

**Инновационные технологии**

УДК 631.53.011:57.084.1

doi: 10.15389/agrobiology.2025.1.60rus

**СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ НЕИНВАЗИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА И РОСТОВОГО ПОТЕНЦИАЛА СЕМЯН НА ПРИМЕРЕ ШПИНАТА ОГОРОДНОГО (*Spinacia oleracea* L.)****М.В. АРХИПОВ<sup>1, 2</sup>, Н.С. ПРИЯТКИН<sup>1</sup> ✉, Ф.Б. МУСАЕВ<sup>3</sup>, И.Г. ДЖАФАРОВ<sup>4</sup>,  
Н.Н. ПОТРАХОВ<sup>5</sup>, Л.П. ГУСАКОВА<sup>1</sup>, Г.Г. ПАНОВА<sup>1</sup>**

Эффективность производства растительной продукции высокого качества в масштабируемых фитотехкомплексах и других сооружениях защищенного грунта во многом определяется качеством и безопасностью семенного материала. Обязательным и необходимым условием служит наличие в составе фитотехкомплексов и сооружений защищенного грунта Блока биологически полноценных семян, который при прочих технических условиях обеспечит эффективность, надежность и конкурентоспособность производства. В настоящей работе впервые были выявлены рентгенографические признаки внутренней структуры семян шпината в связи с их жизнеспособностью, показано совпадение результатов рентгенографического анализа дефектности семян с результатами их лабораторного проращивания. Нашей целью была разработка методики оценки и отбора биологически полноценного семенного материала на основе аппаратно-программных средств микрофокусной рентгенографии с использованием методик визуального и автоматизированного анализа рентгеновских изображений семян шпината, предназначенных для посева в фитотехкомплексах и других сооружениях защищенного грунта. Модельным объектом служили семена шпината огородного (*Spinacia oleracea* L.) сорта Стоик из коллекции ФГБНУ Федерального научного центра овощеводства (Одинцовский г.о., Московская обл.). Рентгеновскую съемку семян проводили с использованием рентгеновского микроскопа РМ-1 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Россия). Полученные цифровые изображения анализировали как визуально, так и с использованием программного обеспечения VideoTeсT-Морфология (ООО «АргусСофт», Россия). Определяли среднюю яркость и среднеквадратическое отклонение яркости (ед. яркости). Посевные качества семян оценивали согласно ГОСТ 12038-84 (М., 1985). Дополнительно измеряли длину корня и ростка с использованием программного обеспечения «VideoTeсT-Морфология» (ООО «АргусСофт», Россия). Установлено, что неполноценные по данным рентгенографического анализа семена шпината сорта Стоик полностью совпали с нежизнеспособными семенами по результатам проращивания. Анализ корреляций между яркостными параметрами цифровых рентгеновских изображений семян и их ростовыми показателями выявил следующие закономерности: коэффициент корреляции средней яркости цифровых рентгеновских изображений и длины корня составил  $r = 0,49$  ( $p < 0,01$ ); коэффициент корреляции среднеквадратического отклонения яркости и длины ростка —  $r = 0,51$  ( $p < 0,01$ ). Показано, что автоматизированный анализ структурной целостности семян шпината в сочетании с сопряженной компьютерной морфометрией проростков позволяет существенно повысить скорость и точность оценки скрытой дефектности семян. Разработанная методика может быть использована при экспресс-оценке и отборе наиболее полноценных семян для посева в масштабируемых фитотехкомплексах и других сооружениях защищенного грунта, предназначенных для круглогодичного интенсивного ресурсосберегающего производства растительной продукции высокого качества с минимальным влиянием условий окружающей среды.

**Ключевые слова:** семенной материал, качество, физические исследования семян, микрофокусная рентгенография, цифровая морфометрия, скрытые дефекты, визуальное дешифрирование, анализ изображений, сепарация семян, фитотехкомплексы, *Spinacia oleracea* L., шпинат огородный.

Качество и безопасность семенного материала — один из важнейших аспектов, определяющих эффективность производства растительной продукции высокого качества в масштабируемых фитотехкомплексах (1) и других сооружениях защищенного грунта. В связи с этим обязательным и необходимым условием служит наличие в составе фитотехкомплексов и сооружений защищенного грунта Блока биологически полноценных семян, который обеспечивает эффективность, надежность и конкурентоспособность производства. Необходимо отметить, что реализация технологических режимов выращивания биологически полноценных семян также важна для стабильного получения растительной продукции высокого качества. Тради-

ционно качество семян овощных культур определяют по таким показателям, как масса 1000 семян, жизнеспособность, энергия прорастания и всхожесть, а также используют калибровку по размеру и плотности. По данным В.А. Лудилова (2), физиологически зрелые семена ряда овощных культур характеризуются высокими показателями как всхожести, так и энергии прорастания.

