

ИНТРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА: СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Н. С. Прияткин¹, М. В. Архипов¹, Л. П. Гусакова¹, Н. Н. Потрахов², Г. И. Кропотов³,
И. А. Цибизов³, И. А. Винеров³

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14;

²ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5;

³ООО «Тидекс», 194292, Санкт-Петербург, ул. Домостроительная, д. 16

E-mail: prini@mail.ru

Поступила в редакцию 13 октября 2017 г., принята к печати 28 мая 2018 г.

В статье приведен обзор интроскопических методов исследования качества семенного материала: мультиспектральная визуализация, лазерная фотометрия, метод фосфоресценции, микрофокусная рентгенография, компьютерная микротомография, магнитно-резонансная микротомография, газоразрядная визуализация, терагерцовая визуализация. Описаны принципы методов, технические и программные средства их реализации и основные технические параметры приборов, используемых при исследовании качества семенного материала. Дана сравнительная характеристика интроскопических методов с учетом сформулированных критериев: сохранение жизнеспособности объекта; исследование как воздушно-сухих семян, так и проростков; получение характеристик индивидуального семени; возможность работы с семенами любых культур; объективизация проводимых наблюдений; исследование дополнительных (например биохимических) характеристик семян; быстрота измерений и обработки данных; бюджетность методики. Приведены основные направления потенциального применения интроскопических методов в семеноведении и промышленном семеноводстве: предпосевная экспресс-оценка качества семенного материала; контроль качества продовольственного зерна при уборке и закладке на хранение; входной и выходной контроль товарных партий зерна при их закладке на ответственное хранение и при освежении; оценка эффективности и корректировка агротехнологий; прогнозирование всхожести и биопродуктивности растений; фундаментальные исследования в семеноведении.

Ключевые слова: интроскопия семян, способы измерений, качество семенного материала.

INTROSCOPIC METHODS OF SEED QUALITY EVALUATION: STATE OF PROBLEM AND PROSPECTS OF REALIZATION

N. S. Priyatkin¹, M. V. Arkhipov¹, L. P. Gusakova¹, N. N. Potrakhov², G. I. Kropotov³,
I. A. Tzibizov³, I. A. Vinerov³

¹Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220;

²First Electrotechnical University «LETI», 5, Professora Popova St., St. Petersburg, 197376;

³Tydex LLC, 16, Domostroitel'naya str., St. Petersburg, 194292

E-mail: prini@mail.ru

The paper presents a review of introspective methods for seed quality evaluation: multispectral visualization, laser photometry, phosphorescence method, microfocus X-ray, computer microtomography, magnetic resonance imaging, gas-discharge visualization, terahertz imaging. The paper describes the main principles of the methods, hardware and the software for their realization and the key technical parameters of devices used in the evaluation of seed quality. The comparative characteristic of the introspective methods is given considering the following formulated criteria: maintaining of the object viability; the study of both air-dried seeds and seedlings; obtaining characteristics of an individual seed; possibility of working with seeds of any crops; objectification of the observations; possibilities to study additional (for example, biochemical) characteristics of seeds; speed of measurements and data processing; the cost of technique. The main directions of the potential application of introspective methods in seed breeding and industrial seed production are following: pre-sowing express assessment of seed quality; quality control of food grain during harvesting and storage; input and output control of grain consignments at storage and refreshing; assessment of efficiency and correction of agrotechnologies; forecasting of germination and bioproductivity of plants; fundamental researches in seed breeding.

Key words: introscopy of seeds, measurements, seed quality.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное семеноводство является одной из важнейших составляющих производства любой растительной продукции. Начиная с момента подготовки к посеву и до уборки, а также в процессе хранения семена подвергаются воздействию техногенных и средовых факторов (протравливание, воздействие патогенных организмов и вредителей, механические травмы при уборке и сушке, нарушение режимов хранения). В результате таких воздействий конечный продукт – посевной материал – может содержать различного вида дефекты и аномалии, что негативно отражается на его качестве.

Существует ряд стандартных тестов, регламентированных ISTA (International Seed Testing Association). Все они позволяют оценить параметры состояния семян только в лабораторных условиях. На данный момент существует незначительное количество методов, при помощи которых возможно прогнозировать дальнейшее развитие растений в полевых условиях. В связи с этим важнейшей проблемой, требующей решения, является прогноз полевой всхожести семян и хозяйственной урожайности растений на основании комплексной интроскопической оценки качества семенного материала с использованием экспресс-методик и технологий, основанных, в частности, на последних достижениях биофизики.

Целью данной работы является обзор существующих в отечественной и мировой практике интроскопических методов контроля качества семенного материала, в том числе разрабатываемых и применяемых в секторе биофизики растений Агрофизического НИИ.

Метод рентгенографии занимает особое место среди существующих научных методов оценки качества семенного материала, поскольку он является методом, включенным в отечественные и зарубежные стандарты.

Основными задачами работы являлись:
 – систематизация информации об интроскопических методах в семеноводстве;
 – проведение сравнительного анализа потенциальной эффективности применения неразрушающих методов в семеноводческой практике.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Мультиспектральная визуализация

Наиболее простым способом получения изображений семян является их съемка в видимом диапазоне. Для этого может применяться как стереомикроскоп для работы по методу светлого поля в падающем свете в комплекте с видеокамерой, так и цифровое сканирование (с использованием обычного сканера). Метод позволяет визуализировать некоторые структурные дефекты семян, например щуплость и поврежденность клопом «вредная черепашка» (Капусткина, 2009).

Метод промышленной сепарации семян по их цветовым параметрам реализован в оптических сортировщиках (фотосепараторах) Ф5.1, Ф10.1, Ф15.1, Ф20.1 производства ООО «Воронежсельмаш» (Россия). В основе работы прибора лежит принцип освещения объекта светом различных длин волн видимого и ближнего инфракрасного диапазона.

Другим перспективным методом является микроскопия в проходящем свете в ближнем инфракрасном диапазоне. Метод позволяет выявлять некоторые структурные дефекты семян, в частности, поврежденность зерна клопом «вредная черепашка» (Вилкова и др., 1976; Капусткина, 2009).

Для определения физиологической зрелости покоящихся семян применяется метод, основанный на флуоресценции хлорофилла (Jalink, Frandas et al., 1998). Используется свет от флуоресцентного светодиодного источника освещения (длина волны 656 нм), который падает на объект (семя). Далее определяется интенсивность флуоресцентного сигнала и его спектральное распределение (рис. 1).

