Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.386.12

Обзорная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-6-15>

История и перспективы применения рентгенографии в семеноводстве и семеноведении

Ф. Б. О. Мусаев¹, С. Л. Белецкий² ✉

¹ ФГБНУ "Федеральный научный центр овощеводства", пос. ВНИИССОК, Россия

² ФГБУ НИИПХ Росрезерва, Москва, Россия

✉ grain-miller@yandex.ru

Аннотация

Введение. Метод рентгенографии различных объектов с целью визуализации их внутренней структуры известен уже более 100 лет. Однако для диагностики качества семян растений он стал использоваться лишь в начале 80-х гг. XX в. Основная причина – отсутствие специализированных технических средств, в первую очередь, источников рентгеновского излучения, которые обеспечивали бы необходимую информативность получаемых изображений. Лишь благодаря разработке и использованию для этих целей методики микрофокусной рентгенографии удалось добиться значительных результатов, включая подготовку Национального стандарта ГОСТ Р 596032021 "Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии".

Цель работы. Аналитический обзор результатов отечественных исследований в области рентгенографии семян различных растений.

Материалы и методы. Рассмотрены основные этапы разработки методики микрофокусной рентгенографии семян и отдельных частей растений сельскохозяйственного и иных назначений. Описаны конструктивные особенности технических средств, включая цифровые, созданных для реализации методики.

Результаты. Показано, что для информативной рентгенографии таких специфических объектов как семена растений, обладающих малыми размерами и плотностью в целом, размер фокусного пятна рентгеновской трубки должен составлять не более нескольких десятков микрометров, напряжение на рентгеновской трубке – не более нескольких десятков киловольт. В качестве системы визуализации скрытого рентгеновского изображения предпочтительнее использовать приемники изображения на основе экрана с фотостимулируемым люминофором или плоскопанельные твердотельные детекторы рентгеновского излучения. Указанный комплект технических средств позволил выделить и описать рентгенографические признаки нормального семени и девяти основных типов дефектов для 600 видов растений.

Заключение. Методика микрофокусной рентгенографии, по сравнению с традиционно используемой контактной рентгенографией, позволяет получать рентгеновские снимки семян с проекционным увеличением изображения до нескольких десятков раз. Такие снимки позволяют визуализировать принципиально более мелкие детали структуры семени, которые незначительно отличаются по плотности.

Ключевые слова: семена, зерно, рентгенография, дефекты семян

Для цитирования: Мусаев Ф. Б. О., Белецкий С. Л. История и перспективы применения рентгенографии в семеноводстве и семеноведении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 6. С. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-6-15

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.10.2021; принята к публикации после рецензирования 09.11.2021; опубликована онлайн 29.12.2021

History and Prospects for the Application of X-Ray Diffraction Analysis in Seed Breeding and Seed Study

Farhad B. O. Musaev¹, Sergey L. Beletskiy²✉

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Vegetable Center, VNISSOK, Russia

² Federal State Government Financed Institution Scientific Research Institute of Storage Problems Federal Agency of State Reserves, Moscow, Russia

✉ grain-miller@yandex.ru

Abstract

Introduction. X-ray analysis has been applied for visualizing the internal structure of various objects for over 100 years. However, this method began to be used for assessing the quality of plant seeds only in the early 1980s. The main impediment was a lack of specialized instruments, particularly X-ray sources, that could provide informative images. Advancements in the field of microfocus radiography allowed significant results to be achieved, including the preparation of the National Standard GOST R 596032021 "Agricultural Seeds. Methods of digital radiography".

Aim. An analytical review of Russian research studies in the field of X-ray diffraction analysis of plant seeds.

Materials and methods. Key stages in the development of microfocus X-ray diffraction analysis of seeds and individual parts of plants for agricultural and other purposes are considered. The design of instruments, including digital ones, created for the implementation of the method are described.

Results. In order to obtain informative X-ray diffraction images of plant seeds, which objects are generally characterized by small sizes and small density, the focal spot of the X-ray tube should not exceed several tens of microns under the voltage of not higher than several tens of kilovolts. As a system for visualizing a latent X-ray image, it is preferable to use image receivers based on a screen with a photostimulated phosphor or flat-panel solid-state X-ray detectors. These instruments have been successfully used to identify and describe the radiographic signs of a normal seed and nine main types of defects for 600 plant species.

Conclusion. In comparison with the conventional contact radiography, microfocus radiography produces X-ray images of seeds with a projection magnification of the image up to several tens of times. Such images permit highly detailed visualization of the structure of seeds that differ slightly in density.

