентгенографии семян является одним из них, он позволяет визуализировать внутреннюю структуру семян. В совместной работе сотрудников Федерального научного центра овощеводства, Агрофизического НИИ и СПб государственного электротехнического университета, НИИ проблем хранения Росрезерва разработан и апробирован метод рентгенографического анализа качества семян овощных культур. В настоящее время ведется программирование, автоматизация данного метода. В замену ранее применяемого визуального анализа рентгенограмм семян приходит способ цифрового анализа рентгеновских изображений в автоматическом режиме. Разработан и апробирован модернизированный программно-аппаратный комплекс, составлен алгоритм работы программы, состоящий из нескольких этапов. В результате значительно ускоряется анализ качества семян, путем визуализации их внутренней структуры. Вновь разрабатываемая компьютерная программа «Сортсемконтроль-2» распознает семена по следующим качественным показателям: полноценные, недовыполненные, невыполненные, уродливые. Результаты анализа автоматически выдаются в виде протокола. Также проводится фракционный анализ партии семян, дается размерная характеристика каждой фракции, по двум наибольшим смежным фракциям, определяется выравненность партии семян. Фракционный анализ партии семян имеет большое практическое значение для предпосевной подготовки семян. В перспективе, применение компьютерной программы «Сортсемконтроль-2» обеспечит ускоренный, в то же время информативный анализ качества семян, что очень важно в условиях коммерциализации оборота семян.

Ключевые слова: семена; рентгенография; рентгенснимок; цифровой анализ; выполненность семян; дефекты; протокол

Введение

Требования к качеству высеваемых семян подрастают каждым годом, что особенно актуально для нашей страны, где в большинстве регионов неблагоприятные климатические условия. Высокий коэффициент размножения овощных культур позволяет получить достаточное количество семян для нужд хозяйств и населения. Однако, не всегда удается обеспечить надлежащее качество. Среди причин низкого качества семян можно выделить отсутствие зонального семеноводства, низкую агротехнику, отсутствие послеуборочной доработки и информативных методов анализа их качества. Пока же контрольно-семенные лаборатории используют стандартный

метод проращивания семян в лабораторных условиях для определения их качества. В современных условиях для морфобиологической и хозяйственной оценки семян нужно применить инструментальные методы, отличающиеся большей информативностью и легкостью исполнения. Инструментально - биофизические методы позволяют выявить недостатки внутренней структуры семян путем получения новой информации об их качестве. Одним из таких методов является микрофокусная рентгенография семян, позволяющая визуализировать внутреннюю структуру семян. В агрономии рентгенографические исследования семян долго не находили системного развития. Причиной этому были малые размеры семян, что не позволяло, при существующем уровне развития технических средств рентгенодиагностики, извлечь необходимое количество информации о внутреннем строении семени и требовало создания специализированной аппаратуры. Начальные работы во второй половине XX века проводили на семенах древесных пород растений (Simak, 1970, Narvankar *et al.*, 2009, Курбанов, 1968, 1984). С началом внедрения микрофокусных излучателей в рентгенографию растительных объектов развернулись широкие работы по изучению внутренней структуры семян сельскохозяйственных культур с целью улучшения их качества. Ведущим учреждением в данном направлении стал Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН. Дальнейшее развитие метода связано с комплексным анализом качества зерна злаковых и семян технических культур (Bino *et al.*, 1993, Demyanchuk *et al.*, 1999, Grundas *et al.*, 2003, Pinto *et al.*, 2009). Метод рентгенографии семян также стал применяться в интродукции и сохранении видов растений (Мусаев, 2018, Ткаченко и др., 2019).