В секторе биофизики растений Агрофизического НИИ стандартные методы анализа качества семян были дополнены компьютерной морфометрией проростков: измерением длины и массы ростков и зародышевых корней на дату определения всхожести, а в отдельных случаях замеры проводились в динамике — на 7-е, 10-е и 15-е сут. Изначально оценивали семена злаковых зерновых культур, затем методика была модифицирована для овощных культур (3-5). Несмотря на эффективность такого подхода к оценке посевных качеств семян, следует отметить его трудоемкость и длительность исполнения. Современные исследования требуют применения инструментальных биофизических методов для отбора биологически полноценных семян (6-8).

Одним из наиболее универсальных методов оценки качества семян считается микрофокусная рентгенография, которая входит в отечественный и в международный стандарты и позволяет исследовать внутреннюю структуру семян в условиях прецизионных экспериментов и при массовых анализах (7-9). Метод получил широкое распространение в семеноведении различных сельскохозяйственных культур (10-12). Первые рентгенографические исследования семян овощных культур — дыни, капусты и лука батуна (5), гороха, горчицы листовой, редиса, огурца, салата, свеклы, томата, укропа (6, 9, 10) в нашей стране также проведены сотрудниками Агрофизического НИИ. В настоящее время рентгеновский метод для оценки семян овощных культур используется как в России (10, 12, 13), так и за рубежом. На основе анализа рентгенографических изображений семян овощных культур исследована связь между их физической целостностью и всхожестью на образцах базилика (14), баклажана (15), бобов и свеклы (16), брокколи (17), дыни и арбуза (18, 19), крэмбе (20, 21), огурца (22), перца и томата (23-25), сквоша (22, 26). Все чаще применяется компьютерный анализ цифровых рентгеновских изображений (27-29).

При отборе полноценных семян овощных культур для последующего посева в фитотехкомплексах необходимо учитывать несколько факторов: целевое назначение сепарируемой партии, вид сельскохозяйственной культуры, исходные качественные характеристики сепарируемых партий семян, производительность оборудования и стоимость работ по сепарации. Этот принцип позволит подбирать оптимальные технологические решения как на основе одного метода сепарации, так и в сочетании с предварительным фракционированием. Последний вариант представляется более обоснованным (30).

Перечень сортировщиков семян, основанных на различных принципах работы — механическом (31), пневматическом (32), электростатическом (33, 34), фотоэлектрическом (35) и рентгеновском (24, 36) — достаточно широк на российском и зарубежных рынках. Однако технологии автоматизированной сортировки семян еще нуждаются в совершенствовании и апробации на различных овощных культурах, предназначенных для круглогодичного выращивания растительной продукции, в том числе в условиях интенсивной светокультуры.

Мы полагаем, что отбор наиболее хозяйственно полноценных семян овощных культур, предназначенных для посева в фитотехкомплексах,

особенно малогабаритных, а также в сооружениях защищенного грунта, лучше осуществлять посредством ручной сепарации на основе визуального и(или) автоматизированного анализа цифровых рентгеновских и цифровых фотографических изображений.

Подход на основе ручной сепарации был реализован нами при отборе качественных семян с минимальной долей хозяйственно значимых скрытых дефектов для использования в качестве посевного материала в вегетационно-облучательном оборудовании нового типа.

В настоящей работе впервые выявлены рентгенографические признаки внутренней структуры семян шпината в связи с их жизнеспособностью и показано совпадение результатов рентгенографического анализа всхожести семян с результатами их лабораторного проращивания.

Нашей целью была разработка методики оценки и отбора биологически полноценного семенного материала на основе аппаратно-программных средств микрофокусной рентгенографии с использованием методик визуального и автоматизированного анализа рентгеновских изображений семян шпината, предназначенных для посева в фитотехкомплексах и других сооружениях защищенного грунта.

*Методика.* Модельным объектом служили семена шпината огородного (*Spinacia oleracea* L.) сорта Стоик (400 шт., размер рабочей выборки 50 шт.) из коллекции ФГБНУ Федерального научного центра овощеводства (Одинцовский г.о., Московская обл.).

Рентгеновскую съемку семян проводили с использованием рентгеновского микроскопа РМ-1 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Россия). Анализ полученных цифровых изображений осуществляли как визуальным способом, так и с использованием программного обеспечения ВидеоТест-Морфология (ООО «АргусСофт», Россия). Анализировали среднюю яркость и среднеквадратическое отклонение яркости (ед. яркости).