Keywords: seeds, grain, X-ray diffraction analysis, seed defects

For citation: Musaev F. B. O., Beletskiy S. L. History and Prospects for the Application of X-Ray Diffraction Analysis in Seed Breeding and Seed Study. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 6, pp. 6–15. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-6-15

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 11.10.2021; accepted 09.11.2021; published online 29.12.2021

Введение. Метод рентгенографии различных объектов с целью визуализации их внутренней структуры известен уже более ста лет – с момента открытия рентгеновского излучения В. К. Рентгеном в 1895 г. Метод до сих пор остается востребованным практически во всех отраслях человеческой деятельности и продолжает активно развиваться. Семена сельскохозяйственных культур были одним из первых объектов диагностики этим методом. Однако тогда рентгенографические исследования семян в агрономии системного развития не получили. Причина – малые размеры семян, что не позволяло при суще-

ствующем уровне развития технических средств рентгенографии извлечь необходимое количество информации о внутреннем строении семени.

Аналоговая рентгенография семян. Первые серьезные работы по рентгенографии растительных объектов начались за рубежом на семенах древесных пород [1, 2]. Постепенно подобные работы нашли распространение и в нашей стране [3–6]. Госкомитетом СССР по лесному хозяйству в 1988 г. был утвержден отраслевой стандарт*.

*ГОСТ 56-94-88. Семена древесных пород. Методы рентгенографического анализа.

История и перспективы применения рентгенографии в семеноводстве и семеноведении

History and Prospects for the Application of X-Ray Diffraction Analysis in Seed Breeding and Seed Study

Впоследствии был проведен широкий круг исследований по рентгенографической оценке качества коллекционных образцов семян из мировой коллекции ГНЦ ВИР. Проанализировано качество семян перед закладкой на хранение и динамика его изменения в процессе хранения с возможностью регистрации результатов анализа [7–9].

Однако в целом исследования в области контроля качества семян посредством изучения их внутренней структуры развивались низкими темпами вследствие, как уже было отмечено, недостатков соответствующих технических средств. Съемки семян проводились классическим способом – на рентгеновскую пленку рентгеновскими аппаратами с протяженным фокусным пятном. Семена приходилось располагать максимально близко к приемнику изображения для предотвращения геометрической нерезкости изображения. Как результат, снимки получались без проекционного увеличения и обладали малой информативностью. Кроме того, "пленочная" технология визуализации рентгеновского изображения требовала много времени и трудов. Поэтому классическая рентгенография не позволяла решить задачу полностью.

Разработка микрофокусных источников рентгеновского излучения и специализированных рентгеновских аппаратов на их основе, а также появление цифровых приемников рентгеновского изображения дали новый толчок исследованиям.

Одним из первых рентгеновских аппаратов, предназначенных для получения снимков семян

сельскохозяйственных растений с целью определения их посевных качеств, стал аппарат "ЭЛЕКТРОНИКА-25" (рис. 1).

Аппарат позволял получать снимки отдельных семян с увеличением изображения до 10 раз. В его состав входили микрофокусный источник рентгеновского излучения семейства РЕИС, а также малогабаритная камера для проведения рентгенографических работ [10]. Источник рентгеновского излучения РЕИС был сконструирован на основе первой отечественной рентгеновской трубки с полым вынесенным анодом и мишенью прострельного типа серии БС. Конструкцию этой трубки, разработанной в ОКБ РП ЛОЭП "Светлана" (Ленинград) и на десятилетия определившей основное направление развития микрофокусных источников рентгеновского излучения в нашей стране, можно считать классической [11].

В конце 80-х гг. был создан портативный микрофокусный рентгеновский излучатель семейства РЕИС на 100 кВ. Использование данного излучателя для рентгенографии семян сельскохозяйственных культур позволило производить работы по оценке хозяйственной пригодности не только семян, но и различных растений [12, 13].

Цифровая рентгенография семян. С началом внедрения микрофокусных источников рентгеновского излучения в рентгенографию растительных объектов развернулись широкие исследования по изучению внутренней структуры семян сельскохозяйственных культур с целью улучшения их качества. Ведущим учреждением в данном направлении семеноводства стал НИИ АФИ (ныне Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Агрофизический научно-исследовательский институт"). В лаборатории биофизики семян этого института рентгенографический метод впервые был адаптирован именно для семян сельскохозяйственных растений и в настоящее время используется для исследования широкого спектра семян зерновых, зернобобовых, масличных культур и кормовых трав [14–20]. Со временем к этим работам подключились Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) и ВНИИС-СОК (ныне ФГБНУ "Федеральный научный центр овощеводства"). При этом сотрудники кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ "ЛЭТИ" сосредоточились на исследованиях в области создания перспективных технических средств рентгенографии семян. Так, в развитие конструкции аппарата "ЭЛЕКТРОНИКА-25" совместно с ЗАО "ЭЛТЕХ-Мед" (Технопарк СПбГЭТУ "ЛЭТИ")

Рис. 1. Рентгеновский аппарат "ЭЛЕКТРОНИКА-25"

Fig. 1. X-ray apparatus "ELECTRONICS-25"

была начата разработка передвижных рентгенодиагностических установок (ПРДУ).

