УДК 631.53.02/.171:621.386.8

РЕНТГЕНОВСКИЙ СЕПАРАТОР СЕМЯН НА ОСНОВЕ МЕТОДА СЪЕМКИ С ПРЯМЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

[1]Никольский М.А., [2]Ткаченко К.Г., [3]Грязнов А.Ю., [3]Староверов Н.Е., [3]Холопова Е.Д., [3]Клонов В.А.

[1]Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия – филиал ФГБНУ Северо-Кавказского федерального научно-исследовательского центра садоводства, виноградарства, виноделия, Анапа, e-mail: mcnik-anapa@mail.ru;

[2]ФГБУН «Ботанический институт им. В.Л. Комарова» Российской академии наук, Санкт-Петербург, e-mail: kigatka@rambler.ru;

[3]ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург, e-mail: ay-gryaznov@yandex.ru

Производство и получение высококачественного посевного и посадочного материала является важнейшей задачей развития агропромышленного комплекса. Использование качественного посевного материала позволяет не только увеличить урожайность возделываемой культуры, но и снизить энергетические издержки производства, что в свою очередь позволяет уменьшить антропогенную нагрузку на агробиоценоз. Одной из основных причин снижения посевных качеств семян и посадочного материала является наличие в них различных внутренних дефектов, таких как скрытая травмированность или повреждение вредителями. Идентификация скрытых дефектов и сортировка таких семян на используемых сортировальных машинах не представляется возможной, поэтому для такой сепарации используется метод рентгенографии, который находит все большее применение. Работы ряда отечественных и зарубежных ученых показали, что рентгенография является одним из наиболее перспективных методов регистрации скрытых дефектов у растительных организмов, позволяющим визуализировать все его внутренние формообразующие структуры, а следовательно, и их плотностные, объемные и линейные аномалии. В процессе исследований учеными СПБГЭТУ были созданы микрофокусные рентгеновские установки для исследования растительных организмов (ПРДУ-02, РМ-01, ПАРДУС). Однако основной недостаток этих приборов состоит в том, что работа с ними требует присутствия оператора, обладающего специфическими знаниями по рентгенологии исследуемых растительных объектов. В связи с этим было принято решение о разработке рентгеновского сепаратора семян, способного при минимальном участии оператора самостоятельно проводить сортировку исследуемых образцов. В ходе выполнения исследований авторами был собран банк рентгеновских изображений семян различных видов растений, представителей разных семейств. Определены основные параметры разрабатываемого рентгеновского сепаратора семян. Предложенная методика автоматической рентгеносепарации плодов и семян позволяет упростить работу и снизить трудозатраты по очистке семенного материала, получить результаты оперативно и без проверки качества семян традиционными способами.

Ключевые слова: семена, диагностика, скрытый дефект, микрофокусная рентгенография, рентгеновский сепаратор

USING X-RAY SEPARATOR WITH DIRECT IMAGE INCREASE FOR SEED LATENT DEFECTS` IDENTIFICATION

[1]Nikolskiy M.A., [2]Tkachenko K.G., [3]Gryaznov A.Yu., [3]Staroverov N.E., [3]Kholopova E.D., [3]Klonov V.A.

[1]The Anapa Zonal Experimental Station for Viticulture and Wine-Making is a branch of the North-Caucasian Federal Research Center for Horticulture, Viticulture, Winemaking, Anapa, e-mail: mcnik-anapa@mail.ru;

[2]Botanical Institute named after V.L. Komarova Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, e-mail: kigatka@rambler.ru;

[3]Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» Petersburg, St. Petersburg, e-mail: ay-gryaznov@yandex.ru

Production of high quality seed and planting material is the most important task for the development of thagro-industrial complex. The use of quality seed allows not only increasing the yield of the cultivated crop, but also reducing the energy costs of production, which in turn makes it possible to reduce the anthropogenic impact on agrobiocenosis. One of the main reasons for reducing the seed quality and planting material is the presence of various internal defects in them, such as latent injuries or damage by pests. Identification of latent defects and sorting of such seeds using sorting machines is not possible, so an X-ray method is used for this separation, which is increasingly popular. The works of a number of Russian and foreign scientists have shown that X-ray method is one of the most promising ones for recording latent defects in plant organisms, which makes it possible to visualize all its internal shaping structures, and, consequently, their density, volumetric and linear anomalies. During the research, scientists of St. Petersburg Electrotechnical University created microfocus X-ray devices for plant organisms study (PRDU-02, RM-01, PARDUS). However, the main drawback of these devices is that they require the presence of an operator possessing specific knowledge in radiology of the plant objects under study. In this connection, it was decided to develop an X-ray seed separator which is capable to sort samples under study separately with the minimum operator involvement. During the research, a bank of X-ray images of seeds of various plant species, representatives of different families was organized. The main parameters of the developed X-ray seed separator are determined. The proposed technique of automatic X-ray separation of fruits and seeds makes it possible to simplify work and reduce labor costs for cleaning seed material, to obtain results promptly and without testing the quality of seeds by traditional methods.