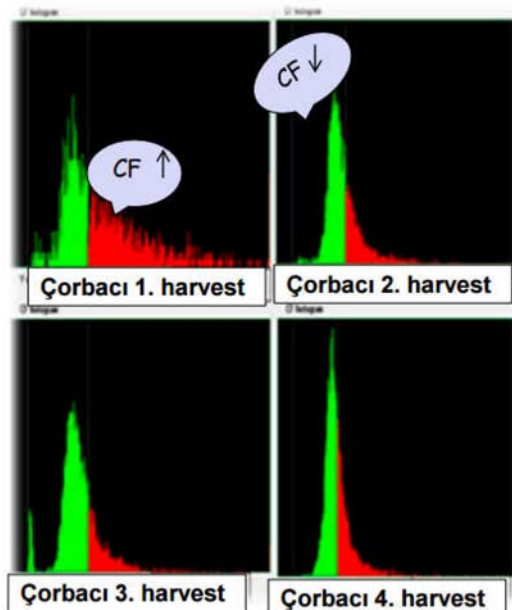


Рис. 1. Спектральные характеристики семян *Brassica oleracea* с различной степенью физиологической зрелости

Стереомикроскопия является важным методом исследования геометрических и оптических свойств семян. С помощью стереомикроскопа, оснащенного блоком люминесценции, можно выявлять такие признаки разнокачественности семян, как видовая и сортовая чистота, жизнеспособность и зараженность возбудителями болезней (Люминесцентный анализ, 1961).

Наиболее мощным представляется мультиспектральный метод, реализованный в аппаратно-программном комплексе Videometer Lab производства компании Analytic Ltd (Великобритания). Прибор укомплектован 5-мегапиксельной CCD камерой, установленной внутри вершины интегрированной сферы, покрытой белым рассеивающим материалом, а также узкополосными светодиодными осветителями, расположенными внутри по периферии сферы (рис. 2). Светодиоды включаются в импульсном режиме последовательно

на разных длинах волн. Образец (семя) помещают на дно встроенной сферы и в течение 5–10 с получают мультиспектральное изображение объекта с высоким разрешением (Olesen et al., 2015). Анализ мультиспектральных снимков выполняется с использованием оригинального программного обеспечения Videometer A/S (рис. 3).

Данный метод позволяет выполнять комплексную спектральную и морфометрическую оценку семян, включая оценку размера, формы, цвета, топографической и спектральной текстуры, а также выявлять спектральные компоненты, связанные с химическим составом поверхности, и производить подсчет объектов изучения. Метод может служить дополнительным инструментом для определения фитосанитарного состояния, зрелости, жизнеспособности и ресурса долговечности семян.

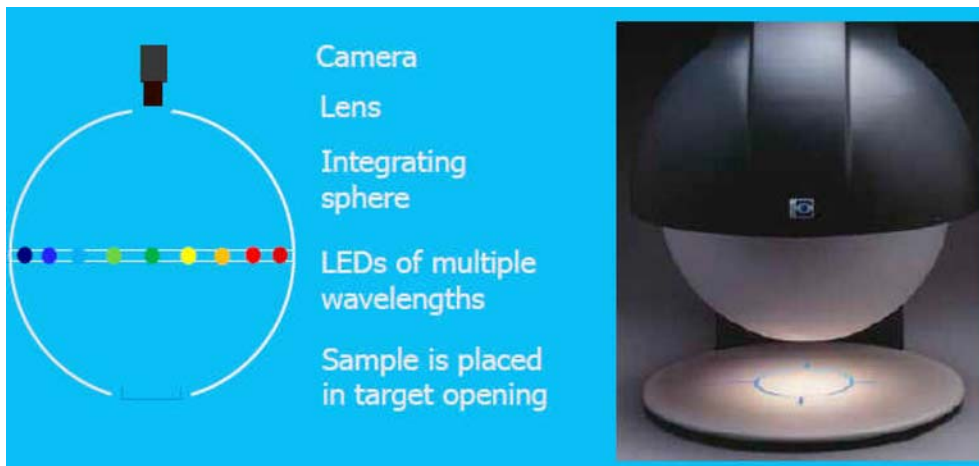


Рис. 2. Схема устройства и прибор Videometer Lab

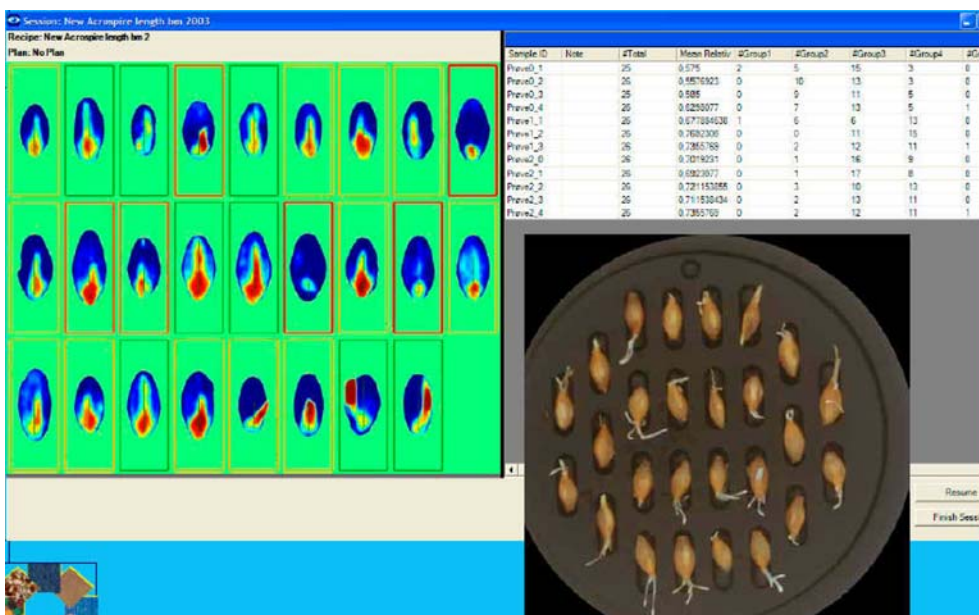


Рис. 3. Программное обеспечение Videometer A/S для мультиспектрального анализа изображений семян

2. Лазерная фотометрия

Одним из оптических методов, подходящих для оценки качества семенного материала, является метод лазерной фотометрии, реализованный в компьютерном портативном лазерном спектрофотометре «ЛАФОТ», предназначенном для компьютерной регистрации всех эффектов прямого взаимодействия монохроматического излучения с длиной волны 732,8 нм с объектами живой природы, в частности, семенами (Лискер и др., 2000) (рис. 4).



