
**БИОЛОГИЯ
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ**

УДК 631.53.011:004.932.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОЗЕРНИСТОСТИ СЕМЯН *PLATYCLADUS ORIENTALIS*
И *THUJA SUTCHUENENSIS* (CUPRESSACEAE) МЕТОДОМ МИКРОФОКУСНОЙ
РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ПОСЕВНЫХ КАЧЕСТВ**© 2019 г. А. В. Карамышева^{1, *}, Л. П. Трофимук², Н. С. Прияткин³, М. В. Архипов³,
Л. П. Гусакова³, Н. Н. Потрахов⁴, В. Б. Бессонов⁴, П. А. Щукина^{4, 5}¹ФГБУН Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук (БИН РАН),
г. Санкт-Петербург, Россия²Научно-опытная станция “Отрадное” Ботанического института (БИН РАН) им. В.Л. Комарова
Российской Академии наук, Ленинградская область, Россия³ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия⁴ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
“ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия⁵ФГБНУ Северо-Западный центр междисциплинарных проблем продовольственного обеспечения,
г. Санкт-Петербург—Пушкин, Россия

*e-mail: korovinaav@mail.ru

Поступила в редакцию 07.04.2019 г.

После доработки 30.07.2019 г.

Принята к публикации 28.08.2019 г.

Статья посвящена исследованию полнозернистости семян *Platycladus orientalis* (L.) Franco и *Thuja sutchuenensis* Franch. с целью определения их посевных качеств методом микрофокусной рентгенографии в сочетании с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений. Семена *Platycladus orientalis* были получены из национального парка “Тянь-Шань”, Урумчи, Китай (Tianshan forest park, Urumchi, China) в октябре 2016 г., семена *Thuja sutchuenensis* – из Zhong Wei Horticultural Products Company, Юбин, Сычуань, Китай (Yibin, Sichuan, China). В результате анализа скрытых дефектов семян *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* установлено, что пустые (невыполненные) и частично выполненные семена, по сравнению с нормально развитыми, имеют достоверно пониженные значения показателя средней яркости рентгенограмм (на 26–30 и 9–10 единиц, соответственно). Оценка веса семян исследуемых видов показала, что пустые (невыполненные) и частично выполненные семена, по сравнению с нормально развитыми, имеют достоверно более низкие значения этого показателя (на 0.011–0.013 и 0.003–0.006 г, соответственно). Абсолютная и грунтовая всхожесть семян *Platycladus orientalis* составили 78 и 43%, семян *Thuja sutchuenensis* – 43 и 20%. На основе анализа связи характеристик цифровых рентгеновских изображений семян исследованных видов, их веса и посевных качеств установлено, что показатель средней яркости рентгенограмм имеет достоверную умеренно тесную связь с всхожестью семян *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* ($r = 0.67$ и 0.44 , соответственно), вес семян – более слабую – $r = 0.60$ и 0.29 .

Ключевые слова: *Platycladus orientalis*, *Thuja sutchuenensis*, качество семян, микрофокусная рентгенография, анализ цифровых изображений

DOI: 10.1134/S0033994619040058

Виды голосемянных растений, семена которых взяты для исследования, в условиях Северо-Запада России фактически представлены единичными растениями. *Platycla-*

duis orientalis (L.) Franco представлен тремя особями, растущими на территории Санкт-Петербургского Ботанического сада им. Петра Великого БИН РАН на участках 77, 82 и 97 и тремя растениями в городских посадках г. Санкт-Петербурга на ул. Орбели (60°00'16.9" N 30°20'29.7" E).

Thuja sutchuenensis Franch. представлена двумя растениями на частных участках в Приозерском районе Ленинградской области (60°35'18.2" N 30°11'16.0" E и 60°50'17.7" N 30°05'56.7" E). Эти растения выращены из черенков, полученных из Daba Mountains, Чунцин, Китай в 2012 г. В природных условиях *Thuja sutchuenensis* произрастает в горных условиях до высоты 2100 м [1]. В опытных посадках выживает на высоте до 2250 м [2]. Эти условия сопоставимы с нашей климатической зоной. Оценка жизненного состояния известных нам растений по В.А. Алексееву – 1 [3]. Оценка зимостойкости по П.И. Лапину – 1 [4, 5]. В условиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области некоторые из известных нам растений плодоносят. Это перспективные виды для озеленения городов и зеленого строительства.

На территории научно-опытной станции “Отрадное” БИН РАН в 2016 г. начаты работы по выращиванию этих растений в условиях Ленинградской области (60°48'59.7" N 30°13'31.0" E). Растения выращиваются из тех же партий семян, что изучаются в данной работе.

Рентгеновский метод оценки качества семян древесных лесных пород подробно описан как в зарубежной, так и отечественной литературе. М. Simak и А. Gustafsson, в 1953 г. на базе метода рентгенографии разработали методику изучения внутреннего строения семян древесных пород с целью анализа полиэмбрионии зародышей, их индивидуальной и географической изменчивости, а также выбраковки пустых и поврежденных [6]. В 70-е гг. E.W.Jr. Belcher [7] и J.W. Duffield [8] показали эффективность рентгенографического метода для оценки содержания влаги и потенциальной жизнеспособности желудей дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). S.K. Kamra в 1973 году была показана эффективность рентгенографии для выявления пустозернистости, скрытой поврежденности насекомыми, механических повреждений и других дефектов при исследовании семян тропических видов древесных растений [9]. Дальнейшее развитие рентгенографического метода позволило получать цифровые изображения семян древесных пород и использовать современные программные средства для их обработки и анализа. Это сделало возможным отделять жизнеспособные и нежизнеспособные семена на основании данных об оптической плотности их внутренних структур, а также определять их анатомическую зрелость [10]. Результаты показали высокую информативность рентгенографического метода в сочетании с визуальным определением отслоения семядолей друг от друга и от околоплодника при оценке степени десикации желудей дуба черешчатого и прогнозирования их способности к прорастанию [11]. К.Г. Ткаченко были проведены исследования по рентгенографическому анализу семян пихты цельнолистной, яблони пурпурной и орешков шиповника морщинистого [12]. Показана высокая информативность метода для оценки полнозернистости семян и скрытой зараженности вредителями. При сопряженном исследовании всхожести и рентгеновских изображений семян нескольких видов древесных лесных пород Саудовской Аравии выявлена высокая эффективность рентгенографии при выявлении недоразвитости эндосперма [13].

