DOI 10.21178/2079–6080.2018.2.4
УДК 631.53.011:57.081.23:004.932.2

Исследование рентгеновских и газоразрядных характеристик желудей дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) для оценки их посевных качеств

© Н.С. Прияткин¹, О.Ю. Бутенко², Д.А. Шабунин², М.В. Архипов¹,
Л.П. Гусакова¹, А.А. Бойцов³, Н.Н. Потрахов³, Н.Е. Староверов³,
К.А. Саввина⁴

Examination of digital X-ray and gas discharge characteristics of English oak acorns (*Quercus robur* L.) for assessment of their sowing qualities

N.S. Priyatkin, O.Yu. Butenko, D.A. Shabunin, M.V. Arkhipov, L.P. Gusakova, A.A. Boitsov, N.N. Potrakhov, N.E. Staroverov, K.A. Savvina (Agrophysical Research Institute; Saint Petersburg Forestry Research Institute; The First Electrotechnical University “LETI”; Kaliningrad State Technical University)

The study of introspective characteristics and growth parameters of English oak acorns was performed for hidden defects identification and sowing qualities of seeds evaluation. Subject of study were acorns of English oak. The place of collecting – Saint Petersburg region, year cropping – 2015. The following methods were applied: microfocus X-Ray with image analysis of digital X-Ray images, gas discharge visualization and standard emergence rate and germination test (GOST 13056.6–97), with additional measurements of root and shoot length. The short description of the non-destructive methods, including the modes of image obtaining and ways of the automatic analysis of the received images and also technical specifications of their realization used in a research is provided. The results show, that it is possible to reveal hidden defects of English oak acorns using microfocus X-Ray and gas discharge visualization techniques. Examples of digital X-ray images of English oak acorns having the hidden defects (stress micro cracks and enzyme mycosis exhaustion) are given. It is revealed, that viable and unviable samples of acorns were significantly different by X-Ray characteristics. Statistically significant differences of gas-discharge characteristics between germinated and undergerminated acorns of English oak have

not revealed. Dependence between introsopic (X-Ray, gas discharge visualization) characteristics and growth indicators (shoot length) of English oak acorns has found. The complex method based on microfocus-X-Ray and gas discharge visualization techniques can be applied as affective tool as a complement to standard tests of English oak acorns quality evaluation.

Key words: English oak, acorn, microfocus X-Ray radiography, gas discharge visualization (electrophotography), sowing qualities, seed image analysis

Исследование рентгеновских и газоразрядных характеристик желудей дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) для оценки их посевных качеств

Н.С. Прияткин, О.Ю. Бутенко, Д.А. Шабунин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, А.А. Бойцов, Н.Н. Потрахов, Н.Е. Староверов, К.А. Саввина

Выполнено исследование интроскопических характеристик и ростовых показателей желудей дуба черешчатого для выявления их скрытой дефектности и оценки посевных качеств. Объектом исследований являлись желуди дуба черешчатого. Место сбора — Санкт-Петербург, год репродукции — 2015. Были использованы следующие методы исследований: метод микрофокусной рентгенографии с компьютерной морфо- и денситометрией цифровых рентгеновских изображений, газоразрядной визуализации (электрофотографии), стандартный тест на энергию прорастания и всхожесть в соответствии с ГОСТ 13056.6—97, с дополнительной оценкой ростовых показателей (длина ростка, сантиметры). Приведено краткое описание используемых в исследовании интроскопических методов, в том числе режимов съемки и способов автоматического анализа полученных изображений, а также технических средств их реализации. Показано, что использование методов микрофокусной рентгенографии и газоразрядной визуализации делает возможным обнаруживать скрытые дефекты желудей дуба черешчатого. Приведены примеры цифровых рентгеновских изображений желудей дуба черешчатого, имеющих скрытые дефекты: микротрещины и энзимо-микозное истощение. Выявлено, что выборки проросших и не проросших желудей дуба черешчатого достоверно отличаются по некоторым рентгенографическим характеристикам. Статистически значимых различий газоразрядных характеристик у проросших и не проросших желудей дуба черешчатого обнаружено не было. Установлена взаимосвязь интроскопических (рентгенографических, газоразрядных) характеристик и ростовых показателей (длина ростка) желудей дуба черешчатого. Разработанная на основе методов микрофокусной рентгенографии и газоразрядной визуализации комплексная методика, в дополнение к существующим стандартным тестам, может служить эффективным дополнительным инструментом для оценки качества желудей дуба черешчатого.

