

ПРИЯТКИН НИКОЛАЙ СЕРГЕЕВИЧ

**НЕИНВАЗИВНАЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА РАЗНОКАЧЕСТВЕННОСТИ
И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРИГОДНОСТИ СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

Специальность: 4.1.5 – мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Санкт-Петербург
2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)

Научный консультант:

Чесноков Юрий Валентинович

доктор биологических наук, член-корреспондент РАН,
директор ФГБНУ АФИ

Официальные оппоненты:

Кавеленова Людмила Михайловна

доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой экологии, ботаники и охраны природы,
Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика С.П.
Королева»

Новиков Артур Игоревич

доктор технических наук, доцент
профессор кафедры древесиноведения Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Осипова Галина Степановна

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры
плодоовощеводства и декоративного садоводства
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный аграрный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»

Защита диссертации состоится «03» апреля 2024 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.001.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Агрофизический научно-исследовательский институт» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д.14. Тел. +7 (812) 534-13-24, факс +7 (812) 534-19-00, e-mail: office@agrophys.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Агрофизического научно-исследовательского института и на сайте <http://www.agrophys.ru>, с авторефератом - на сайте <http://vak.ed.gov.ru> и <http://www.agrophys.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14, ФГБНУ АФИ.

Учёный секретарь

диссертационного совета 24.1.001.01

кандидат биологических наук

_____ Н.Г. Синявина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшим условием повышения эффективности растениеводства и увеличения производства продукции является хорошо развитая система семеноводства и качество высеваемых семян (Малько, Андросова, 2020).

Сорт проявляет свои возможности при посеве высококачественными семенами, получение которых может обеспечить только хорошо организованное семеноводство. Для получения высоких эффектов в селекции также необходимо наличие высококачественного исходного материала (Жученко, 1990). Необходимость наличия качественных семян предполагается также и при закладке их в коллекционные фонды на длительное хранение (Филипенко, 1991).

А.А. Жученко (1990), отмечая роль «онтогенетической памяти», указывал, что даже высокоурожайные посевы зерновых культур могут давать весьма посредственные и даже плохие семена. Важную роль в формировании качества семян играют биотические и абиотические факторы (Сечняк, 1981; Макрушин и др., 2012, 2018). В результате их воздействия формируется разнокачественность семян различного по своему типу и происхождению. Будучи в определенной степени эволюционно необходимой для сохранения вида, с хозяйственной точки зрения, она является отрицательной (Сечняк, 1981; Войтенко, 1991; Бухаров, 2020). Существенную роль в снижении посевных качеств семян играет наличие в них внутренних, невидимых невооруженным глазом, повреждений.

Качество посевного материала является серьезной проблемой не только в производстве пищевого зерна, но и в овощеводстве. Особенностью семян овощных культур является их большое морфобиологическое разнообразие. Неравномерность роста сеянцев, разная продуктивность растений и неоднородность продукции по качеству во многом определяются низким качеством семян (Лудилов, 2005).

В связи с этим необходима разработка комплексной системы оценки качества и продукционного потенциала семенного материала, которая позволила бы достоверно и надежно проводить раннюю и быструю оценку и отбор высококачественных семян, а также на основе полученных протоколов анализа семян провести оперативную корректировку применяемых агротехнологий для оптимизации состояния посевов сельскохозяйственных культур.

Степень разработанности темы. Существующая на сегодня комплексная система оценки качества семенного материала включает в себя традиционную оценку их качества, которая проводится согласно стандартным методам – проращивания в лабораторных условиях (ГОСТ 12038-84), определения массы 1000 семян (ГОСТ 12042-80), определения жизнеспособности семян биохимическим методом (ГОСТ 12039-82), так и оценку методами определения зараженности болезнями (ГОСТ 12044-93), включая заселенность вредителями (ГОСТ 12045-97). ГОСТ 28666.1-90 (ИСО 6639/1-86); ГОСТ 28666.3-90 (ИСО 6639/3-86) ГОСТ 28666.4-90 (ИСО 6639/4-87).

Однако, традиционные методы контроля качества семян довольно трудоемки и длительны по времени. Кроме того, анализируемые образцы семян при этом, как правило, разрушаются или утилизируются в процессе оценки.

Современная инструментальная база предлагает линейку неинвазивных методов исследования семенного материала таких как: интроскопические – микрофокусная рентгенография (Архипов, Потрахов, 2008; Rego et al., 2023 и др.), компьютерная микротомография (Gomes-Junior et al., 2019; Kunishima et al., 2020 и др.), магнитно-резонансная томография (Pietrzak et al., 2002; Tuomainen et al., 2022 и др.); оптические – цифровое сканирование и цифровая фотография (Afonnikov et al., 2022; Huang et al., 2022 и др.), метод оценки по флуоресценции хлорофилла (Jalink et al., 1998; Xu et al., 2021 и др.) и по фосфоресценции (Веселова и др., 1995; Беляков, 2020), ИК-микроскопия (Капусткина, Фролов, 2022) и спектрофотометрия (Казаченко и др., 2019; Radenovic et al., 2022 и др.), мульти- (Olesen et al., 2015; França-Silva et al., 2022 и др.) и гиперспектральная (Singh et al., 2007; Feng et al., 2019 и др.) визуализация, а также электрофизические – газоразрядная

визуализация (ГРВ или электрофотография) (Cater, Vatic, 1998; Zanco, 2016). Все эти методы, каждый в отдельности, нашли свое применение в неинвазивной оценке качества семян. Однако, вопрос сопряженных исследований качества семенного материала несколькими инструментальными методами, до сих пор, не изучен.

Целью исследования являлась разработка методик комплексной неинвазивной экспресс-оценки качества семян сельскохозяйственных культур и древесных лесных пород на основе использования набора инструментальных физических методов для совершенствования агротехнологий в системе адаптивного растениеводства.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Осуществить практическую оценку экспериментально-научных и практических основ методологии комплексной неинвазивной экспресс-оценки разнокачественности и скрытой дефектности семян различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений с использованием набора инструментальных физических методов (цифрового сканирования, микрофокусной рентгенографии, электрофотографии), для оперативной проверки хозяйственной пригодности семенного материала.
2. Усовершенствовать технические и программные элементы методик цифрового сканирования, микрофокусной рентгенографии и электрофотографии.
3. Выявить и оценить количественно генетическую, матричную и экологическую разнокачественность семян исследованных сельскохозяйственных культур, на основе усовершенствованной методики цифрового сканирования, в сочетании с компьютерным анализом изображений.
4. Оценить количественно скрытую дефектность семян исследованных сельскохозяйственных культур и древесных лесных пород, на основе усовершенствованной методики микрофокусной рентгенографии, в сочетании с визуальным и компьютерным анализом цифровых рентгеновских изображений.
5. Оценить количественно невыполненность семян древесных лесных пород и провести первичный скрининг скрытых дефектов биогенного происхождения семян зерновых культур, с использованием усовершенствованной методики электрофотографии, и последующим компьютерным анализом цифровых газоразрядных изображений.
6. Изучить взаимосвязи характеристик разнокачественности и скрытой дефектности семян, полученных с использованием инструментальных физических методов, с посевными качествами (энергия прорастания, всхожесть) семян, а также с дополнительными ростовыми показателями (длина корня и ростка).
7. На основе сопряженных неинвазивных комплексных исследований получить новые знания о структурных внешних и внутренних характеристиках формообразующих структур, описывающие скрытую неоднородность семян зерновых, овощных, декоративных, плодовых, орехоплодных культур, а также семян древесных лесных пород.
8. На основе полученного практического материала предложить концепцию «параметрического паспорта» семени, включающего, дополнительно к информации о генетическом паспорте сорта, морфометрические, рентгеновские, электрофизические и морфофизиологические показатели индивидуальных семян и партий семенного материала.

Научная новизна. Впервые разработаны и предложены научно-практические основы методологии комплексной неинвазивной экспресс-оценки разнокачественности и скрытой дефектности семян различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений с использованием набора инструментальных физических методов (цифрового сканирования, микрофокусной рентгенографии, электрофотографии).

Получены новые фундаментальные знания о структурных внешних и внутренних характеристиках формообразующих структур, описывающие скрытую неоднородность семян зерновых, овощных, декоративных, плодовых, орехоплодных культур, а также семян древесных лесных пород.