Рис. 4. Портативный компьютерный лазерный фотометр «ЛАФОТ»

Особенность прибора заключается в одновременной регистрации значений четырех компонентов излучения (Вт М^{-2}), взаимодействующего с объектом исследования: падающего, отраженно диффузного, отраженно зеркального, поглощенного. При этом одновременно с величинами излучений отдельно измеряются по азимуту 360° доли диффузно отраженного излучения под различными углами наклона. Реализация алгоритмов физического исследования и переработки первичной и вторичной информации осуществляется при помощи компьютера через блок сопряженного с ним экспериментального устройства.

Используемая мощность источника излучения не изменяет свойства объекта в ходе проведения эксперимента. Общее время снятия показаний с одного объекта с учетом его размещения и изъятия из устройства не превышает 10–15 с, а полученные данные (в том числе по индикатрисам рассеяния) выводятся в виде текстового файла, что значительно облегчает дальнейший статистический анализ.

Метод позволяет выявить различия в оптической структуре семян, вызванные, в том числе, различной сортовой принадлежностью и неодинаковым физиологическим состоянием, обусловленным, в частности, заражением возбудителями грибных (Дмитриев, Лискер, 2007) и вирусных болезней семян, включая вирус табачной мозаики. В перспективе данный метод может стать основой для разработки технологии автоматизированного неразрушающего анализа и отбора семенного материала.

3. Метод флуоресценции

В отличие от флуоресценции, фосфоресценция – это процесс, при котором энергия, поглощенная веществом, высвобождается в виде света относительно медленно.

Фосфоресценцию при комнатной температуре (ФКТ) воздушно-сухих и набухающих семян можно

регистрировать при помощи установки с двухдисковым фосфороскопом. Объект освещается импульсами видимого света (6 мс свет, 24 мс темнота) от галогенной лампы КГМ-150. Послесвечение регистрируется в интервале 3–18 мс после прекращения освещения в видимой части спектра. Сигнал с фотоумножителя поступает сначала на усилитель (рН-340), а затем на самописец. Кинетика затухания свечения регистрируется в миллисекундной временной области на осциллографе с памятью (Веселова, 2008).

При помощи регистрации ФКТ у воздушно-сухих семян до проращивания можно прогнозировать изменение их всхожести после предпосевного воздействия факторов различной природы в малых дозах (тепловое и ионизирующее излучение, акустическое воздействие, электрическое поле коронного разряда, комбинированное магнитное поле, лазерное излучение) (Козарь, 2005; Веселова, 2008).

4. Микрофокусная (мягколучевая) рентгенография

Метод мягколучевой микрофокусной рентгенографии на протяжении многих лет успешно применяется как в России (Архипов, Потрахов, 2008; Мусаев, Курбакова, 2011), так и за рубежом (Burg et al., 1995; Moreira et al., 1999; Gomes-Junior et al., 2012; Silva et al., 2013). С 1976 г. метод включен в международные и отечественные стандарты, в первую очередь по оценке зараженности и поврежденности зерна вредителями. С его помощью можно обнаруживать различные структурные дефекты семян, такие как трещиноватость, энзимомикозное истощение (ЭМИС), внутреннее прорастание, скрытая заселенность вредителями, повреждение клопом «вредная черепашка», механические травмы и дефектность зародыша, пустозернистость. Данная методика подходит для исследования различных по плотности и размеру семян.

Получение рентген-снимков зерен (рис. 5) осуществляется при помощи передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 (организация-разработчик и предприятие изготовитель ЗАО «Элтех-Мед», Санкт-Петербург, Россия, www.eltech-med.com).



Рис. 5. Передвижная рентгенодиагностическая установка ПРДУ-02

Перспективным направлением является использование существующего и разработка нового программного обеспечения для автоматического анализа снимков семян. В частности, измерение морфометрических и оптических параметров рентгенограмм, характеризующих степень плотности эндосперма, может быть выполнено с помощью программного обеспечения для морфометрического анализа изображений производства ООО «АргусСофт» (Санкт-Петербург, Россия,

www.argussoft.org) (рис. 6). При этом анализируются следующие характеристики рентгенограмм зерен (в частности, пшеницы): площадь проекции (см²), периметр (см), длина (см), ширина (см), округлость (отн. ед.), удлиненность (отн. ед.), средняя яркость (ед. яркости), отклонение яркости (ед. яркости), оптическая плотность (отн. ед.), интегральная оптическая плотность (ед. яркости) и изрезанность (отн. ед.).

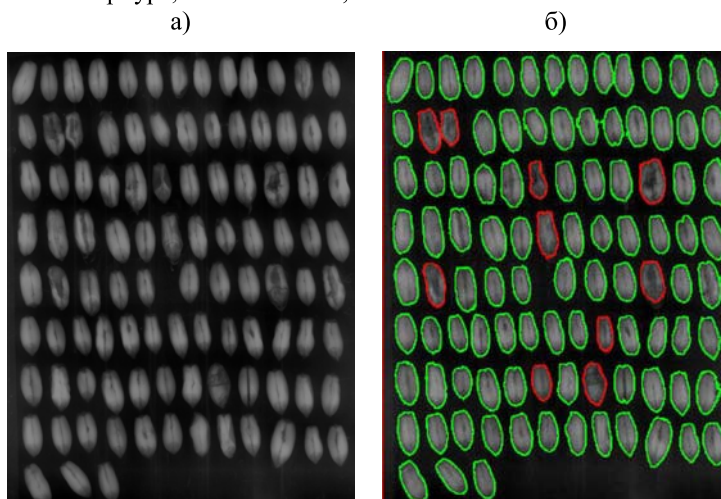


Рис. 6. Рентгенограмма зерновок яровой мягкой пшеницы (а) и пример ее программной количественной обработки (б)

5. Компьютерная микротомография

Используемый в настоящее время метод микрофокусной проекционной рентгенографии (Архипов, Потрахов, 2008) не всегда позволяет детально визуализировать дефекты семян, так как обнаружение дефекта во многом зависит от расположения семени на приемнике излучения. Поэтому микротомографический метод с возможностью получения с разного ракурса множества проекций и сечений позволяет существенно дополнить метод проекционной рентгенографии.

Метод компьютерной микротомографии позволяет получить объемное изображение внутренней структуры зерновки (Del Nobile et al., 2015), а также визуализировать некоторые структурные дефекты, в частности, трещиноватость,

поврежденность клопом «вредная черепашка» и внутреннее прорастание (Arkhipov et al., 2015).

Аппаратное обеспечение метода представлено рентгеновским микротомографом Bruker SkyScan 1172 в комплекте с программным обеспечением CTVox и DataViewer для представления микротомографических изображений в формате 3D и построения виртуальных сечений. Метод микротомографии позволяет осуществлять съемку с пространственным разрешением 2,5–2,6 мкм, а угол вращения 0,3–0,4 градуса обеспечивает получение множества проекций.