В настоящее время создано целое семейство ПРДУ, предназначенных для исследования крупных растений, включая древесные породы, а также целых партий семян овощных, зерновых и других культур в условиях специализированной лаборатории. Установки позволяют получать в зависимости от решаемой задачи рентгеновское изображение отдельной зерновки с коэффициентом увеличения 10 и более.

В состав установки семейства ПРДУ помимо микрофокусного источника рентгеновского излучения 1 и цифрового приемника изображения 2 входит специализированная камера для проведения рентгенографических работ 3 (рис. 2).

В ходе разработки конструкции установки оценивались в частности возможности двух типов цифровых приемников рентгеновского изображения для целей рентгенографии семян: на основе системы "экран–оптика–ПЗС-матрица", а также на основе экрана с фотостимулируемым люминофором (ФСЛ). Было установлено, что приемники на основе ФСЛ-экрана обладают большей чувствительностью и обеспечивают более высокое качество рентгеновского изображения за счет большей разрешающей способности. Однако стоимость си-

Рис. 2. Семейство ПРДУ: 1 – источник рентгеновского излучения; 2 – цифровой приемник изображения; 3 – специализированная камера для проведения рентгенографических работ

Fig. 2. Family PRDU: 1 – X-ray source; 2 – digital image receiver; 3 – specialized camera for X-ray work

Рис. 3. Портативный рентгенодиагностический комплекс семейства ПАРДУС

Fig. 3. Portable X-ray diagnostic complex of the PARDUS family

стемы визуализации на основе экрана с ФСЛ в несколько раз выше, чем системы "экран–оптика–ПЗС-матрица".

Принципиально новым техническим средством рентгенографии стал портативный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для исследования небольших по размерам фрагментов растений или отдельных семян непосредственно в поле, лесу и т. д. С этой целью в состав комплекса был включен первый отечественный микрофокусный аппарат со встроенным аккумуляторным источником питания семейства ПАРДУС (рис. 3). Малая мощность аппарата в сочетании с высокой чувствительностью цифрового приемника рентгеновского изображения позволяет обеспечить радиационно-безопасные условия работы оператора при проведении рентгенографических исследований.

Все описанные технические средства рентгенографии семян позволяют визуализировать основные типы их дефектов: невыполненность, дефекты зародыша, трещиноватость, скрытую поврежденность насекомыми, поврежденность грибной и бактериальной инфекцией, скрытое прорастание семян.

Для исследования более мелких морфологических особенностей строения семян необходимо получать их изображение с большим увеличением. С этой целью была разработана еще одна специализированная установка – рентгеновский микроскоп РМ-01 (рис. 4).

В отличие от установок семейства ПРДУ установка РМ-01 позволяет получать снимки отдельных семян с увеличением до нескольких сотен раз. С этой целью объект съемки размещается в специальном держателе, который в автоматическом режиме обеспечивает перемещение объекта в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также вращение

Рис. 4. Рентгеновский микроскоп РМ-01
Fig. 4. X-ray microscope RM-01

вокруг оси. В базовом варианте установки РМ-01 визуализация рентгеновского изображения осуществляется с помощью приемника изображения, построенного по схеме "экран-оптика-ПЗС"*. Однако возможно использование более современных приемников рентгеновского изображения, напри-

мер на основе крупноформатных твердотельных детекторов рентгеновского излучения.

Зарубежные ученые за данный период также продвинулись в исследованиях по рентгенографии семян. Развитие нашли работы в области комплексного анализа качества зерна злаковых и семян технических культур [21–24]. Метод рентгенографии семян также стал применяться для решения различных задач биологии и семеноведения [25, 26]. Посредством рентгенографического анализа внутренней структуры семян перца [27] делаются заключения об их жизнеспособности. По промежуткам между эндоспермом и зародышем на рентгеновских изображениях семян судят о их вызреваемости и влажности, определяют качество будущих проростков [28].

В последние годы ФГБНУ "ФНЦО" проведены масштабные исследования по рентгенографии семян овощных культур. Совместно с сотрудниками ФГБНУ АФИ и СПбГЭТУ "ЛЭТИ" идентифицированы и классифицированы основные дефекты и недостатки внутренней структуры семян овощных культур, имеющие хозяйственно-

Рис. 5. Рентгеновское изображение семян различных овощных культур: а – томат; б – перец; в – баклажан; г – редис; д – капуста; е – свекла; ж – укроп; з – пастернак; и – кресс-салат; к – лук; л – спаржа; м – майоран; н – шпинат
Fig. 5. X-ray image of seeds of various vegetable crops: а – tomato; б – pepper; в – eggplant; г – radish; д – cabbage; е – beets; ж – dill; з – parsnip; и – cress salad; к – bow; л – asparagus; м – mayoran; н – spinach

* Блинов Н. Н. Основы рентгенодиагностической техники: учеб. пособие / под ред. Н. Н. Блинова. М.: Медицина, 2002. 392 с.

