

Применение метода газоразрядной визуализации для оценки скрытых дефектов семян

© 2023. Н. С. Прияткин¹, к. т. н., с. н. с.,

М. В. Архипов^{1,2}, д. б. н., профессор, г. н. с., Л. П. Гусакова¹, к. б. н., в. н. с.,

В. Н. Пищик^{1,3}, к. б. н., с. н. с., Т. А. Кузнецова⁴, к. б. н., доцент,

А. В. Карамышева⁵, вед. специалист, Л. П. Трофимук⁵, агроном,

П. А. Щукина^{1,2}, м. н. с., М. А. Кузнецова⁴, бакалавр,

¹Агрофизический научно-исследовательский институт,

195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14,

²Северо-Западный центр междисциплинарных проблем

продовольственного обеспечения – обособленное подразделение СПбФИЦ РАН,

196608, Россия, г. Санкт-Петербург-Пушкин, шоссе Подбельского, д. 7,

³Всероссийский научно-исследовательский институт

сельскохозяйственной микробиологии,

196608, Россия, г. Санкт-Петербург-Пушкин, шоссе Подбельского, д. 3,

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,

⁵Ботанический институт им. В. Л. Комарова Российской академии наук,

197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2,

e-mail: prini@mail.ru

Метод газоразрядной визуализации (ГРВ, электрофотографии) позволяет регистрировать и количественно оценивать свечение, возникающее вблизи поверхности объекта (семена), при помещении его в электромагнитное поле высокой напряжённости. Методом газоразрядной визуализации в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений выявлены и проанализированы скрытые дефекты изученных семян. Обнаружена невыполненность образцов семян сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) и биогенное повреждение бактериального происхождения семян кукурузы сахарной (*Zea mays* L.). Показано, что невыполненные (пустые) семена имеют пониженные значения средней интенсивности цифровых газоразрядных изображений. Согласно полученным данным, методы газоразрядной визуализации и микрофокусной рентгенографии показали высокую эффективность (> 90%) точности при выявлении невыполненных (пустых) семян сосны кедровой сибирской. Проведена сравнительная оценка газоразрядных показателей и всхожести семян как интегральных показателей для оценки биологической полноценности семян кукурузы сахарной. Установлено, что образец семян кукурузы сахарной гибрида Краснодарский 194 МВ характеризовался сниженными значениями средней интенсивности газоразрядных изображений, а также средней яркости цифровых рентгеновских изображений по сравнению с тремя другими образцами семян. Образец гибрида Краснодарский 194 МВ характеризовался худшими посевными качествами: энергией прорастания, всхожестью, длиной корня и длиной ростка. Показано, что семена Краснодарский 194 МВ были поражены фитопатогенными бактериями *Pantoea ananatis*. Обнаружена средняя обратная корреляция ряда характеристик газоразрядного свечения (площадь, суммарная интенсивность) со среднеквадратическим отклонением яркости цифровых рентгеновских изображений, а также слабая достоверная связь большинства газоразрядных характеристик с посевными качествами. Исследованиями подтверждено, что метод газоразрядной визуализации в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений может служить эффективным дополнительным инструментом для оперативного выявления дефектных семян.

Ключевые слова: газоразрядная визуализация (электрофотография) семян, анализ изображений семян, посевные качества семян, *Pinus sibirica* Du Tour, *Zea mays* L.

Application of gas discharge visualization technique for seeds hidden defects evaluation

© 2023. N. S. Priyatkin¹

ORCID: 0000-0002-5974-4288³

M. V. Arkhipov^{1,2}

ORCID: 0000-0002-6903-6971³

L. P. Gusakova¹

ORCID: 0000-0002-6178-2953³

V. N. Pishchik^{1,3}

ORCID: 0000-0001-6422-4837³

T. A. Kuznetsova⁴

ORCID: 0000-0003-0162-0896³

A. V. Karamysheva⁵

ORCID: 0000-0003-1109-5810³

L. P. Trofimuk⁵

ORCID: 0000-0002-1007-5087³

P. A. Shchukina^{1,2}

ORCID: 0000-0002-5223-8374³

M. A. Kuznetsova⁴

ORCID: 0000-0002-0577-2785³

¹Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdanskiy Pr., Saint Petersburg, Russia, 195220,

²North-Western Center of Interdisciplinary Researches
of Problems of Food Maintenance,

7, Podbelsky Shosse, Saint Petersburg-Pushkin, Russia, 196608,

³All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology,
3, Podbelsky Shosse, Saint Petersburg-Pushkin, Russia, 196608,

⁴Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
29, Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg, Russia, 195251,

⁵Komarov Botanical Institute RAS,
2, Professora Popova St., Saint Petersburg, Russia, 197376,

e-mail: prini@mail.ru

The gas-discharge visualization (GDV, electrophotography) method allows recording and quantifying the glow that occurs near the surface of the object (seed), when placing it in an electromagnetic field of high intensity. The hidden defects – emptiness of *Pinus sibirica* Du Tour seeds and biogenic damage (by phytopathogenic bacteria *Pantoea ananatis*) of *Zea mays* L. seeds were revealed and analyzed by the method of gas discharge visualization in combination with automatic analysis of digital gas-discharge images. It is shown that empty seeds have reduced values of the averaged intensity of digital gas discharge images. According to the data obtained, the methods of gas-discharge imaging (electrophotography) and microfocus radiography showed high efficiency (> 90%) of accuracy in the detection of empty seeds of *Pinus sibirica*. It was found that the sample of *Zea mays* seeds (hybrid Krasnodarskiy 194 MV) was characterized by reduced values of the average intensity of gas-discharge images, as well as the average brightness of digital X-ray images, compared with the other three seed samples. The seed sample of hybrid Krasnodarskiy 194 MB was characterized by the worst sowing qualities: emergence rate, germination, root length and shoot length. It was shown that the Krasnodarskiy 194 MB seeds were affected by phytopathogenic bacteria *Pantoea ananatis*. The average inverse correlations of a number of characteristics of gas-discharge glow (area, total intensity) with the standard deviation of brightness of digital X-ray images, as well as weak reliable correlation of most gas-discharge characteristics with seeding qualities were found. Comparative assessment of gas discharge indices and seedlings germination as integral indices for evaluation of biological completeness of *Zea mays* seeds was carried out. Research has confirmed that the method of gas discharge visualization in combination with automatic analysis of digital gas-discharge images can be used as an effective additional tool for rapid detection of defective seeds.