Семена овощных культур системному рентгенографическому анализу ранее не подвергались, в то же время, они нуждаются в тщательных исследованиях ввиду большого видового разнообразия. Огромное морфологическое и ботаническое разнообразие семян овощных культур, их принадлежность десяткам семейств, сотням родов и видов требует системного подхода к организации исследований. Часто встречается разнокачественность семян, обусловленная зональным ведением семеноводства, либо особенностью строения семенного растения, разноярусным расположением семян или особенностью строения соцветия, неравномерным питанием (Никольский, Грязнов, 2017, Бухаров и др., 2018, Musaev *et al.*, 2020).

В нашей стране в последние десятилетия подобные работы проводились в Агрофизическом НИИ совместно с СПбГЭТУ и НИИПХ на зерне злаковых культур и во ВНИИССОК-ФНЦО – на семенах овощных культур (Архипов М.В., Великанов Л.П., Потрахов Н.Н., Белецкий С.Л., Мусаев Ф.Б.).

Визуальная рентгенографическая оценка качества семян наряду с её достоинствами, имеет ряд недочетов, главным из которых является субъективизм оператора. Также непростым делом представляется подготовка большого числа специалистов для массового анализа семян. Очевидна и экономическая составляющая, так как оплата труда в любой технологии занимает значительную долю в себестоимости продукта или услуг.

Следовательно, в перспективе нужно добиться автоматизации процесса анализа качества семян. В этом направлении в последнее десятилетие занимаются и отечественные и зарубежные специалисты. Достигнуты определенные успехи, рентгенографический анализ проводится в 3D формате (Bruggink, Duijn van, 2017, Porsch, 2020).

Заметного успеха в программно-цифровом анализе рентгенограмм семян добились сотрудники Агрофизического НИИ, Санкт-Петербургского электротехнического университета. (Желудков и др., 2016, Потрахов и др., 2018). Значительные работы в этом направлении проводятся также сотрудниками НИИ

проблем хранения Росрезерва и Федерального научного центра овощеводства (Мусаев, 2018). Разработана, апробирована в лабораторных условиях и зарегистрирована первая версия программы автоматического контроля выполненности семян «СортСемКонтроль-1,0» (Белецкий и др., 2018).

Новизна исследований – разработана программа рентгенографического анализа семян огурца в автоматическом режиме, распознающая полноценные и дефектные семена. Процесс анализа значительно ускорен с внедрением пакетной обработки рентгенограмм (до десяти) с выдачей протокола испытаний.

Материал и методы

Были использованы семена огурца различных сортов и гетерозисных гибридов, различного происхождения, разных мест репродукции и разных лет урожая (табл. 1).

Таблица 1

Сорта и гетерозисные гибриды огурца для исследований (2019-2020 гг.)

Table 1

Cucumber cultivar and hybrid of research material (2019-2020)

№ п/п No	Сорт огурца, гибрид F ₁ Cucumber cultivar, hybrid F ₁	Оригинатор Originator	Репродукция Reproduction	Год урожая Crop year
651	Единство	ВНИИССОК	КФХ Истомин	2012
652	Катюша F ₁	ВНИИССОК	ФГБНУ ФНЦО	2014
653	Крепыш	ВНИИССОК	КФХ Луговое	2013
654	Голубчик F ₁	ССФ «Манул»	ООО «Премиум сидз»	2010
655	Апрельский F ₁	МСХА им. К.А. Тимирязева	ООО «Премиум сидз»	2010
656	Коротышка	ВНИИССОК	ФГБНУ ФНЦО	2017
657	Единство	ВНИИССОК	КФХ Истомин	2011
658	Электрон	ВНИИССОК	КФХ Шатова	2013
659	Родничок F ₁	Молд НИИОЗО	ООО «Премиум сидз»	2010
660	Феникс	Крымская ОС ВИР	ООО «Премиум сидз»	2010
661	Водопад	ВНИИССОК	ФГБНУ ФНЦО	2014
662	Дездемона	ЗАО «Семко-Юниор»	ООО Агропи	2015
663	Сантана F ₁	S&G Seeds (Нидерланды)	ООО Агропи	2015

Для разработки программы автоматического анализа качества семян овощных культур был использован программно-аппаратный комплекс ПРДУ (М-ПРДУ). Модернизированный программно-аппаратный комплекс в системе Росрезерва был апробирован в декабре 2017 г. Модернизация затронула приёмник изображения, вместо рентгенчувствительной пластины применен цифровой плоскостной приёмник-матрицы рентгеновских изображений с разрешением получаемого изображения 3000×3000 точек (рис. 1).