На рис. 7 представлено томографическое изображение виртуальных сечений зерновки пшеницы с различными структурными дефектами. Исследования выполнены в Ресурсном центре «Геомодель» СПбГУ.

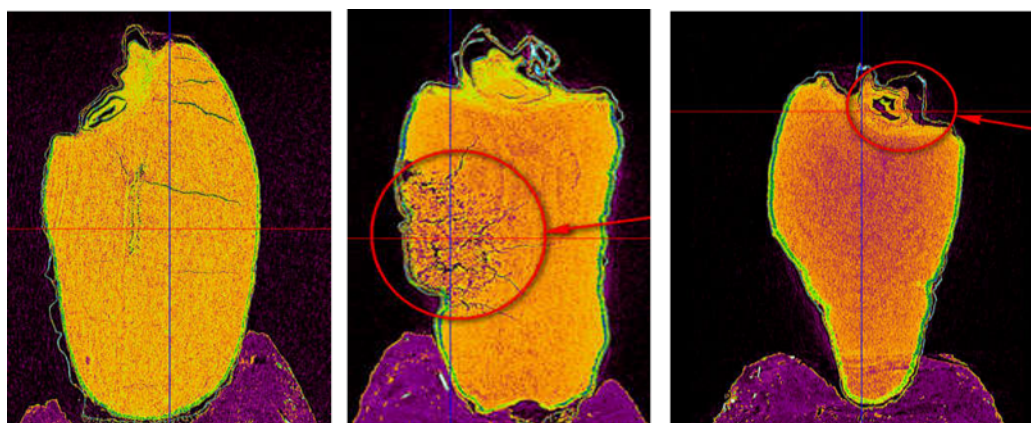


Рис. 7. Томографическое изображение виртуальных сечений зерновки пшеницы с различными структурными дефектами: а) микротрещины; б) поврежденность клопом «вредная черепашка»; в) внутреннее прорастание

Метод компьютерной микротомографии имеет очевидные преимущества по сравнению с проекционной микрофокусной рентгенографией, а именно:

- разрешение позволяет детально визуализировать все дефекты, а также органы семени;
- возможность получения неограниченного числа виртуальных сечений (проекций), что гарантирует визуализацию дефекта.

Вместе с тем существуют и очевидные ограничения, в частности, низкая производительность аппаратуры. Съемка одной зерновки с заданным разрешением занимает 25 минут, что позволяет проводить только точечный анализ выборки из партии семян. Следует отметить также высокую стоимость аппаратно-программного комплекса. Отечественные аналоги – микрофокусные рентгеновские компьютерные томографы семейства МРКТ (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед») – при сходных параметрах получаемых томограмм имеют на порядок большую производительность и меньшую стоимость (Bessonov et al., 2017).

6. Магнитно-резонансная микротомография

Появление метода магнитно-резонансной микротомографии, или ЯМР-томографии, относится к середине 1980-х гг. (Callaghan et al., 1991). Он основан на импульсном методе ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). В начале данный метод получил практическое применение в медицине. В настоящее время он широко используется для диагностики костной патологии, травм мышц и сухожилий, обнаружения опухолей, оперативного контроля при лечении заболеваний, а также при изучении функциональной активности головного мозга. Современные методики позволяют получать изображения внутренней структуры исследуемых объектов с разрешением до 100 мкм и изучать протекающие в них процессы. Основное преимущество метода ЯМР заключается в том, что в нем не используется ионизирующее излучение, что делает установку ЯМР-томографии совершенно безвредными для объектов исследования.

Особенно целесообразно использование ЯМР при исследовании пористых материалов, содержащих жидкости (Коптюг, Сагдеев, 2002), какими являются ткани растений. С помощью приборной базы Avance-300 MHz NMR Spectrometer (Bruker, Германия) можно получать МРТ-изображения (магнитно-резонансные микротомографические изображения) стеблей, корневой системы и семян с различным содержанием воды, в процессе набухания, а также при температурах до -30°C . Метод позволяет получать изображения отдельных срезов, глубина и ориентация которых задаются оператором.

Магнитно-резонансная микротомография (МРТ) может успешно использоваться при исследовании онтогенеза растений, а также при решении многих вопросов, связанных с контролем водного режима (Виноградова, Фалалеев, 2010). Особенно перспективно использовать данный метод

при исследовании семян, поскольку их водный статус в период набухания и прорастания может оказывать влияние на последующее развитие и рост растений. Распределение воды может иметь важное значение не только для процессов прорастания, но и для оценки качества семян.

Зарубежными исследователями (Foucat et al., 1993) было установлено, что использование МРТ позволяет более детально изучить морфологические особенности (семядоли и сосудистые пучки) исследуемых объектов по сравнению с рентгенографией.

7. Газоразрядная визуализация

Метод газоразрядной визуализации (ГРВ) позволяет регистрировать и количественно оценивать свечение, возникающее вблизи поверхности объекта (семени) при помещении его в электромагнитное поле высокой напряженности.

Принцип метода заключается в следующем (рис. 8). Между плоским стеклянным электродом 2, на котором размещается объект исследования 1, и плоским электродом заземления 13, на который устанавливается металлический тест-объект 12, подаются импульсы напряжения длительностью 10 мкс от высоковольтного генератора электромагнитного поля 5. При высокой напряженности поля в газовой среде пространства контакта объекта 1 и плоского стеклянного электрода 2 развивается лавинный и/или скользящий разряд, параметры которого определяются свойствами объекта. Свечение разряда с помощью оптической системы 6–8 преобразуется в видеосигналы, которые записываются в виде одиночных кадров (ВМР-файлов), каждый из которых представляет собой пространственно распределенную группу участков свечения различной яркости на компьютере 9.

Аппаратное обеспечение метода представлено серийным прибором «ГРВ Камера» (рис. 9), организация-разработчик и предприятие-производитель – ООО «Биотехпрогресс» (Санкт-Петербург, www.ktispb.ru).

Примеры газоразрядных изображений семян некоторых видов растений приведены на рис. 10. Программная обработка осуществляется в программе «ГРВ научная лаборатория» (рис. 11).

Метод позволяет выявлять некоторые структурные дефекты семян (невыполненность) (Архипов и др., 2013), а также функциональные изменения семян, обусловленные их сортовой принадлежностью и энзимомикозным истощением (Прияткин и др., 2006).

Наиболее перспективным является использование данного метода для оценки биопродуктивности растений на ранних этапах онтогенеза (Прияткин и др., 2015), а также для исследования процессов, происходящих при послеуборочном дозревании семян.