В Агрофизическом институте (Санкт-Петербург) показана информативность метода визуального рентгенографического анализа цифровых рентгеновских изображений для выявления пустозернистости семян ели европейской [14] и автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений желудей дуба черешчатого для обнаружения микротрещин и энзимо-микозного истощения [15]. Установлена взаимосвязь рентгенографических характеристик и ростовых показателей (длина ростка) желудей дуба черешчатого.

Действующий на настоящий момент ОСТ 56-94-88 “Семена древесных пород. Методы рентгенографического анализа” нуждается в обновлении в связи с развитием ин-

струментальных рентгеновских технологий – переход от “пленочной” к цифровой рентгенографии.

Цель работы: исследование полнозернистости семян *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* методом микрофокусной рентгенографии с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений для прогноза их посевных качеств.

В процессе исследования планировалось выявить и проанализировать скрытые дефекты образцов семян исследуемых видов, выполнить оценку веса семян, определить их посевные качества, изучить связь характеристик цифровых рентгеновских изображений семян, их веса и посевных качеств.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследований служили семена *Platycladus orientalis*, полученные из Tianshan forest park, Urumchi, China в октябре 2016 г. и *Thuja sutchuenensis*, полученные из Zhong Wei Horticultural Products Company, Yibin, Sichuan, China в декабре 2015 г.

Для реализации метода микрофокусной съемки семян специалистами Агрофизического научно-исследовательского института и Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина) разработан совместно аппаратно-программный комплекс на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 для контроля качества семян. Организация-разработчик и предприятие-изготовитель: ЗАО “ЭЛТЕХ-Мед”, Санкт-Петербург, Россия [16]. В состав установки ПРДУ-02 входят: рентгенозащитная камера для проведения рентгенографических работ; источник рентгеновского излучения моноблочного типа РАП70М-0.1Н-1; приемник рентгеновского изображения на основе многофункционального портативного плоско-панельного детектора для цифровой рентгенографии; управляющая рабочая станция с универсальным программным обеспечением для анализа цифровых рентгеновских изображений семян. Коэффициент увеличения изображения составлял $3.0\times$ для рентгеновской съемки.

Программная обработка цифровых изображений семян осуществлялась в программе ARGUS-BIO. Анализировался параметр “Средняя яркость”, единицы яркости [17]. Масса индивидуальных семян оценивалась с использованием лабораторных весов VLTE-150, с точностью 0.001 г.

Семена были высеяны в апреле 2018 г. в ящики с искусственным грунтом, состоящим из раскисленного торфа, песка и вермикулита в соотношении 2 : 1 : 1. Проращивание проводилось при температуре 16–20 °С и естественном освещении. Проращивались только те семена, для которых были получены цифровые рентгеновские изображения, приведенные в статье. Каждая из исследуемых партий содержала 100 семян. Семена были посеяны без предварительной стратификации после обработки оригинальным регулятором прорастания семян N-8В в течении 20 часов при 18–20 °С. Регулятор прорастания разработан для ускоренного проращивания семян длительного покоя [18] и полностью заменяет предлагаемую в литературе стратификацию в течении 30–45 дней [19].

В статье приводятся также данные по всхожести семян из тех же партий, полученные за 3 года на территории научно-опытной станции “Отрадное” БИН РАН. Посев проводился в аналогичных условиях: семена высевались на гряды после обработки оригинальным регулятором для прорастания семян N-8В. Для испытаний был использован субстрат, состоящий из раскисленного торфа, песка и садовой земли в соотношении 1 : 1 : 1.

Статистический анализ выполнен с использованием непараметрических методов статистики: критериев Kruskal-Wallis ANOVA & Median Test и рангового коэффициента корреляции Спирмана.

Таблица 1. Характеристики качества семян *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis*
Table 1. *Platycladus orientalis* and *Thuja sutchuenensis* seed quality characteristics

Вид Species	Полнозернистость семян, % Fullness of seeds, %	Абсолютная всхожесть, % Absolute germination, %	Грунтовая всхожесть, % Field germination, %
<i>Platycladus orientalis</i>	55	78.2	43.0
<i>Thuja sutchuenensis</i>	46	43.5	20.0

Таблица 2. Результаты 3-х летнего опыта по выращиванию *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* из семян

Table 2. The results of three-year experiment in growing *Platycladus orientalis* and *Thuja sutchuenensis* from seeds

Год Year	Опыт Experiment	<i>Platycladus orientalis</i>			<i>Thuja sutchuenensis</i>		
		Число семян Number of seeds	Абсолютная всхожесть, % Absolute germination, %	Грунтовая всхожесть, % Field germination, %	Число семян Number of seeds	Абсолютная всхожесть, % Absolute germination, %	Грунтовая всхожесть, % Field germination, %
2016	1	—	—	—	215	43.0	19.8
	2	—	—	—	645	44.6	20.5
2017	1	243	83.6	46.0	210	41.5	19.1
	2	243	82.9	45.6	900	46.1	21.2
2018	1	300	78.5	43.2	215	40.4	18.6
	2	220	76.9	42.5	215	41.1	18.9
Средние значения Averages			80.5	44.3	—	42.8	19.7

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеновские изображения семян *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* представлены на рис. 1 и 2. Данные по всхожести семян представлены в таблице 1. Выявлено, что абсолютная и грунтовая всхожесть составили 78 и 43% у семян *Platycladus orientalis* и 43 и 20% у семян *Thuja sutchuenensis*, соответственно.

В табл. 2 приведены данные по всхожести из тех же партий семян, полученные за 3 года испытаний на территории научно-опытной станции “Отрадное” БИН РАН. Как видно из табл. 2, данные по всхожести семян сопоставимы с данными полученными при проращивании образцов семян после рентгенографии.

При визуальном анализе цифровых рентгенографических изображений семена *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* были разделены на 3 группы: пустые (невыв-

Рис. 1. Рентгеновские изображения (а) и результаты проращивания семян (b) *Platycladus orientalis*.

Зеленым цветом отмечены проросшие семена (всходы).