биологическое значение и влияющие на их качество. Исследования систематизированы для 26 видов овощных культур, принадлежащих 11 ботаническим семействам [29]. Примеры цифровых рентгеновских изображений семян овощных культур представлены на рис. 5.

Программное обеспечение рентгенографии семян. Основным направлением в развитии рентгенографии семян уже более 10 лет является разработка алгоритмов автоматизированного анализа их качества. Сотрудники СПбГЭТУ "ЛЭТИ", ФГБНУ АФИ, ФГБНУ "ФНЦО", а также ФГБУ НИИПХ Росрезерва проводят работу в этом направлении на зерновых и овощных культурах. Разработан алгоритм компьютерного анализа качества семян, состоящий из следующих этапов:

- подготовки рентгеновских изображений к анализу;
- компенсации искажений, вызванных геометрией съемки и наличием артефактов;
- идентификации объектов на рентгеновском изображении;
- выявления дефектов семян;
- фракционного анализа;
- автоматического составления протокола анализа.

Алгоритм реализован в аппаратно-программном комплексе, разработанном в ЗАО "ЭЛТЕХ-Мед" совместно с ФГБУ НИИПХ Росрезерва. Он успешно апробирован в аппаратно-программном комплексе на основе рентгеновской установки семейства ПРДУ (рис. 6).

Разработаны и апробированы программы автоматического компьютерного анализа качества семян "Агротест-Зерно-1", "Агротест-Зерно-2", "Паспорт-Зерно", "Паспорт-Зерно 2.0", "Сорт-

Рис. 6. Аппаратно-программный комплекс на основе рентгеновской установки семейства ПРДУ

Fig. 6. Hardware and software complex based on an X-ray unit of the PRDU family

СемКонтроль-1.0", "СортСемКонтроль-2.0" [30, 31]. Исследования продолжаются, идет разработка новых версий программ с целью повышения их возможностей по распознаванию дефектов. Проведена аттестация методики измерений внутренних дефектов зерна с применением рентгенодиагностической установки типа ПРДУ-02 (Свидетельство об аттестации методики (метода) измерения № 241.0283/RA.RU.311866/2017).

Компьютерная рентгеновская томография семян. Одним из наиболее современных и перспективных методов получения высокоразрешающих изображений, в том числе трехмерных, является рентгеновская компьютерная томография. Разработанный в Германии метод трехмерной визуализации семян (плодов) свеклы в поточном режиме [32] является в настоящее время наивысшим достижением в области рентгенографии семян.

Для решения аналогичных задач сотрудниками лаборатории рентгенотелевизионных систем СПбГЭТУ "ЛЭТИ" совместно с ЗАО "ЭЛТЕХ-Мед" разработано семейство отечественных микрофокусных рентгеновских компьютерных томографов – МРКТ [33, 34].

Одна из последних разработок – томограф МРКТ-04 (рис. 7).

Основу его конструкции составляет рентгенозащитная камера. Материал и толщина стенок камеры обеспечивают полную защиту от неиспользуемого рентгеновского излучения в соответствии с действующими нормативами. Внутри камеры расположены источник рентгеновского излучения моноблочного типа РАП-150М с микрофокусной рентгеновской трубкой БС16, приемник рентгеновского изображения на основе твердотельного плоскопанельного двухкоординатного детектора.

Рис. 7. Микрофокусный рентгеновский компьютерный томограф МРКТ-04

Fig. 7. Microfocus X-ray computed tomograph MRKT-04

Рис. 8. Трехмерные рентгеновские изображения: а — фундука (лат. nux pontica); б — сливы (лат. prúnus)

Fig. 8. Three-dimensional X-ray images: а — hazelnuts (lat. nux rontisa); б — plums (lat. prúnus)

В отличие от установок семейства ПРДУ (кроме РМ-01) томографы дополнительно снабжены автоматизированным устройством для вращения и перемещения по оси пучка рентгеновского излучения объекта исследования.

Для управления работой основных узлов томографа, сбора и обработки проекционных данных, а также реконструкции трехмерного изображения объекта исследования используется оригинальное программное обеспечение.

Максимальное напряжение на рентгеновской трубке томографа – 150 кВ, максимальный ток трубки – 0.1 мА. Размеры входного окна детектора рентгеновского излучения равны 300 × 300 мм. Размер пикселя детектора рентгеновского излучения – 140 мкм. Минимальный размер вокселя получаемого изображения, в общем случае, составляет 5 мкм.