Ключевые слова: дуб черешчатый, желудь, микрофокусная рентгенография, газоразрядная визуализация (электрофотография), посевные качества, анализ изображений семян

Прияткин Николай Сергеевич — старший науч. сотр., зав. сектором биофизики растений, канд. техн. наук

E-mail: prini@mail.ru

Бутенко Олеся Юрьевна — старший науч. сотр. НИО селекции, воспроизводства и химического ухода за лесом, канд. с.-х. наук

Шабунин Дмитрий Александрович — ведущий науч. сотр. НИО селекции, воспроизводства и химического ухода за лесом, канд. биол. наук

E-mail: ds1512@mail.ru

Архипов Михаил Вадимович — главный науч. сотр., сектор биофизики растений, д-р биол. наук, профессор

Гусакова Людмила Петровна — ведущий науч. сотр., сектор биофизики растений, канд. биол. наук

Бойцов Анатолий Аркадьевич — доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды, канд. физ.-мат. наук

Потрахов Николай Николаевич — зав. кафедрой электронных приборов и устройств, д-р техн. наук, профессор

Староверов Николай Евгеньевич — аспирант кафедры электронных приборов и устройств

Саввина Карина Андреевна — студент-магистрант

¹ ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14
Телефон: 8 (812) 534–13–24
E-mail: office@agrophys.ru

² ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства»
194021, Санкт-Петербург, Институтский пр., 21
Телефон: 8 (812) 552–80–26
E-mail: mail@spb-niilh.ru

³ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.
Телефон: 8 (812) 346–44–87
E-mail: root@post.etu.spb.ru

⁴ ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236022, г. Калининград, Советский пр., д. 1
Телефон: 8 (4012) 99–59–01
E-mail: rector@klgtu.ru

Введение

Одной из основных лесообразующих пород на европейской части Российской Федерации является дуб черешчатый (*Quercus robur* L.). Успешное лесовосстановление дубрав может осуществляться только с применением лесокультурных технологий, поскольку самосев погибает в первые годы от затенения травостоем и порослью других пород. При этом важнейшей задачей ученых и практиков лесного хозяйства становится увеличение объемов заготовки желудей улучшенной селекционной категории [5]. В связи с этим насущной проблемой, требующей решения, является разработка новых (оптических, рентгеновских, электрофизических и др.) методов контроля качества семян [16, 7], в дополнение к существующим стандартным тестам [4].

Simak и Gustafsson, которые в 1953 году на базе метода рентгенографии разработали методику изучения внутреннего строения семян интродуцентов древесных пород с целью анализа полиэмбрионии зародышей, их индивидуальной и географической изменчивости, а также выбраковки пустых и поврежденных [15]. В 70-е годы Belcher [10] и Duffield [12] показали эффективность рентгенографического метода для оценки содержания влаги и потенциальной жизнеспособности желудей дуба.

Дальнейшее развитие рентгенографического метода позволило получать цифровые изображения семян древесных лесных пород, а также использовать современные программные средства для их обработки и анализа, с помощью которого стало возможным отделять жизнеспособные и нежизнеспособные семена хвойных пород, на основании данных оптической плотности внутренних структур семени, а также определять их анатомическую зрелость [14]. Приведенные данные [13] показали высокую информативность рентгенографического метода в сочетании с визуальным определением отслоения семядолей друг от друга и от околоплодника при оценке степени

десикации желудей дуба и прогнозирования их способности к прорастанию. К.Г. Ткаченко [8] были проведены исследования по рентгенографическому анализу семян пихты цельнолистной, яблони пурпурной и орешков шиповника морщинистого. Показана высокая информативность метода для оценки полноты семян и скрытой зараженности вредителями.