Впервые предложен способ дифференцированного анализа цифровых рентгеновских изображений семян плодовых культур (яблоня домашняя *Malus domestica* Borkh.), а также семян древесных лесных пород (сосна кедровая сибирская *Pinus sibirica* DuRoi, кедровый

стланик *Pinus pumila* (Pall.) Regel, эвкоммия вязолистная *Eucommia ulmoides* Oliv.), позволяющий оценить пространственные и яркостные параметры отдельных структур и органов семени.

Установлена взаимосвязь показателей скрытой дефектности и яркостных параметров цифровых рентгеновских изображений семян зерновых (яровая мягкая пшеница *Triticum aestivum* L., сахарная кукуруза *Zea mays* L.), капустные культуры (*Brassica* spp., шпинат огородный *Spinacia oleracea* L.), древесные лесные породы) с посевными качествами и дополнительными ростовыми показателями семян, что позволяет использовать этот подход как для рентгенографических экспресс-экспертиз оценки качества партий семенного материала перед посевом, так и для разработки алгоритмов отбора наиболее биологически полноценных семян с целью прецизионных экспериментов и создания промышленных образцов автоматических сортировщиков семян.

На основе использования триады неинвазивных инструментальных физических методов оценки разнообразного семенного материала различных сельскохозяйственных и древесных лесных культур, в дополнение к фенотипическим, физиолого-биохимическим и молекулярно-генетическим характеристикам семени, а также его морфологическим показателям предложен «параметрический паспорт» семени.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в получении новой фундаментально-научной информации о разнокачественности и скрытой внутренней дефектности покоящихся семян и в разработке алгоритмов сбора такой информации.

Установлены взаимосвязи посевных качеств и дополнительных ростовых показателей семян исследованных видов сельскохозяйственных и древесных лесных растений с характеристиками их скрытой неоднородности и дефектности.

Практическая значимость работы заключается в усовершенствовании неинвазивных инструментальных методик экспресс-оценки разнокачественности и скрытой дефектности семенного материала сельскохозяйственных культур и древесных лесных пород. Разработанные методики и подходы могут быть использованы в селекционных целях, в практике промышленного семеноводства и контрольно-семенном деле. Научно-методические основы и разработанные методологии оценки неоднородности семенного материала могут послужить основополагающей научно-практической базой для создания различных типов (оптических, рентгеновских, газоразрядных) промышленных сортировщиков семян.

В ФГБНУ АФИ, при участии автора, разработан действующий национальный стандарт ГОСТ Р 59603-2021 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии».

Методология и методы исследований. Методология научного исследования была построена на комплексном сочетании лабораторных методик оценки разнокачественности и скрытой дефектности, а также посевных качеств семенного материала, полученного в условиях естественного произрастания растений, мелкоделяночных полевых опытов и производственных посевов. Выбранная методология позволила использовать преимущества примененных методов исследования. Статистическую обработку полученных результатов проводили по Б. А. Доспехову (1985). Зависимости между изучаемыми показателями определялись с использованием пакета статистических программ «Statistica 10» (Stat-Soft Inc., USA). Проверку гипотез о статистической значимости корреляционных связей проводили с использованием критерия Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная комплексная неинвазивная экспресс-оценка семенного материала является научно-методической основой для выявления разнокачественности семян различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений в системе адаптивного растениеводства.

2. Усовершенствованные и адаптированные технические и программные элементы методик цифрового сканирования, микрофокусной рентгенографии и

электрофотографии, примененные в совокупности, позволяют количественно оценить разнокачественность и скрытую дефектность исследованных видов семян сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений.

3. Количественные характеристики разнокачественности и скрытой дефектности семян, полученные с использованием инструментальных физических методов, и посевные качества (энергия прорастания, всхожесть) семян, а также дополнительные ростовые показатели (длина корня и ростка) взаимосвязаны между собой.

4. С целью описания совокупности признаков (морфометрических, рентгеновских, электрофизических и морфофизиологических) и характеристики биологической полноценности и хозяйственной пригодности семян для посева может быть предложен «Параметрический паспорт» семени.

Степень достоверности и апробация работы. Необходимый в научных исследованиях

уровень достоверности обеспечивался строгим соблюдением методических принципов и требований к проведению лабораторных опытов, а также инструментальных измерений и статистической обработки данных. Степень достоверности подтверждена использованием различных методов для оценки разнокачественности, которые не только дали сходные результаты, но и позволили выявить ее причины.

Апробация результатов работы. Результаты исследований были доложены и представлены на более чем 40 научных российских и зарубежных научных форумах, включая международные, в том числе: Международной научно-практической конференции «Инновации и технологии в лесном хозяйстве» (ФБУ СПбНИИЛХ, 2013, 2016), VII Международном конгрессе «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине» (г. Санкт-Петербург, 2015), Всероссийской научной конференции с международным участием «Агроэкосистемы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления» (ФГБНУ АФИ, г. Санкт-Петербург, 2016), Научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2019), Научной конференции с международным участием и школы молодых ученых "Годичное собрание общества физиологов растений России (г. Санкт-Петербург, 2016, г. Иркутск, 2018), Международных конгрессах ISTA (г. Таллинн, Эстония, 2016; г. Хайдарабад, Индия, 2019), Международной научной конференции, «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего» (ФГБНУ АФИ, г. Санкт-Петербург, 2017, 2019, 2021), 70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава (ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, 2017), Международного конгресса "Повышение конкурентоспособности российской сельскохозяйственной продукции на внутренних и внешних рынках (для обсуждения и выработки решений)", в рамках международной агропромышленной выставки-ярмарки "Агрорусь-2017" (г. Санкт-Петербург, 2017), Всероссийской научно-практической конференции "Современные методы, средства и нормативы в области оценки качества зерна и зернопродуктов" (Кубанский филиал ФГБНУ «ВНИИЗ», г. Анапа, 2017, 2018, 2019), Международной научно-практической конференции молодых учёных «Роль молодых ученых в решении актуальных задач АПК» (ФГБОУ ВО СПбГАУ, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, 2017, 2018), Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава «Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения» (ФГБОУ ВО СПбГАУ, 2017, 2020), Второй всероссийской научной конференции с международным участием «Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве» (ФГБНУ АФИ, г. Санкт-Петербург, 2018), Международной научной конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки» (ФГБУН НИИСХ Крыма, г. Ялта, 2018, 2019), International Conference on X-Ray, Electrovacuum and Biomedical Technique (г. Санкт-Петербург, 2018, 2020), IX Международной научно-технической конференции «Леса России» (ФГБОУ ВО СПбЛТУ им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, 2019), Всероссийской научной конференции с международным участием «Вклад

агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки» (ФГБНУ АФИ, г. Санкт-Петербург, 2020), Международной научной конференции «Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства» (ФГБНУ АФИ, г. Санкт-Петербург, 2022), VII Жученковских чтениях «Биологические основы защиты растений» (Федеральный научный центр биологической защиты растений, г. Краснодар, 2022), VIII Международной научно-практической конференции «Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве», (Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, г. Киров, 2022).

Организация исследования и личный вклад автора. Исследования выполнены на базе сектора биофизики растений лаборатории экологической физиологии и биофизики растений отдела светофизиологии растений и биопродуктивности агроэкосистем Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Агрофизический научно-исследовательский институт».

Автор принимал личное участие в организации, разработке методических программ исследований, проведении лабораторных экспериментов и оценке исследуемого материала в период с 2012 - 2023 гг. в качестве руководителя и ответственного исполнителя. Доля личного участия в получении и обработке результатов исследований составляет не менее 85%.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 46 печатных работ, из которых 21 опубликована в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 12 статей в базе цитирования Web of Science и Scopus, 2 методических пособия.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, заключения и практических рекомендаций, изложена на 253 страницах, включает 61 рисунок и 22 таблицы. Список использованной литературы включает 403 наименования, в том числе 121 на иностранном языке.

Финансовая поддержка. Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-805 от 02 октября 2020 года).

Благодарности. Автор выражает благодарность научному консультанту, доктору биологических наук, член-корреспонденту РАН, Чеснокову Ю.В., доктору биологических наук, профессору Архипову М.В., кандидату биологических наук Гусаковой Л.П., кандидату биологических наук Великанову Л.П., кандидату биологических наук Пановой Г.Г. (ФГБНУ АФИ), доктору технических наук, профессору Потрахову Н.Н. (ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), доктору сельскохозяйственных наук Мусаеву Ф.Б.О., а также ряду других научных сотрудников, коллег и соавторов за помощь и поддержку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Литературный обзор

В обзоре приведены сведения о разнокачественности семенного материала. Приводится понятие разнокачественности семян, по данным литературы. Описываются категории разнокачественности семян. В целом различают три категории разнокачественности семян: генетическую, матрикальную и экологическую.