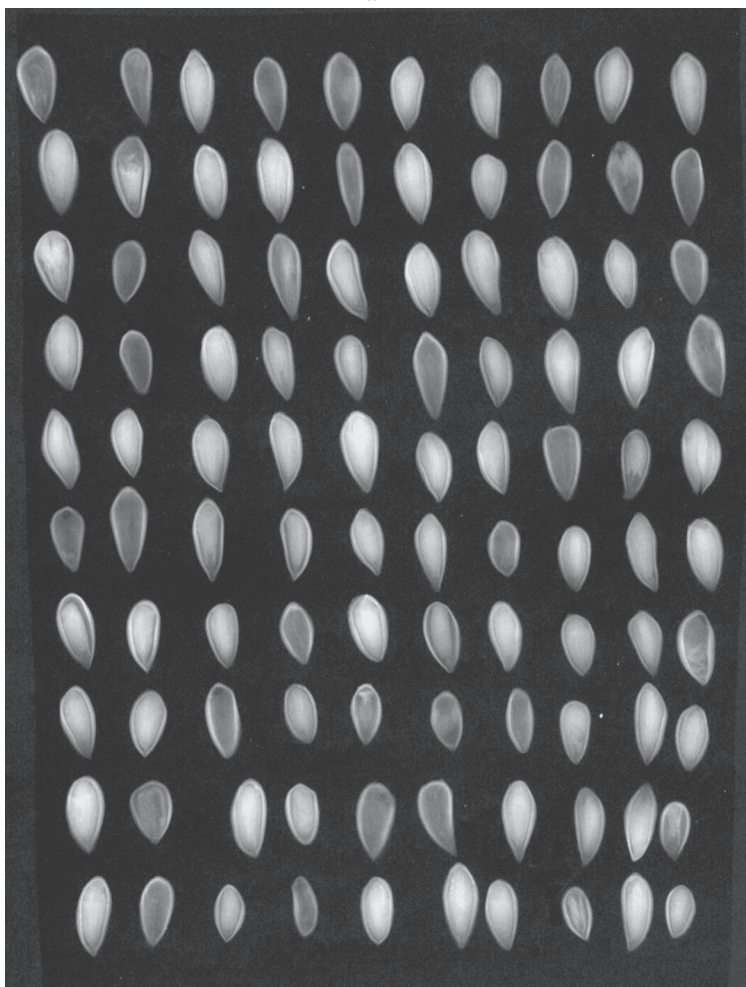
Нумерация семян на схеме дана в соответствии с их положением на снимке.

Fig. 1. X-ray images (a) and results of seed sprouting (b) of *Platycladus orientalis*.

The sprouted seeds (seedlings) are marked in green.

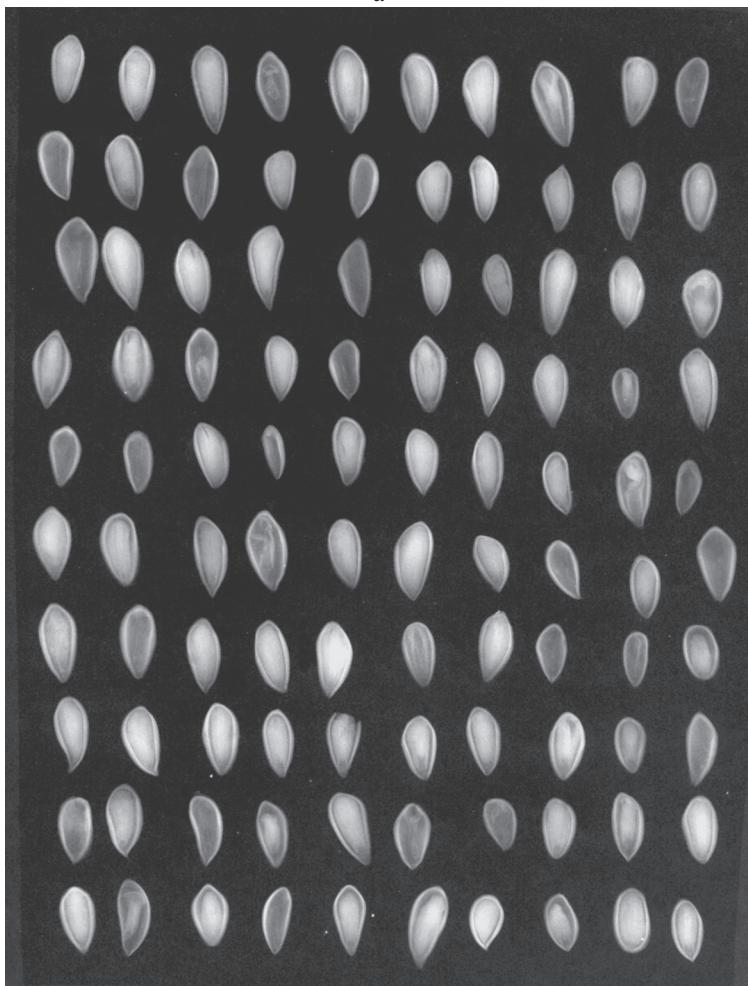
The numbering of seeds in the diagram is given in accordance with their location in the picture.

a



b

					6	7			
11		13	14		16	17			
		23		25	26		28		
31		33					38	38	
	42	43	44	45	46	47			
					56		58	39	60
	62	63		65		67	68	69	
			74					79	80
81		83					88		
91				95	96	97		99	100

a*b*

					7				
	12								
	22		24			28	28		
	32		34			37	38		
		43			46				
						57			
			73	74		76			
	82								100
			93					99	

←
Рис. 2. Рентгеновские изображения (а) и результаты проращивания семян (б) *Thuja sutchuenensis*. Желтым цветом отмечены проросшие семена.

Нумерация семян на схеме дана в соответствии с их положением на снимке.

Fig. 2. X-ray images (a) and results of a seed sprouting (b) of *Thuja sutchuenensis*.

The sprouted seeds (seedlings) are marked in yellow.

The numbering of seeds in the diagram is given in accordance with their location in the picture.

полненные) — группа 0, частично выполненные (недовыполненные) — группа 1, нормально развитые — группа 2.

У обоих изученных видов показатель средней яркости цифровых рентгенографических изображений семян трех выделенных качественных групп обнаруживает достоверные различия (рис. 3). Средняя яркость изображений частично выполненных и пустых семян по сравнению с нормально развитыми снижается соответственно на 10 и 30%. Вес отдельных семян *Platyclusus orientalis* и *Thuja sutchuenensis*, относящихся к разным группам, также достоверно различается (рис. 4). В данном случае различия более выраженные — соответственно 14–23 и 45–46%.