Keywords: seeds, diagnostics, latent defect, microfocus X-ray, X-ray separator

Производство и получение высококачественного посевного и посадочного материала является важнейшей задачей развития агропромышленного комплекса. В настоящее время все более широкое распространение в сельском хозяйстве получают рентгенографические методы контроля качества плодов и семян. Основные достоинства этих методов: высокие скорость анализа и информативность, надёжность и точность, распознавание скрытых дефектов семян и выявление вредителей.

На сегодняшний день сформировались два основных способа рентгенографии: контактный и с увеличением изображения [1, с. 23–24; 2].

Для реализации первого, контактного способа съёмки, используется источник рентгеновского излучения с протяженным фокусным пятном, объект съемки при этом располагается на достаточно большом расстоянии от источника излучения и вплотную к приемнику рентгеновского изображения.

Для реализации съёмки с увеличением используется источник излучения с точечным фокусным пятном, поэтому этот метод называется микрофокусной рентгенографией. Объект съемки располагается на определенном расстоянии, как от источника излучения, так и от приемника изображения, а соотношение этих расстояний определяет коэффициент увеличения изображения объекта.

Микрофокусная рентгенография позволяет получить увеличенное изображение объекта, именно поэтому данный метод является предпочтительным при рентгенографии семян, так как получаются резкие, увеличенные в десятки раз, изображения семян, что невозможно при контактной рентгенографии. Таким образом, метод микрофокусной рентгенографии позволяет надежно выявлять разнообразные дефекты семян, в том числе их разную степень выполненности, поражение вредителями, трещиноватость, а затем отделить некачественные семена от качественных (выполненных, полнозёрных) [3, с. 10–12; 4; 5, с. 18–23].

В целом использование метода рентгенографии для изучения внутренней структуры растений и семян древесных пород как за рубежом, так и в нашей стране используется достаточно давно [6].

Так, работы ученых ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» и ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства» показали, что рентгенография является одним из наиболее перспективных методов регистрации скрытых дефектов у растительных организмов, позволяющим визуализировать все его внутренние формообразующие структуры, а следовательно, и их плотностные, объемные и линейные аномалии [7, 8].

Как видно из приведенного краткого литературного обзора, отечественные ученые, в частности коллективы ученых из СПБГЭТУ, АФИ, ВИР, АЗОС, БИН, и их зарубежные коллеги имеют довольно обширный опыт по применению интроскопических методов оценки и регистрации внутреннего состояния растительных организмов, а также качественных показателей семенного материала, предназначенного для дальнейшего размножения, на основе анализа полученного рентгеновского изображения.

В процессе исследований учеными СПБГЭТУ были созданы микрофокусные рентгеновские установки для исследования растительных организмов (ПРДУ-02, РМ-01, ПАРДУС). Однако основной недостаток этих приборов состоит в том, что работа с ними требует присутствия оператора, обладающего специфическими знаниями по рентгенологии исследуемых растительных объектов, а так как специалисты с такими знаниями – явление довольно редкое, использование подобных установок весьма ограничено.

В связи с этим было принято решение о разработке рентгеновского сепаратора семян, способного при минимальном участии оператора самостоятельно проводить сортировку исследуемых образцов.

Материалы и методы исследования

Для разделения качественных и некачественных семян была предложена модель рентгеновского сепаратора семян. В данной установке рентгеновское излучение используется для получения теневого изображения объектов, после чего выполняется цифровая обработка снимка. На основе полученных данных принимается решение, повреждено семя или нет, и, соответственно, поврежденные семена отделяются от неповрежденных.

Макет рентгеновского сепаратора семян включает в себя рентгенозащитную камеру 1, перестраиваемый микрофокусный источник рентгеновского излучения 2, систему перемещения источника 3, приемник рентгеновского излучения 4, состоящий из сцинтиллятора 5 и матрицы фоточувстви-

тельных транзисторов 6, систему подачи семян 7, магнитную фокусирующую систему 8, блок обработки и управления 9. Блок обработки и управления соединен с приемником излучения, источником излучения и магнитной фокусирующей системой. Схема макета показана на рис. 1.