Пробоподготовка, режим и условия съемки соблюдены согласно Методическим указаниям «Рентгенографический анализ качества семян овощных культур» (Мусаев и др., 2015). Распознавание снимков, идентификация объектов и считывание дефектов проводились по программе Автоматического контроля выполненности семян овощных культур «СортСемКонтроль-1,0» (Белецкий и др., 2018).



Рис. 1 Программно-аппаратный комплекс: а) общий вид, б) модернизированная рентгеноустановка с плоскоребрим приемником-матрицей

Fig. 1 Software and hardware complex: a) common view, b) upgraded X-ray unit with flat panel receiver-matrix

Результаты и обсуждение

Разрабатываемая программа носит рабочее название «СортСемКонтроль-2.0». Продукт предназначен для автоматического анализа графических файлов рентгенообразов семян огурца. На рисунке 2 приведён интерфейс программы «СортСемКонтроль-2.0».



Рис. 2 Интерфейс программы «СортСемКонтроль-2.0».

Fig. 2 Interface of the SortSemKontrol-2.0 program

Программа обладает следующей технической характеристикой: Тип ЭВМ: IBM PC совместимый ПК. Язык: C++ ОС: Windows XP и выше. Объём программы: 2,1 Мб. Программа работает в определенной последовательности – алгоритме, состоящем из

нескольких этапов. Приводим основные этапы автоматизированного анализа рентгенобразов семян программой «СортСемКонтроль-2.0».

Сначала проводится **подготовка изображений**. Она необходима для получения адекватного цифрового образа семени. Проводится масштабирование диапазона яркостей изображения, подавляются помехи, компенсируются искажения и, в целом, происходит улучшение качества изображения.

Искажения снимков могут быть обусловлены особенностями аппаратуры съемки, а также эффектом геометрии съемки и повлиять как на размеры объектов, так и на характеристику их внутренних деталей. Искажение также может быть вызвано наличием на рентгенограммах следов износа рентгеночувствительных пластин в виде точек, полосок, бороздок. Разработан метод программного их обнаружения и удаления, основанный на высокочастотной цифровой фильтрации образа (Желудков и др., 2016).

Следующим этапом алгоритма является **Компенсация искажений** – как обязательный прием для получения адекватного цифрового образа семени. Искажения могут быть вызваны эффектом геометрии съемки и повлиять как на размеры объектов, так и на характеристику их внутренних деталей. В ранних работах (Великанов, 1997) даже предлагалось использование сферических поверхностей для помещения объектов съемки (семян), что представлялось технологически сложновыполнимым. Теперь же разработано и реализовано программно-геометрическое преобразование изображений, компенсирующее искажение размеров объектов в зависимости от расстояния до источника излучения (рентгеновской трубки) (Желудков и др., 2016).

Искажение снимков также может быть вызвано наличием на рентгенограммах следов износа рентгеночувствительных пластин в виде точек, полосок, бороздок. Разработан метод программного их обнаружения и удаления, основанный на высокочастотной цифровой фильтрации образа, и последующей билинейной интерполяции обнаруженных артефактов. Рисунок 3 содержит примеры цифровой фильтрации образа в виде фрагментов из рентгенограмм семян.