По величине всхожести различия всех выделенных групп семян выявлены только у *Platyclusus orientalis* (рис. 5а). Всхожесть нормально развитых семян составила ~80% и была в 2.7 раза выше, чем всхожесть частично выполненных. У *Thuja sutchuenensis* группы частично выполненных (1) и нормально развитых (2) семян по этому показателю достоверно не различаются (рис. 5б). Всхожесть нормально развитых семян *Thuja sutchuenensis* оказалась в 2 раза более низкой, чем у *Platyclusus orientalis*, при этом всхожесть частично выполненных семян у двух видов достоверно не различается.

На основе корреляционного анализа (табл. 3) установлено, что показатель яркости изображений и вес семян *Platyclusus orientalis* имеют среднюю степень связи с их всхожестью ($r = 0.67$ и 0.60). У *Thuja sutchuenensis* связь этих параметров является, хотя и достоверной, но очень слабой ($r = 0.44$ и 0.29). Следует отметить, что у обоих видов параметр яркости цифровых изображений более тесно связан со всхожестью, чем вес семян.

Проблема сопоставления рентгеновских и морфофизиологических характеристик семян является сложной по ряду причин, как технического, так и биологического свойства, а именно:

— цифровые рентгеновские изображения семян были получены только в одной проекции. Вместе с тем было показано, что при изменении положения зерновки при рентген-съемке, визуализация и, соответственно, количественная оценка дефекта может быть отличной от первоначальной [20];

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа средней яркости цифровых рентгенографических изображений, веса семян и их всхожести

Table 3. Results of the correlation analysis of average brightness of digital X-ray images, weight and germination of seeds

Характеристика Characteristic	<i>Platyclusus orientalis</i>	<i>Thuja sutchuenensis</i>
	Всхожесть, % Germination, %	
Средняя яркость, ед. Average brightness, units	0.67 ($p < 0.05$)	0.44 ($p < 0.05$)
Вес отдельных семян, г Weight of individual seeds, g	0.60 ($p < 0.05$)	0.29 ($p < 0.05$)

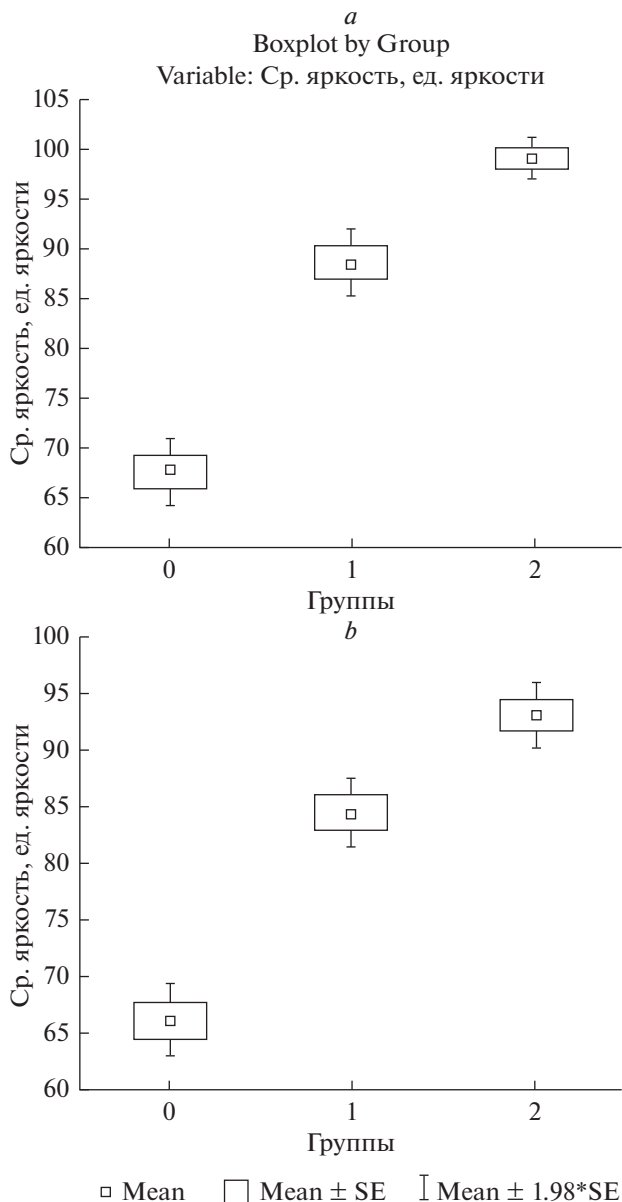


Рис. 3. Средняя яркость цифровых рентгенографических изображений семян *Platycladus orientalis* (a) и *Thuja sutchuenensis* (b) относящихся к разным качественным группам.

По горизонтали: 0 – пустые (невыполненные) семена; 1 – частично выполненные (недовыполненные) семена; 2 – нормально развитые (выполненные) семена. *По вертикали:* средняя яркость (ед. яркости).

Fig. 3. Average brightness of digital X-ray images of seeds of *Platycladus orientalis* (a) and *Thuja sutchuenensis* (b) relating to different qualitative groups.

X-axis: 0 – empty (blind) seeds; 1 – partially filled seeds; 2 – normally developed (filled) seeds. *Y-axis:* average brightness (brightness units).