Данные о применении газоразрядной визуализации для оценки качества семян древесных лесных пород немногочисленны. М. Cater и F. Batic (1998) использовали этот метод для определения жизнеспособности семян бука обыкновенного и клена белого [11]. Применение методов газоразрядной визуализации совместно с микрофокусной рентгенографией показало высокий уровень достоверности выявления неполноценных, не имеющих развитого эндосперма семян ели обыкновенной [2]. С помощью анализа с использованием подхода нечеткой логики установлена сопряженная связь характеристик газоразрядных изображений ели обыкновенной с длиной зародышевых корней [9].

В рамках настоящего исследования проведен интроскопический анализ желудей дуба черешчатого с использованием методов микрофокусной рентгенографии, в сочетании с компьютерной морфо- и денситометрией цифровых рентгеновских изображений, газоразрядной визуализации и оценкой ростовых показателей.

Целью исследований являлась оценка информативности разработанной комплексной методики неразрушающего контроля качества желудей дуба черешчатого.

Для выполнения цели исследований были поставлены следующие задачи:

1. Разработать адаптивные методики получения и количественной программной обработки цифровых рентгеновских и газоразрядных изображений желудей дуба черешчатого, включая подбор режимов съемки и адаптацию алгоритмов автоматического анализа изображений.

2. Выполнить рентгенографический и газоразрядный анализ желудей дуба черешчатого.

3. Изучить взаимосвязь рентгеновских и газоразрядных характеристик желудей дуба черешчатого с их посевными качествами.

Объект и методы исследований

Объектом исследований являлись желуды дуба черешчатого. Место сбора – Санкт-Петербург, год репродукции – 2015. Объем выборки – 53 штуки.

Для выполнения исследований использовались инструментальные физические и стандартные методы.

1) *Методика микрофокусной рентгенографии* [1], позволяющая получать цифровые рентгеновские изображения семян с прямым рентгеновским увеличением. Рентген-съемка проводилась с использованием передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 (организация-разработчик и предприятие-изготовитель ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Санкт-Петербург, Россия) (рис. 1).

1 – пульт управления, 2 – рентгенозащитная камера, 3 – источник излучения, 4 – предметный столик, 5 – цифровой приемник изображения

Рис. 1. Рентгеновская установка ПРДУ-02

В качестве приемника использовалась CR система DIGORA PCT. Время от включения рентгеновского аппарата до получения изображения на экране ЭВМ составляет около 3 минут. Определен оптимальный коэффициент увеличения ($1,0\times$) для рентген-съемки желудей.

Для анализа морфометрических и оптических параметров цифровых рентгеновских изображений желудей дуба применялось серийное программное обеспечение «Аргус-Био» производства ООО «АргусСофт» (Санкт-Петербург, Россия), позволяющее автоматически обрабатывать цифровые рентгеновские изображения. При этом анализировались параметры [6]: средняя яркость (единицы яркости), отклонение

яркости (единицы яркости), интервал яркости (единицы яркости), минимальная яркость (единицы яркости), оптическая плотность (относительные единицы), интегральная оптическая плотность (относительные единицы).

Методика включала в себя следующие основные этапы (рис. 2): пробоподготовка желудей дуба для рентген-съемки (а); рентген-съемка желудей, сохранение цифровых рентгеновских изображений (б); анализ полученных цифровых рентгеновских изображений, включая выделение области интереса, бинаризацию изображения, автоматическое измерение характеристик объекта по заданным параметрам (в).

Рис. 2. Основные этапы цифрового рентгенографического анализа желудей дуба черешчатого

Примеры цифровых рентгеновских изображений нормальных и дефектных желудей

дуба черешчатого представлены на рисунке 3.