Keywords: gas discharge visualization (electrophotography) of seeds, seed image analysis, sowing qualities of seeds, *Pinus sibirica* Du Tour, *Zea mays* L.

Известно, что ни один из взятых отдельно методов биотестирования не позволяет сделать достаточно обоснованное заключение о токсичности природных сред. В связи с этим возникает необходимость использования нескольких биологических объектов и методов, т. е. систем тестирования [1].

Для этих целей определённую перспективу имеет метод газоразрядной визуализации, основанный на эффекте Кирилян, разработанный для исследования состояния различных биологических объектов и влияния на них условий окружающей среды. Несмотря на то, что до сих пор интерпретация результатов и механизмы этого явления являются дискуссионными [2, 3], показано, что использование метода газоразрядной визуализации позволяет изучить биологические объекты, спектр которых достаточно широк: от различных жидкофазных объектов (воды, в том числе химически загрязнённые [4–6], натуральные и синтетические эфирные масла [5], различные

биологические жидкости [7, 8]) до сложных биологических систем: растений [9–12], животных [13] и человека [14, 15].

Методика газоразрядной визуализации позволяет следить за динамикой развития микробиологических культур [8], выявлять патологические изменения у растений, возникающие вследствие воздействия патогенов [11] и пестицидов [9]. Вместе с этим сообщается о невозможности выявить некоторые различия при исследовании характеристик газоразрядного свечения у растений, выращенных в различных условиях [10].

Метод позволяет отличать жизнеспособные и нежизнеспособные семена древесных лесных пород, например, бука обыкновенного (*Fagus sylvatica* L.) и клёна обыкновенного (*Acer platanoides* L.) [16], выявлять невыполненность семян, а также структурно-функциональные характеристики семян, обусловленные их сортовой принадлежностью, повреждённостью возбудителями бо-

лезней грибной и бактериальной этиологии, а также сосущими вредителями [17]. С помощью метода электрофотографии возможно также отбирать лучшие семена перед посевом [18]. Имеются данные о связи характеристик газоразрядного свечения семян пшеницы с биологической продуктивностью растений [17].

Задача оценки функционального состояния покоящихся семян, решаемая с помощью метода газоразрядной визуализации, является весьма актуальной для семеноводства, так как ее решение позволит получить новую информацию, существенно сократить время, затрачиваемое на проращивание семян, и получать интегральные характеристики их качества, а возможно и их потенциальной продуктивности. Несмотря на это, количество публикаций по использованию этого метода в семеноводстве пока крайне немногочисленно, исследования в большинстве случаев носят пилотный характер [19].

Цель работы – изучение качества семян древесных лесных пород на примере сосны кедровой сибирской и кукурузы сахарной с использованием методики газоразрядной визуализации (электрофотографии), приёмов автоматического анализа цифровых газоразрядных изображений.

Подбор семян данных видов растений обусловлен возможностью работы с семенами данных видов растений методом газоразрядной визуализации – семена имеют подходящие размеры и толщину.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований служили семена сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) из Новосибирска и Республики Тыва и кукурузы сахарной (*Zea mays* L.). Семена кукурузы сахарной включали 4 образца: 1 – гибрид РОСС 272 АМВ (происхождение – Волгоградская область), 2 – гибрид РОСС 272 АМВ (происхождение – Саратовская область), 3 – гибрид Краснодарский 194 МВ (происхождение – Алтайский край), 4 – гибрид F1 Лидер 165 (происхождение – Астраханская область). Для исследований характеристик семян кукурузы сахарной инструментальными физическими методами (электрофотография, микрофокусная рентгенография) и оценки их посевных качеств были отобраны средние пробы в количестве 100 штук семян каждого образца. Каждое семя в эксперименте имело индивидуальный номер для сопоставления исследуемых показателей.

Для реализации метода газоразрядной визуализации (электрофотографии) семян специалистами Агрофизического научно-исследовательского института и ООО «Биотехпрогресс» была разработана и апробирована методика газоразрядного свечения семян [19].

Метод газоразрядной визуализации (ГРВ) [20] (электрофотографии) [17] позволяет регистрировать и количественно оценивать свечение, возникающее вблизи поверхности объекта (семена), при помещении его в электромагнитное поле высокой напряжённости. Принцип метода заключается в следующем (рис. 1). Между плоским стеклянным электродом 2, на котором размещается объект исследования 1, и плоским электродом заземления 13, на который устанавливается металлический тест-объект 12, подаются импульсы напряжения длительностью 10 мкс от высоковольтного генератора 5, который генерирует электромагнитное поле. При высокой напряжённости 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 распределённую группу участков свечения различной яркости 9 [19].

Аппаратное обеспечение метода представлено серийным прибором «ГРВ Камера». Организация-разработчик и предприятие-производитель ООО «Биотехпрогресс», г. Санкт-Петербург. Программная обработка осуществляется в программе «ГРВ научная лаборатория».

По формулам, приведённым в работах [19, 20], анализируются следующие характеристики цифровых газоразрядных изображений: площадь свечения (пиксели), средняя интенсивность (единицы яркости), коэффициент формы (относительные единицы), средний радиус изолинии (пиксели), нормализованное среднеквадратическое отклонение радиуса изолинии (пиксели), длина изолинии (пиксели), энтропия по изолинии (относительные единицы), фрактальность по изолинии (относительные единицы), суммарная интенсивность (относительные единицы).

Площадь свечения рассчитывается как количество точек изображения с ненулевой интенсивностью, не удалённых при фильтра-

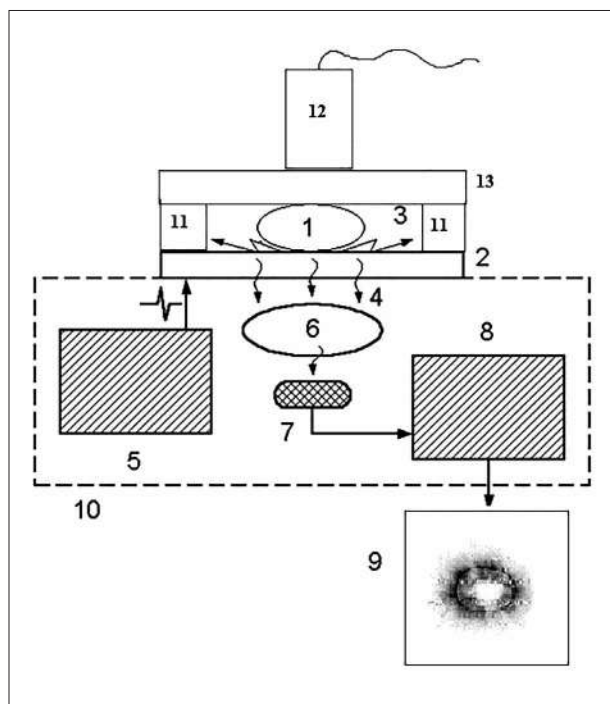


Рис. 1. Принцип метода газоразрядной визуализации (описание см. в тексте)
Fig. 1. Principle of gas discharge technique (see text for description)

ции шума, средняя интенсивность – по всем точкам изображения с ненулевой интенсивностью, не удалённых при фильтрации шума. Параметры рассчитываются по специальным образом формируемой для газоразрядного изображения последовательности чисел, называемой изолинией. Изолиния строится следующим образом.