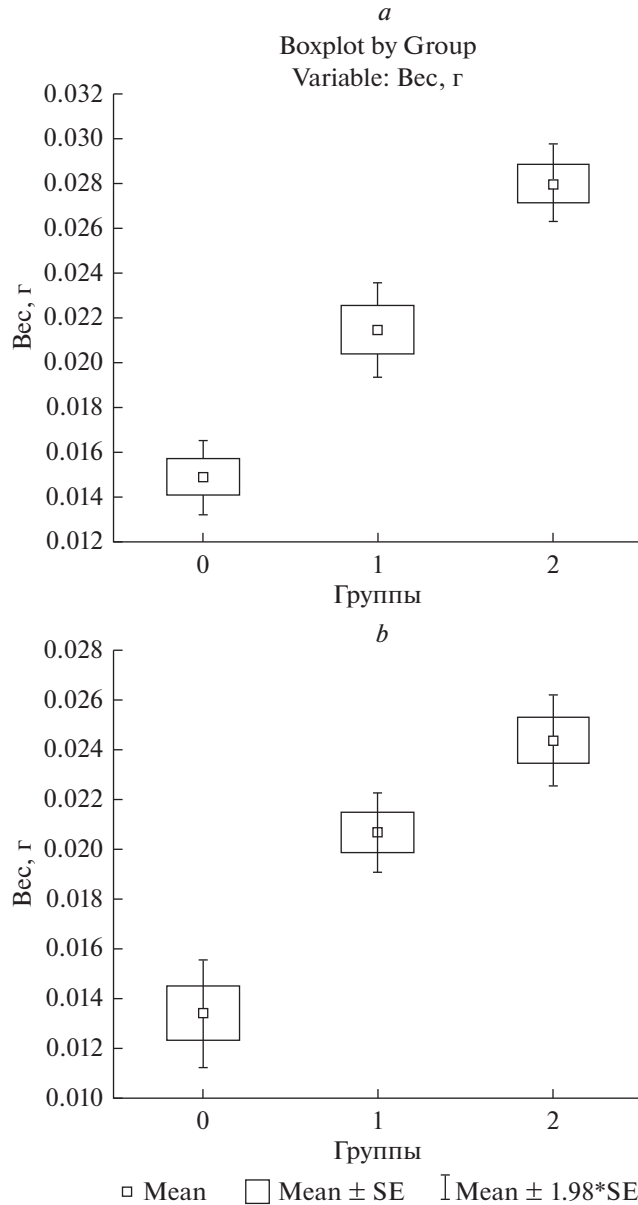


Рис. 4. Вес семян *Platycladus orientalis* (a) и *Thuja sutchuenensis* (b), относящихся к разным качественным группам.

По горизонтали: 0 – пустые (невыполненные) семена; 1 – частично выполненные (недовыполненные) семена; 2 – нормально развитые (выполненные) семена.

По вертикали: вес, г.

Fig. 4. The weight of *Platycladus orientalis* (a) and *Thuja sutchuenensis* (b) seeds relating to different qualitative groups.

X-axis: 0 – empty (blind) seeds; 1 – partially filled seeds; 2 – normally developed (filled) seeds.

Y-axis: weight, g.

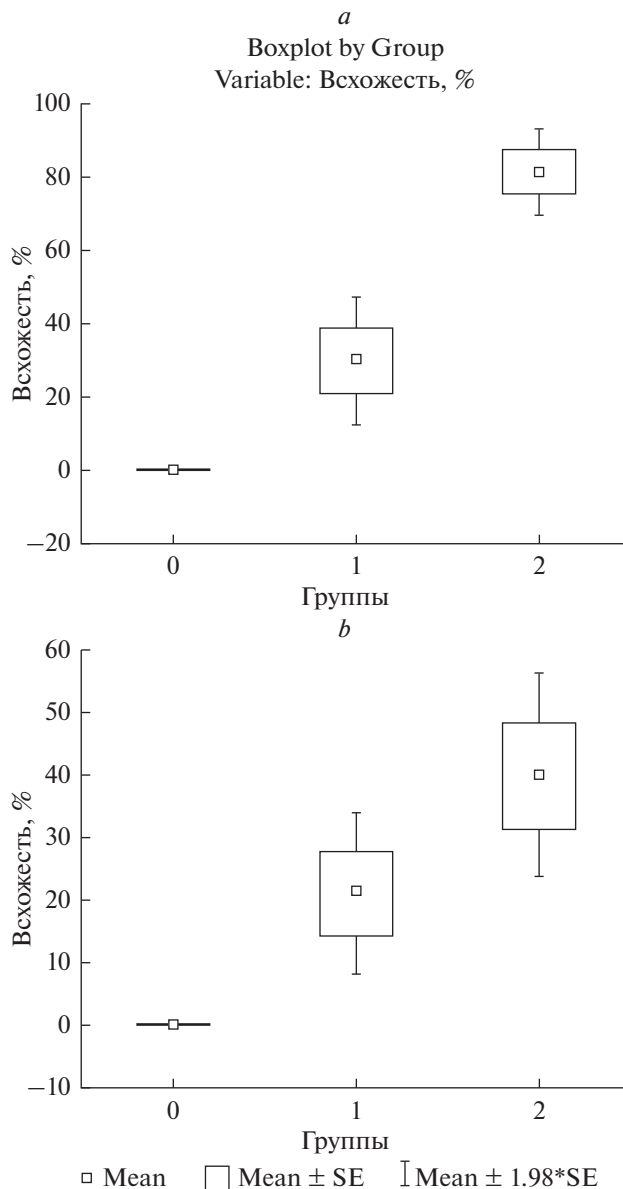


Рис. 5. Всхожесть семян *Platycladus orientalis* (a) и *Thuja sutchuenensis* (b), относящихся к разным качественным группам.

По горизонтали: 0 – пустые (невыполненные) семена; 1 – частично выполненные (недовыполненные) семена; 2 – нормально развитые (выполненные) семена.

По вертикали: всхожесть, %.

Fig. 5. Seed germination of *Platycladus orientalis* (a) and *Thuja sutchuenensis* (b) relating to different qualitative groups.

X-axis: 0 – empty (blind) seeds; 1 – partially filled seeds; 2 – normally developed (filled) seeds.

Y-axis: germination, %.

– биологически полноценные семена также могут быть гетерогенны по показателям энергии прорастания, всхожести и силы роста [21]. Причина такого разнообразия связана, в частности, с различиями морфологических показателей зародыша, которые могут быть идентифицированы как рентген-позитивные признаки [22]. В этом случае необходим количественный анализ цифровых рентгеновских изображений, с использованием методов классификации снимков [23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа скрытых дефектов семян двух видов древесных растений *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* методом микрофокусной рентгенографии в сочетании с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений установлено, что пустые (невыполненные) и частично выполненные семена, по сравнению с нормально развитыми, имеют статистически достоверно пониженные значения показателя средней яркости рентгенограмм на 26–30 и 9–10 единиц соответственно.

Оценка веса семян исследуемых видов показала, что пустые (невыполненные) и частично выполненные семена имеют достоверно более низкие значения этого показателя на 0.011–0.013 и 0.003–0.006 г соответственно.