Рентгенографический анализ качества семян проводили по Ф.Б. Музаеву с соавт. (37). Шаблонные рентгеновские изображения выбирали из всей совокупности снимков как наиболее типичные по указанным рентгенографическим признакам.

Посевные качества тех же семян определяли, проращивая их в лабораторных условиях на вертикальных пластинках согласно ГОСТ 12038-84 (М., 1985) при температуре 15 °С в течение 14 сут.

Дополнительно проводили линейные измерения проростков с использованием программного обеспечения ВидеоТест-Морфология» (ООО «АргусСофт», Россия), учитывали длину корня и ростка.

Статистический анализ выполняли в программе Statistica 10 («Stat-Soft, Inc.», США), рассчитывали коэффициенты корреляции ( $r$ ) Спирмана.

*Результаты.* Семена шпината оказались удачным объектом для рентгенографического анализа. Внутренние дефекты и недостатки семян на рентгенограммах отражались четко и контрастно (рис. 1).

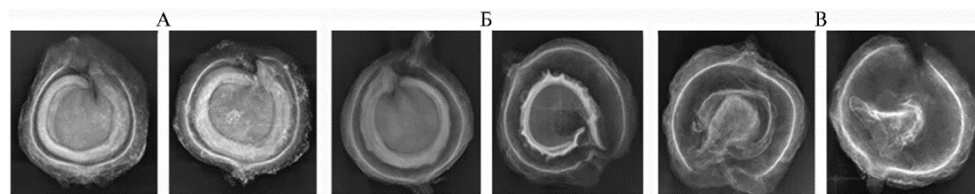


Рис. 1. Шаблонные рентгеновские изображения семян шпината (*Spinacia oleracea* L.) сорта Стоик, сделанные с использованием рентгеновского микроскопа РМ-1 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Россия; прямое рентгеновское увеличение 10×): А — нормальные семена, Б — невыполненные (пустотелые) семена.

При визуальном анализе цифровых рентгенографических изображений были выявлены следующие структурные дефекты (рис. 2): семена №№ 7, 9, 30 и 34 характеризовались как невыполненные, №№ 1, 3, 13 и 21 просматривались как частично невыполненные, семя № 43 выглядело как поврежденное по сочетанию нерегулярных светлых и темных теней. Всего обнаружили 9 неполноценных семян.

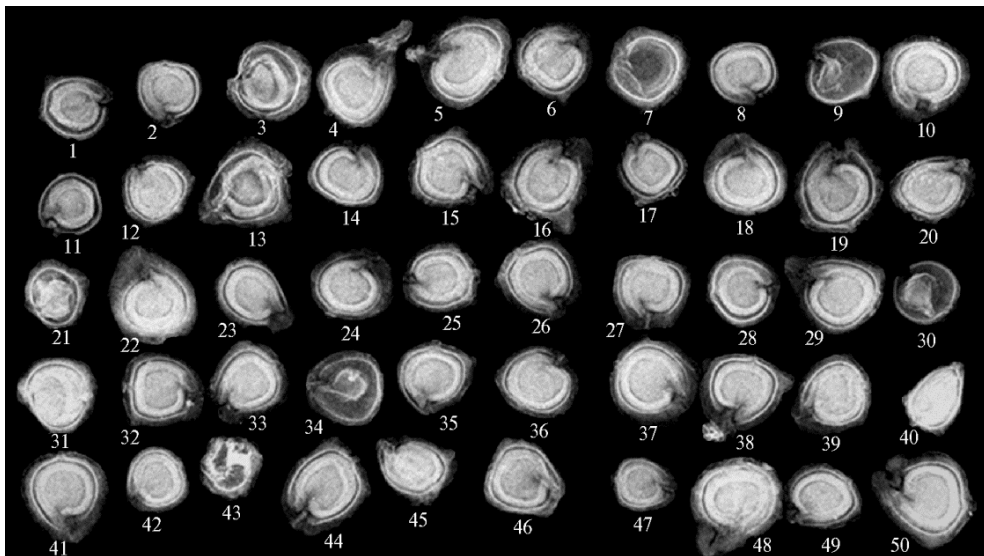


Рис. 2. Рентгеновский снимок семян (1-50 — номера семян) шпината (*Spinacia oleracea* L.) сорта Стоик, сделанный с использованием рентгеновского микроскопа РМ-1 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Россия; увеличение 10×).