1. Из центра свечения выпускаются воображаемые лучи к краям картинке. Каждому лучу соответствует своё значение угла, задающего его направление. Этот угол измеряется в градусах и лежит в диапазоне от 0 до 360°. Угол отсчитывается от вертикального направления по часовой стрелке. Лучи с равным шагом по углу покрывают всё изображение. Общее количество лучей определяется как ширина изображения, умноженная на 4. То есть для стандартного размера ГРВ-граммы 320 · 240 количество лучей составит 320 · 4 = 1280.

2. Для каждого луча находится первая (наиболее близкая) от центра точка с интенсивностью, равной средней интенсивности свечения и последняя (наиболее удалённая) от центра точка с такой же интенсивностью.

3. Вычисляется расстояние между двумя найденными точками. Набор полученных расстояний для каждого луча и формирует изолинию.

Таким образом, мы получаем числовую последовательность, характеризующую форму свечения объекта исследования. В тех лучах, которые проходят по ярким стримерам, соответствующее расстояние будет большим. И наоборот, если луч пересекает «провал» в изображении, то и расстояние будет маленьким или нулевым.

Введём ряд обозначений: i – номер луча; N – количество лучей; α_i – угол наклона i -ого луча; D_i – значение изолинии для i -ого луча (расстояние между двумя крайними точками, имеющими значение интенсивности, равное средней интенсивности); x и y – координаты пикселя.

$$\delta_i = D_i \cdot \sin(\alpha_i), y_i = D_i \cdot \cos(\alpha_i)$$

Тогда:

$$L = \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad \text{– длина}$$

изолинии,

$$\sum_{i=1}^N D_i$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N} \quad \text{– средний радиус изолинии,}$$

$$K_f = \frac{L}{2\pi \bar{R}} \quad \text{– коэффициент формы,}$$

$$E_{\bar{R}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{R})^2}{N - 1}} \quad \text{– среднее квадратическое отклонение (СКО) радиуса изолинии,}$$

$$E_{NR} = \frac{E_{\bar{R}}}{\bar{R}} \quad \text{– нормализованное СКО ра-}$$

диуса изолинии.

Расчёт энтропии выполняли следующим образом.

1. Находим минимальное и максимальное значение изолинии.

2. Делим этот диапазон на заданное количество интервалов. Это количество либо задаётся пользователем явно, либо выбирается таким, чтобы энтропия была максимальной.

3. Пусть k – номер интервала, N_{int} – количество интервалов, N_k – количество значений изолинии, которые попадают в k -тый диапазон. Рассчитываем вероятность попадания значений изолинии в k -тый диапазон по формуле:

$$P_k = \frac{N_k}{N_{\text{int}}}$$

4. Рассчитываем энтропию по Шеннону по формуле:

$$E = - \sum_{i=1}^N P_k \ln(P_k).$$

Фрактальность рассчитывали по изолинии с использованием алгоритма Хигучи (Higuchi).

Параметры численно характеризуют различные аспекты формы свечения. Средний радиус изолинии характеризует ширину свечения вокруг объекта, нормализованное СКО радиуса изолинии характеризует неравномерность ширины свечения по контуру, коэффициент формы и фрактальность – меру изрезанности внешнего контура газоразрядного изображения, энтропия – меру хаотичности изображения.

Суммарная интенсивность рассчитывается по формуле:

$$I_{sum} = \frac{IA}{q},$$

где I – средняя интенсивность, A – площадь, q – константа, равная 100000.

С целью верификации метода газоразрядной визуализации были использованы методы

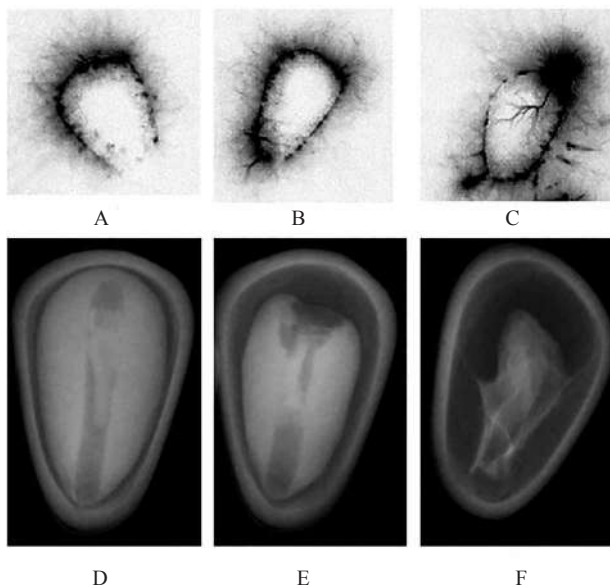


Рис. 2. Примеры цифровых газоразрядных (А–С) и рентгеновских (D–F) изображений: А – газоразрядное изображение нормально сформированного семени, В – недоразвитого семени, С – пустого семени, D – рентгеновское изображение нормально сформированного семени, E – недоразвитого семени, F – пустого семени

Fig. 2. Examples of digital gas discharge (A–C) and X-ray (D–F) images: A – gas discharge image of normally formed seed, B – semi-empty seed, C – empty seed, D – X-ray image of normally formed seed, E – semi-empty seed, F – empty seed

микрофокусной рентгенографии [21] и проращивания семян согласно ГОСТ 12038-84.

Идентификация фитопатогенных бактерий, изолированных с семян кукурузы гибрида Краснодарский 194 МВ, была проведена методом 16S рРНК секвенирования по протоколу [22] с использованием BLAST программы и стандартными биохимическими методами [23, 24]. Был проведён тест на семенах кукурузы по изучению фитопатогенности бактерий [24].