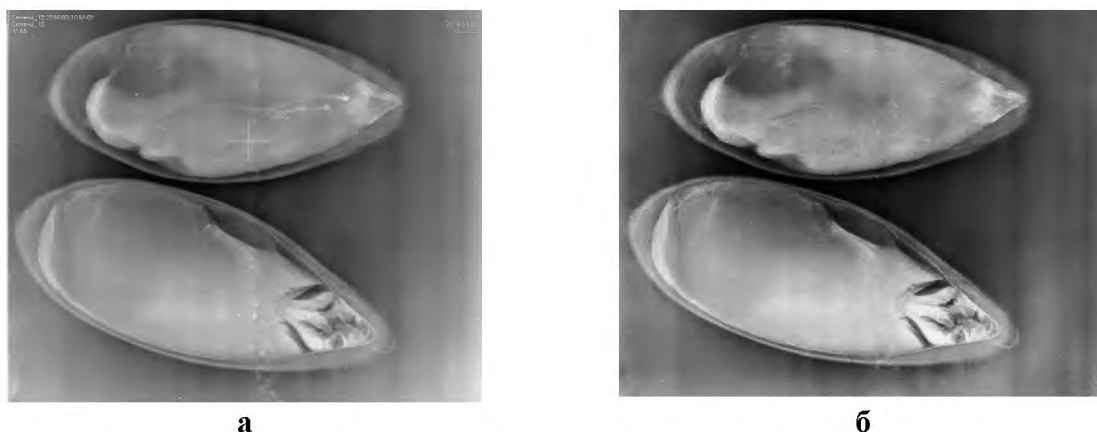


Рис. 3 Пример цифровой фильтрации артефактов рентгенографических из изображений семян:
а) исходный снимок, б) исправленный снимок

Fig. 3 Example of digital filtering of seed radiographic image artifacts: a) original snapshot, b) corrected snapshot

Следующим шагом является **идентификация объектов (семян) на рентгенограмме**. Разработан и программно реализован достаточно эффективный и быстрый численный метод для реализации этой цели. После выделения объектов необходимо определить их пространственную ориентацию. Для этого есть несколько распространенных способов. В частности, для семян, с учетом их формы, идеально подходит способ, основанный на построении для каждой из них эллипсоида инерции.

Для дальнейшего анализа семя можно развернуть по главным осям эллипсоида инерции (рис. 4).

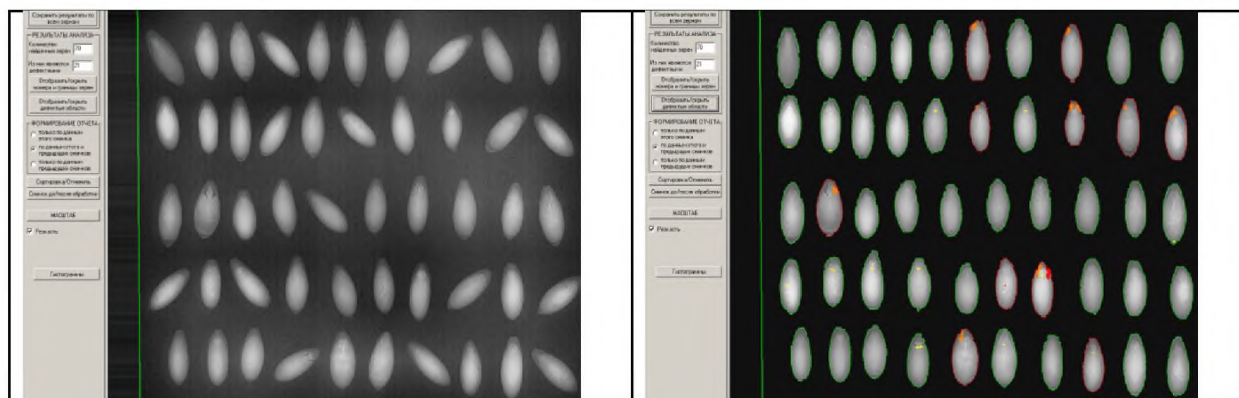


Рис. 4 Пространственная ориентация изображений семян огурца на рентгенограммах: до – (слева), после программной обработки – (справа)

Fig. 4 Spatial orientation of images of cucumber seeds on radiographs: before – (left), after software processing – (right)