Рис. 3. Примеры цифровых рентгеновских изображений желудей дуба черешчатого:
а – без скрытых дефектов; б – с микротрещиной внутри; в – с энзимо-микозным истощением

2) *Методика газоразрядной визуализации* [3] — позволяет регистрировать и количественно оценивать свечение, возникающее вблизи поверхности объекта (в данном случае — желудя дуба черешчатого) при помещении его в электромагнитное поле высокой напряженности. Принцип методики заключается в следующем (рис. 4а): между плоским стеклянным электродом 2, на котором размещается объект исследования 1 и заземляющим электродом для съемки больших объектов 12 с фиксаторами 13 и светонепроницаемым колпаком 11, подаются импульсы напряжения длительностью 10 мкс от

высоковольтного генератора 5, который создает электромагнитное поле. 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 в компьютере 9.

Рис. 4. Принципиальная схема устройства для исследования характеристик газоразрядного свечения желудей дуба черешчатого (а) и его внешний вид (б)

Аппаратное обеспечение метода представлено серийным прибором «ГРВ Камера», (организация-разработчик и предприятие-производитель ООО «Биотехпрогресс», Санкт-Петербург, Россия). Обработка изображений осуществлялась в программе «ГРВ научная лаборатория». Анализировались следующие параметры [3] газоразрядных изображений: площадь (пиксели), средняя интенсивность (единицы яркости), коэффициент формы (относительные единицы), энтропия по изолинии (относительные единицы), фрактальность по

изолинии (относительные единицы), СКО фрактальности (относительные единицы), средний радиус изолинии (пиксели).

В процессе разработки адаптивной методики подобран тип заземляющего электрода и определено оптимальное импульсное напряжение (180 В) для инициации газоразрядных изображений желудей. Данные режимы съемки обеспечивают получение воспроизводимых изображений с минимальным уровнем шумовой компоненты, а также идентифицировать нормальные и дефектные желуди (рис. 5).

Рис. 5. Примеры газоразрядных изображений желудей дуба черешчатого: а – без скрытых дефектов; б – с энзимо-микозным истощением

Методика включает в себя следующие основные этапы: 1 — установка, фиксация объекта исследования (желудя) для газоразрядной съемки, согласно схеме, представленной на рисунке 4; 2 — инициация и регистрация газоразрядного свечения объекта исследования, сохранение цифровых газоразрядных изображений в формате BMP; 3 — авто-

матический анализ полученных цифровых газоразрядных изображений.

3) Методика оценки посевных качеств желудей дуба согласно ГОСТ 13056.6–97 «Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести» [4], с дополнительной цифровой фотографией и морфометрией проростков на 7-е и 20-е сутки (рис. 6).

Рис. 6. Пример нормально проросшего желудя на 7-е (а) и 20-е сутки (б) и не проросшего желудя, имеющего скрытый дефект биогенного происхождения на семядолях (в)

Результаты и их обсуждение

Анализ статистического распределения данных рентгеновских и газоразрядных характеристик желудей дуба позволил сделать вывод о его ненормальности, поэтому были применены методы непараметрической статистики: критерий Манна-Уитни и корреляционный анализ Спирмана.

Для оценки объектов на выявление скрытых аномалий и дефектов с помощью неразрушающих методов цифровые фотографии желудей были поделены на 2 группы: желуды, имеющие визуальные потемнения на семядолях (группа 1) и не имеющие таких признаков (группа 0). При сравнении и анализе данных

групп с использованием критерия Манна-Уитни было выявлено, что они различаются по следующим параметрам цифровых рентгеновских изображений: Средняя яркость (единицы яркости) — Медиана (группа 1) = 123,24, Медиана (Группа 0) = 133,73, $p = 0,047$; Минимальная яркость (единицы яркости) — Медиана (группа 1) = 40, Медиана (Группа 0) = 53, $p = 0,008$; Оптическая плотность рентгенограмм (относительные единицы) — Медиана (группа 1) = 0,354, Медиана (группа 0) = 0,305, $p = 0,025$; Интегральная оптическая плотность (относительные единицы) — Медиана (группа 1) = 4869, Медиана (группа 0) = 3756, $p = 0,0003$ (рис. 7).