Габариты рентгенозащитной камеры (д × ш × в) равны 1100 × 670 × 550 мм, габариты

приборной камеры исследования (камеры для размещения образцов) позволяют исследовать объекты размером до 210 × 250 × 250 мм. Общая масса томографа не превышает 250 кг.

Примеры результатов исследований, выполненных на томографе МРКТ-04, представлены на рис. 8.

Заключение. Накопленный опыт создания и эксплуатации технических средств рентгенографии семян и растений позволяет утверждать, что в нашей стране создана и успешно развивается технология проведения таких исследований в семеноводстве и семеноведении.

Разработаны как высокоинформативные методики проведения рентгенографии семян и растений, так и самые современные технические средства для их реализации. В перспективе – полная автоматизация анализа рентгеновских изображений и создание соответствующей нормативной базы в виде ГОСТ "Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии".

Список литературы

1. Simak M. New uses of X-ray method for the analysis of forest seed // Metsäntutkimuslaitos. 1970. № 27. Р. 1–11.
2. Simak M., Gustaffson A. X-rays photography and sensibility in forest tree species // Hereditas. 1953. Vol. 39, № 4. Р. 458–468. doi: 10.1111/j.1601-5223.1953.tb03430.x
3. Курбанов М. Р. Семена древесных пород. Методы рентгенографического анализа. М.: Госкомлес СССР, 1968. 22 с.
4. Курбанов М. Р. Рентгенография семян с увеличенным изображением // Бюллетень ГБС АН СССР. 1984. Вып. 133. С. 97–101.
5. Некрасов В. И., Смирнова Н. Г. Рентгенографическая оценка качества семян // Качество семян в связи с условиями их формирования при интродукции. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1971. С. 60–69.
6. Смирнова Н. Г. Рентгенографическое изучение семян лиственных древесных интродуцированных рас-

тений. М.: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. 108 с.

7. Зайцев В. А., Редькина З. В., Грун Л. Б. Перспективы рентгенографии в диагностике качества семян // Селекция и семеноводство. 1981. № 7. С. 37–38.

8. Малевинский В. Е., Зайцев В. А., Редькина З. В. Влияние сроков хранения на энергию прорастания и всхожесть семян двухкосточника тростникового // Сб. науч. тр. ЛСХИ. 1984. С. 37.

9. Зайцев В. А., Редькина З. В. Возможности и перспективы применения метода рентгенографии семян сельскохозяйственных культур // Электронная промышленность. 1987. Сер. 4, вып. 2 (117). С. 117.

10. Редькина З. В., Зайцев В. А., Архипов М. В. Рентгенография с прямым рентгеновским увеличением на излучателе РЕИС-И для диагностики семян // Бот. сад АН Лат. ССР, экологические проблемы семеноведения ин-

тродуцентов: тез. докл. Рига, 1984. С. 105.

11. Иванов С. А., Щукин Г. А., Рентгеновские трубки технического назначения. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. 200 с.

12. Портативный микрофокусный рентгеновский аппарат для диагностики семян и зерен / Л. Г. Андрущенко, М. В. Архипов, Л. Б. Грун, Ю. К. Иоффе, З. В. Редькина, Н. А. Федорак // Электронная промышленность. 1983. Вып. 11 (128). С. 31–34.

13. Печенова Т. В., Смирнова Н. Г., Холодова В. К. Использование рентгенографии при изучении качества семян // Сахарная свекла. 1985. № 10. С. 38–39.

14. Рентгенография для выявления внутренних повреждений и их влияние на урожайные качества семян / В. Н. Савин, М. В. Архипов, А. Л. Баденко, Ю. К. Иоффе, Л. Б. Грун // Вестн. с.-х. науки. 1981. № 10 (301). С. 99–104.

15. Савин В. Н., Кондрашова М. Д., Архипов М. В. Влияние различных типов повреждений семян ячменя на их посевные качества и урожайные свойства // Докл. РАСХН. 1995. № 3. С. 5–7.

16. Савин В. Н., Архипов М. В., Гусакова Л. П. Жизнеспособность овощных семян при внутренних повреждениях // Аграрная наука. 1997. № 2. С. 23–25.

17. Архипов М. В., Гусакова Л. П., Алферова Д. В. Рентгенография растений при решении задач семеноведения и семеноводства // Изв. С.-Петерб. гос. аграрного ун-та. 2011. № 22. С. 336–341.

18. Архипов М. В., Потрахов Н. Н. Микрофокусная рентгенография растений. СПб.: Технолит, 2008. 192 с.

19. Великанов Л. П. Рентгенографический анализ внутренней поврежденности семян пшеницы и ячменя // Агрофизические методы и приборы. Растения и среда их обитания. 1997. Т. 3. С. 234–254.