Далее рассматриваются стандартные методы оценки качества семенного материала. Приводится понятие о качестве семенного материала. Описываются основные методы оценки качества семенного материала: методы определения всхожести, жизнеспособности, массы 1000 семян, силы роста и прочие стандартные методы оценки качества семян.

Приводится аналитический обзор инструментальных физических методов оценки качества семенного материала. В целом эти методы можно условно разделить на 2 группы: морфофизиологические и физические – с использованием соответствующего инструментария.

К первой группе методов следует отнести классические традиционные методы оценки непосредственно самих семян, рассмотренных в главе 1.2.

Ко второй группе относят инструментальные физические методы, предназначенные для неинвазивной оценки качества семян, в целом условно можно классифицировать на следующие подгруппы:

- интроскопические – микрофокусная рентгенография, компьютерная микротомография, магнитно-резонансная томография;
- оптические – цифровая оптическая визуализация, метод оценки по флуоресценции хлорофилла и по фосфоресценции, ИК-микроскопия и спектрофотометрия, мульти- и гиперспектральная визуализация;
- интегральные электрофизические – газоразрядная визуализация (ГРВ или электрофотография).

Описывается мировой опыт применения основных инструментальных физических методов оценки разнокачественности и дефектности семян различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений: микрофокусная рентгенография, компьютерная микротомография, магнитно-резонансная томография, оптическая визуализация – цифровое сканирование, цифровая фотография, инфракрасная микроскопия, метод флуоресценции хлорофилла, люминесцентный метод регистрации фосфоресценции, лазерная фотометрия, инфракрасная (ИК) спектроскопия, термография, мульти- и гиперспектральная визуализация, терагерцовая визуализация, электрофотография (газоразрядная визуализация). Показано, что в настоящее время для исследования качества семян представлен достаточно широкий выбор современного инструментария, который позволяет существенно усовершенствовать и дополнить традиционные методы анализа семян путем проращивания их в лабораторных условиях. При этом преимущество имеют методы стандартизированные, неинвазивные, автоматизированные, экспресс-методы с высоким уровнем точности и информативности, позволяющие проводить комплексный качественный и количественный анализ семян.

В завершающем разделе литературного обзора описываются факторы, влияющие на качество семенного материала: качество исходных семян, роль сорта, влияние условий выращивания растений, патогенной микрофлоры, насекомых, минерального питания растений и агротехнологий на качество семян.

Глава 2. Материалы и методы исследований

2.1. Материалы исследований

В качестве материалов исследований были использованы семена различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных пород:

2.1.1. Зерновые культуры:

1) Семена мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) яровых сортов Злата, Радмира, Юбилейная 58 и гибридных линий АФИ 1 (Агата х ITMI29) F₅, АФИ 2 (Агата х ITMI47) F₅, АФИ 7 (Лиза х ITMI10) F₄, h2788 (Злата х Московская) F₁₂, h3021 (Биора х Злата) F₄ были получены в строго контролируемых условиях выращивания культуры (агробиополигон ФГБНУ АФИ (Ленинградская обл., 2022 год) и в полевых условиях (ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка», Московская обл., 2020 год) (посевным материалом служили семена из коллекции ФГБНУ АФИ).

2) Семена озимой мягкой пшеницы сорта Светоч, в разной степени поврежденных клопом вредная черепашка (предоставлены А.В. Капусткиной, лаборатория сельскохозяйственной энтомологии ФГБНУ ВИЗР, г. Санкт-Петербург).

3) Семена пшеницы из производственных посевов, подвергнутых механической послеуборочной доработке (предоставлены Н.И. Жуковым, ООО «Сильные семена», Краснодарский край, урожай 2020).

4) Семена яровой мягкой пшеницы сорта Дарья (предоставлены Е.Н. Пасынковой и А.В. Пасынковым), происхождение - Ленинградский НИИСХ «Белогорка», различающихся годом репродукции и технологией выращивания (доза внесения азота).

5) Семена кукурузы, предоставленные Т.Ю. Гагкаевой (лаборатория микологии и фитопатологии ФГБНУ ВИЗР: 1- гибрид РОСС 272 АМВ (выращен – Волгоградская область), 2 - гибрид РОСС 272 АМВ (выращен – Саратовская область), 3 – гибрид

Краснодарский 194 МВ (выращен – Алтайский край), 4 - гибрид F₁ Лидер 165 (выращен – Астраханская область).

2.1.2. Овощные культуры

1) Семена пяти сортов фасоли овощной выращенные в пяти контрастных эколого-географических условиях среды в течение двух лет (Таблица 1). Сорта фасоли были подобраны по принципу разнообразия морфо-биологических и хозяйственно-полезных признаков. Сорт Настёна (происхождение ВНИИССОК) – универсального типа, Магура и Морена – луцильные (происхождение ВНИИССОК-БГСХА), Миробела и Бажена (происхождение ВНИИССОК-БГСХА) – сахарные. Пункты размножения семян отличались друг от друга географическим расположением (широта, долгота), высотой над уровнем моря и удаленностью от них, типом почвы и др.

2) Семена капустных культур из коллекции ВИР (18 образцов), предоставленные А.М. Артемьевой. Белокочанная капуста (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) - 1 коллекционный сортообразец, цветная капуста (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.) - 3 сортообразца, пекинская капуста (*Brassica rapa* subsp. *pekinensis* (Lour.) - 5 сортообразцов европейского и азиатского происхождения. Каждый коллекционный сортообразец представлен двумя партиями семян, полученных в различные годы и на различных станциях ВИР, расположенных в трех эколого-географических зонах Российской Федерации: Северо-западная зона (Пушкин), южная (Майкоп, Дагестан), Дальний Восток, а также в Нидерландах: Капуста белокочанная Jupiter F1 Нидерланды Москва 2016; Капуста белокочанная Jupiter F1 Нидерланды Пушкин 2017; Капуста цветная Merawane Market Великобритания Дагестан 2014; Капуста цветная Merawane Market Великобритания Нидерланды 2016; Капуста цветная Champoin of England Великобритания Майкоп 2014; Капуста цветная Champoin of England Великобритания Дагестан 2020; Капуста цветная Vilmorin 23 Франция Дагестан 2014; Капуста цветная Vilmorin 23 Франция Нидерланды 2016; Капуста пекинская Дак-се Корея Пушкин 2017; Капуста пекинская Дак-се Корея Майкоп 2015; Капуста пекинская Fu-Min Китай Нидерланды 2016; Капуста пекинская Fu-Min Китай Дальний Восток 2016; Капуста пекинская Harumaki Shin Santousai Япония Дальний Восток 2016; Капуста пекинская Harumaki Shin Santousai Япония Майкоп 2015; Капуста пекинская Ju Zhu Китай Майкоп 2015; Капуста пекинская Ju Zhu Китай Пушкин 2017; Капуста пекинская Осенний 6 Китай Майкоп 2016; Капуста пекинская Осенний 6 Китай Дальний Восток 2019.

3) Семена шпината огородного (*Spinacia oleracea* L.) сорта Стоик из коллекции Федерального научного центра овощеводства, семена предоставлены Ф.Б.О. Мусаевым.

4) Семена укропа пахучего (*Anethum graveolens* L.) сорта Кентавр, 2015-2017 годов репродукции, предоставленные Ф.Б.О. Мусаевым (ФНЦ Овощеводства).

5) Семена пастернака посевного (*Pastinaca sativa* L.) сорта Кулинар 2013 года репродукции, предоставленные Ф.Б.О. Мусаевым (ФНЦ Овощеводства).

2.1.3. Декоративные культуры

1) Семена декоративного лука кристофа (*Allium cristophii* Trautv.), предоставленные Ф.Б.О. Мусаевым (ФНЦ Овощеводства).

2) Семена 8 образцов шнитт-лука *Allium schoenoprasum* L., из биокolleкции ВНИИО – филиала ФГБНУФНЦО: Медонос, Чемал, Подвид Сибирский, Подвид Европейский, Мудрец, Pražský Krajoва, Образец из ЮУБСИ, Образец из КузБС, предоставленные Ф.Б.О. Мусаевым (ФНЦ Овощеводства).