Определение посевных качеств семян стандартными методами (всхожесть) показало, что абсолютная и грунтовая всхожесть семян *Platycladus orientalis* составила соответственно 78 и 43% и была более высокой, чем всхожесть семян *Thuja sutchuenensis* – 43 и 20%. Всхожесть нормально развитых семян *Platycladus orientalis* (~80%) примерно в 2 раза превышает их всхожесть у *Thuja sutchuenensis*; существенных различий во всхожести частично выполненных семян (22–30%) у двух видов не наблюдается.

На основе анализа связи яркости цифровых рентгеновских изображений семян исследованных видов, их веса и посевных качеств установлено, что показатель средней яркости рентгенограмм имеет достоверную, но умеренно тесную связь с их всхожестью – $r = 0.67$ (*Platycladus orientalis*) и $r = 0.44$ (*Thuja sutchuenensis*), вес семян – более слабою: $r = 0.60$ и 0.29 , соответственно. Показатели связи у *Platycladus orientalis* достоверно выше, чем у *Thuja sutchuenensis*.

Приведенные данные позволяют сделать заключение, что метод микрофокусной рентгенографии в сочетании с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений может являться эффективным дополнительным инструментом для оперативного выявления дефектных семян древесных пород и стать основой для создания промышленных сортировщиков (сепараторов) семян для нужд лесного семеноводства.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0667-2019-0013 и государственного задания по плановым темам “Коллекция живых растений Ботанического института им. В.Л. Комарова (история, современное состояние, перспективы использования)” (№: АААА-А18-118032890141–4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang C.Q., Yang Y., Ohsawa M., Momohara A., Yi S.-R., Robertson K., Song K., Zhang S.-Q., He L.-Y. 2015. Community Structure and Survival of Tertiary Relict *Thuja sutchuenensis* (Cupressaceae) in the Subtropical Daba Mountains, Southwestern China. – PLoS One. 10(4): e0125307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125307>
2. Zunji Jian, Ma Fanqiang, Guo Quanshui, Pei Shunxiang, Qin Alli, Xiao Wenfa, Zhao Zhilu. 2017. Responses of Survival and Growth of *Thuja sutchuenensis* Reintroduction Seedlings to Altitude Gradient 林业科学. – Scientia Silvae Sinicae. 53(11): 1–11. (In Chinese) <https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20171101>
3. Алексеев В.А. 1989. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. – Лесоведение. 4: 51–57.

4. Лапин П.И., Сиднева С.В. 1973. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений. — В сб. научных трудов: Опыт интродукции древесных растений. М. С. 7–67.
5. Лапин П.И. Калуцкий К.К., Калуцкая О.Н. 1979. Интродукция лесных пород. М.: Лесная промышленность. 224 с.
6. Simak M., Gustafsson A. 1953. X-ray photography and sensitivity in forest tree species. — *Hereditas*. 39 p.
<https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1953.tb03430.x>
7. Belcher E.W.Jr., Bozzo I. 1979. Radiographic analysis of agricultural and forest tree seeds. *AOSA Handbook* 31. 29 p.
8. Duffield J.W. 1973. New techniques for reading seed radiographs save time. — *Tree Planter's Notes*. 24(3): 14.
https://rnrnet.net/publications/tpn/24-3/pdf.2005-06-21.9168784267/at_download/file
9. Kamra S.K. 1976. Use of X-ray radiography for studying seed quality in tropical forestry. — *Studia Forestalia Suecica*. 131: 1-34.
<https://pdfs.semanticscholar.org/cbb3/ab11d227fe5136c1535004ad84bc90a8baf5.pdf>
10. Sahlen K., Bergsten U., Wiklund K. 1995. Determination of viable and dead Scots pine seeds of different anatomical maturity after freezing using IDX method. — *Seed Sci. Technol.* 23(2): 405–414.
11. Goodman R.C., Jacobs R.C., Karrfalt R.P. 2005. Evaluating desiccation sensitivity of *Quercus rubra* acorns using X-Ray image analysis. — *Can. J. For. Res.* 35(12): 2823–2831.
<https://doi.org/10.1139/X05-209>
12. Ткаченко К.Г. 2016. Рентгенографический метод определения качества репродуктивных диаспор и выявления в них вредителей. — В сб.: Материалы Всерос. конф. с международным участием “Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике”. Красноярск. С. 226–227.
http://forest.akadem.ru/Konf/2016/IF_a/conference_proc_18-22_04_16.pdf
13. Al-Turki T.A., Baskin C.C. 2017. Determination of seed viability of eight wild Saudi Arabian species by germination and X-Ray tests. — *Saudi Journal of Biological Sciences*. 24(4): 822–829.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.06.009>
14. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Бондаренко А.С. 2013. Применение методов мягколучевой рентгенографии и газоразрядной визуализации для оценки качества семян ели европейской. — *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 31: 62–66.
15. Прияткин Н.С., Бутенко О.Ю., Шабунин Д.С., Архипов М.В., Гусакова Л.П., Бойцов А.А., Потрахов Н.Н., Староверов Н.Е., Саввина К.А. 2018. Исследование рентгеновских и газоразрядных характеристик желудей дуба черешчатого для оценки их посевных качеств. — *Труды Санкт-Петербургского НИИ Лесного хозяйства*. 2: 4–17.
<http://journal.spb-niilh.ru/pdf/2-2018/spbniilh-proceedings-2-2018-1-full.pdf>
16. Архипов М.В., Демянчук А.М., Великанов Л.П., Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Потрахов Е.Н. 2009. Патент РФ № 85292, МПК А01С 1/02. Устройство для рентгенодиагностических исследований зерна и семян. Бюл. № 22.
17. Пантелеев В.Г., Егорова О.В., Клыкова Е.И. 2005. Компьютерная микроскопия. М.: Техносфера. 303 с.
18. Карамышева А.В., Фирсов Г.А., Трофимук Л.П., Орлова Л.В. Особенности и способы семенного размножения кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel, Pinaceae) в Санкт-Петербурге. *Вестник удмуртского университета. Серия биология. Науки о Земле*. 2019 Т. 29, вып. 2: 181–189.
<http://journals.udsu.ru/biology/article/view/4433/4227>
19. Bonner F.T., Brand G.J. 2008. *Platyclusus orientalis* (L.) Franco. In: *The Woody Plant Seed Manual*. Agriculture Handbook 727: 854–855.
https://www.fs.fed.us/rm/pubs_series/wo/wo_ah727.pdf
20. Grundas S., Velikanov L., Archipov M. 1999. Importance of wheat grain orientation for the detection of internal mechanical damage by the X-Ray method. — *Int. Agrophysics*. 13(3): 355–361.
<http://www.international-agrophysics.org/Importance-of-wheat-grain-orientation-for-the-detection-of-internal-mechanical-damage.106971,0,2.html>
21. Савин В.Н., Архипов М.В., Баденко А.Л., Иоффе Ю.К., Грун Л.Б. 1981. Рентгенография для выявления внутренних повреждений и их влияние на урожайные качества семян. — *Вестник сельскохозяйственной науки*. 10: 99–104.
22. Дерунов И.В. 2004. Рентгенографическое исследование семян различных сельскохозяйственных культур и продуктов их переработки. Дис. ... канд. биол. наук. СПб. 116 с.
23. Narvankar D.S., Singh C.B., Jayas D.S., White N.D.G. 2009. Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat. — *Biosystems engineering*. 103(1): 49–56.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.01.016>
24. Прияткин Н.С., Архипов М.В., Гусакова Л.П., Бойцов А.А., Потрахов Н.Н., Староверов Н.Е., Щукина П.А., Капусткина А.В. 2018. Автоматический анализ и классификация цифровых рентгеновских и газоразрядных изображений семян пшеницы, поврежденных клопом —