20. Agrophysical direction of further development and application of X-ray method / L. P. Velikanov, S. Grundas, M. V. Archipov, A. M. Demianichuk, L. P. Gusakova // Proc. of Intern. conf. on new trends in agrophysics, Lublin, Poland, 10–11 June 2008. P. 147–148.

21. 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. № 13. P. 355–361.

22. Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat / D. S. Narvankar, C. B. Singh, D. S. Jayas, N. D. G. White // Biosystems engineering. 2009. Vol. 103, iss. 1. P. 49–56. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.01.016

23. Bruggink H., Duijn B. X-ray based seed analysis // Seed Testing International. 2017. № 153. P. 45–50.

24. Radiographic analysis to test maize seeds for the presence of Sitophilus Zea mais (Coleoptera: Curculionidae) / F. França-Silva, M. L. M. de Carvalho, G. A. Carvalho, D. B. de Andrade, V. F. de Souza, E. R. Marques // Seed Science and Technology. 2019. Vol. 47, № 3. P. 249–260. doi: 10.15258/sst.2019.47.3.02

25. An assessment of mechanical and stink bug damage in soybean seed using X-ray analysis test / T. L. F. Pinto, S. M. Cicero, J. B. França-Neto, V. A. Forti // Seed Science and Technology. 2009. Vol. 37. P. 110–120. doi: 10.15258/sst.2009.37.1.13

26. Bino R. J., Aartse J. W., Van Der Burg W. J. Non destructive X-ray of Arabidopsis embryo mutants // Seed Science Research. 1993. Vol. 3, iss. 3. P. 167–170. doi: 10.1017/S0960258500001744

27. Dell'Aquila A. Pepper seed germination assessed by combined X-radiography and computer-aided imaging analysis // Biologia Plantarum. 2007. Vol. 51. P. 777–781. doi: 10.1007/s10535-007-0159-9

28. Gagliardi B., Marcos-Filho J. Relationship between germination and bell pepper seed structure assessed by the X-ray test // Scientia Agricola. 2011. Vol. 68, № 4. P. 411–416. doi: 10.1590/S0103-90162011000400004

29. Мусаев Ф. Б., Потрахов Н. Н., Архипов М. В. Рентгенография семян овощных культур. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2016. 207 с.

30. Porsch F. Automated seed testing by 3D X-ray computed tomography // Seed Science and Technology. 2020. Vol. 48, № 1. P. 73–81. doi: 10.15258/sst.2020.48.1.10

31. Рентгеновская томография / Н. Н. Потрахов, А. В. Ободовский, В. Б. Бессонов, Е. Н. Потрахов, К. К. Гук // Фотоника. 2019. Т. 13, № 7. С. 688–693. doi: 10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.688.692

32. Бессонов В. Б., Ларионов И. А., Ободовский А. В. Особенности разработки программно-аппаратных комплексов для микрофокусной рентгеновской компьютерной томографии // Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8, № 4 (34). С. 23–33. doi: 10.25210/jfop-1904-023033

33. Потрахов Н. Н., Белецкий С. Л., Архипов М. В. Аппаратно-программный комплекс для контроля качества зерна на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 // Таврический вестн. аграрной науки. 2018. № 4 (16). С. 152–159. doi: 10.25637/TVAN2018.04.14

34. Musaev F. B., Beletskyi S. L., Potrakhov N. N. A brief atlas of radiographic signs of vegetable seeds. Moscow: DeLi plus, 2018. 52 p.

Информация об авторах

Мусаев Фархад Багадыр оглы – доктор сельскохозяйственных наук (2019), ведущий научный сотрудник ФГБНУ "Федеральный научный центр овощеводства". Автор более 120 научных работ. Сфера научных интересов – семеноведение овощных культур, рентгенография и цифровая морфометрия семян.

Адрес: ФГБНУ ФНЦО, ул. Селекционная, д. 14, пос. ВНИИССОК, Одинцовский район, Московская область, 143072, Россия

E-mail: musayev@bk.ru

<https://orcid.org/000-0001-9323-7741>

Белецкий Сергей Леонидович – кандидат технических наук (2004), доцент (2008), ученый секретарь ФГБУ Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва. Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – новые методы испытаний пищевой продукции и сырья, технологии длительного хранения пищевой продукции и сырья.

Адрес: ФГБУ Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва, ул. Волочаевская, д. 40/1, Москва, 111033, Россия.