2.1.4. Плодовые культуры

1) Семена яблони *Malus domestica* Borkh. сортов Антоновка и Китайка Керн, 2008 года вступления в эксплуатацию (плодоношение). Семена предоставлены Ю.В. Бурменко (ФГБНУ "Всероссийский селекционно-технологический институт садоводства и питомниководства"), г. Москва.

2.1.5. Орехоплодные культуры

1) Семена селекционного сорта миндаля обыкновенного (*Amygdalus communis* L.) «Милас» урожая 2020 года, предоставленные ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени

Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН» (пгт. Никита, республика Крым).

2.1.6. Древесные лесные породы

1) Семена ели обыкновенной (*Picea abies* L.) место сбора - спелые насаждения Ленинградской области естественного происхождения. Семена предоставлены СПбНИИ Лесного хозяйства А.С. Бондаренко.

2) Семена сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) из Новосибирска и Республики Тыва, а также кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) разной степени биологической полноценности, полученные из разных эколого-географических зон произрастания. Образцы предоставлены Л.П. Трофимуком (НОС «Отрадное» БИН РАН).

3) Желуди дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). Место сбора – Санкт-Петербург, год репродукции – 2015. Семена предоставлены СПбНИИ Лесного хозяйства О.Ю. Бутенко.

4) Семена эвкоммии вязолистной (*Eucommia ulmoides* Oliver.), предоставленные С.Г. Сахаровой (СПбГЛТУ им. С.М. Кирова): происхождение г. Кропоткин и Вьетнам.

2.2. Методы исследований

2.2.1. Цифровое сканирование в сочетании с автоматическим анализом изображений семян

Цифровые изображения семян получали с использованием планшетного сканера HP Scanjet 200, или аналог, формат сохраняемых файлов BMP, TIFF, JPG. Выбор необходимого и достаточного разрешения при сканировании определялся техническими возможностями сканера (максимальное разрешение 4800x2400 DPI), ресурсами программного обеспечения и персонального компьютера, а также размерами семян, так как для обеспечения точности измерений менее 1% требовалось, чтобы на объект (проекцию семени) попадало не менее 1000 пикселей. Морфометрический анализ цифровых сканированных изображений семян был выполнен на базе Агрофизического НИИ с использованием серийного программного обеспечения «ВидеоТест-Морфология 5.2», производства ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия. Методика включает в себя подбор контрастной подложки (фона) для сканирования семян с минимальными теневыми эффектами, калибровку программного обеспечения для привязки к реальным размерным величинам, выбор параметров измерений и непосредственно автоматический анализ цифровых сканированных изображений семян.

Для автоматической компьютерной морфометрии семян использован набор следующих параметров, по группам: размерные характеристики, характеристики формы, характеристики цвета.

2.2.2. Микрофокусная рентгенография семян в сочетании с визуальным и автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений

Для микрофокусной съемки семян использовали аппаратно-программный комплекс на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02, применяемой для контроля качества семян (совместная разработка ФГБНУ АФИ и Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ им. В.И. Ульянова-Ленина; предприятие-изготовитель ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», г. Санкт-Петербург, Россия). Коэффициент увеличения изображения при рентгеновской съемке составлял, в зависимости от конкретного образца семян (вида сельскохозяйственной культуры) от 1,0х до 5,0х. Программная обработка цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы осуществлялась в программе «ВидеоТест-Морфология 5.2.», производства ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия.

Дополнительно способом визуальной расшифровки цифровых рентгеновских изображений анализировались показатели скрытой дефектности семян, согласно ГОСТ Р 59603-2021.

2.2.3. Газоразрядная визуализация (электрофотография) семян

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

Аппаратное обеспечение метода газоразрядной визуализации представлено серийным аппаратом «ГРВ Камера-Про», Организация-разработчик и предприятие-производитель ООО «Биотехпрогресс», Санкт-Петербург, Россия.

Анализ изменений газоразрядных изображений включает в себя вычисление характеристик амплитудных, геометрических, яркостных, фрактальных и вероятностных параметров. Программная обработка осуществляется в программе «ГРВ научная лаборатория».

2.2.4. Оценка посевных качеств семян

Для определения всхожести семян использовали ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

С целью более детальной оценки морфометрических показателей проростков была использована методика, позволяющая получать цифровые изображения проростков с помощью сканера или лабораторного стенда с цифровой фотокамерой, с последующей морфометрией в программе «ВидеоТест-Морфология 5.2». Анализировались дополнительные ростовые показатели (длина зародышевого корня и ростка)

2.2.5. Статистическая обработка данных

Обработка результатов осуществлялась в программе MS Excel (построение графиков), а также Statistica 10, с применением t-критерия, корреляционный анализ.

Глава 3. Результаты исследований

Оценка и изучение состояние семенного материала имеет первостепенное значение, как для фундаментальной науки, так и для практики и производства. Прежде всего, это касается внутреннего состояния семян, поскольку невооруженным глазом невозможно проникнуть за оболочку поверхности любого семени. Именно поэтому разработка и использование неинвазивных методов оценки, прежде всего внутреннего, состояния семенного материала становится как никогда актуальной, особенно, если необходимо сохранить изучаемый семенной материал и использовать его, в последствие, для посадки. В этой связи нами были проведены исследования разнокачественности семян на основе методики цифрового сканирования и цифровой фотографии в сочетании с автоматическим анализом изображений семян, неоднородности и скрытой дефектности семян методом микрофокусной рентгенографии, а также скрытой дефектности семян на основе методики электрографии (газоразрядной визуализации), что позволило нам сравнить эти подходы как между собой, так и их возможности в отношении широкого круга семян различных видов растений.

3.1. Изучение разнокачественности семян на основе методики цифрового сканирования и цифровой фотографии в сочетании с автоматическим анализом изображений семян

При планировании экспериментов по изучению разнокачественности семян с использованием методики цифрового сканирования и цифровой фотографии в сочетании с автоматическим анализом изображений и на основании литературных данных, представленных в Главе I, мы исходили из того, что разнокачественность семян может быть описана не только качественными, но и количественными показателями, характеризующими размеры, форму и цвет семян. Однако разнокачественность может быть обусловлена различными причинами. Так, например, генетическая разнокачественность проявляется, помимо разнообразия генотипов, в различиях фенотипа, включая, различия цвета семян. Цвет семени является одной из характеристик сорта и потому крайне важен для работы с семенным материалом, как в селекционной работе, так и в промышленности.

Еще одним параметром, на который мы обратили внимание, является матричная разнокачественность, которая проявляется в различиях геометрических и цветовых показателей семян, что обусловлено неодинаковой степенью вызреваемости семян на частях материнского растения. А экологическая разнокачественность, которая также влияет на формирование семян растений, проявляется в изменениях как геометрических показателей

(условия выращивания растений), так и цветowych показателей, особенно в случае воздействия на семена биотических факторов среды. Исходя из этого, и для максимально возможной стандартизации использованного нами подхода, мы использовали методику цифрового сканирования семян в сочетании с компьютерным анализом изображений.

3.1.1. Усовершенствование методики цифрового сканирования в сочетании с автоматическим анализом изображений семян

Для выполнения исследований разнокачественности семенного материала методика на основе цифрового сканирования изображений и анализа изображений, была усовершенствована следующим образом:

1. Был предложен набор контрастных фоновых покрытий, обеспечивающий контрастность объектов интереса (семян), относительно фона. Это обеспечило минимальное количество операций по программной обработке цифровых сканированных изображений в программе «ВидеоТест-Морфология».

2. Для семян некоторых сельскохозяйственных культур предложены рамки, для простоты изготовленные из картона толщиной 0,18 мм, и размерами, подбираемыми в зависимости от размера исследуемых семян, с подложкой из бумажного или прозрачного скотча, что обеспечило возможность «каскадной» съемки двумя инструментальными методами (цифровое сканирование и микрофокусная рентгенография), с сохранением персонализированной нумерации семян, необходимой для формирования «параметрического паспорта».

3. Из набора параметров, рассчитываемых в программе «ВидеоТест-Морфология», были выбраны оптимальные, характеризующие размеры, форму и цветность семян.