Лабораторный анализ посевных качеств семян шпината сорта Стоик (рис. 3) показал, что 33 семени проросли и сформировали нормальные ростки, 8 семян успели наклониться к моменту регистрации показателей на 14-е сут, 9 семян не проросли. В итоге неполноценные семена, выявленные при рентгенографическом анализе, оказались нежизнеспособными по результатам проращивания.



Рис. 3. Цифровая фотография проростков шпината (*Spinacia oleracea* L.) сорта Стоик из семян после рентгеновского анализа (фотоаппарат Canon EOS 5D, «Canon», Япония).

Автоматизированный анализ цифровых рентгеновских изображений семян в сочетании с цифровой морфометрией проростков (табл.) выявил, что семена №№ 7, 9, 30 и 34 характеризовались минимальными значениями средней яркости в диапазоне от 90 до 113 ед. яркости и минимальным среднеквадратическим отклонением яркости в диапазоне от 40 до 49 ед. яркости. Семена №№ 1, 3, 13 и 21 характеризовались пониженными значениями среднеквадратического отклонения яркости в диапазоне от 49 до 55 ед. яркости.

**Результаты компьютерного анализа цифровых рентгеновских изображений семян шпината (*Spinacia oleracea* L.) сорта Стоик в сочетании с цифровой морфометрией проростков**

№ семени	Рентгенографические показатели, ед. яркости		Ростовые показатели, мм	
	средняя яркость	среднеквадратическое отклонение яркости	длина ростка	длина корня
1	116	49	0	6
2	132	50	0	7
3	131	50	0	0
4	135	63	15	8
5	140	63	7	10
6	126	62	13	15
7	113	49	0	0
8	137	50	7	13
9	101	43	0	0
10	139	68	18	12
11	113	50	12	10
12	140	61	17	20
13	120	55	0	0
14	139	58	18	17
15	129	62	16	8
16	114	60	9	5
17	121	56	17	13
18	136	61	13	8
19	107	52	0	6
20	130	58	8	10
21	133	55	0	0
22	140	64	5	11
23	127	59	12	19
24	116	65	13	11
25	134	61	7	7
26	123	61	13	13
27	130	59	14	12
28	133	57	0	6
29	125	67	13	12
30	90	40	0	0
31	164	59	10	10
32	123	62	8	17
33	130	65	2	8
34	96	41	0	0
35	138	57	14	15
36	137	62	10	9
37	135	67	15	15
38	126	62	0	5
39	136	65	12	10
40	173	54	12	18
41	123	58	0	7
42	150	54	0	8
43	131	58	0	0
44	125	61	8	6
45	141	63	15	18
46	142	46	8	11
47	122	52	12	9
48	144	63	0	7
49	130	61	8	17
50	128	61	13	7

По результатам корреляционного анализа яркостных параметров для цифровых рентгеновских изображений семян у шпината сорта Стоик с их ростовыми показателями коэффициент корреляции средней яркости

для цифровых рентгеновских изображений и длины корня составил  $r = 0,49$  ( $p < 0,01$ ), коэффициент корреляции среднеквадратического отклонения яркости и длины роста —  $r = 0,51$  ( $p < 0,01$ ).

Следует отметить, что семя как биологический и агрономический объект представляет собой сложную живую систему, на жизнеспособность и развитие которой воздействует множество факторов. Так, у различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений на ростовые показатели семян влияют не только степень их выполненности (6, 38, 39), но и размерные характеристики, форма (9, 20, 40), а также степень развития зародыша, которую также можно оценить объективно, в том числе с использованием средств компьютерного анализа изображений (40, 41). Эти данные согласуются с результатами других исследователей (15, 25, 26). Метод мягколучевой рентгенографии используется также для обнаружения грибных инфекции в семенах злаковых культур (43, 44) и насекомых-вредителей, в частности кукурузного долгоносика (44).

Любой структурный дефект семени может в той или иной мере негативно повлиять на его способность к прорастанию и дальнейшему развитию растения в ювенильный период. В зависимости от степени развития дефекта и его локализации эти негативные признаки могут иметь фатальный характер (семя не способно к прорастанию) либо существенно снижать ростовой потенциал. Поэтому при анализе скрытых дефектов семян целесообразно вводить такой индекс, как суммарное число скрытых дефектов (6, 9). Этот подход активно используется в биологии и медицине, например при оценке патологии сперматозоидов человека по их морфологическим признакам (45).