E-mail: grain-miller@yandex.ru

References

1. Simak M. New Uses of X-Ray Method for the Analysis of Forest Seed. *Metsäntutkimuslaitos*. 1970, no. 27, pp. 1–11.
2. Simak M., Gustaffson A. X-Rays Photography and Sensibility in Forest Tree Species. *Hereditas*. 1953, vol. 39, no. 4, pp. 458–468. doi: 10.1111/j.1601-5223.1953.tb03430.x
3. Kurbanov M. R. *Semena drevesnykh porod. Metody rentgenograficheskogo analiza* [Seeds of Wood Species. X-ray analysis methods.] Moscow, Goskomles USSR, 1968, 22 p. (In Russ.)
4. Kurbanov M. R. *Rentgenografiya semyan s uvelicheniem izobrazheniem* [Radiography of Seeds with an Enlarged Image]. Bulletin of the GBS of the USSR Academy of Sciences. Moscow, *Nauka*, 1984, vol. 133, pp. 97–101. (In Russ.)
5. Nekrasov V. I., Smirnova N. G. *Rentgenograficheskaya otsenka kachestva semyan* [Radiographic Assessment of the Quality of Seeds]. From: *Kachestvo semyan v svyazi s usloviyami ikh formirovaniya pri introduktsii* [The Quality of Seeds In Connection With the Conditions of Their Formation during the Introduction]. Novosibirsk, *Nauka*, 1971, pp. 60–69. (In Russ.)
6. Smirnova N. G. *Rentgenograficheskoe izuchenie semyan listvennykh drevesnykh introdutsirovannykh rastenii* [X-Ray Study of Seeds of Deciduous Woody Introduced Plants]. Moscow, *Nauka*, 1976, 108 p. (In Russ.)
7. Zaitsev V. A., Redkina Z. V., Grun L. B. Prospects for Radiography in the Diagnosis of Seed Quality. Selection and Seed Production. 1981, no. 7, pp. 37–38. (In Russ.)
8. Malevinsky V. E., Zaitsev V. A., Redkina Z. V. *Vliyanie srokov khraneniya na energiyu prorastaniya im vskhozhest' semyan dvukistochnika trostnikovogo* [The Influence of Storage Time on the Germination Energy of the Germination of Seeds of Two-Source Reed]. *Sbornik nauchnykh trudov LSKhI* [Collection of scientific works of the Leningrad Agricultural Institute]. 1984, p. 37. (In Russ.)
9. Zaitsev V. A., Redkina Z. V. Possibilities and Prospects of Application of the Method of X-Ray Analysis of Agricultural Seeds. *Electronic industry*. 1987, ser. 4, iss. 2, p. 117. (In Russ.)
10. Redkina Z. V., Zaitsev V. A., Arkhipov M. V. Radiography with Direct X-Ray Magnification on the REIS-I Emitter for the Diagnosis of Completion, Injury and Infection of Seeds. Bot. garden AN Lat. SSR, ecological problems of seed research of introduced species: Abstracts. Riga, 1984, p. 105. (In Russ.)
11. Ivanov S. A., Shchukin G. A. *Rentgenovskie trubki tekhnicheskogo naznacheniya* [X-Ray Tubes for Technical Purposes]. Leningrad, *Energoatomizdat*, 1989, 200 p. (In Russ.)
12. Andrushchenko L. G., Arkhipov M. V., Grun L. B., Ioffe Yu. K., Redkina Z. V., Fedorak N. A. Portable Micro-focus X-Ray Apparatus for Diagnostics of Seeds and Grains. *Electronic Industry*. 1983, vol. 11 (128), pp. 31–34. (In Russ.)
13. Pechenova T. V., Smirnova N. G., Kholodova V. K. The Use of Radiography in the Study of Seed Quality. *Sugar Beet*. 1985, no. 10, pp. 38–39. (In Russ.)
14. Savin V. N., Arkhipov M. V., Badenko A. L., Badenko A. L., Ioffe Yu. K. Radiography to Identify Internal Injuries and their Influence on the Yielding Qualities of Seeds. *Vestn. s.-kh. Nauk*. 1981, no. 10 (301), pp. 99–104. (In Russ.)
15. Savin V. N., Kondrashova M. D., Arkhipov M. V. Influence of Various Types of Damage to Barley Seeds on Their Sowing Qualities and Yielding Properties. Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 1995, no. 3, pp. 5–7. (In Russ.)
16. Savin V. N., Arkhipov M. V., Gusakova L. P. Viability of Vegetable Seeds in Case of Internal Damage. *Agrarian Science*. 1997, no. 2, pp. 23–25. (In Russ.)
17. Arkhipov M. V., Gusakova L. P., Alferova D. V. Radiography of Plants in Solving Problems of Seed Science and Seed Production. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011, no. 22, pp. 336–341. (In Russ.)
18. Arkhipov M. V., Potrakhov N. N. *Mikrofokusnaya rentgenografiya rastenii* [Microfocus Radiography of Plants]. SPb, *Tekhnolit*, 2008, 192 p. (In Russ.)
19. Velikanov L. P. X-ray Analysis of Internal Damage to Wheat and Barley Seeds. Agrophysical methods and devices. Plants and Their Habitat. 1997, vol. 3, pp. 234–254. (In Russ.)
20. Velikanov L. P., Grundas S., Arkhipov M. V., Demianichuk A. M., Gusakova L. P. Agrophysical Direction of Further Development and Application of X-Ray Method. Proc. of Intern. Conf. on New Trends in Agrophysics. Lublin, Poland, 10–11 June 2008, pp. 147–148.
21. 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, pp. 355–361.
22. 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, iss. 1, pp. 49–56. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.01.016