Все эти усовершенствования позволили нам применить методику цифрового сканирования семян в сочетании с компьютерным анализом изображений, позволяющую без изменения методики пробоподготовки впоследствии исследовать одни и те же семена различными стандартизированными методами: микрофокусной рентгенографией, согласно ГОСТ Р 59603-2021, с последующей оценкой посевных качеств семян (энергия прорастания, всхожесть), согласно ГОСТ 12038-84, а также проводить оценку дополнительных ростовых показателей (длина зародышевого корня и ростка), с сохранением персонализированной информации о каждом семени. Кроме того, такой подход, предложенный нами, позволял провести эффективную оценку разнокачественности семян различных видов растений как однодольных, так и двудольных.

3.1.2. Изучение разнокачественности семян зерновых культур

3.1.2.1. Изучение морфометрических и оптических характеристик семян яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), полученных в разных агроэкологических условиях

Для того чтобы провести количественную оценку цветности семян 8 генетических линий яровой мягкой пшеницы, полученных в полевых и контролируемых условиях, было проведено цифровой сканирование этих семян, в сочетании с компьютерным анализом изображений.

Результаты анализа цветности семян пшеницы, полученных в полевых и контролируемых условиях, по цифровым сканированным изображениям: степень выраженности красного цвета скан-проекции семени по модели RGB, единицы яркости (8 бит), и степень выраженности зеленого цвета скан-проекции семени по модели RGB, единицы яркости (8 бит) представлены на рисунке 1.

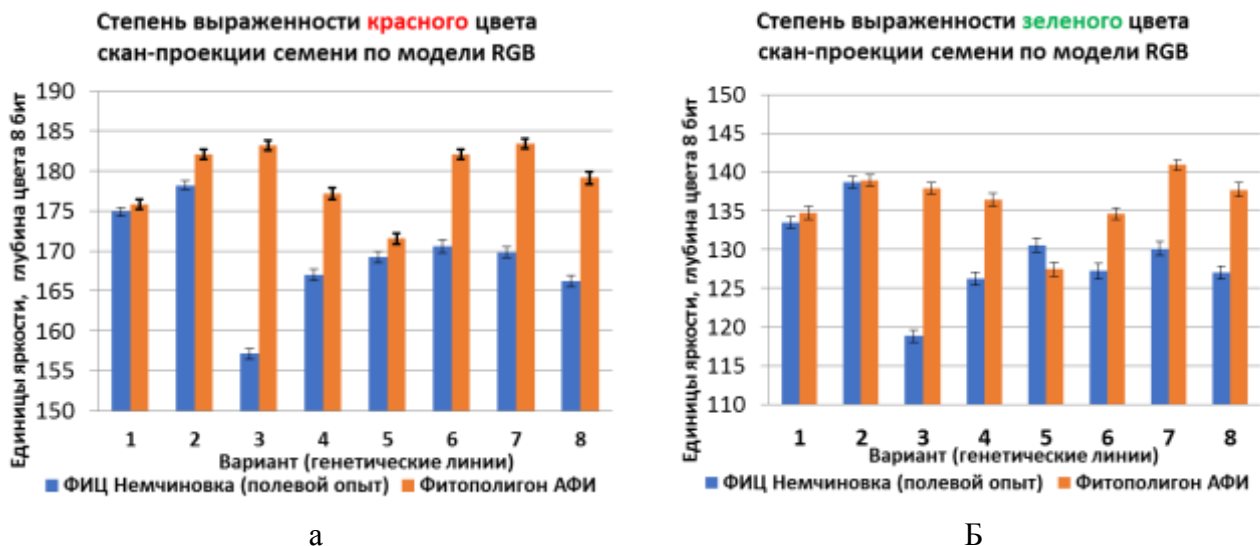


Рисунок 1. Результаты анализа цветности семян пшеницы, полученных в полевых и контролируемых условиях, по цифровым сканированным изображениям: а – степень выраженности красного цвета скан-проекции семени по модели RGB, единицы яркости (8 бит), б – степень выраженности зеленого цвета скан-проекции семени по модели RGB, единицы яркости (8 бит). Цифрами на диаграммах показаны генетические линии: 1 – Агата х ITMI29, 2 – Агата х ITMI47, 3 – Лиза х ITMI10, 4 – Злата, 5 – Радмира, 6 – Юбилейная 58, 7 – h2788 (Злата х Московская), 8 – h3021 (Биора х Злата)

Степень выраженности красного цвета по цветовой модели RGB оказалась выше у образцов семян, полученных в условиях фитополигона ФГБНУ АФИ, по сравнению с образцами, полученными в условиях полевого опыта в ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка». Диапазон значений этого показателя в первом случае, составил от 171 до 183 единицы яркости, во втором случае – 157-178 единиц яркости. Эта закономерность прослеживалась у всех 8 исследованных генетических линий семян пшеницы.

Степень выраженности зеленого цвета по цветовой модели RGB также оказалась выше у образцов семян, полученных в условиях фитополигона ФГБНУ АФИ, по сравнению с образцами, полученными в условиях полевого опыта в ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка». Диапазон значений этого показателя в первом случае, составил от 121 до 141 единицы яркости, во втором случае – 118-139 единиц яркости. Эта закономерность также прослеживалась у всех 8 исследованных генетических линий пшеницы.

Полученные результаты анализа цветности семян пшеницы дают основание полагать, что различия цветовых характеристик поверхности семян связаны:

- с их сортовыми особенностями и генетическим происхождением изучаемого материала.
- с условиями выращивания (полевые – мелкоделяночный опыт в ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка» контролируемые условия – фитополигон ФГБНУ АФИ), которые влияют на цветовые характеристики получаемых семян (большая степень выраженности красного и зеленого цветов для семян, сформированных в условиях фитополигона ФГБНУ АФИ).

Следовательно, данный подход позволяет количественно описать цветовые характеристики поверхности семян пшеницы, что может иметь значение при оценке влияния экологических условий на качество семенного материала.

3.1.2.2. Изучение оптических характеристик семян сахарной кукурузы (*Zea mays* L.), пораженных бактериозом с сопряженной оценкой посевных качеств

Для того, чтобы оценить пораженные бактериозом семена кукурузы были изучены оптические характеристики этих образцов в различных спектральных диапазонах (видимый, УФ). Установлено, что образец гибрида Краснодарский 194 МВ значительно отличается от трех других образцов по параметрам: тон и цветовые составляющие по модели RGB (видимый и УФ диапазоны освещения - Длина волны возбуждающего света 365 нм).

Результаты анализа цифровых изображений семян кукурузы, полученных при искусственном освещении (видимый и УФ диапазоны) представлены на рисунке 2.

Следует отметить, что образец гибрида Краснодарский 194 МВ, выращенный в Алтайском Крае, характеризовался максимальными значениями показателя «Тон», полученными при анализе изображений семян в видимом диапазоне освещения: $0,165 \pm 0,003$, по сравнению с тремя другими образцами: РОСС 272 АМВ (Волгоградская обл.) $0,155 \pm 0,002$; РОСС 272 АМВ (Саратовская область) $0,153 \pm 0,002$; Лидер 165 F₁ (Астраханская область) $0,151 \pm 0,002$, соответственно, а также в УФ диапазоне освещения: $0,422 \pm 0,0038$, по сравнению с тремя другими образцами: РОСС 272 АМВ (Волгоградская обл.) $0,379 \pm 0,0056$; РОСС 272 АМВ (Саратовская область) $0,367 \pm 0,005$; Лидер 165 F₁ (Астраханская область) $0,379 \pm 0,004$, соответственно.

Соотношение цветовых составляющих по модели RGB меняется у семян образца гибрида Краснодарский 194 МВ в сторону уменьшения разницы значений красного и синего каналов (видимый диапазон) и увеличения в УФ диапазоне, по сравнению с тремя другими образцами.