Следующим этапом программа **познает (считывает) дефекты семян**. Невыполненность семян является важным показателем, характеризующим биологическую и хозяйственную пригодность семени, и хорошо обнаруживается методом рентгенографии. Для качественной и количественной оценки показателя невыполненности предложен следующий алгоритм анализа изображения семени. За единицу измерения яркости изображения принимается шаг дискретизации яркостной компоненты сигнала изображения в диапазоне от 0 до 255 (по шкале аддитивной цветовой модели - RGB), задаваемый используемой аппаратурой съемки и оцифровки. На рис. 5 приведены рентгеновские изображения семян огурца с различными значениями показателя выполненности - F. Отчетливо видно, что вычисленные автоматически значения степени выполненности (по соотношению доли светлых/темных/оттенков и шкале RGB) хорошо согласуются и с визуальной оценкой признака.

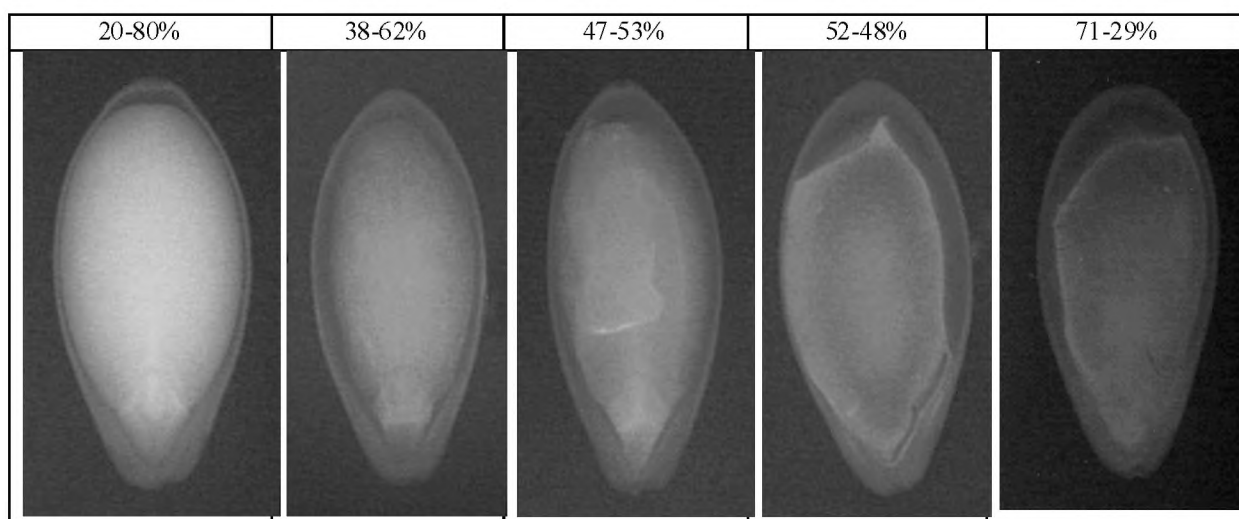


Рис. 5 Рентгенографические изображения семян огурца различной степени выполненности семядолей

Fig. 5 Radiographic images of cucumber seeds of varying degrees of cotyledons

Результаты автоматического анализа рентгеновских изображений семян сводятся в виде протокола, где содержатся данные о качестве анализируемых семян. В таблице 2 представлен пример протокола по результатам анализа семян огурца (табл. 2).