Макет управляется оператором, который загружает объекты исследования в систему подачи семян, а также контролирует работу самого сепаратора.

Коэффициент увеличения изображения задается при указании оператором типа исследуемых семян. Он рассчитывается исходя из минимального размера дефектов, которые могут присутствовать в этих семенах, по следующим формулам:

$$A = a \cdot f2/f1, \quad (1)$$

$$H = d \cdot (f2 - f1)/f1, \quad (2)$$

где a – размер дефекта (мм); A – размер изображения дефекта (мм); H – нерезкость изображения дефекта (мм); d – размер фокусного пятна микрофокусного источника рентгеновского излучения (мм); $f1$ – расстояние от фокусного пятна до семени (см); $f2$ – расстояние от фокусного пятна до плоскости приемника излучения (см).

Сепаратор работает следующим образом: оператор задает тип исследуемых семян, автоматически устанавливаются рабочее напряжение и ток рентгеновской трубки, в зависимости от типа семян изменяется расстояние от источника излучения до объекта исследования, меняя таким образом коэффициент увеличения изображения. Рентгеновское излучение, генерируемое микрофокусным источником, проходит сквозь семена и неравномерно ослабляется элементами их структуры. Сформированное за семенем теневое рентгеновское изображение регистрируется и преобразуется в цифровой электрический сигнал приемником рентгеновского излучения. Блок обработки и управления с помощью специального программного обеспечения обрабатывает цифровое изображение каждого семени и определяет качество партии семян.