Статистический анализ выполнен с использованием t -критерия в программе MS Excel, а также корреляционного анализа Спирмана в программе Statistica 10.

Результаты и обсуждение

Примеры цифровых газоразрядных изображений и сопряжённого рентгенографического анализа семян сосны кедровой сибирской с дефектами «пустозернистость» и «недовыполненность» представлены на рисунке 2.

Данные, представленные на рисунке 3, показывают, что при пороговом значении средней интенсивности газоразрядных изображений (82 единицы яркости) возможно полностью отделить пустозернистые семена сосны кедровой сибирской, однако в данный диапазон частично попадают и невыполненные, и нормально сформированные семена.

Результаты сравнения эффективности методик газоразрядной визуализации (электрофотографии) и микрофокусной рентгенографии, в сочетании с анализом цифровых рентгеновских изображений и измерений веса индивидуальных семян, по данным анализа семян сосны кедровой сибирской, представлены в таблице 1. Классификация выполнена на основании данных визуального анализа цифровых рентгеновских изображений.

Согласно нашим исследованиям на выбранных образцах, оба метода показали высокую эффективность (> 90%) точности при выявлении невыполненных (пустых) семян сосны кедровой сибирской.

Примеры газоразрядных, рентгеновских изображений семян кукурузы и результаты сопряжённого теста на проращивание представлены на рисунке 4.

Согласно изображениям, представленным на рисунке 4, дефектное семя, характеризующееся более тёмной рентген-проекцией, по сравнению с нормальным семенем, имеет более узкую «корону» неправильной формы.

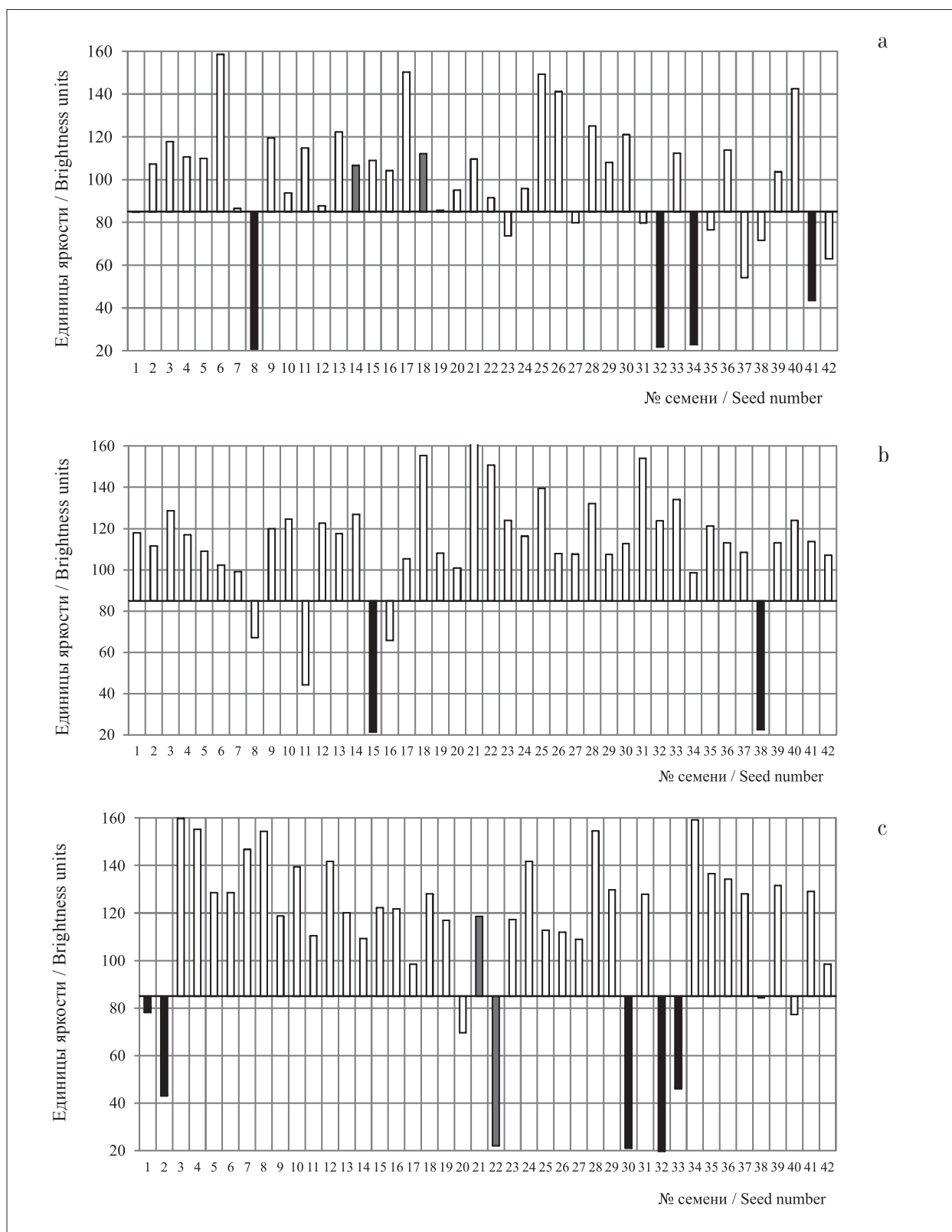


Рис. 3. Средняя интенсивность цифровых газоразрядных изображений семян сосны кедровой сибирской: а – образец № 1 (место сбора семян – Новосибирск); б – образец № 2 (место сбора семян – Новосибирск); с – образец (место сбора семян – Республика Тыва). Столбцы белого цвета (класс А) – нормальные (полнозернистые семена), серого (класс В) – частично пустозернистые, чёрного – пустозернистые (класс С) – невыполненные семена
Fig. 3. Averaged intensity of digital gas discharge images of *Pinus sibirica* seeds: a – sample 1 (place of collection – Novosibirsk); b – sample 2 (place of collection – Novosibirsk); c – sample (place of collection – Tyva Republic). White color chart bars (class A) – normal (full-grain) seeds, gray color chart bars (class B) – partially full-grain seeds, black color chart bars (class C) – empty seeds

Таблица 1 / Table 1

Результаты сравнения эффективности методик газоразрядной визуализации (электрофотографии) и микрофокусной рентгенографии / Results of comparing the effectiveness of gas discharge visualization (electrophotography) and microfocus X-ray techniques

Классы объектов Object categories	Количество объектов Number of subjects	Точность, % / Погрешность, % Accuracy, % / Inaccuracy, %	
		газоразрядная визуализация gas discharge visualization	рентгенография X-ray radiography
Класс А / Category A	110	88 / 12	98 / 2
Класс В / Category B	4	25 / 75	50 / 50
Класс С / Category C	12	100 / 0	92 / 8

Примечание / Note: общее количество объектов – 126 / total number of subjects – 126.