Таблица 2

Протокол автоматического рентгенографического анализа качества семян огурца

Table 2

Protocol of automatic X-ray analysis of cucumber seeds quality

Показатели, признаки Indicators, traits	Единица измерения Unit of measure	Значение Value	
Партия 1, проба 1 / Batch 1, sample 1			
Дополнительная информация: семена огурца Additional information: cucumber seeds			
Общая информация: / General information:			
Всего идентифицировано семян: / Total seeds identified:		штук / pcs.	560
Средняя ширина семян / Average seed width	мм / mm	3,8	
Средняя длина семян / Average seed length	мм / mm	8,9	
Средняя площадь семян / Average seed area	мм ² / mm ²	24,6	
Средняя оптическая плотность (яркость): / Average optical density (brightness):	пиксель / pixel	120	
Нормальных семян (без дефектов) / Normal (full-value) seeds (without defects)	штук, % / pcs., %	487	87,0
Информация о дефектах: / Information about defects:			
Семян без дефектов / Seeds without defects	штук, % / pcs., %	487	87,0
Невыполненные / Undeveloped	штук, % / pcs., %	36	6,4
Недовыполненные / Underdeveloped	штук, % / pcs., %	27	4,8
Уродливые / Monstrous	штук, % / pcs., %	10	1,8
Фракционный анализ: / Fractional analysis:			
Выравненность / Alignment	%	79,9	
9,6 x 4,6 мм	%	0,00	
9,4 x 4,4 мм	%	2,1	
9,2 x 4,2 мм	%	13,6	
9,0 x 4,0 мм	%	53,6	
8,8 x 3,8 мм	%	26,3	
8,6 x 3,6 мм	%	4,4	

С помощью программы также можно считать линейные размеры семян и делить партию на фракции. Доля двух наибольших смежных фракций определяют выровненность партии семян. В данном примере она равна 79,9%, по сумме двух наибольших фракций (53,6 + 26,3%). Фракционный анализ партии семян имеет большое практическое значение для предпосевной подготовки семян.

Заключение

Разработан алгоритм автоматического рентгенографического анализа качества семян овощных культур, подготовлена компьютерная программа «Сортсемконтроль-2», которая распознает семена огурца по следующим качественным показателям: полноценные, недовыполненные, невыполненные, уродливые. Также обеспечен анализ фракционного состава партии семян: семена по размерным характеристикам делятся на шесть фракций (в процентах), далее по двум преобладающим смежным фракциям определяется выровненность партии семян (в процентах). Все результаты анализа автоматически выдаются в виде протокола. Теперь программа может провести анализ семян в режиме пакетной обработки рентгенограмм (до десяти рентгенограмм

одновременно) и выдать обобщенные результаты анализа, что значительно ускоряет сам процесс.

Литература / References

Архипов М.В., Потрахов Н.Н. Микрофокусная рентгенография семян в селекции, семеноводстве и защите растений // IV Лужские научные чтения. Современное научное знание: теория и практика. Материалы международной научно-практической конференции. 2016. С. 53–55.

[Arkhipov M.V., Potrakhov N.N. Microfocus radiography of seeds in breeding, seed production and plant protection. IV Luga scientific readings. Modern scientific knowledge: theory and practice. Materials of the international scientific and practical conference. 2016: 53–55]

Белецкий С.Л., Мусаев Ф.Б., Желудков А.Г., Антошкина М.С., Потрахов Н.Н. Программа для автоматического контроля выполненности семян овощных культур «СортСемКонтроль-1,0»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616484 (РФ) / правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (RU) – заявка №2018613760; дата поступления 16.04.2018; дата регистрации 01.06.2018.

[Beletsky S.L., Musaev F.B., Zheludkov A.G., Antoshkina M.S., Potrakhov N.N. Program for automatic control of the fulfillment of vegetable seeds "Sortsemcontrol-1,0": certificate of state registration of the computer program No. 2018616484 (RF) / copyright holder of SPbSETU "LETI" (RU) – application No. 2018613760; date of receipt 16.04.2018; date of registration 01.06.2018]

Бухаров А.Ф., Балеев Д.Н., Иванова М.И., Бухарова А.Р., Фефелов Ф.О., Разин О.А., Разин А.Ф. Линейные размеры морфологических элементов семени укропа как показатели разнокачественности // Аграрный научный журнал. 2018. № 11. С. 3–7.