Для автоматизированной оценки скрытых дефектов перспективу представляет создание специализированного программного обеспечения на основе нейронных сетей. Такие исследования уже точно представлены в зарубежных источниках (29, 41, 45). Многообразие скрытых дефектов (6, 9, 10), а также видовое разнообразие изучаемых растений (около 500 видов, включая зерновые, зернобобовые, кормовые, технические, овощные, плодовые, лекарственные, цветочные, древесные лесные породы) делают эту задачу хотя и технически сложной, затратной по времени и ресурсам, но принципиально необходимой и реально выполнимой.

Таким образом, на примере шпината огородного с помощью аппаратно-программных средств микрофокусной рентгенографии и цифровой морфометрии, а также методик визуального и автоматизированного анализа изображений мы показали возможность неинвазивной оценки качества и ростового потенциала семян и выявили корреляционные зависимости между значениями яркостных параметров цифровых рентгеновских изображений семян и их ростовых показателей. Разработанная и апробированная методика автоматизированного анализа структурной целостности семян овощных культур в сочетании с сопряженной компьютерной морфометрией проростков дает возможность существенно повысить скорость и точность оценки скрытой дефектности семян. В ближайшем будущем такой подход создаст основу для разработки принципиально новых алгоритмов автоматизированного отбора наиболее полноценных семян в семеноведении и семеноводстве, в том числе для посева в фитотехкомплексах или в других сооружениях защищенного грунта.

*<sup>1</sup>ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,*  
195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,  
e-mail: agrentgen@mail.ru, prini@mail.ru ✉, l-gusakova@mail.ru,

*Поступила в редакцию*  
*2 июля 2024 года*  
Принята к публикации  
13 августа 2024 года

gaiane@inbox.ru;

<sup>2</sup>ФГБНУ Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения — обособленное структурное подразделение ФГБУН Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,

196608 Россия, г. Санкт-Петербург—Пушкин, ш. Подбельского, 7А;

<sup>3</sup>ФГБНУ Федеральный научный центр овощеводства, 143080 Россия, Московская обл., Одинцовский г.о., пос. ВНИИССОК, ул. Селекционная, 14, e-mail: musayev@bk.ru;

<sup>4</sup>Научно-исследовательский институт защиты растений и технических культур

МСХ Азербайджанской Республики,

AZ 2002, Азербайджанская Республика, г. Гянджа, ул. Азиза Алиева, 91, e-mail: info@bmtbeti.az;

<sup>5</sup>ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина),

197022 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: kzhamova@gmail.com

*Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2025, V. 60, № 1, pp. 60–69

## ADVANCED CAPABILITIES OF NON-INVASIVE ASSESSMENT OF SEED QUALITY AND GROWTH POTENTIAL ON THE EXAMPLE OF GARDEN SPINACH (*Spinacia oleracea* L.)

M.V. Arkhipov<sup>1, 2</sup>, N.S. Priyatkin<sup>1</sup> ✉, F.B. Musayev<sup>3</sup>, I.G. Jafarov<sup>4</sup>, N.N. Potrakhov<sup>5</sup>, L.P. Gusakova<sup>1</sup>, G.G. Panova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agrophysical Research Institute, 14 Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail agrorentgen@mail.ru, prini@mail.ru (✉ corresponding author); l-gusakova@mail.ru, gaiane@inbox.ru;

<sup>2</sup>North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance — a separate division of the St. Petersburg Federal Research Center RAS, 7A, sh. Podbelskogo, St. Petersburg—Pushkin, 196608 Russia;

<sup>3</sup>Federal Scientific Vegetable Center, 14 Selektsionnaya ul., Odintsovo, 143080 Russia, e-mail musayev@bk.ru;

<sup>4</sup>Scientific Research Institute of Plant Protection and Technical Plants of the Ministry of Agriculture Republic of Azerbaijan, 91, Aziz Aliyev, Ganja city, Republic of Azerbaijan, e-mail info@bmtbeti.az;

<sup>5</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197022 Russia, e-mail kzhamova@gmail.com

ORCID:

Arkhipov M.V. orcid.org/0000-0002-6903-6971

Priyatkin N.S. orcid.org/0000-0002-5974-4288

Musayev F.B. orcid.org/0000-0001-9323-7741

Jafarov I.G. orcid.org/0009-0000-3985-3658

The authors declare no conflict of interests

Final revision received July 02, 2024

Accepted August 13, 2024

Potrakhov N.N. orcid.org/0000-0001-8806-0603

Gusakova L.P. orcid.org/0000-0002-6178-2953

Panova G.G. orcid.org/0000-0002-1132-9915

doi: 10.15389/agrobiol.2025.1.60eng

### Abstract

The efficiency of production of high quality plant products in scalable phytotechcomplexes and other protected ground facilities is largely determined by the quality and safety of seed material. An obligatory and necessary condition is the presence in the composition of phytotechcomplexes and facilities of protected ground Block of biologically complete seeds, which under other technical conditions will ensure the efficiency, reliability and competitiveness of production. In the present work, for the first time, radiographic features of the internal structure of spinach seeds were identified in relation to their viability, and the concordance of the results of radiographic analysis of seed defectiveness with those from laboratory germination was shown. The aim of the work was to develop a methodology for evaluation and selection of the most biologically valuable seed material on the basis of hardware-software microfocuss radiography using techniques of visual and automatic analysis of digital X-ray images of vegetable seeds (spinach as an example), intended for sowing in phytotechcomplexes and other protected facilities. Spinach seeds of Stoick variety from the collection of the Federal Scientific Center of Vegetable Growing served as a model. X-ray imaging was carried out using an X-ray microscope RM-1. The analysis of the obtained digital X-ray images of spinach was performed visually and using the software VideoTesT-Morphology (ArgusSoft Ltd., Russia). The following parameters of digital X-ray images of seeds were analyzed: average brightness (brightness units), standard deviation of brightness (brightness units). Sowing qualities of seeds were evaluated according to GOST 12038-

84. Additionally, root and shoot length indices were measured using the VideoTesT-Morphology software. The characteristics of the methodology of visual and automatic interpretation of digital X-ray images of spinach seeds with computer-assisted morphometry of seedlings are presented. It was found that defective seeds identified by X-ray analysis completely corresponded with non-viable seeds according to the germination test. Correlation analysis of brightness parameters of digital X-ray images of spinach seeds of Stoick variety with their growth parameters revealed the following patterns: correlation coefficient of mean brightness of digital X-ray images and root length was  $r = 0.49$  ( $p < 0.01$ ); correlation coefficient of standard deviation of brightness and sprout length was  $r = 0.51$  ( $p < 0.01$ ). It is shown that automatic analysis of the structural integrity of vegetable seeds in combination with the computer-assisted morphometry of seedlings allows significantly increasing the speed and accuracy of assessment of hidden defectiveness of seeds. The developed methodology can be used in express-evaluation and selection of the most complete seeds for sowing in scalable phytotechcomplexes, other protected facilities designed for year-round intensive waste-free resource-saving production of plant products of high quality regardless of environmental conditions.

Keywords: seed quality assessment, physical techniques of seed research, microfocus radiography, digital morphometry, hidden defects of seeds, visual interpretation, seed image analysis, seed sorting, phytotechcomplexes, *Spinacia oleracea* L., garden spinach.