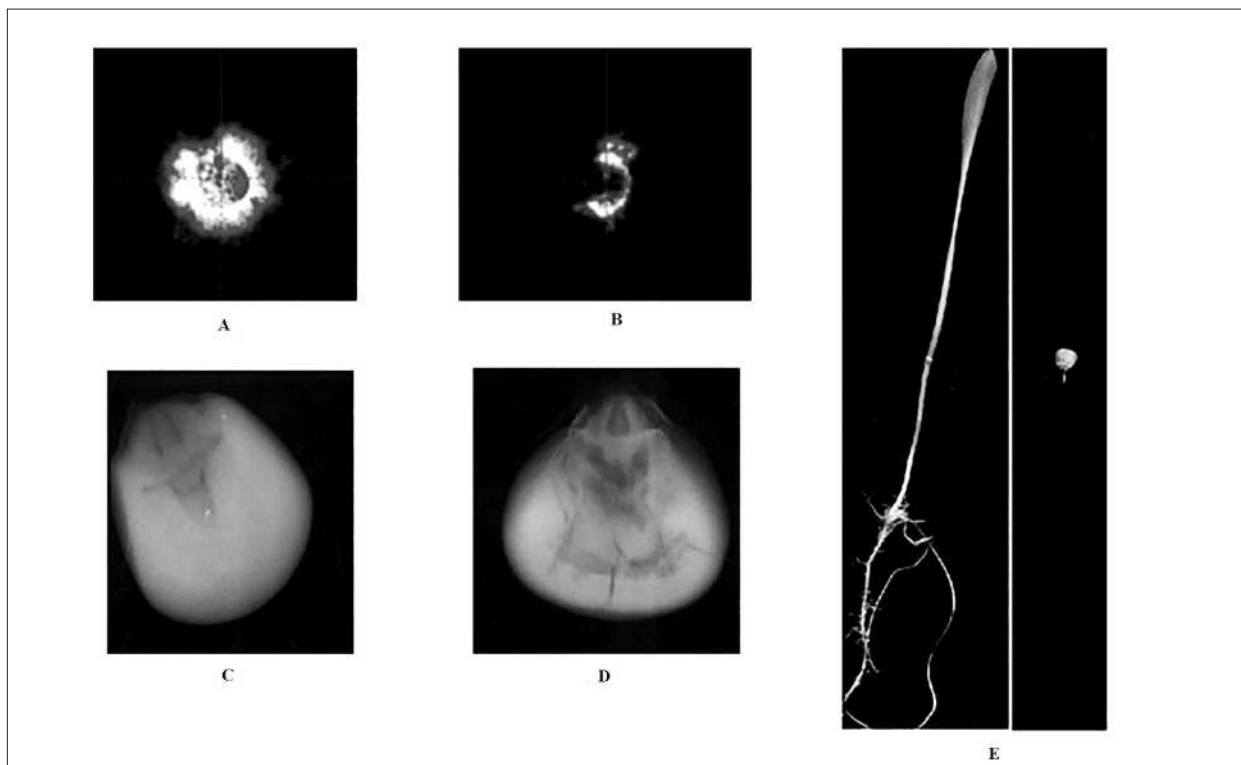


Рис. 4. Примеры газоразрядных, рентгеновских изображений семян кукурузы и результаты сопряжённого теста на проращивание: А – газоразрядное изображение нормального семени; В – газоразрядное изображение семени с дефектом бактериальной этиологии; С – рентгеновское изображение нормального семени; D – рентгеновское изображение семени с дефектом бактериальной этиологии; E – фотография проростка нормального (слева) и дефектного (справа) семени
Fig. 4. Examples of gas discharge and X-ray images of *Zea mays* seeds and results of combined germination test: A – gas discharge image of a normal seed; B – gas discharge image of a seed with a defect of bacterial etiology; C – X-ray image of a normal seed; D – X-ray image of a seed with a defect of bacterial etiology; E – photo of a seedling of normal (left) and defective (right) seeds

Проращивание дефектного семени привело к появлению аномального проростка.

Результаты сравнительного анализа цифровых газоразрядных изображений образцов семян кукурузы представлены в таблице 2.

Обработка данных анализа цифровых газоразрядных изображений кукурузы показала, что гибрид Краснодарский 194 МВ по сравнению с другими образцами семян имеет

статистически значимо пониженные показатели площади, средней интенсивности, суммарной интенсивности, энтропии, фрактальности, длины изолинии и среднего радиуса изолинии цифровых газоразрядных изображений. У образца Краснодарский 194 МВ достоверно выше среднее квадратичное отклонение фрактальности и нормализованное среднее квадратичное отклонение радиуса изолинии.

Таблица 2 / Table 2

Результаты сравнительного анализа характеристик цифровых газоразрядных изображений образцов семян кукурузы / Results of comparative analysis of digital gas discharge images characteristics of *Zea mays* seeds samples

Параметр, единицы измерения Parameters, units	Наименование образца / Sample name			
	РОСС 272 AMB (B) ROSS 272 AMV (V)	Краснодарский 194 MB Krasnodarskiy 194 MV	Лидер 165F1 Lider 165 F1	РОСС 272 AMB (C) ROSS 272 AMV (S)
Площадь, пиксели /Area, pixels	3430±130**	2610±140	3810±130**	3520±150**
Средняя интенсивность, единицы яркости Averaged intensity, brightness units	65,0±2,3**	57,2±2,5	67,2±2,3**	68,5±2,5**
Энтропия, относительные единицы Entropy, relative units	1,77±0,09	1,66±0,09	1,87±0,07**	1,80±0,08*
Фрактальность, относительные единицы Fractality, relative units	1,72±0,01**	1,64±0,02	1,71±0,01**	1,73±0,01**
Суммарная интенсивность, относительные единицы / Summarized intensity, relative units	2,27±0,13**	1,56±0,13	2,61±0,14**	2,47±0,16**

Примечание: * – различия значимы при $p < 0,05$, ** – различия значимы при $p < 0,01$ по сравнению с образцом гибрида Краснодарский 194 MB.