[Bukharov A.F., Baleev D.N., Ivanova M.I., Bukharova A.R., Fefelov F.O., Razin O.A., Razin A.F. Linear dimensions of morphological elements of dill seed as indicators of different quality. Agricultural scientific Journal. 2018. 11: 3–7]

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

[Zheludkov A.G., Beletsky S.L., Potrakhov N.N. Complex solution of automation problems of the radiographic method of analyzing the quality of seeds and grains of cereal crops. Khleboпродукты. 2016. 5: 58–61]

Курбанов М.Р. Рентгенография семян с увеличенным изображением // Бюллетень ГБС АН СССР. 1984. Вып. 133. С. 97–101.

[Kurbanov M.R. Radiography of seeds with an enlarged image. Byulletin GBS of the USSR Academy of Sciences. 1984. 133: 97–101]

Курбанов М.Р. Семена древесных пород. Методы рентгенографического анализа. М.: Госкомлес СССР, 1968. 22 с.

[Kurbanov M.R. Seeds of tree species. Methods of X-ray analysis. Moscow: State Committee of the USSR, 1968. 22 p.]

Мусаев Ф.Б., Антошкина М.С., Архипов М.В., Великанов Л.П. Рентгенографический анализ качества семян овощных культур: Методические указания. М.-СПб., 2015. 42 с.

[Musaev F.B., Antoshkina M.S., Arkhipov M.V., Velikanov L.P., et al. Radiographic analysis of the quality of vegetable seeds. Methodical instructions. M.-SPb., 2015. 42 p.]

Мусаев Ф.Б. Научно-практические аспекты совершенствования контроля качества семян овощных культур. Диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / ФБГНУ ФНЦО, п. ВНИИССОК Одинцовского района Московской области, 2018. 479 с.

[Musaev F.B. Scientific and practical aspects of improving the quality control of vegetable seeds. Dissertation for the degree of Doctor of Agricultural Sciences / FBGNU FNTSO. P. VNISSOK Odintsovo district of the Moscow region, 2018. 479 p.]

Никольский М.А., Грязнов А.Ю. Оценка эмбриональной плодородности глазков винограда методом микрофокусной рентгенографии // Труды КубГАУ. 2017. № 66. С. 185–189.

[Nikolsky M.A., Gryaznov A.Yu. Evaluation of the embryonic fruitfulness of grape eyes by microfocus radiography // Proceedings of the Kuban State Agrarian University. 2017. 66: 185–189]

Потрахов Н.Н., Белецкий С.Л., Архипов М.В. Аппаратно-программный комплекс для контроля качества зерна на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 // Таврический вестник аграрной науки. 2018. № 4 (16). С. 152–159. [Potrakhov N.N., Beletsky S.L., Arkhipov M.V. Hardware and software complex for grain quality control based on a mobile X-ray diagnostic unit PRDU-02. *Tavrichesky Bulletin of Agrarian Science*. 2018. 4 (16):152–159]

Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Варфоломеева Е.А., Капелян А.И., Грязнов А.Ю. Рентгенографический метод контроля качества орешков видов рода *Rosa* L. интродуцированных в ботаническом саду Петра Великого // Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН. 2019. № 21. С. 39–57.

[Tkachenko K. G., Staroverov N. E., Varfolomeeva E. A., Kapelyan A. I., Gryaznov A. Yu. X-ray method of quality control of nuts of species of the genus *Rosa* L. introduced in the Botanical Garden of Peter the Great. *Bulletin of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2019. 21: 39–57]

Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю. Рентгенографическое изучение качества плодов и семян // Hortus Botanicus. 2018. Т. 13. С. 52–66.

[Tkachenko K.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu. Radiographic study of the quality of fruits and seeds // *HortusBotanicus*. 2018. 13: 52–66]

Baskin J.M., Lu J.J., Baskin C.C., Tan D.Y. The necessity for testing germination of fresh seeds in studies on diaspore heteromorphism as a life-history strategy // *Seed Science Research*. 2013. Vol. 23 (Iss. 2). P. 83–88.