## REFERENCES

1. Panova G.G., Udalova O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Chernousov I.N. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2020, 90(10): 1633-1639 (doi: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19) (in Russ.).
2. Ludilov V.A. *Semenovedenie ovoshchnykh i bakhchevykh kul'tur* [Seed production of vegetable and melon crops]. Moscow, 2005 (in Russ.).
3. Velikanov L.P., Grundas S., Archipov M.V., Demianichuk A.M., Gusakova L.P. Agrophysical direction of further development and application of X-ray method. *Nowe trendy w agrofizyce*. Lublin, Poland, 2008: 147-148.
4. Cicero S.M., van der Heijden G.W.A.M., van der Burg W.J. Evaluation of mechanical damage in seeds of maize (*Zea mays* L.) by X-ray and digital imaging. *Seed Science and Technology*, 1998, 26(1): 603-612.
5. Savin V.N., Arkhipov M.V., Gusakova L.P. *Agrarnaya nauka*, 1997, 2: 23-25 (in Russ.).
6. Arkhipov M.V., Potrakhov N.N., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Shchukina P.A., Borisova N.R. *Neinvazivnye tekhnologii ekspres-otsenki i otbora biologicheskii polnotsennykh semyan dlya vyrashchivaniya rastitel'noy produktsii v vegetatsionno-obluchatel'nom oborudovanii novogo tipa* [Non-invasive technologies for express evaluation and selection of biologically complete seeds for growing plant products in new type of vegetation-irradiation equipment]. St. Petersburg, 2019 (in Russ.).
7. Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Shchukina P.A., Mirskaya G.V., Chesnokov Yu.V. Evaluation of heterogeneity and hidden defects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds by instrumental physical methods. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2022, 57(5): 911-920 (doi: 10.15389/agrobiology.2022.5.911rus).
8. Bianchini V.d.M., Mascarin G. M., Silva L.C.A.S., Arthur V., Carstensen J.M., Boelt B., da Silva C.B. Multispectral and X-ray images for characterization of *Jatropha curcas* L. seed quality. *Plant Methods*, 2021, 17: 9 (doi: 10.1186/s13007-021-00709-6).
9. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Potrakhov N.N., Gryaznov A.Yu., Bessonov V.B., Obodovskiy A.V., Staroverov N.E. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2019, 89(4): 627-638 (doi: 10.21883/JTF.2019.04.47324.170-18) (in Russ.).
10. Musaev F.B., Potrakhov N.N., Arkhipov M.V. *Rentgenografiya semyan ovoshchnykh kul'tur* [X-ray of vegetable seeds]. St. Petersburg, 2016 (in Russ.).
11. Tkachenko K.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu. *Hortus botanicus*, 2018, 13: 52-66 (in Russ.).
12. Podvigina O.A., Bartenev I.I., Novikova A.V. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2021, 4: 5-13 (doi: 10.26897/0021-342X-2021-4-5-15) (in Russ.).
13. Musaev F., Priyatkin N., Potrakhov N., Beletskiy S., Chesnokov Y. Assessment of *Brassicaceae* seeds quality by X-ray analysis. *Horticulturae*, 2022, 8(1): 29 (doi: 10.3390/horticulturae8010029).
14. Altizani-Júnior J.C., Cicero S.M., Alves R.M., Gomes-Junior F.G. Non-destructive assessment of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) seeds quality. *Journal of Seed Science*, 2023, 45(1): e202345036 (doi: 10.1590/2317-1545v45277168).
15. Silva V.N., Cicero S.M., Bennett M. Relationship between eggplant seed morphology and germination. *Revista Brasileira de Sementes*, 2012, 34(4): 597-604 (doi: 10.1590/S0101-31222012000400010).
16. Hamdy S., Charrier A., Corre L.L., Rasti P., Rousseau D. Toward robust and high-throughput detection of seed defects in X-ray images via deep learning. *Plant Methods*, 2024, 20: 63 (doi: 10.1186/s13007-024-01195-2).
17. Abud H.F., Cicero S.M., Gomes Junior F.G. Radiographic images and relationship of the internal