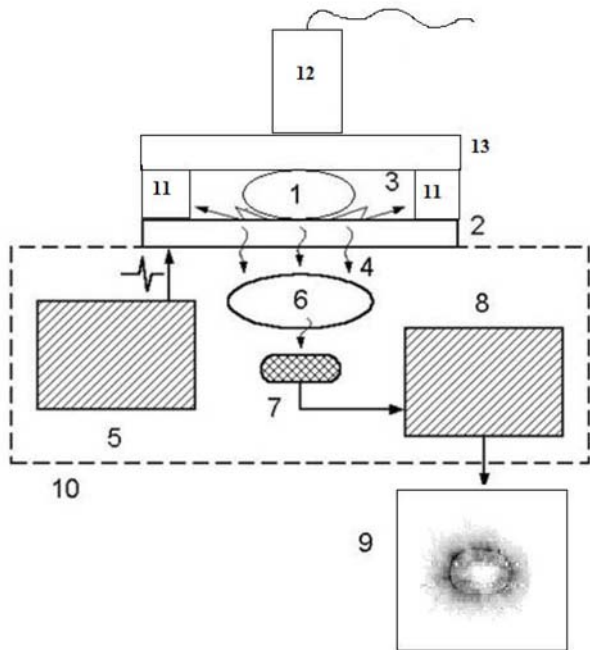


Рис. 8. Схематическое изображение прибора для исследования характеристик газоразрядного свечения:
 1 – объект исследования (семя); 2 – плоский стеклянный электрод; 3 – газовый разряд;
 4 – оптическое излучение; 5 – генератор; 6 – оптическая система; 7,8 – видеопреобразователь;
 9 – компьютер; 10 – корпус; 11 – непрозрачная диэлектрическая пластина; 12 – металлический тест-объект; 13 – плоский электрод заземления



Рис. 9. Прибор для инициации и регистрации газоразрядного свечения «ГРВ Камера Про»

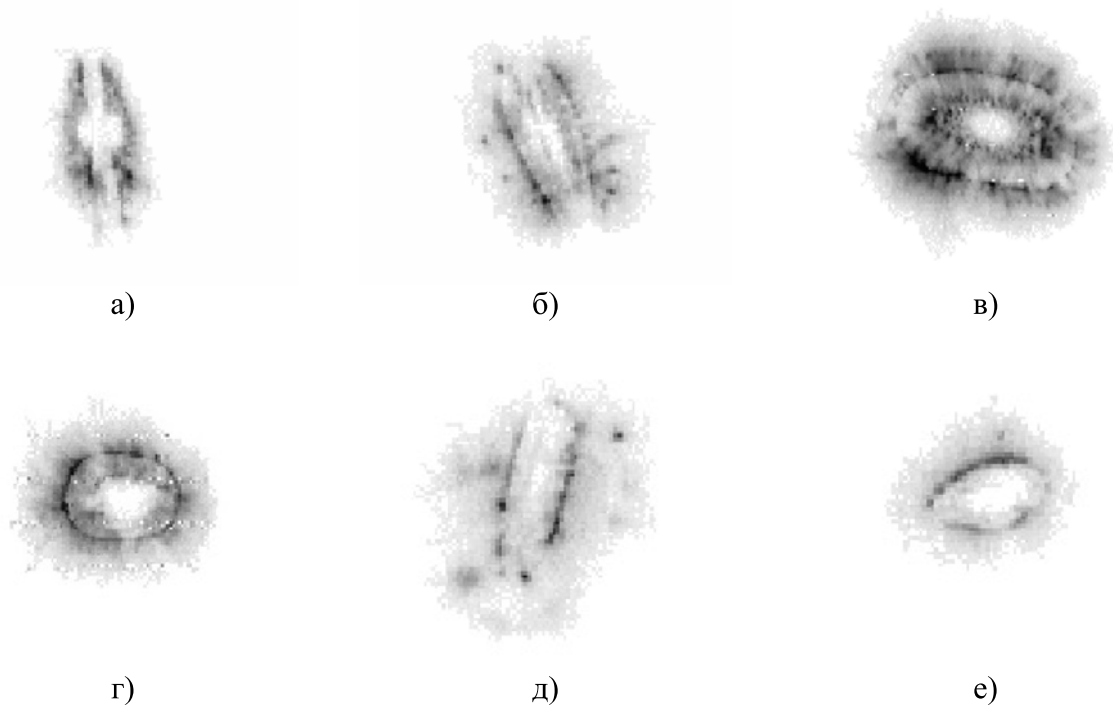


Рис. 10. Примеры инвертированных газоразрядных изображений семян некоторых культур:
 а) яровая твердая пшеница; б) овес; в) фасоль; г) маш (вигна); д) топинамбур; е) ель обыкновенная

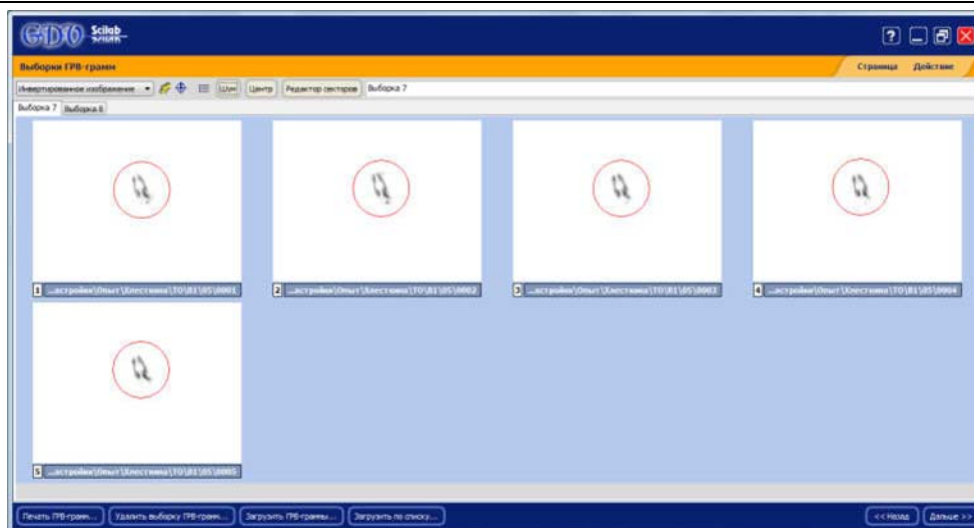


Рис. 11. Окно программного обеспечения «ГРВ научная лаборатория» для работы с семенами различных видов растений

8. Терагерцовая визуализация

Терагерцевое (или терагерцовое, также ТГц) излучение – вид электромагнитного излучения, спектр частот которого расположен между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами. Границы между ними в различных источниках определяются по-разному. Максимально допустимый диапазон ТГц частот $0,1 \cdot 10^{12} - 10 \cdot 10^{12}$ Гц ($3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$ Гц), диапазон длин волн 1,0–0,1 мм (от 30 мкм до 3 мм) соответственно. ТГц — неионизирующее излучение, оно легко проходит сквозь большинство диэлектриков, но сильно поглощается некоторыми из них, а также проводящими материалами. Например, дерево, пластик, керамика для него прозрачны, а металл и вода – нет. В последнее время метод терагерцовой визуализации стремительно развивается и имеет

значительные перспективы для применения в разных отраслях народного хозяйства. Появились данные о возможности использования метода терагерцовой визуализации для определения сортовой чистоты семян (Lu et al., 2005), качества семенного материала (Ge et al., 2014), а также сверххранного прогнозирования лабораторной всхожести семян (Jiang et al., 2016). Метод визуализации семян в терагерцовом диапазоне позволяет улавливать происходящие при прорастании семян изменения уже спустя 6 часов после их замачивания (Jiang et al., 2016).