Bino R.J., Aartse J.W., Van Der Burg W.J. Nondestructive X-ray of Arabidopsis embryo mutants // *Seed Science Research*. 1993. № 3. P. 167–170.

Bruggink H., Duijn van A. X-ray based seed analysis / *Seed Testing International: ISTA News Bulletin*. 2017. Vol. 153. P. 45–50.

Demyanchuk A., Grundas S., Velikanov L. Identification of Wheat Morphotype and Variety Based on X-Ray Images of Kernels // *Advances in Agrophysical Research*. 2013. Ch. 10. P. 223–267.

Grundas S., Velikanov L., Arkhipov V. Importance of wheat grain orientation for the detection of internal mechanical damage by the X-ray method // *Int. Agrophysics*. 1999. No 13. P. 355–361.

Narvankar D.S., Singh C.B., Jayas D.S., White N.D.G. Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat // *Biosystems engineering*. 2009. Vol. 103 (1). P. 49–56.

Pinto T.L.F., Cicero S.M., França-Neto J.B., Forti V.A. An assessment of mechanical and stink bug damage in soybean seed using X-ray analysis test // *SeedSci. & Technol*. 2009. Vol. 37. P. 110–120.

Porsch F. Automated seed testing by 3D X-ray computed tomography// *Seed Science and Technology*. 2020. Vol. 48, No 1. P. 73–81.

Simak M., Gustaffson A. X-rays photography and sensibility in forest tree species // *Hereditas*. 1953. Vol. 39, No 4. P. 458–468.

Simak M. New uses of x-ray method for the analysis of forest seed. Stockholm, 1970. P. 1–11.

Venudevan B., Srimath P. Influence of seed polymorphism on physical, physiological and biochemical seed quality characters of endangered medicinal tree Bael (*Aegle marmelos* (L.) corr.) // *Sci. Res. Essays*. 2013. Vol. 8 (30). P. 1413–1419.

Статья поступила в редакцию 22.06.2021 г.

Musaev F.B., Beletskiy S.L., Potrakhov N.N. Development of computer program for automatic X-ray analysis of quality of vegetable seeds // *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*. 2021. № 3 (160). P. 86-95.

Traditional morphometric methods of seed quality analysis, although they are accurate, are less informative, labor-intensive and long-term in execution. In modern conditions, in seed science and seed control, the use of more informative and high-speed instrumental methods is required. The method of microfocus X-ray of seeds is one of them, it allows you to visualize the internal structure of seeds. In the joint work of employees of the Federal Scientific Vegetable Center, Agrophysical Research Institute and St. Petersburg State Electrotechnical University, Research Institute for Storage Problems of "Rosrezerv", a method of X-ray analysis of the quality of vegetable seeds was developed and tested. Currently, programming, automation of this method is underway. The method of digital analysis of X-ray images in automatic mode comes as a replacement for the previously applied visual analysis of seed radiographs. A modernized software and hardware complex was developed and tested, a program algorithm was compiled, consisting of several stages. As a result, the quality analysis of seeds is significantly accelerated by visualizing their internal structure. The newly developed computer program "Sortsemkontrol-2" recognizes seeds according to the following qualitative indicators: full-value, underdevelopment, undevelopment, monstrous. The analysis results are automatically reported as a log. The fractional analysis of the seed batch is also carried out, the dimensional characteristic of each fraction is given, according to the two largest adjacent fractions, the equalization of the seed batch is determined. Fractional analysis of a batch of seeds is of great practical importance for pre-production of seeds. In the future, the application of the computer program "Sortsemkontrol-2" will provide an accelerated, at the same time informative analysis of the quality of seeds, which is very important in the conditions of commercialization of seed turnover.

Key words: *seeds; X-ray analysis; radiography; digital analysis; seed performance; defects; protocol*