23. Bruggink H., Duijn B. X-Ray Based Seed Analysis. Seed Testing International. 2017, no. 153, pp. 45–50.
24. França-Silva F., de Carvalho M. L. M., Carvalho G. A., de Andrade D. B., de Souza V. F., Marques E. R. Radiographic Analysis to Test Maize Seeds for the Presence of Sitophilus Zea Mais (Coleoptera: Curculionidae). Seed Science and Technology. 2019, vol. 47, no. 3, pp. 249–260. doi: 10.15258/sst.2019.47.3.02
25. 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. Seed Science and Technology. 2009, vol. 37, pp. 110–120. doi: 10.15258/sst.2009.37.1.13
26. Bino R. J., Aartse J. W., Van Der Burg W. J. Non destructive X-Ray of Arabidopsis Embryo Mutants // Seed Science Research. 1993, vol. 3, iss. 3, pp. 167–170. doi: 10.1017/S0960258500001744
27. Dell'Aquila A. Pepper Seed Germination Assessed by Combined X-Radiography and Computer-Aided Imaging Analysis. Biologia Plantarum. 2007, vol. 51, pp. 777–781. doi: 10.1007/s10535-007-0159-9
28. Gagliardi B., Marcos-Filho J. Relationship between Germination and Bell Pepper Seed Structure Assessed by the X-Ray Test. Scientia Agricola. 2011, vol. 68, no. 4, pp. 411–416. doi: 10.1590/S0103-90162011000400004
29. Musaev F. B., Potrakhov N. N., Arkhipov M. V. Rentgenografiya semyan ovoshchnykh kul'tur [X-Ray of Vegetable Seeds]. SPb, Izd-vo SPbGETU LETI, 2016, 207 p. (In Russ.)
30. Porsch F. Automated Seed Testing by 3D X-Ray Computed Tomography. Seed Science and Technology. 2020, vol. 48, no. 1, pp. 73–81. doi: 10.15258/sst.2020.48.1.10
31. Potrakhov N. N., Obodovsky A. V., Bessonov V. B., Potrakhov E. N., Guk K. K. X-Ray Tomography. Photonics Russia. 2019, vol. 13, no. 7, pp. 688–693. (In Russ.) doi: 10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.688.692
32. Bessonov V. B., Larionov I. A., Obodovsky A. V. Features of the Development of Software and Hardware Systems for MicroCT. Physical Bases of Instrumentation. 2019, vol. 8, no. 4(34), pp. 23–33. (In Russ.) doi: 10.25210/jfop-1904-023033
33. Potrakhov N. N., Beletskiy S. L., Arkhipov M. V. Hardware and Software Complex for Grain Quality Control Based on the Mobile X-Ray Diagnostic Unit PRDU-02. Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki. 2018, no. 4 (16), pp. 152–159. (In Russ.) doi: 10.25637/TVAN2018.04.14
34. Musaev F. B., Beletskiy S. L., Potrakhov N. N. A Brief Atlas of Radiographic Signs of Vegetable Seeds. Moscow, DeLi plus, 2018, 52 p.

Information about the authors

Farhad B. O. Musaev, Dr Sci (Agricultural) (2019), Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC). The author of 120 scientific publications. Area of expertise: seed science of vegetable crops, radiography and digital morphometry of seeds
Address: Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Vegetable Center, 14 Seleksionnaya St., VNISSOK 143072, Russia
E-mail: musayev@bk.ru
<https://orcid.org/000-0001-9323-7741>

Sergey L. Beletskiy, Cand. Sci. (Eng.) (2004), assistant professor (2008), Scientific Secretary of Federal State Government Financed Institution Scientific Research Institute of Storage Problems Federal Agency of State Reserves (FGFI SRISP Rosreserv). The author of 300 scientific publications. Area of expertise: new methods of testing food products and raw materials, technologies for long-term storage of food products and raw materials.
Адрес: FGFI Scientific Research Institute of Storage Problems Federal Agency of State Reserves, 40/1 Voloch-aevskaia St., Moscow 111033, Russia
E-mail: grain-miller@yandex.ru