Рис. 7. Результаты сравнения групп желудей дуба черешчатого, имеющих визуальные потемнения на семядолях (группа 1) и не имеющие таковых (группа 0) по данным анализа цифровых рентгеновских изображений:
 а – средняя яркость; б – минимальная яркость; в – оптическая плотность, г – интегральная оптическая плотность

Также выявлены статистически достоверные различия между группами 1 и 0 по характеристикам газоразрядных изображений – параметр Нормализованное среднеквадратическое отклонение (СКО) радиуса изолинии – Медиана (группа 1) = 476, Медиана (группа 0) = 403, $p = 0,033$ (рис. 8).

Для изучения взаимосвязи интроскопических (рентгеновских, газоразрядных) характеристик и посевных качеств (ростовых показателей) желуди были поделены на 2 группы: группа 1 – проросшие желуди, группа 0 – не

проросшие желуди. Сравнение данных групп выполнено с использованием критерия Манна-Уитни.

В результате установлено, что группы статистически различимы по следующим параметрам цифровых рентгеновских изображений: минимальная яркость (единицы яркости) – Медиана (группа 1) = 53, Медиана (группа 0) = 40, $p = 0,014$ и интервал яркости (единицы яркости) – Медиана (группа 0) = 160, Медиана (группа 1) = 151, $p = 0,035$ (рис. 9).

Рис. 8. Результаты сравнения групп желудей дуба черешчатого, имеющих визуальные потемнения на семядолях (группа 1) и не имеющие таковых (группа 0) по данным анализа цифровых газоразрядных изображений – параметр «нормализованное СКО радиуса изолинии»

Рис. 9. Результаты сравнения групп желудей дуба черешчатого, проросших (группа 1) и не проросших (группа 0) по данным анализа цифровых рентгеновских изображений:
а – минимальная яркость; б – интервал яркости

Статистически значимых различий газоразрядных характеристик у проросших (группа 1) и не проросших (группа 0) желудей дуба черешчатого обнаружено не было.

Корреляционный анализ Спирмана выявил ряд взаимосвязей интроскопических (рентгеновских, газоразрядных) и дополнительных показателей посевных качеств (длина

ростка на 20-е сутки) желудей дуба черешчатого. В частности, коэффициент корреляции между минимальной яркостью цифровых рентгеновских изображений и длиной ростка составил $r = 0,3775$, $p = 0,0053$; между нормализованным СКО радиуса изолинии газоразрядных изображений и длиной ростка $r = -0,3429$, $p = 0,0120$ (рис. 10).

Рис. 10. Зависимости параметров цифровых рентгеновских (Минимальная яркость, единицы яркости), газоразрядных изображений (нормализованное СКО радиуса изолинии, пиксели) с ростовыми показателями (длина роста на 20-е сутки, см)

Таким образом установлено, что те желуди, у которых наблюдались минимальные значения минимальной яркости цифровых рентгеновских изображений и максимальные значения среднего радиуса изолинии газоразрядных изображений характеризовались худшими посевными качествами.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Установлено, что желуди дуба черешчатого, имеющие внутренние скрытые дефекты

под околоплодником, достоверно отличаются по рентгеновским и газоразрядным характеристикам, в сравнении с желудями, не имеющими дефектов.

2. Выявлено, что жизнеспособные желуди дуба черешчатого отличаются от нежизнеспособных по характеристикам цифровых рентгеновских изображений.

3. Обнаружена взаимосвязь между рентгеновскими, газоразрядными характеристиками и ростовыми показателями желудей дуба черешчатого.