На рис. 12 представлены изображения семян сои спустя 16 часов после замачивания.

Перспективным является также анализ спектральных характеристик порошковой фракции семян в терагерцовом диапазоне (Jiang et al., 2016).

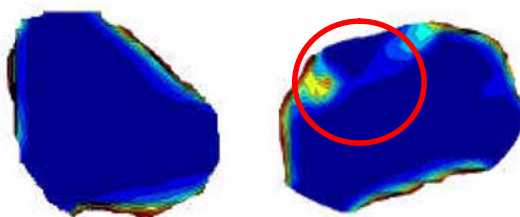


Рис. 12. Терагерцовое изображение невосхожего (слева) и восхожего (справа) семени сои спустя 16 часов после намачивания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных физических методов позволил сформулировать следующие критерии, по которым можно судить о потенциальной пригодности интроскопических методик для использования в практике семеноведения и промышленного семеноводства:

- 1) сохранение жизнеспособности объекта;
- 2) исследование как воздушно-сухих семян, так и проростков;
- 3) получение характеристик индивидуального семени;
- 4) возможность работы с семенами любых культур;
- 5) объективизация проводимых наблюдений;

- 6) исследование дополнительных (например, биохимических) характеристик семян;
- 7) быстрота измерений и обработки данных;
- 8) бюджетность методики.

На основании указанных критериев можно следующим образом оценить потенциальную пригодность некоторых интроскопических методик для использования в семеноведении и промышленном семеноводстве (табл.). Исходя из приведенных в таблице характеристик, можно сделать заключение, что метод микрофокусной рентгенографии наиболее соответствует предъявляемым критериям и поэтому может считаться наиболее адаптированным для практического применения.

Таблица. Сравнительная характеристика некоторых физических методов исследования разнокачественности семенного материала

Критерии оценки	Методика			
	микро-фокусная рентгено-графия	компью-терная микро-томография	газораз-рядная визуали-зация	тера-герцовая визуали-зация
1. Сохранение жизнеспособности объекта	+	+	+	–
2. Исследование как сухих семян, так и проростков	+	+	+	–
3. Получение характеристик индивидуального семени	+	+	+	+
4. Возможность работы с семенами любых культур	+	+	–	+
5. Объективизация проводимых наблюдений	+	+	+	+
6. Исследование дополнительных характеристик семян	–	–	–	+
7. Быстрота измерений и обработки данных	+	–	+/-	+/-
8. Бюджетность методики (стоимость оборудования)	+/-	–	+	–

Вместе с тем следует отметить, что метод терагерцовой визуализации является единственным из перечисленных методов, позволяющим дополнительно анализировать биохимический состав семян.

Разработка новых, а также совершенствование существующих методов интроскопической оценки семенного материала позволит в будущем применять их для решения следующих задач управляемого семеноводства:

– предпосевная экспресс-оценка качества семенного материала в системе Россельхозцентра;

– контроль качества продовольственного зерна при уборке и закладке на хранение в системе Росрезерва;

– входной и выходной контроль товарных партий зерна при их закладке на ответственное хранение и при освежении;

– оценка эффективности и корректировка агротехнологий (режимов уборки, сушки, минерального питания, химических и физических обработок и др.);

– прогнозирование всхожести и биопродуктивности растений в естественных и регулируемых условиях;

– фундаментальные исследования в семеноведении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипов М. В., Потрахов Н. Н. Микрофокусная рентгенография растений. СПб.: Технолит, 2008. 192 с.
- Архипов М. В., Прияткин Н. С., Бондаренко А. С. Применение методов мягколучевой рентгенографии и газоразрядной визуализации для оценки качества семян ели европейской // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2013. № 31. С. 62–66.
- Веселова Т. В. Изменение состояния семян при их хранении, проращивании и под воздействием внешних факторов (ионизирующего излучения в малых дозах и других слабых воздействий), определяемое методом замедленной люминесценции. Автореф. дисс. доктора биол. наук. М., 2008. 48 с.
- Вилкова Н. А., Шапиро И. Д., Борщова Т. А. Использование инфракрасной микроскопии для диагностики повреждения и устойчивости зерновок к клопам // Методы исследований патологических изменений растений. М.: Колос, 1976. С. 216–219.
- Виноградова И. С., Фалалеев О. В. Применение магнитно-резонансной микротомографии для исследования внутреннего строения растений // Сельскохозяйственная биология. 2010. № 3. С. 118–124.
- Дмитриев А. П., Лискер И. С. Физические свойства семян пшеницы, пораженных фузариозом // Приложение к журналу «Вестник защиты растений» «Лаборатория микологии и фитопатологии им. А. А. Ячевского ВИЗР. История и современность». СПб., 2007. С. 136–141.
- Капусткина А. В. Морфофизиологические особенности прорастания зерновок озимой пшеницы при их повреждении вредной черепашкой // Вестник защиты растений. 2009. № 4. С. 39–47.
- Козарь В. И. Разработка и применение люминесцентного метода для экологического анализа качества семян. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М., 2005. 24 с.
- Коптюг И. В., Сагдеев Р. З. Применение метода ЯМР-томографии для исследования процессов транспорта вещества // Успехи химии. 2002. Т. 71. № 10. С. 899–949.
- Лискер И. С., Дмитриев А. П., Цыплаков А. Е., Дмитриева О. М., Зотов И. О., Болотников Р. В. Фотометрическое изучение семян томатов // Докл. РАСХН. 2000. № 2. С. 9–13.
- Люминесцентный анализ. Сборник статей / Под ред. М. А. Константиновой-Шлезингер. М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1961. 400 с.