Note: * – differences are significant at $p < 0.05$, ** – differences are significant at $p < 0.01$, in comparison with Krasnodarskiy 194 MV hybrid sample.

Таблица 3 / Table 3

Результаты исследований посевных качеств и влажности семян кукурузы
Results of study of *Zea mays* seeds sowing qualities and moisture content

Показатели Indicators	Наименование образца / Sample name			
	РОСС 272 AMB (B) ROSS 272 AMV (V)	Краснодарский 194 MB Krasnodarskiy 194 MV	Лидер 165F1 Lider 165 F1	РОСС 272 AMB (C) ROSS 272 AMV (S)
Энергия прорастания, % Emergence rate, %	86	16	78	83
Всхожесть, % Germination, %	97	22	89	97
Длина ростка, см Shoot length, cm	10,94±0,35	1,15±0,37	9,14±0,37	10,39±0,37
Длина корня, см Root length, cm	15,8±0,8	2,1±0,7	13,9±0,9	15,0±1,0
Влажность, % Moisture content, %	5,29	5,29	4,91	5,04

Результаты исследований посевных качеств семян кукурузы представлены в таблице 3.

Образец гибрида Краснодарский 194 MB характеризовался худшими посевными качествами: энергия прорастания – 16%, всхожесть – 22%, длина ростка – $1,2 \pm 0,7$ см, длина корня – $2,1 \pm 1,0$ см, по сравнению с тремя другим образцами: РОСС 272 АМВ (Волгоградская обл.) – 86%, 97%, $10,9 \pm 0,8$ см и $15,8 \pm 1,0$ см; РОСС 272 АМВ (Саратовская область) – 83%, 97%, $10,4 \pm 1,0$ см и $15,0 \pm 1,0$ см; Лидер 165 F1 – 78%, 89%, $9,1 \pm 0,9$ см и $13,9 \pm 1,3$ см соответственно. При измерении показателей

энергии прорастания и всхожести отмечалась мацерация семян гибрида Краснодарский 194 MB. При микробиологическом анализе зёрен кукурузы обнаружено поражение зёрен фитопатогенными бактериями. Бактерии были изолированы с семян кукурузы Краснодарский 194 MB и идентифицированы по стандартным биохимическим характеристикам и методу 16 S rRNA как *Pantoea ananatis*. Тест на выявление фитопатогенных свойств бактерий *P. ananatis* на зерне других сортов кукурузы подтвердил способность мацерировать зёрна кукурузы. Поражение листьев и семян кукурузы бактериями

P. ananatis описано ранее другими исследователями [24, 25].

Корреляционный анализ Спирмана выявил закономерности взаимосвязи характеристик газоразрядного свечения семян кукурузы, некоторых рентгеновских характеристик (среднеквадратическое отклонение яркости, средняя яркость) и посевных качеств (энергия прорастания, всхожесть, длина ростка, длина корня).

Была обнаружена средняя обратная корреляция ряда характеристик газоразрядного свечения (площадь, суммарная интенсивность) со среднеквадратическим отклонением яркости цифровых рентгеновских изобра-

жений, а также слабая достоверная связь большинства газоразрядных характеристик с посевными качествами (табл. 4).

Характеристики газоразрядных изображений семян изучались при их различной влажности. Интересно отметить, что влажность семян исследуемых образцов семян кукурузы не имеет прямой взаимосвязи с характеристиками газоразрядных изображений (табл. 3). Значения влажности семян у образца семян кукурузы гибрида Краснодарский 194 МВ достоверно не отличаются от таковых у образца РОСС 272 АМВ (В), при наличии различий их газоразрядных характеристик, веса индивидуальных семян, посевных качеств, а

Таблица 4 / Table 4

Результаты корреляционного анализа данных, полученных для образцов семян кукурузы
Results of correlation data mining obtained for *Zea mays* seed samples

Показатели цифровых газоразрядных изображений, единицы измерения Digital gas discharge images parameters, units	Значения коэффициентов корреляций Спирмана Spearman coefficient correlation values					
	среднеквадратическое отклонение яркости цифровых рентгеновских изображений, единицы яркости standard deviation of brightness of digital X-ray images, brightness unit	средняя яркость цифровых рентгеновских изображений, единицы яркости averaged brightness of digital X-ray images, brightness unit	энергия прорастания, % emergence rate, %	всхожесть, % germination, %	длина корешка, см root length, cm	длина проростка, см shoot length, cm
Площадь, пиксели Area, pixel	-0,50*	0,09	0,27*	0,38*	0,29*	0,30*
Средняя интенсивность, единицы яркости Averaged intensity, brightness unit	-0,42*	-0,10*	0,17*	0,26*	0,17*	0,20*
Энтропия, относительные единицы Entropy, relative unit	-0,16*	0,05	0,10*	0,16*	0,12*	0,12*
Фрактальность, относительные единицы Fractality, relative unit	-0,02	0,27*	0,30*	0,34*	0,30*	0,31*
Суммарная интенсивность, относительные единицы Summarized intensity, relative unit	-0,51*	0	0,25*	0,36*	0,26*	0,28*

Примечание * – корреляции значимы при $p < 0,05$.
Note: * – significant correlation ($p < 0.05$).

также инфекционной нагрузки. Очевидно, что в данном случае различия газоразрядных характеристик связаны не с влажностью семян, а с их электропроводностью, которая оказывает определяющее влияние на инициацию газового разряда при помещении объекта исследований в электромагнитное поле высокой напряжённости, как одним из важнейших показателей, определяющих характеристики газоразрядных изображений биологических объектов [20].

Заключение

Выявлены и проанализированы скрытые дефекты исследуемых образцов семян сосны кедровой сибирской и кукурузы сахарной методом газоразрядной визуализации в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений. Показано, что пустые и частично полнозернистые семена имеют пониженные значения средней интенсивности газоразрядных изображений.

Проведена сравнительная оценка газоразрядных характеристик и всхожести проростков, показана возможность их использования для оценки биологической полноценности семян в качестве интегральных показателей.

Установлено, что метод газоразрядной визуализации (электрофотографии) в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений может служить эффективным дополнительным инструментом для оперативного выявления дефектных семян.