- morphology and physiological potential of broccoli seeds. *Acta Scientiarum Agronomy*, 2018, 40: 1-9 (doi: 10.4025/actasciagr.v40i1.34950).
18. Gomes Junior F.G., Chiquito A.A., Marcos-Filho J. Semi-automated assessment of the embryonic area of cucumber seeds and its relationship to germination and seedling length. *Journal of Seed Science*, 2013, 35(2): 183-189 (doi: 10.1590/S2317-15372013000200007).
  19. Ahmed M.R., Yasmin J., Collins W., Cho B.K. X-ray CT image analysis for morphology of muskmelon seed in relation to germination. *Biosystems Engineering*, 2018, 175: 183-193 (doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.09.015).
  20. de Medeiros A.D., Bernardes L.J., da Silva L.J., de Freitas B.A.L. Deep learning-based approach using X-ray images for classifying *Crambe abyssinica* seed quality. *Industrial Crops and Products*, 2021, 164: 113378 (doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113378).
  21. da Silva R. A., Neri T.F.S., de Medeiros A.D., do Carmo Milagres C., da Silva L.J. Use of radiographic images for rapid and non-destructive assessment of crambe seed quality. *Journal of Seed Science*, 2021, 43: e202143001 (doi: 10.1590/2317-1545v43239136).
  22. 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, 40(1): 102-107 (doi: 10.15258/sst.2012.40.1.11).
  23. Gagliardi B., Marcos-Filho J. Relationship between germination and bell pepper seed structure assessed by the X-ray test. *Scientia Agriculturae*, 2011, 68(4): 411-416.
  24. Bruggink H., van Duijn B. X-Ray based seed analysis. *Seed Testing International*, 2017, 153: 43-50.
  25. de Medeiros A.D., Zavala-Leyn M.I.J., da Silva L.J., Oliveira A.M.S., dos Santos Dias D.C.F. Relationship between internal morphology and physiological quality of pepper seeds during fruit maturation and storage. *Agronomy Journal*, 2020, 112(1): 25-35 (doi: 10.1002/agj2.20071).
  26. Silva P.P., Freitas R.A., Cicero S.M., Marcos-Filho J., Nascimento W.M. Image analysis in the morphological and physiological study of pumpkin seeds. *Horticultura Brasileira*, 2014, 32: 210-214 (doi: 10.1590/S0102-05362014000200016).
  27. Dell'Aquila A. Development of novel techniques in conditioning, testing and sorting seed physiological quality. *Seed Science and Technology*, 2009, 37(3): 608-624.
  28. Porsch F. Automated seed testing by 3D X-ray computed tomography. *Seed Science and Technology*, 2020, 48(1): 73-81 (doi: 10.15258/sst.2020.48.1.10).
  29. Zhao L., Haque S.M.R., Wang R. Automated seed identification with computer vision: challenges and opportunities. *Seed Science and Technology*, 2022, 50(1): 75-102(28) (doi: 10.15258/sst.2022.50.1.s.05).
  30. Beletskiy S.L., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Gusakova L.P. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*, 2018, 3: 89-97 (in Russ.).
  31. Yampilov S.S., Tsybenov Zh.B., Zhigzhitov A.O., Pashinova N.V., Gylykova S.Zh. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya*, 2023, 2(89): 57-64 (in Russ.).
  32. Kutsenko Yu.N. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2014, 26(2): 15-21 (in Russ.).
  33. Tarushkin V.I. *Agroinzheneriya*, 2016, 5(75): 56-60 (in Russ.).
  34. Abdel-Salam M., Ahmed A., El-Kishki H. Seed sorting by electrostatic separation: an experimental study. *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004*. Boulder, CO, USA, 2004: 377-380 (doi: 10.1109/CEIDP.2004.1364266).
  35. Inamdar A.A., Suresh D.S. Application of color sorter in wheat milling. *International Food Research Journal*, 2014, 21(6): 2083-2089.
  36. Nikol'skiy M.A., Tkachenko K.G., Gryaznov A.Yu., Staroverov N.E., Kholopova E.D., Klonov V.A. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, 10: 41-47 (in Russ.).
  37. Musaeov F.B., Antoshkina M.S., Arkhipov M.V., Velikanov L.P., Gusakova L.P., Bessonov V.B., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K., Kosov V.O., Potrakhov E.N., Potrakhov N.N. *Rentgenograficheskiy analiz kachestva semyan ovoshchnykh kul'tur. Metodicheskie ukazaniya* [X-ray analysis of the quality of vegetable seeds. Methodical instructions]. Moscow-St. Petersburg, 2015 (in Russ.).
  38. Makrushin N.M., Babitskiy L.F., Klitsenko O.A., Makrushina E.M., Es'kova O.V., Klitsenko G.G., Shabanov R.Yu., Mishchuk S.A. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, 54: 371-376 (in Russ.).
  39. Karamysheva A., Trofimuk L., Priyatkin N., Arkhipov M., Gusakova L., Shchukina P., Staroverov N., Potrakhov N. Comparative study of the fullness of dwarf siberian pine seeds *Pinus pumila* (Pall.) Regel from places of natural growth and collected from plants introduced in north-western Russia by microfocus x-ray radiography to predict their sowing qualities. *Biological Communications*, 2020, 65(4): 297-306 (doi: 10.21638/spbu03.2020.403).
  40. Marcos-Filho J., Gomes Junior F.G., Bennett M.A., Wells A.A., Stieve S. Using tomato analyzer software to determine embryo size in X-rayed seeds. *Revista Brasileira de Sementes*, 2010, 3(2): 146-153 (doi: 10.1590/S0101-31222010000200018).
  41. de Medeiros A.D., Zavala-León M.J., de Oliveira Araújo J., Pereira M.D., dos Santos Dias

- D.C.F., Silva L.J. Relationship between internal morphology and physiological quality of *Leucaena leucocephala* seeds using image analysis. *Revista Arvore*, 2019, 43(2): 1-9 (doi: 10.1590/1806-90882019000200008).
42. Karunakaran C., Jayas D., White N. Soft X-ray inspection of wheat kernels infested by *Sitophilus oryzae*. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(3): 739 (doi: 10.13031/2013.13576)
  43. Narvankar D.S., Singh C.B., Jayas D.S., White N.D.G. Assessment of soft X-ray imaging for detection of fungal infection in wheat. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 49-56 (doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.01.016).
  44. França-Silva F., de Carvalho M.L.M., Carvalho G.A., de Andrade D.B., de Souza V.F., Marques E.R. Radiographic analysis to test maize seeds for the presence of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Seed Science and Technology*, 2019, 47(3): 249-260 (doi: 10.15258/sst.2019.47.3.02).
  45. World Health Organization, Department of Reproductive Health and Research. *WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen (6th ed.)*. World Health Organization, Geneva, 2021.