вредная черепашка, для прогноза их посевных качеств. — Известия СПб ГЭТУ ЛЭТИ. 6: 60–67.
https://izv.etu.ru/assets/files/6_2018_p060-067.pdf

Microfocus X-Ray Radiography Studies of Seed Fullness of *Platycladus orientalis* and *Thuja sutchuenensis* (Cupressaceae) for Predicting Seed Sowing Quality

A. V. Karamysheva^{a, *}, L. P. Trofimuk^b, N. S. Priyatkin^c, M. V. Arkhipov^c, L. P. Gusakova^c,
N. N. Potrakhov^d, V. B. Bessonov^d, and P. A. Shhukina^{d, e}

^aKomarov Botanical Institute RAS, St. Petersburg, Russia

^bScientific Experimental Station “Otradnoye” of Komarov Botanical Institute, Leningrad region, Russia

^cAgrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

^dSaint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russia

^eNorth-Western Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance,
St. Petersburg—Pushkin, Russia

*e-mail: koroviaav@mail.ru

Abstract—Fullness of *Platycladus orientalis* (L.) Franco and *Thuja sutchuenensis* Franch seeds was studied in attempt to predict seed sowing qualities. Seeds of *Platycladus orientalis* were received from Tianshan forest park, Urumchi, China, in October, 2016 and of *Thuja sutchuenensis* – from Zhong Wei Horticultural Products Company, Yibin, Sichuan, China, in December, 2015. The hardware-software system for microfocus X-ray radiography of seeds was designed by the specialists of Agrophysical research institute and the St. Petersburg Electrotechnical University “LETI” using mobile X-ray diagnostic installation PRDU-02. Analysis of latent defects of *Platycladus orientalis* and *Thuja sutchuenensis* seeds, revealed that empty and partially filled seeds, as compared to normally developed ones, have significantly decreased values of the average brightness index on digital X-ray images (by 26–30 and 9–10 units, respectively). Assessment of the seed weight of the studied species showed that empty and partially filled seeds, as compared to normally developed ones, have significantly lower values of this indicator (by 0.011–0.013 g and 0.003–0.006 g less respectively). Sowing qualities of the sampled seeds of *Platycladus orientalis* and *Thuja sutchuenensis* were determined by standard methods (germination). Absolute and field seed germination of *Platycladus orientalis* was 78% and 43%, and of *Thuja sutchuenensis* – 43% and 20%. Assessment of relationships between characteristics of digital X-ray images of the seeds, their weight and sowing qualities, showed that seed germination of *Platycladus orientalis* and *Thuja sutchuenensis* has a reliable moderate association with the average brightness of the radiographs ($r = 0.67$ and 0.44 , respectively), while association with the seed weight is weaker ($r = 0.60$ and 0.29 , respectively).

Keywords: *Platycladus orientalis*, *Thuja sutchuenensis*, seeds quality, microfocus radiography of seeds, seed image analysis

ACKNOWLEDGMENTS

Work is performed within the state task No. 0667-2019-0013 and the state task on planned subjects “Collection of live plants of Komarov Botanical Institute RAS (history, the current state, the prospects of use)” (No.: AAAA-A18-118032890141-4).

REFERENCES

1. Tang C.Q., Yang Y., Ohsawa M., Momohara A., Yi S.-R., Robertson K., Song K., Zhang S.-Q., He L.-Y. 2015. Community Structure and Survival of Tertiary Relict *Thuja sutchuenensis* (Cupressaceae) in the Subtropical Daba Mountains, Southwestern China. — PLoS One. 10(4): e0125307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125307>
2. Zunji Jian, Ma Fanqiang, Guo Quanshui, Pei Shunxiang, Qin Aili, Xiao Wenfa, Zhao Zhilu. 2017. Responses of Survival and Growth of *Thuja sutchuenensis* Reintroduction Seedlings to Altitude Gra-