Выражаем благодарность в. н. с. лаборатории микологии ВИЗР, к. б. н. Т.Ю. Гагкаевой за предоставленные образцы семян кукурузы. Видовая идентификация патогенных бактерий была выполнена во ВНИИСХМ в рамках Программы ФАНО России по развитию и инвентаризации биоресурсных коллекций научными организациями.

Литература

1. Чупис В.Н., Журавлёва Л.Л., Иванов Д.Е. Применение в экологических исследованиях методов биотестирования на культурах клеток человека и животных // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 4. С. 71–76.
2. Stanwick M. Aura photography: mundane physics or diagnostic tool? // Nurs Times. 1996. V. 92. No. 25. P. 39–41.
3. Duerden T. An aura of confusion Part 2: the aided eye – “imaging the aura?” // Complement ther Nurs Midwifery. 2004. V. 10. No. 2. P. 116–123.

4. Баркалов А.В., Щевелев М.И., Ащеулов А.Ю. Использование метода ГРВ для анализа химического состава питьевых вод // «Наука. Информация. Сознание. Навстречу олимпийским играм»: VIII Международный конгресс по медицинской и прикладной биоэлектрографии. СПб., 2004. С. 163–165.

5. Korotkov K., Krizhanovsky E., Borisova M., Korotkin D., Hayes M., Matravers P., Komoh K.S., Peterson P., Shiozawa K., Vainshelboim A. Time dynamics of the gas discharge around drops of liquids // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. No. 7. P. 3334–3338.

6. Игнатов И.И., Мосин О.В. Эффект Кирлиан в изучении газоразрядного свечения биологических объектов и воды // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 12 (173). С. 37–46.

7. Степанов А.В., Свиридов Л.П., Короткина С.А., Ахметели Г.Г., Крыжановский Э.В. Использование метода ГРВ биоэлектрографии для оценки реакции антиген-антитело // Известия вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 2. С. 32–36.

8. Гудакова Г.З., Галынкин В.А., Коротков К.Г. Исследование характеристик газоразрядного свечения микробиологических культур // Журнал прикладной спектроскопии. 1988. Т. 49. № 3. С. 412–417.

9. Буадзе О.А., Коротков К.Г., Ратман П.А. Изучение влияния гербицида 2,4Д на растительный организм с последующим защитным эффектом витамина В2 методом поверхностной газоразрядной визуализации (эффект Кирлиан) // Сообщения АН ГССР. 1989. Т. 135. № 1. С. 193–196.

10. Sadikov A., Kononenko I. Latest experiments with GDV technique in agronomy // Proceedings of the 6th International Multi-Conference Information Society IS 2003. Collaborative and Information Society, Ljubljana, Solvenia. 2003. P. 110–113.

11. Прияткин Н.С., Дорофеева Т.Б., Коротков К.Г., Слепян Э.И. Газоразрядное свечение древесины стебля однолетнего побега *Ulmus glabra*, инфицированного *Graphium ulmi* // Микология и фитопатология. 2007. Т. 41. № 6. С. 564–567.

12. Ковязин В.Ф., Нгуен Т.Л., Прияткин Н.С. Использование метода газоразрядной визуализации для оценки жизненного состояния деревьев // Естественные и технические науки. 2015. № 6 (84). С. 260–268.

13. Прияткин Н.С., Коротков К.Г., Слепян Э.И., Авдеева Г.С., Дорофеева Т.Б., Пономаренко Г.О. Программно-аппаратный комплекс для установления характеристик газоразрядного свечения «ГРВ-комплекс» и перспективы его использования при анализе состояния организмов и выявлении экологического риска // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета). 2003. № 10. С. 151–153.

14. Литвинов О.П., Волкова Т.П. Оценка влияния ионизации воздуха рабочего помещения на психофизиологическое состояние сотрудников с помощью метода

ГРВ биоэлектрографии // Наука. Информация. Сознание: VII Международный научный конгресс по ГРВ биоэлектрографии. СПб., 2003. С. 46–49.

15. Vainshelboim A., Hayes M., Momoh K.S., Raatsi C., Peirce S., Korotkov K., Priyatkin N. GDV technology applications for cosmetic sciences // Proceedings of 18th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems. Dublin, 2005. P. 437–442.

16. Čater M., Batič F. Determination of seed vitality by high frequency electrophotography // *Phyton: annales rei botanicae*. 1998. V. 38. No. 2. P. 225–336.

17. Martinez M.A., Priyatkin N.S., van Duijn B. Electrophotography in analysis: basic concepts and methodology // *Seed Testing International*. 2018. V. 156. P. 53–56.

18. Zanco J.J. Biofotônica na caracterização de sementes submetidas à altas diluições dinamizadas. Lages, 2016. 238 p.

19. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Гусакова Л.П., Борисова М.В., Колесников Л.Е. Методика исследования характеристик газоразрядного свечения семян. СПб.: АФИ, 2016. 52 с.

20. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии. СПб.: Изд-во СПб ГУИТМО, 2001. 360 с.

21. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Гусакова Л.П., Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Бессонов В.Б., Ободовский А.В., Староверов Н.Е. Рентгеновские компьютерные методы исследований структурной целостности семян и их значение в современном семеноведении // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89. № 4. С. 627–638.

22. Karlov D., Sazanova A., Guro P., Kuznetsova I., Verkhozina A., Belimov A., Safronova V. Genetic diversity of rhizobial strains isolated from the relict legumes *Gueldenstaedtia monophylla* and *G. verna* growing in the republics of Altai and Buryatia (Russia) // *Bio. Comm*. 2022. V. 67. No. 3. P. 141–151.

23. Holt J.G., Krieg N.R., Sneath P.H.A., Stanley J.T., William S.T. *Bergey's manual of determinative bacteriology*. Baltimore: Williams and Wilkins, 1994. P. 786–788.

24. Cota L.V., Costa R.V., Silva D.D., Parreira D.F., Lana U.G.P., Casela C.R. First report of pathogenicity of *Pantoea ananatis* in sorghum (*Sorghum bicolor*) in Brazil // *Australasian Plant Disease Notes*. 2010. No. 5. P. 120–122.

25. Mamede M.C., Tebaldi N.D., Mota L.C.B.M., Martins O.M., Coelho L. Detection of *Pantoea ananatis* in corn seeds on semi-selective medium // *Tropical Plant Pathology*. 2018. V. 43. No. 3. P. 254–256.