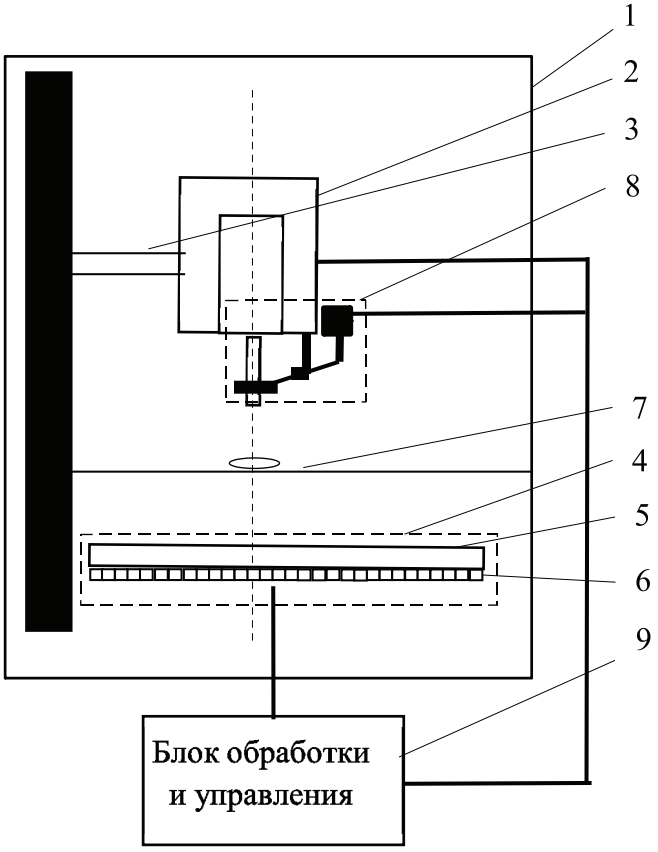


Рис. 1. Схема макета рентгеновского сепаратора семян

Результаты исследования и их обсуждение

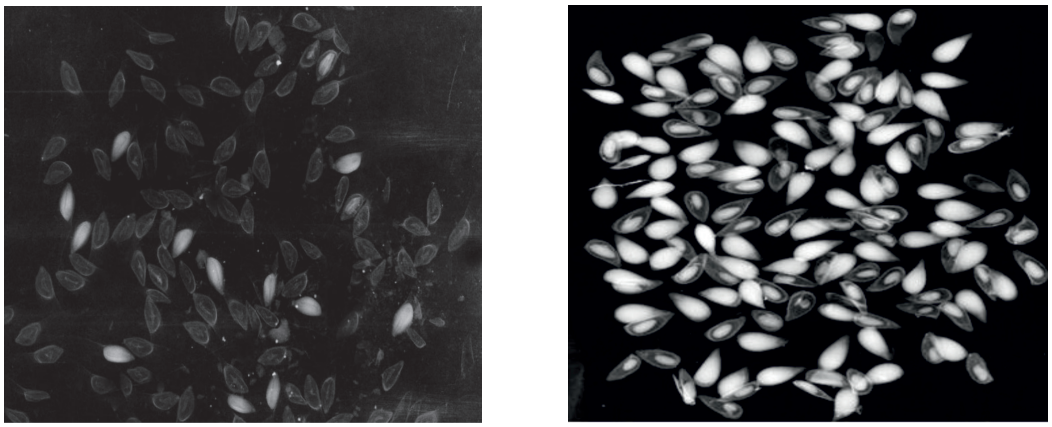
Для определения качества семян была проведена предварительная работа по определению оптимальных режимов съемки семян разного видового состава. В этой работе были использованы коллекционные образцы некоторых видов семян растений, которые произрастают на территории парка-дендрария Ботанического сада Петра Великого БИН РАН (Санкт-Петербург), основным требованием к растениям, участвовавшим в исследованиях, было наличие разного вида семян (боб, орешек, двураздельная семянка), что позволяло индивидуально для каждого вида подбирать режимы съемки, получая наиболее информативные и достоверные результаты.

В результате проведенной работы был собран банк эталонных изображений. При разработке технологии сепарации семян была получена и использована база изображений семян различных видов растений. Всего для исследований были отобраны семена почти 40 различных видов растений (некоторые рода, указанные в таблице, были представлены разными видами). Для проведения исследований использован микрофокусный источник излучения РАП50, имеющий диапазон изменения анодного напряжения рентгеновской трубки 5…50 кВ, диапазон изменения анодного тока: 20…200 мкА.

Параметры рентгенографии для семян различных видов

Латинское название рода	Анодное напряжение трубки, кВ	Анодный ток трубки, мкА	Время экспозиции, с
Abies	16	100	1
Acer	22	150	1
Berberis	18	180	1
Carpinus	18	140	1
Colutea	26	200	1
Cotoneaster	21	100	2
Ecbalium	17	200	1
Echinacea	15	120	1
Foeniculum	15	120	1
Gladiolus	15	200	2
Heracleum	19	150	1
Holodiscus	24	120	2
Hydrangea	21	100	1
Incarvillea	22	200	2
Iris	25	160	1
Juniperus	18	150	1
Lablab	22	120	2
Lespedeza	16	120	1
Malus	16	100	1
Mangifera	17	60	1
Mespilus	21	200	1
Phytolaca	23	200	1
Picea	22	150	1
Platicladus	18	130	1
Ptelea	19	150	1
Pterocaria	24	130	2
Pyrus	22	100	1
Quercus	29	120	2
Rhaponticum	15	120	1
Ricinus	15	60	1
Robinia	25	90	1
Rosa	18	120	2
Silybum	19	90	1
Sorbaria	18	90	1

Рис. 2. Образцы карточек с семенами, приготовленные для рентгенографии



а *б*

Рис. 3. Рентгеновские снимки неупорядоченно расположенных семян яблони (а) и ели (б)

Для каждого вида семян были рассчитаны оптимальные параметры съёмки, получены рентгенографические изображения, после чего параметры съемки были уточнены. При рентгенографическом контроле семян объекты исследования, как правило, расположены на карточках, в строгом порядке, как показано на рис. 2. Карточка имеет рабочее поле из рентгенпрозрачного материала площадью, допускающей размещение всей анализируемой партии семян.