- Мусаев Ф. Б., Курбакова О. В., Курбаков Е. Л., Архипов М. В., Великанов Л. П., Потрахов Н. Н.. Применение рентгенографического метода в семеноведении овощных культур // Гавриш. 2011. № 1. С. 44–46.
- Прияткин Н. С., Архипов М. В., Гусакова Л. П. Комплексный анализ морфометрических и оптических параметров рентгенограмм, характеристик газоразрядного свечения и ростовых показателей образцов зерен ячменя // Материалы VII международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». Санкт-Петербург, 07–11 сентября 2015 г. СПб., 2015. 190 с.
- Прияткин Н. Н., Коротков К. Г., Куземкин В. А., Дорофеева Т. Б. Исследование влияния окружающей среды на состояние растений на основе метода ГРВ биоэлектрографии // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 2. С. 67–72.
- Arkhipov M. V., Priyatkin N. S., Gusakova L. P., Kulkov A. M. Visualization of internal structural defects of wheat seeds using micro CT // Micro CT User Meeting. Abstract Book. Brugge, Belgium, 2015, pp. 177–179.
- Bessonov V. B., Klonov V. V., Larionov I. A., Obodovskiy A. V. An investigation of radiation instability on reconstruction quality in tomography // Journal of Physics: Conference Series 872 012054, 2017, v. 872, iss. 1, pp. 1–4. DOI:10.1088/1742-6596/872/1/012054.
- Burg W. J. van der, Jalink H., Zwol R. A. van, Aartse J. W., Bino R. J. Non-destructive seed evaluation with impact measurements and X-ray analysis // Acta Horticulturae, 1995, v. 362, pp. 149–157.
- Callaghan P. T., Coy A., MacGowan D., Packer K. J., Zelaya F. O. Diffraction-like effects in NMR diffusion studies of fluids in porous solids // Nature, 1991, v. 351, no. 6, pp. 467–469. Doi:10.1038/351467a0.
- Del Nobile M. A., Laverse J., Lampignano V., Cafarelli B., Spada A. Applications of tomography in food inspection. In book: Industrial tomography // Systems and applications, December, 2015, pp. 693–710. DOI: 10.1016/B978-1-78242-118-4.00025-3.
- Foucat L., Chavagnat A., Renou J.-P. Nuclear magnetic resonance micro-imaging and X-radiography as possible techniques to study seed germination // Scientia Horticulturae, 1993, v.55, pp.323–331.
- Ge H., Jiang Y., Xu Z., Lian F., Zhang Y., Xia S. Identification of wheat quality using THz spectrum // Opt. Express, 2014, no. 22, pp. 12533–12544.
- Gomes-Junior F. G., Yagushi J. T., Belini U. L., Cicero S. M., Tomazello-Filho M. X-ray densitometry to assess internal seed morphology and quality // Seed Science and Technology, 2012, v. 40, no. 1, pp. 102–107.
- Jalink H., Frandas A., Schoor R. van der, Bino J. B. Chlorophyll fluorescence of the testa of Brassica oleracea seeds as an indicator of seed maturity and seed quality // Sci. agric., 1998, v. 5, special issue Piracicaba. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161998000500016>.
- Jiang Y., Ge H., Lian F., Zhang Y., Xia S. Early detection of germinated wheat grains using terahertz image and chemometrics // Scientific Reports, 2016, no. 6. Article number: 21299.
- Lu M., Zhang Y., Sun J., Chen S., Li N., Zhao G., Shen J. Identification of maize seeds by terahertz scanning imaging // Chinese Optics Letters, 2005, v. 3, iss. 1, pp. 239–241.
- Moreira M. L. de, Aelst A. C. van, Eck J. W. van, Hoekstra F. A. Pre-harvest stress cracks in maize (*Zea mays* L.) kernels as characterized by visual, X-ray and low temperature scanning electron microscopical analysis: effect on kernel quality // Seed Science Research, 1999, v. 9, pp. 227–236.
- Olesen M. H., Nikneshan P., Shrestha S., Tadayyon A., Deleuran L. Ch., Boelt B., Gislum R. Viability Prediction of *Ricinus communis* L. Seeds Using Multispectral Imaging // Sensors (Basel), 2015, v. 15, no. 2, pp. 4592–4604.
- Silva V. N., Cicero S. M., Bennett M. Associations between X-ray visualised internal tomato seed morphology and germination // Seed Science and Technology, 2013, v. 41, no. 2, pp. 225–234.

REFERENCES

- Arkhipov M. V., Potraхов N. N. *Mikrofokusnaia rentgenografiia rastenii* [Microfocus x-ray plants]. Saint- Peterburg: Tekhnolit, 2008. 192 p.
- Arkhipov M. V., Priyatkin N. S., Bondarenko A. S. Primenenie metodov miagkoluchevoi rentgenografii i gazorazriadnoi vizualizatsii dlia otsenki kachestva semian eli evropeiskoi [Application of methods of Masca Lucia x-ray and gas discharge visualization to assess the quality of seeds of Norway spruce] // *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 31, pp. 62–66.
- Veselova T. V. *Izmenenie sostoiianiia semian pri ikh khraneni, proraschivanii i pod vozdeistviem vneshnikh faktorov (ioniziruiushchego izlucheniia v malykh dozakh i drugikh slabykh vozdeistvii), opredeliaemoe metodom zamedlennoi liuminesentsii*. Avtoref. diss. dokt. biol. nauk [Changing the state of seeds at their storage, sprouting and under the influence of external factors (ionizing radiation in small doses and other weak influences), defined by the method of delayed luminescence. Dr. boil. sci. abst. diss.]. Moscow, 2008. 48 p.
- Vilkova N. A., Shapiro I. D., Borshchova T. A. Ispol'zovanie infrakrasnoi mikroskopii dlia diagnostiki povrezhdeniia i ustoichivosti zernovok k klopam [The use of infrared microscopy for the diagnosis of the damage and stability of grain to bugs] // *Metody issledovaniia patologicheskikh izmenenii rastenii*. Moscow: Kolos, 1976. pp. 216–219.
- Vinogradova I. S., Falaleev O. V. Primenenie magnitno-rezonansnoi mikrotomografii dlia issledovaniia vnutrennego stroeniia rastenii [Application of nuclear magnetic resonance imaging method for research of an internal structure of plants] // *Sel'skokhoziaistvennaia biologii*, 2010, no 3, pp. 118–124.
- Dmitriev A. P., Lisker I. S. Fizicheskie svoistva semian pshenitsy, porazhennykh fuzariozom [Physical properties of wheat seeds affected by Fusarium] // *Prilozhenie k zhurnalu «Vestnik zaschity rastenii» «Laboratoriya mikologii i fitopatologii im. A. A. Yachevskogo VIZR. Istoriiya i sovremennost»*. 2007, pp. 136–141.