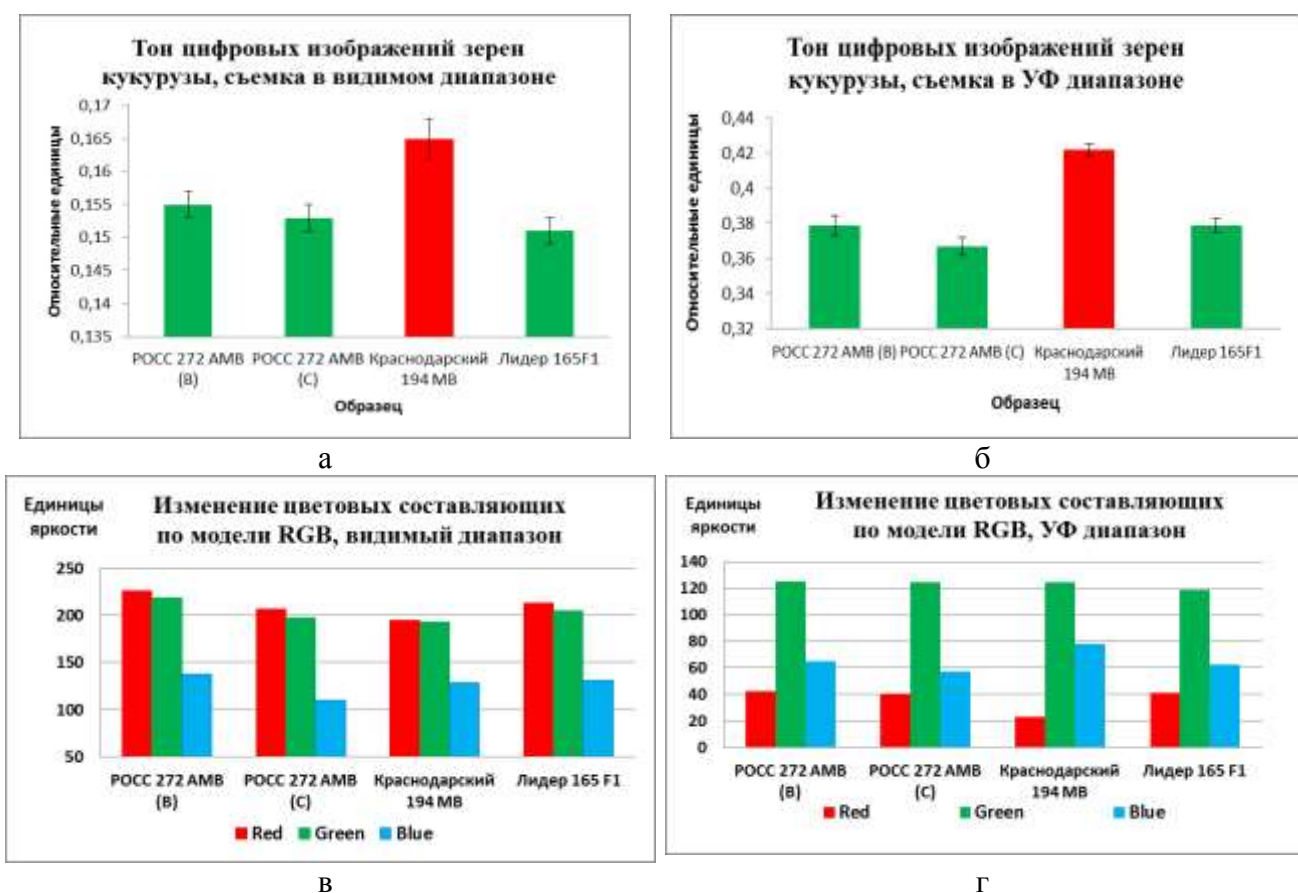


Рисунок 2. Результаты оптической визуализации и программной обработки цифровых изображений семян кукурузы: тон при съемке в видимом (а) в УФ (б) диапазонах, соотношение цветовых составляющих по модели RGB в видимом (в) и (г) УФ диапазонах

Результаты исследований посевных качеств семян кукурузы представлены на рисунке 3.

Как следует из представленных результатов, если по показателю «Тон» (рис. 2а,б) образец гибрида Краснодарский 194 МВ характеризовался максимальными показателями, то по следующим посевным качествам (рис. 3) он характеризовался худшими параметрами - значение показателей «Энергия прорастания» 16%, «Всхожесть» – 22%, «Длина зародышевого побега» $1,15 \pm 0,67$ см, «Длина зародышевого корня» $2,07 \pm 1,01$ см, по сравнению с тремя другим образцами: РОСС 272 АМВ (Волгоградская обл.) 86%, 97%, $10,94 \pm 0,825$ см и 15,81 $\pm 0,955$ см; РОСС 272 АМВ (Саратовская область) 83%, 97%,

10,39±0,996 см и 15,04±0,996 см; Лидер 165 F₁ (Астраханская область) 78%, 89% 1 9,14±0,897 и 13,87±1,28, соответственно.

Также были проведены микробиологическое исследование семян кукурузы и идентификация патогена. Максимальный показатель обсемененности семян кукурузы зафиксирован у образца Краснодарский 194 МВ. В результате проведенных исследований фитопатогенные бактерии, обнаруженные в семенах кукурузы, были идентифицированы как *Pantoea ananatis* s1.

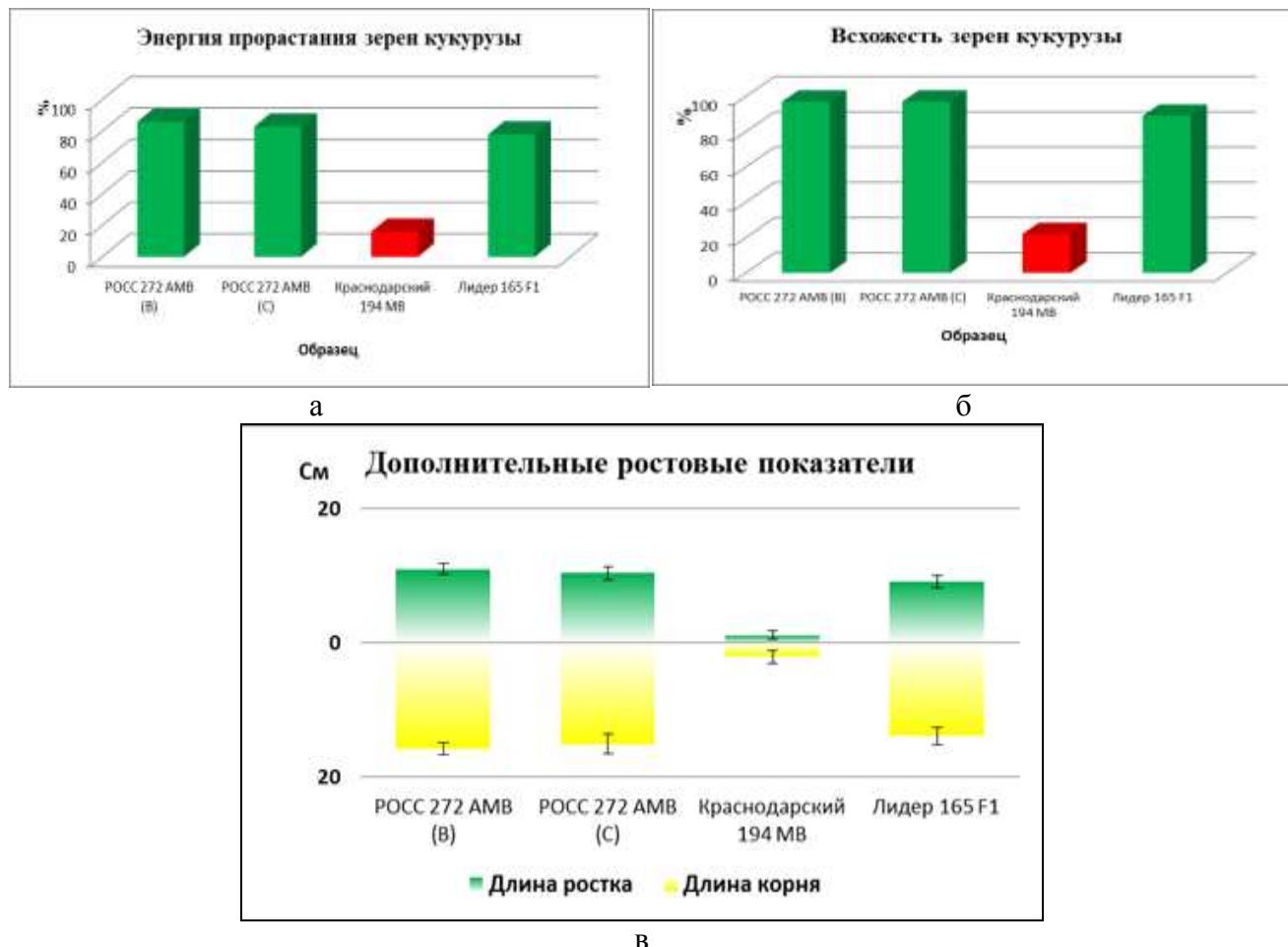


Рисунок 3. Результаты исследований посевных качеств семян кукурузы: а – энергия прорастания, б – всхожесть, в – дополнительные ростовые показатели

3.1.3. Изучение разнокачественности семян овощных культур

3.1.3.1. Изучение экологической разнокачественности семян фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.), с использованием программных средств анализа цифровых изображений

Следующим объектом исследований, выбранным для оценки экологической разнокачественности семян, была фасоль обыкновенная – представитель овощных культур. В результате проведенного автоматического морфометрического анализа сканированных изображений семян фасоли были получены данные измерений по нескольким параметрам, характеризующим размер и форму семян для каждого из 50 вариантов исследований (5 сортов x 5 эколого-географических зон: Москва, Белгород, Ставрополь, Омск, Горки x 2 года репродукции). Экспериментальные данные морфометрического анализа семян фасоли представлены на рисунке 4.