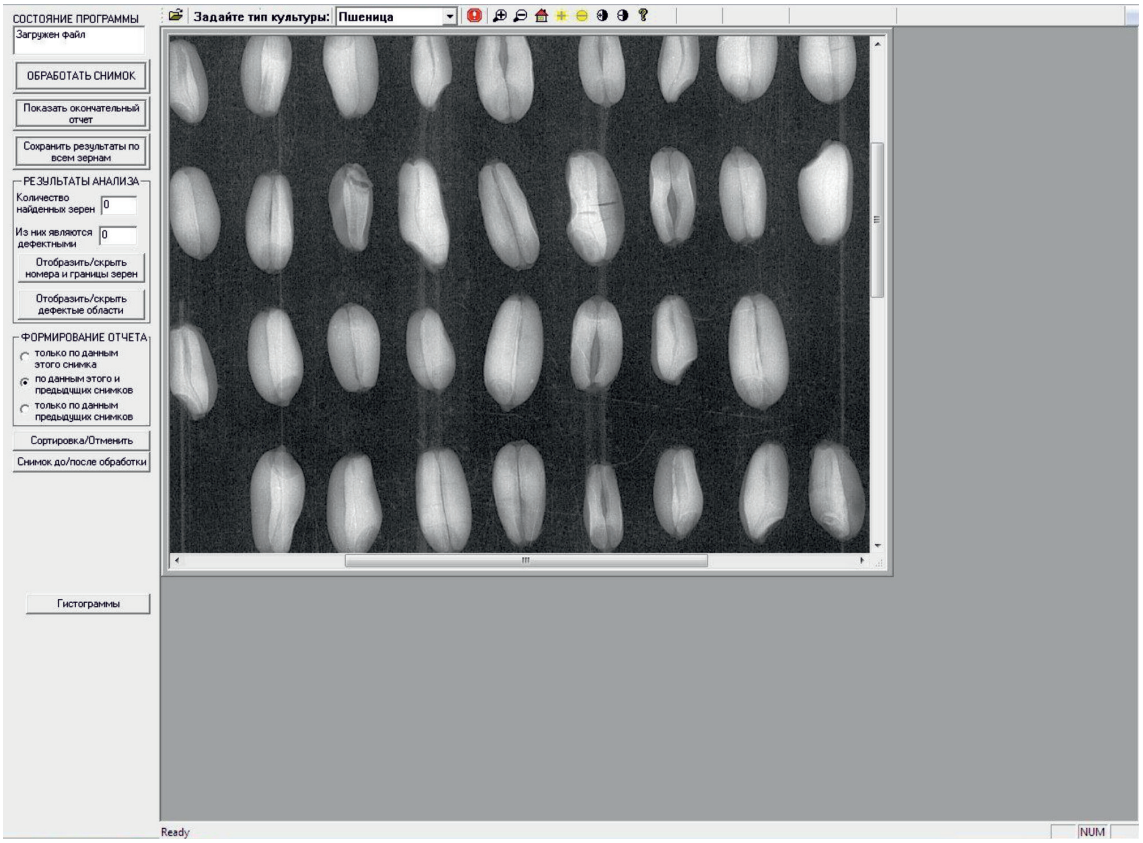


Рис. 4. Рабочее окно программы Агротест 3.0

При получении банка изображений семян также использовали картонные карточки. Однако, так как при разбраковке семян при помощи сепаратора они не будут расположены отдельно друг от друга, в строгом порядке, были проведены эксперименты, которые позволили выяснить, что и в хаотично расположенных семенах (рис. 3), что имеет место в сепараторе, все скрытые дефекты надежно распознаются.

Анализ полученных изображений проводится в программе с рабочим названием Агротест 3.0 (рис. 4). Программа в автоматическом режиме проводит обработку снимка, идентифицирует виды скрытых дефектов семени, выделяет семена с различными видами дефектов, а также проводит автоматический учет и формирует отчет в отдельный файл.

Выводы

В ходе выполнения исследований собран банк рентгеновских изображений семя различных видов растений, представителей разных семейств.

Определены основные параметры разрабатываемого рентгеновского сепаратора семян. Показано, что в сепараторе должна быть предусмотрена возможность изменять напряжение рентгеновской трубки от 14 до 30 кВ, а ток трубки от 60 до 200 мкА во всем диапазоне рабочих напряжений, коэффициент увеличения изображения должен изменяться от 3 до 5. Производительность у использованного макета сепаратора семян составляет несколько кг в час с точностью сортировки на уровне 85–90%. У производственного образца может быть достигнута производительность до нескольких тонн в час.

Предложенная методика автоматической рентгеновской сепарации плодов и семян позволяет упростить работу и снизить трудозатраты по очистке семенного материала, получить результаты оперативно и без проверки качества семян традиционными способами.

Было подтверждено, что методика без потери качества может использоваться для семян, различных по плотности и размерам. Предложенная методика, конечно же, не заменяет стандартную проверку лабора-

торной и грунтовой (полевой) всхожести, но позволяет быстро сделать предварительную оценку качества партии плодов и семян и разработать направления дальнейших исследований.

Список литературы

1. Архипов М.В. Микрофокусная рентгенография растений / М.В. Архипов, Н.Н. Потрахов. – СПб.: Технолит, 2008. – 194 с.