- Kapustkina A. V. Morfofiziologicheskie osobennosti prorastaniia zernovok ozimoi pshenitsy pri ikh povrezhdenii vrednoi cherepashkoi [Morphological and physiological features of the germination of kernels of winter wheat when they are damage to the harmful turtle] // *Vestnik zaschity rasteniy*, 2009, no. 4, pp. 39–47.
- Kozar' V. I. *Razrabotka i primeneniye liuminescentnogo metoda dlia ekologicheskogo analiza kachestva semian*. Avtoref. diss. kand. biol. nauk [Development and application of luminescence method for the environmental analysis of seed quality. Cand. biol. sci. abst. diss.]. Moscow, 2005. 24 p.
- Koptiug I. V., Sagdeev R. Z. Primeneniye metoda IaMR-tomografii dlia issledovaniia protsessov transporta veshchestva [Application of NMR tomography to mass transfer studies] // *Uspekhi khimii*, 2002, v. 71, no. 10, pp. 899–949.
- Lisker I. S., Dmitriev A. P., Tsyplakov A. E., Dmitrieva O. M., Zotov I. O., Bolotnikov R. V. Fotometricheskoe izuchenie semian tomatov [Photometric study of tomato seeds] // *Doklady Rossiyskoy Akademii selskokhozyaystvennykh nauk*, 2000, no. 2, pp. 9–13.
- Liuminestsentnyi analiz (Sbornik statei)* [Fluorescent analysis. A collection of articles] / Pod red. M. A. Konstantinovi-Shlezinger. Moscow: State publishing house of physical and mathematical literature, 1961. 400 p.
- Musaev F. B., Kurbakova O. V., Kurbakov E. L., Arkhipov M. V., Velikanov L. P., Potrakhov N. N. Primeneniye rentgenograficheskogo metoda v semenovedenii ovoshchnykh kul'tur [The application of x-ray method in the seed of vegetable crops]. *Gavrish*, 2011, no. 1, pp. 44–46.
- Priiatkin N. S., Arkhipov M. V., Gusakova L. P. Kompleksnyi analiz morfometricheskikh i opticheskikh parametrov rentgenogramm, kharakteristik gazorazriadnogo svecheniia i rostovykh pokazatelei obraztsov zeren iachmenia [Comprehensive analysis of morphometric and optical parameters of x-ray, characteristics of gas discharge glow and the growth indices of samples of grains of barley] // *Materialy VII mezhdunarodnogo kongressa «Slabye i sverkhslabye polia i izlucheniia v biologii i meditsine»*. Sankt-Peterburg, 07–11 sentiabria 2015 g. [Proceedings of the VII international Congress "Weak and hyperweak fields and radiations in biology and medicine"]. St. Petersburg, 2015. 190 p.
- Priiatkin N. N., Korotkov K. G., Kuzemkin V. A., Dorofeeva T. B. Issledovanie vliianiia okruzhaiushchei sredy na sostoianie rastenii na osnove metoda GRV bioelektrografii [A study of the influence of the environment on the condition of the plants on the basis of the method of GDV Bioelectrography] // *Izv. Vuzov. Priborostroenie*, 2006, v. 49, no. 2, pp. 67–72.
- Arkhipov M. V., Priyatkin N. S., Gusakova L. P., Kulkov A. M. Visualization of internal structural defects of wheat seeds using micro CT // *Micro CT User Meeting. Abstract Book*. Bruge, Belgium, 2015, pp. 177–179.
- Bessonov V. B., Klonov V. V., Larionov I. A., Obodovskiy A. V. An investigation of radiation instability on reconstruction quality in tomography // *Journal of Physics: Conference Series* 872 012054, 2017, v. 872, iss. 1, pp. 1–4. DOI :10.1088/1742-6596/872/1/012054.
- Burg W. J. van der, Jalink H., Zwol R. A. van, Aartse J. W., Bino R. J. Non-destructive seed evaluation with impact measurements and X-ray analysis // *Acta Horticulturae*, 1995, v. 362, pp. 149–157.
- Callaghan P. T., Coy A., MacGowan D., Packer K. J., Zelaya F. O. Diffraction-like effects in NMR diffusion studies of fluids in porous solids // *Nature*, 1991, v. 351, no. 6, pp. 467–469. DOI:10.1038/351467a0.
- Del Nobile M. A., Laverse J., Lampignano V., Cafarelli B., Spada A. Applications of tomography in food inspection. In book: *Industrial tomography // Systems and applications*. December, 2015, pp. 693–710. DOI: 10.1016/B978-1-78242-118-4.00025-3.
- Foucat L., Chavagnat A., Renou J.-P. Nuclear magnetic resonance micro-imaging and X-radiography as possible techniques to study seed germination // *Scientia Horticulturae*, 1993., v. 55, pp. 323–331.
- Ge H., Jiang Y., Xu Z., Lian F., Zhang Y., Xia S. Identification of wheat quality using THz spectrum // *Opt. Express*, 2014, no. 22, pp. 12533–12544.
- Gomes-Junior F. G., Yagushi J. T., Belini U. L., Cicero S. M., Tomazello-Filho M. X-ray densitometry to assess internal seed morphology and quality // *Seed Science and Technology*, 2012, v. 40, no. 1, pp. 102–107.
- Jalink H., Frandas A., Schoor R. van der, Bino J. B. Chlorophyll fluorescence of the testa of Brassica oleracea seeds as an indicator of seed maturity and seed quality // *Sci. agric.*, 1998, v. 5, special issue Piracicaba. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90161998000500016>.
- Jiang Y., Ge H., Lian F., Zhang Y., Xia S. Early detection of germinated wheat grains using terahertz image and chemometrics // *Scientific Reports*, 2016, no. 6. Article number: 21299.
- Lu M., Zhang Y., Sun J., Chen S., Li N., Zhao G., Shen J. Identification of maize seeds by terahertz scanning imaging // *Chinese Optics Letters*, 2005, v. 3, iss. 1, pp. 239–241.
- Moreira M. L. de, Aelst A. C. van, Eck J. W. van, Hoekstra F. A. Pre-harvest stress cracks in maize (*Zea mays* L.) kernels as characterized by visual, X-ray and low temperature scanning electron microscopical analysis: effect on kernel quality // *Seed Science Research*, 1999, v. 9, pp. 227–236.
- Olesen M. H., Nikneshan P., Shrestha S., Tadayyon A., Deleuran L. Ch., Boelt B., Gislum R. Viability Prediction of *Ricinus communis* L. Seeds Using Multispectral Imaging // *Sensors (Basel)*, 2015, v. 15, no. 2, pp. 4592–4604.
- Silva V. N., Cicero S. M., Bennett M. Associations between X-ray visualised internal tomato seed morphology and germination // *Seed Science and Technology*, 2013, v. 41, no. 2, pp. 225–234.