Разработанная комплексная методика неразрушающего интроскопического контроля

качества желудей дуба на основе технологий микрофокусной рентгенографии и газоразрядной визуализации может стать эффективным	дополнением к уже существующим методам контроля семенного материала желудей дуба черешчатого и других древесных лесных пород.
--	---

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архипов, М.В. Микрофокусная рентгенография растений / М.В. Архипов, Н.Н. Потрахов // СПб.: Изд-во «Технолит», 2008. – 192 с.
2. Архипов, М.В. Применение методов мягколучевой рентгенографии и газоразрядной визуализации для оценки качества семян ели европейской / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, А.С. Бондаренко // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 31. – С. 62–66.
3. Архипов, М.В. Методика исследования характеристик газоразрядного свечения семян / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, М.В. Борисова, Л.Е. Колесников – СПб.: АФИ, 2016. – 52 с.
4. ГОСТ 13056.6–97. Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести. – Введ. в действие 01.07.1998. Официальное издание. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 28 с.
5. Крюкова, С.А. Искусственное восстановление дубрав в Центральной лесостепи / С.А. Крюкова // Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции “Инновации и технологии в лесном хозяйстве” ITF-2016, 31 мая-2 июня 2016 г., Санкт-Петербург, ФБУ “СПбНИИЛХ. СПб.: СПбНИИЛХ, 2016. – С. 85.
6. Пантелеев, В.Г. Компьютерная микроскопия / В.Г. Пантелеев, О.В. Егорова, Е.И. Клыкова // М.: Техносфера, 2005. – 303 с.
7. Прияткин, Н.С. Интроскопические методы исследования качества семенного материала: состояние проблемы и перспективы использования / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, Н.Н. Потрахов, Г.И. Кропотов, И.А. Цибизов, И.А. Винеров // Агрофизика. – 2018. – № 2. – С. 29–39. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.02.05
8. Ткаченко, К.Г. Рентгенографический метод определения качества репродуктивных диаспор и выявления в них вредителей / К.Г. Ткаченко // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 18–22 апреля 2016 г. Красноярск: ИЛ СО РАН. – 2016. – С. 226–227.
9. Arkhipov, M.V. Seed assessment using fuzzy logic and gas discharge visualization data / M.V. Arkhipov, N.S. Priyatkin, E.D. Krueger, D.A. Kurtener, A.S. Bondarenko // European Agrophysical Journal. – 2014. – vol. 1. – no. 4. – pp. 124–133. <http://dx.doi.org/10.17830/j.eaj.2014.01.124>.
10. Belcher, E.W.Jr. Radiographic analysis of agriculture and forest tree seeds / E.W.Jr. Belcher // Document prepared for the Seed X-ray Technology Committee of the Association of Official Seed Analysts, Boise, Idaho. – 1977. – vol. 31. – pp. 1–29.
11. Cater, M. Determination of Seed Vitality by High Frequency Electrophotography / M. Cater, F. Batic // Phyton (Horn, Austria). – 1998. – vol. 38. – fasc. 2. – pp. 225–237.
12. Duffield, J.W. New techniques for reading seed radiographs save time / J.W. Duffield // Tree Plant, Notes. – 1973. – vol. 24. – 14 p.
13. Goodman, R.C. Evaluating desiccation sensitivity of *Quercus rubra* acorns using X-Ray image analysis / R.C. Goodman, D.F. Jacobs, R.P. Karrfalt // Can. J. For. Res. – 2005. – vol. 35. – pp. 2823–2831. DOI: 10.1139/X05–209.

14. Sahlen, K. Determination of viable and dead Scots pine seeds of different anatomical maturity after freezing using IDX method / K. Sahlen, U. Bergsten, K. Wiklund // *Seed Sci. Technol.* – 1995. – vol. 23. – pp. 405–414.
15. Simak, M. X-ray photography and sensitivity in forest tree species / M. Simak, A. Gustafsson // *Hereditas*, – 1953. – 39 c.
16. Van Duijn, B. Advances of technologies for seed science and seed testing / B. Van Duijn, N.S. Priyatkin, H. Bruggink, F.G. Gomes-JR, B. Boelt, F. Gorian, M.A. Martinez // *Proc. of XX Brazilian Seed Congress*. Aug. 7, 2017 – Aug. 10, 2017. Foz do Iguacu, PR, Brazil. – 2017. – vol. 27. – no. 2. – pp. 18–22.