Контрастные природно-климатические условия зон проведения эксперимента, в результате которого были собраны семена для их последующего компьютерного морфометрического анализа, а также резко различающиеся погодные условия, обеспечили

значимые различия показателей размерных и геометрических характеристик семян в пределах одного сорта.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о влиянии эколого-географических и климатических условий на экологическую разнокачественность семян фасоли обыкновенной.

Метод компьютерной морфометрии цифровых сканированных изображений позволил провести оперативную и объективную, по сравнению с ручным методом измерений, оценку геометрических характеристик семян фасоли обыкновенной.

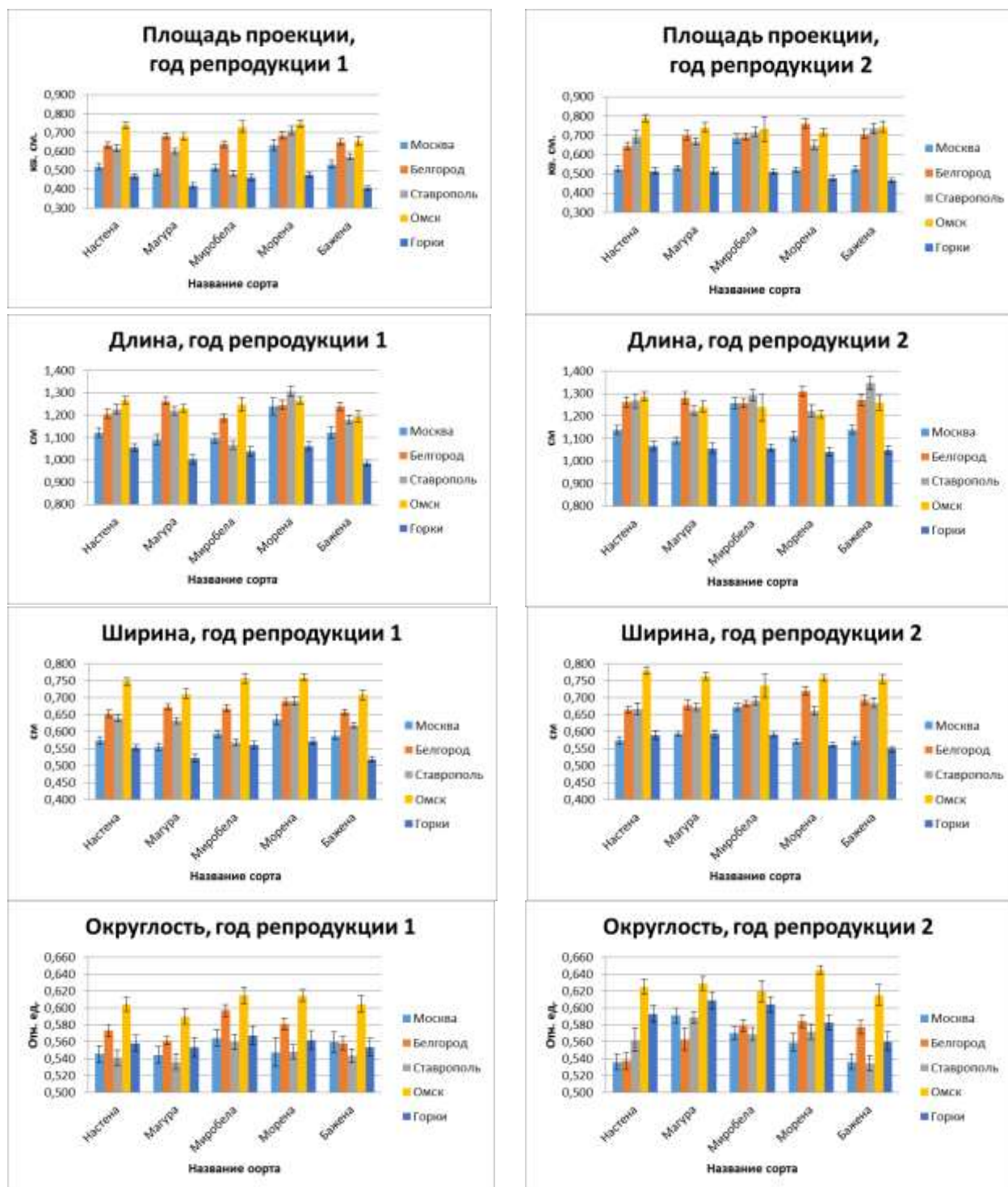


Рисунок 4. Морфометрические характеристики семян различных сортов фасоли в контрастных условиях репродукции

3.1.3.2. Изучение матрикальной разнокачественности семян укропа пахучего (*Anethum graveolens* L.) и пастернака посевного (*Pastinaca sativa* L.)

Для изучения матрикальной разнокачественности семян были использованы еще одни представители семейства овощных – укроп пахучий (*Anethum graveolens* L.) и пастернак посевной (*Pastinaca sativa* L.), поскольку они обладают сравнительно мелкими семенами, что затрудняет использование ручных (неавтоматизированных) методов оценки (измерения линейкой, сита и т.д.) геометрии и цвета семян, особенно у овощных культур. Для этого мы также использовали метод компьютерной морфометрии цифровых сканированных изображений семян.

Результаты компьютерного морфометрического анализа семян укропа и пастернака, собранных с разных порядков ветвей материнских растений, представлены на рисунке 5.