References

1. Chupis V.N., Zhuravleva L.L., Ivanov D.E. Application of biotesting methods on human beings and animals cell cultures in ecological investigations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 4. P. 71–76 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-4-071-76

2. Stanwick M. Aura photography: mundane physics or diagnostic tool? // *Nurs Times*. 1996. V. 92. No. 25. P. 39–41.

3. Duerden T. An aura of confusion Part 2: the aided eye – “imaging the aura?” // *Complement Ther Nurs Midwifery*. 2004. V. 10. No. 2. P. 116–123. doi: 10.1016/j.ctnm.2004.01.002

4. Barkalov A.V., Shchevelev M.I., Ashsheulov A.Yu. The use of GDV method for the chemical composition of drinking waters analysis // “Science. Information. Spirit. Towards to the Olympic Games”: VIII International Congress of medical and applied Bioelectrography. Sankt-Peterburg, 2004. P. 163–165 (in Russian).

5. Korotkov K., Krizhanovsky E., Borisova M., Korotkin D., Hayes M., Matravers P., Komoh K.S., Peterson P., Shiozawa K., Vainshelboim A. Time dynamics of the gas discharge around drops of liquids // *J. Appl. Phys*. 2004. V. 95. No. 7. P. 3334–3338. doi: 10.1063/1.1651343

6. Ignatov I.I., Mosin O.V. Kirlian effect in studying of gas discharge glow of biological objects and water by the method of color Kirlian analysis // *Nano- and microsystems technology*. 2014. No. 12 (173). P. 37–46 (in Russian).

7. Stepanov A.V., Sviridov L.P., Korotkina S.A., Akhmeteli G.G., Kryzhanovskiy E.V. Using the GDV bioelectrography method to evaluate the antigen-antibody reaction // *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 2006. V. 49. No. 2. P. 32–36 (in Russian).

8. Gudakova G.Z., Galynkin V.A., Korotkov K.G. The study of gas discharge luminescence characteristics of microbiological cultures // *Zhurnal prikladnoii spektroskopii*. 1988. V. 49. No. 3. P. 412–417 (in Russian).

9. Buadze O.A., Korotkov K.G., Ratman P.A. Study of the effect of 2,4D herbicide on plant organism with the subsequent protective effect of vitamin B2 by surface gas discharge visualization (Kirlian effect) // *Soobshcheniya AN GSSR*. 1989. V. 135. No. 1. P. 193–196 (in Russian).

10. Sadikov A., Kononenko I. Latest experiments with GDV technique in agronomy // *Proceedings of the 6th International Multi-Conference Information Society IS 2003 C. Ljubljana*, 2003. P. 110–113.

11. Priyatkin N.S., Dorofeeva T.B., Korotkov K.G., Slepian E.I. Gas discharge glow of wood stalk of *Ulmus glabra* annual sprout infected by *Graphium ulmi* // *Mikologiya i fitopatologiya*. 2007. V. 41. No. 6. P. 564–567 (in Russian).

12. Kovyazin V.F., Nguen T.L., Priyatkin N.S. Using gas discharge visualization to assess tree life // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015. No. 6 (84). P. 260–268 (in Russian).

13. Priyatkin N.S., Korotkov K.G., Slepian E.I., Avdeeva G.S., Dorofeeva T.B., Ponomarenko G.O. Software and hardware complex for determination of characteristics of gas discharge glow “GDV-complex” and prospects of its use in analysis of state of organisms and identification of ecological risk // *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-*

Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta tochnoy mekhaniki i optiki (tekhnicheskogo universiteta). 2003. No. 10. P. 151–153 (in Russian).

14. Litvinov O.P., Volkova T.P. Assessment of the impact of ionization of the working room air on the psychophysiological state of employees using the GDV Bioelectrography technique // "Science. Information. Spirit": Proc. of VII International Scientific Congress of GDV Bioelectrography. Sankt-Peterburg, 2003. P. 46–49 (in Russian).

15. Vainshelboim A., Hayes M., Momoh K.S., Raatsi C., Peirce S., Korotkov K., Priyatkin N. GDV technology applications for cosmetic sciences // Proceedings of 18th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems. Dublin, 2005. P. 437–442.

16. Čater M., Batič F. Determination of seed vitality by High Frequency Electrophotography // *Phyton: annales rei botanicae*. 1998. V. 38. No. 2. P. 225–336.

17. Martinez M.A., Priyatkin N.S., van Duijn B. Electrophotography in analysis: basic concepts and methodology // *Seed Testing International*. 2018. V. 156. P. 53–56.

18. Zanco J.J. Biophotonics in seed characterization submitted to high dynamized dilutions. Lages, 2016. 238 p. (in Portugal).

19. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Borisova M.V., Kolesnikov L.E. Research technique of gas discharge glow characteristics of seed. Sankt-Peterburg: ARI, 2016. 52 p. (in Russian).

20. Korotkov K.G. Basis of GDV bioelectrography. Sankt-Peterburg: SPbGU ITMO, 2001, 360 p. (in Russian).

21. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., Potrakhov N.N., Gryaznov A.Yu., Bessonov V.B., Obodovskiy A.V., Staroverov N.E. X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2019. V. 89. No. 4. P. 627–638 (in Russian). doi: 10.21883/JTF.2019.04.47324.170-18

22. Karlov D., Sazanova A., Guro P., Kuznetsova I., Verkhovzina A., Belimov A., Safronova V. Genetic diversity of rhizobial strains isolated from the relict legumes *Gueldenstaedtia monophylla* and *G. verna* growing in the republics of Altai and Buryatia (Russia) // *Bio. Comm*. 2022. V. 67. No. 3. P. 141–151. doi: 10.21638/spbu03.2022.301

23. Holt J.G., Krieg N.R., Sneath P.H.A., Stanley J.T., William S.T. Bergey's manual of determinative bacteriology. Baltimore: Williams and Wilkins, 1994. P. 786–788.

24. Cota L.V., Costa R.V., Silva D.D., Parreira D.F., Lana U.G.P., Casela C.R. First report of pathogenicity of *Pantoea ananatis* in sorghum (*Sorghum bicolor*) in Brazil // *Australasian Plant Disease Notes*. 2010. No. 5. P. 120–122. doi: 10.1007/BF03215904

25. Mamede M.C., Tebaldi N.D., Mota L.C.B.M., Martins O.M., Coelho L. Detection of *Pantoea ananatis* in corn seeds on semi-selective medium // *Tropical Plant Pathology*. 2018. V. 43. No. 3. P. 254–256. doi: 10.1007/s40858-017-0203-z