2. Васильев А.Ю. Высокодетальная микрофокусная рентгенография с многократным увеличением изображения: прошлое, настоящее и будущее // Мат. II междун. конгр. «Невский радиологический форум 2005». – СПб.: МАЛО, 2005. – С. 54–57.

3. Никольский М.А. Определение качества срастания привитых компонентов саженцев винограда, методом микрофокусной рентгенографии. Учебно-методическое пособие / М.А. Никольский, М.И. Панкин, А.Ю. Грязнов, Н.Н. Потрахов. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2014. – 20 с.

4. Ренгенодиагностическая установка для экспресс-контроля качества / В.П. Нино, А.Ю. Грязнов, Е.Н. Потрахов, Н.Н. Потрахов // Пищевая промышленность. – 2008. – № 5. – С. 18–20.

5. Архипов М.В. Интроскопический метод ускоренного определения скрытой заселенности зерна карантинными вредителями: методические рекомендации: Методические рекомендации / М.В. Архипов, Д.И. Алексеева, Л.П. Великанов, Л.П. Гусакова, И.В. Дерунов. – СПб., 2005. – 24 с.

6. Carolyn A Larabell Imaging cellular architecture with X-rays / Carolyn A Larabell, Keith A Nugent // Current Opinion in Structural Biology. – 2010. – Vol. 20. – P. 623–631.

7. Мусаев Ф.Б. Применение рентгенографического метода в семеноведении овощных культур / Ф.Б. Мусаев, О.В. Курбакова, Е.Л. Курбаков, М.В. Архипов, Л.П. Великанов, Н.Н. Потрахов // Гавриш. – 2011. – № 1. – С. 44–46.

8. Гусакова Л.П., Великанов Л.П., Бурляева М.О. Использование рентгенографии для оценки качества семян вигны и чины из коллекции ВИР / Л.П. Гусакова, Л.П. Великанов, М.О. Бурляева // Сельскохозяйственная биология. – 2012. – № 5. – С. 121–127.

References

1. Arhipov M.V. Mikrofokusnaja rentgenografija rastenij / M.V. Arhipov, N.N. Potrahov. SPb.: Tehnolit, 2008. 194 p.

2. Vasilev A.Ju. Vysokodetalnaja mikrofokusnaja rentgenografija s mnogokratnym uvelicheniem izobrazhenija: proshloe, nastojashhee i budushhee // Mat. II mezhdun. kongr. «Nevskij radiologicheskij forum 2005». SPb.: MALO, 2005. pp. 54–57.

3. Nikolskij M.A. Opredelenie kachestva srastanija privityh komponentov sazhencev vinograda, metodom mikrofokusnoj rentgenografii. Uchebno-metodicheskoe posobie / M.A. Nikolskij, M.I. Pankin, A.Ju. Grjaznov, N.N. Potrahov. Krasnodar: Izdatelskij Dom Jug, 2014. 20 p.

4. Rengenodiagnosticheskaja ustanovka dlja jekspress-kontrolja kachestva / V.P. Nino, A.Ju. Grjaznov, E.N. Potrahov, N.N. Potrahov // Pishhevaja promyshlennost. 2008. no. 5. pp. 18–20.

5. Arhipov M.V. Introskopicheskij metod uskorennogo opredelenija skrytoj zaselennosti zerna karantinnymi vrediteljami: metodicheskie rekomendacii: Metodicheskie rekomendacii / M.V. Arhipov, D.I. Alekseeva, L.P. Velikanov, L.P. Gusakova, I.V. Derunov. SPb., 2005. 24 p.

6. Carolyn A Larabell Imaging cellular architecture with X-rays / Carolyn A Larabell, Keith A Nugent // Current Opinion in Structural Biology. 2010. Vol. 20. pp. 623–631.

7. Musaev F.B. Primenenie rentgenograficheskogo metoda v semenovedenii ovoshhnyh kultur / F.B. Musaev, O.V. Kurbakova, E.L. Kurbakov, M.V. Arhipov, L.P. Velikanov, N.N. Potrahov // Gavrish. 2011. no. 1. pp. 44–46.

8. Gusakova L.P., Velikanov L.P., Burljaeva M.O. Ispolzovanie rentgenografii dlja ocenki kachestva semjan vigny i chiny iz kollekcii VIR / L.P. Gusakova, L.P. Velikanov, M.O. Burljaeva // Selskohozjajstvennaja biologija. 2012. no. 5. pp. 121–127.