REFERENCES

1. Arkhipov M.V., Potrakhov N.N. *Mikrofokusnaya rentgenografiya rastenij*. Saint Petersburg, 2008, 192 p. (In Russian)
2. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Bondarenko A.S. *Primenenie metodov myagkoluchevoj rentgenografii i gazorazryadnoj vizualizatsii dlya otsenki kachestva semyan eli evropejskoj. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 31, pp. 62–66. (In Russian)
3. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Borisova M.V., Kolesnikov L.E. *Metodika issledovaniya kharakteristik gazorazryadnogo svecheniya semyan*. Saint Petersburg, 2016. 52 p. (In Russian)
4. GOST 13056.6–97. *Semena derev'ev i kustarnikov. Metod opredeleniya vskhozhesti*. Moscow, 1998. (In Russian)
5. Kryukova S.A. *Iskusstvennoe vosstanovlenie dubrav v Tsentral'noj lesostepi. Tezisy dokladov V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii «Innovatsii i tekhnologii v lesnom khozyajstve» ITF-2016*, 31 maya-2 iyunya 2016 g., Saint Petersburg, FBU SPbNIILKH, 2016, p. 85. (In Russian)
6. Panteleev V.G., Egorova O.V., Klykova E.I. *Komp'yuternaya mikroskopiya*. Moscow, 2005, 303 p. (In Russian)
7. Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Gusakova L.P., Potrakhov N.N., Kropotov G.I., TSibizov I.A., Vinerov I.A. *Introskopicheskie metody issledovaniya kachestva semennogo materiala: sostoyanie problemy i perspektivy ispol'zovaniya. Agrofizika*, 2018, no. 2, pp. 29–39. DOI: 10.25695/AGRPH.2018.02.05 (In Russian)
8. Tkachenko K.G. *Rentgenograficheskij metod opredeleniya kachestva reproduktivnykh diaspor i vyyavleniya v nikh vreditelej. Monitoring i biologicheskie metody kontrolya vreditelej i patogenov drevesnykh rastenij: ot teorii k praktike. Materialy Vserossijskoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Moscow, 18–22 aprelya 2016 g. Krasnoyarsk, IL SO RAN, 2016, pp. 226–227. (In Russian)
9. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Krueger E.D., Kurtener D.A., Bondarenko A.S. Seed assessment using fuzzy logic and gas discharge visualization data. *European Agrophysical Journal*, 2014, vol. 1, no. 4, pp. 124–133. <http://dx.doi.org/10.17830/j.eaj.2014.01.124>.
10. Belcher E.W.Jr. Radiographic analysis of agriculture and forest tree seeds. Document prepared for the Seed X-ray Technology Committee of the Association of Official Seed Analysts, Boise, Idaho, 1977, vol. 31, pp. 1–29.
11. Cater M., Batic F. Determination of Seed Vitality by High Frequency Electrophotography. *Phyton* (Horn, Austria), 1998, vol. 38, fasc. 2, pp. 225–237.
12. Duffield J.W. New techniques for reading seed radiographs save time. *Tree Plant, Notes*, 1973, vol. 24, 14 p.
13. Goodman R.C., Jacobs D.F., Karrfalt R.P. Evaluating desiccation sensitivity of *Quercus rubra* acorns using X-Ray image analysis. *Can. J. For. Res.*, 2005, vol. 35, pp. 2823–2831. DOI: 10.1139/X05–209.

14. Sahlen K., Bergsten U., Wiklund K. Determination of viable and dead Scots pine seeds of different anatomical maturity after freezing using IDX method. *Seed Sci. Technol.*, 1995, vol. 23, pp. 405–414.
15. Simak M., Gustafsson A. X-ray photography and sensitivity in forest tree species. *Hereditas*, 1953, 39 p.
16. Van Duijn B., Priyatkin N.S., Bruggink H., Gomes-JR F.G., Boelt B., Gorian F., Martinez M.A. Advances of technologies for seed science and seed. *Proc. of XX Brazilian Seed Congress*. Aug. 7, 2017 – Aug. 10, 2017. Foz do Iguacu, PR, Brazil, 2017, vol. 27, no. 2, pp. 18–22.

Статья поступила в редакцию 6.07.2018