- dient 林业科学. — *Scientia Silvae Sinicae*. 53(11): 1–11. (In Chinese)
<https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20171101>
3. *Alekseev V.A.* 1989. Diagnostics of the vitality of trees and forest stands. — *Lesovedenie*. 4:51–57. (in Russian)
 4. *Lapin P.I., Sidneva S.V.* 1973. Otsenka perspektivnosti introduktsii drevesnykh rastenii po dannym vizualnykh nabludeni. [Assessment of the arboreal plants introduction prospects according to visual observations] — In: *Sbornik Nauchnykh trudov: Opyt introduktsii drevesnykh rastenii*. Moscow. P. 7–67. (in Russian)
 5. *Lapin P.I., Kalutskii K.K., Kalutskaya O.N.* 1979. Introduktsiya lesnykh porod. [Introduction of forest trees]. Moscow. 224 p. (In Russian)
 6. *Simak M., Gustafsson A.* 1953. X-ray photography and sensitivity in forest tree species. — *Hereditas*. 39 p.
<https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1953.tb03430.x>
 7. *Belcher E.W.Jr., Bozzo I.* 1979. Radiographic analysis of agricultural and forest tree seeds. *AOSA Handbook* 31. 29 p.
 8. *Duffield J.W.* 1973. New techniques for reading seed radiographs save time. — *Tree Planter's Notes*. 24(3): 14.
https://rnr.net/publications/tpn/24-3/pdf.2005-06-21.9168784267/at_download/file
 9. *Kamra S.K.* 1976. Use of X-ray radiography for studying seed quality in tropical forestry. — *Studia Forestalia Suecica*. 131: 1-34.
<https://pdfs.semanticscholar.org/cbb3/ab11d227fe5136c1535004ad84bc90a8baf5.pdf>
 10. *Sahlen K., Bergsten U., Wiklund K.* 1995. Determination of viable and dead Scots pine seeds of different anatomical maturity after freezing using IDX method. — *Seed Sci. Technol.* 23(2): 405–414.
 11. *Goodman R.C., Jacobs R.C., Karrfalt R.P.* 2005. Evaluating desiccation sensitivity of *Quercus rubra* acorns using X-Ray image analysis. — *Can. J. For. Res.* 35(12): 2823–2831.
<https://doi.org/10.1139/X05-209>
 12. *Tkachenko K.G.* 2016. X-ray methods in determination the quality of reproductive diaspore and its pests revealing. In: *Monitoring and biological control methods of woody plant pests and pathogens: from theory to practice*. Proc. of int. conf. Krasnoyarsk. P. 226–227. (In Russian)
http://forest.akadem.ru/Konf/2016/IF_a/conference_proc_18-22_04_16.pdf
 13. *Al-Turki T.A., Baskin C.C.* 2017. Determination of seed viability of eight wild Saudi Arabian species by germination and X-Ray tests. — *Saudi Journal of Biological Sciences*. 24(4): 822–829.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.06.009>
 14. *Arkhypov M.V., Priiatkin N.S., Bondarenko A.S.* 2013. Primeneniye metodov myagkoluchevoy rentgenografii i gazorazryadnoy vizualizatsii dlya otsenki kachestva semyan yeli yevropeiskoy. [Application of soft beam X-ray radiography and gas-discharge visualization for quality assessment of Norway spruce seeds]. — *Izvestiia Saint-Peterburg Sate Agrarian University*. 31: 62–66. (In Russian)
 15. *Priiatkin N.S., Butenko O.Iu., Shabunin D.S., Arkhipov M.V., Guskova L.P., Boitsov A.A., Potrakhov N.N., Staroverov N.E., Savvina K.A.* 2018. Examination of digital X-ray and gas discharge characteristics of English oak acorns (*Quercus robur* L.) for assessment of their sowing qualities. — *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2: 4–17. (In Russian)
<http://journal.spb-niilh.ru/pdf/2-2018/spbniilh-proceedings-2-2018-1-full.pdf>
 16. *Arkhypov M.V., Demianchuk A.M., Velikanov L.P., Potrakhov N.N., Griaznov A.Iu., Potrakhov E.N.* 2009. Patent RF № 85292, MPK A01S 1/02. Ustroistvo dlya rentgenodiagnosticheskikh issledovaniy zerna i semyan [The device for X-ray diagnostic testings of grains and seeds]. *Biul. № 22*. (In Russian)
 17. *Pantelev V.G., Egorova O.V., Klykova E.I.* 2005. *Kompyuternaia mikroskopiya* [Computed microscopy]. Moscow. 303 p. (In Russian)
 18. *Karamysheva A.V., Firsov G.A., Trofimuk L.P., Orlova L.V.* 2019. Peculiarities and methods of seed propagation of dwarf Siberian pine (*Pinus pumila* (Pall.) Regel, Pinaceae) at Saint-Petersburg. — *Vestnik udmurtskogo universiteta Serii biologii. Nauki o Zemle*. 29(2): 181–189.
<http://journals.udsu.ru/biology/article/view/4433/4227>
 19. *Bonner F.T., Brand G.J.* 2008. *Platycladus orientalis* (L.) Franco. In: *The Woody Plant Seed Manual*. Agriculture Handbook 727: 854–855.
https://www.fs.fed.us/rm/pubs_series/wo/wo_ah727.pdf
 20. *Grundas S., Velikanov L., Arkhipov M.* 1999. Importance of wheat grain orientation for the detection of internal mechanical damage by the X-Ray method. — *Int. Agrophysics*. 13(3): 355–361.
<http://www.international-agrophysics.org/Importance-of-wheat-grain-orientation-for-the-detection-of-internal-mechanical-damage.106971,0,2.html>
 21. *Savin V.N., Arkhipov M.V., Badenko A.L., Ioffe Iu.K., Grun L.B.* 1981. Rentgenografiya dlya vyavleniya vnutrennikh povrezhdeniy i ikh vliyaniye na urozhainyye kachestva semyan [X-ray analysis for identification of internal damages and their effect on seed yield characteristics]. — *Vestnik sel'skokhoziaistvennoi nauki*. 10: 99–104. (In Russian)
 22. *Derunov I.V.* 2004. Rentgenograficheskoye issledovaniye semyan razlichnykh selskokhozyaystvennykh kultur i produktov ikh pererabotki: Dis. ... kand. biol. nauk [Radiographic research of the

- seeds of various crops and products of their processing: Diss. Cand. (Biology) Sci.]. Saint Petersburg. 116 p. (In Russian)
23. *Narvankar D.S., Singh C.B., Jayas D.S., White N.D.G.* 2009. Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat. – *Biosystems engineering*. 103(1): 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.01.016>
 24. *Priiatkin N.S., Arkhipov M.V., Gusakova L.P., Boitsov A.A., Potrakhov N.N., Staroverov N.E., Shchukina P.A., Kapustkina A.V.* 2018. Avtomaticheskii analiz i klassifikatsiia tsifrovyykh rentgenovskikh i gazorazriadnykh izobrazhenii semian pshenitsy, povrezhdennykh klopom–vrednaia cherepashka, dlia prognoza ikh posevny khkachestv [The automatic analysis and classification of digital x-ray and gas discharge images of wheat seeds damaged by corn bug for the forecast of their sowing qualities]. – *Izvestiya SPb GETU LETI*. 6: 60–67. (In Russian) https://izv.etu.ru/assets/files/6_2018_p060-067.pdf