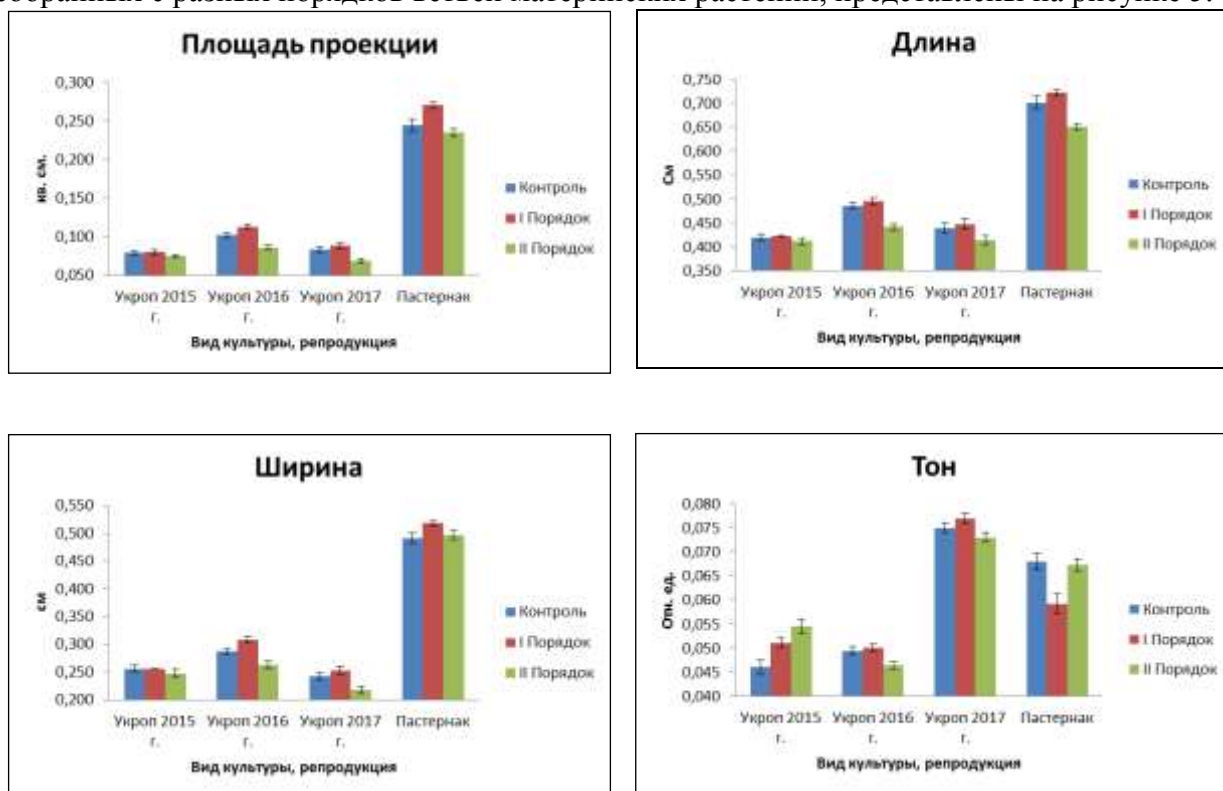


Рисунок 5. Морфометрические характеристики семян укропа и пастернака, собранных с разных порядков ветвления материнских растений

Установлено, что семена укропа и пастернака, отобранные с разных порядков ветвления растений, различались по параметрам, характеризующим размер семян: площадь проекции, длина и ширина. У семян, собранных с ветвей первого порядка значения этих показателей были статистически достоверно выше, по сравнению с семенами, отобранными с ветвей второго порядка. Контрольный образец, представляющий собой общий сбор семян, занимал промежуточное положение по размерным характеристикам. Данная закономерность прослеживается на образцах семян укропа, собранных в разные годы. Анализ цветовых характеристик семян зонтичных, на примере укропа и пастернака, культур, в частности, тона не выявил закономерностей, связанных с отбором семян с разных частей материнских растений.

Учитывая, что возможности планшетного сканера по разрешению достаточно широки (до 4800 dpi), в сочетании с компьютерной морфометрией, метод позволяет работать с очень мелкими семенами (<1 мм). Это создает неоспоримые преимущества метода, в сравнение с ручными измерениями размера, и тем более, формы семян.

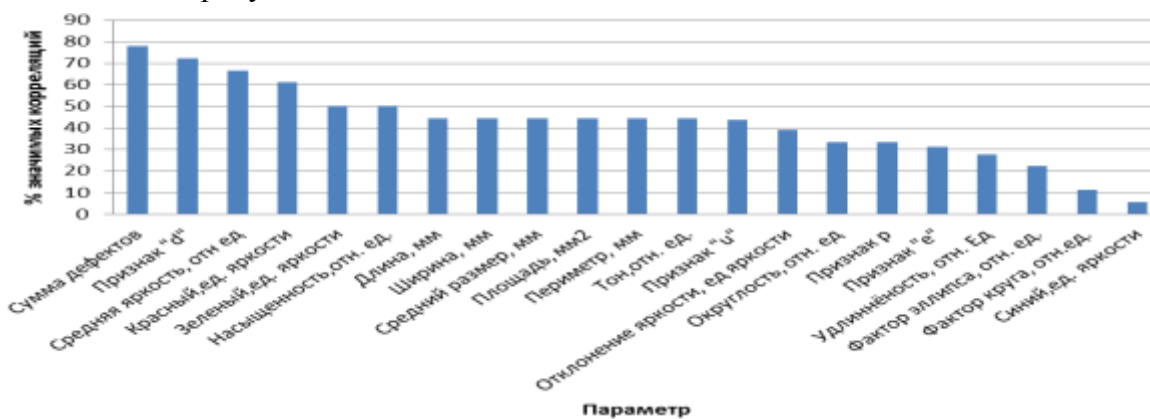
3.1.3.3. Изучение генетической и экологической разнокачественности семян капустных культур методом анализа цифровых сканированных изображений с сопряженной оценкой посевных качеств

Для оценки генетической и экологической разнокачественности с использованием методики цифрового сканирования, в сочетании с компьютерным анализом изображений были взяты 18 образцов семян капустных культур, описание образцов приведено в Главе II.

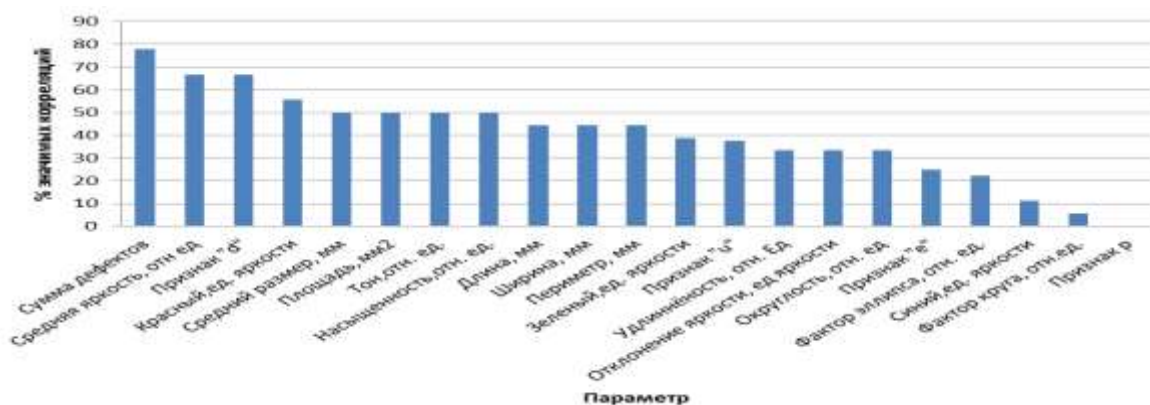
Существенность различий цветовых характеристик семян капустных культур отмечена по параметру Тон отмечена у всех пар образцов (один сорт, разные годы репродукции, разные регионы выращивания семян), по параметру Красный, RGB, Насыщенность – у 8 пар образцов из 9, по параметру Зеленый, RGB – у 7 пар образцов из 9, по параметру Синий RGB – у 6 пар образцов из 9. Существенность различий по посевным качествам семян капустных культур отмечена по параметру Баллы всхожести у всех пар образцов, грунтовая всхожесть – у 8 пар образцов из 9.

Таким образом, цветовые индексы поверхности семян могут являться важным признаком, характеризующим особенности фенотипа семян, как в условиях разных эколого-географических зон их выращивания, так и в условиях их получения в разные годы репродукции.

Результаты ранжирования коэффициентов корреляции показателей, полученных неинвазивными физическими методами, в том числе методом цифрового сканирования и посевных качеств индивидуальных семян капустных культур (по 18 вариантам) представлены на рисунке 6.



а



б

Рисунок 6. Результаты ранжирования значимости коэффициентов корреляции (по вариантам) показателей, полученных неинвазивными физическими методами и посевных качеств индивидуальных семян капустных культур: а – баллы всхожести; б – грунтовая всхожесть, %. Признак «d» - нерегулярные затемнения; признак «u» – угловатые, признак «e» – невыполненные семена

На рисунке 6а видно, что процент значимых корреляций цветовых характеристик поверхности персонализированных семян с их посевными качествами (баллы всхожести) уменьшается в ряду: Красный, Зеленый, Насыщенность, Тон, Синий.

На рисунке 6б показано, что процент значимых корреляций цветовых характеристик поверхности персонализированных семян с их посевными качествами (грунтовая всхожесть) уменьшается в ряду: Красный, Тон, Насыщенность, Зеленый, Синий.

Установлено, что коэффициенты корреляции посевных качеств и оптических характеристик поверхности семян были значимы в 55% случаях для показателя «Составляющая красного цвета по модели RGB». Предположительно, это связано с различной степенью физиологической зрелости семян.

3.1.4. Изучение генетической, матрикальной и экологической разнокачественности семян декоративных культур на примере многолетних луков

Для изучения разнокачественности семян были использованы также представители семейства овощных культур: многолетние луки – шнитт-лук (*Allium schoenoprasum* L.) и лук Кристофа (*Allium cristophii* Trautv.). Они обладают сравнительно мелкими семенами, что затрудняет использование неавтоматизированных методов оценки геометрии и цвета семян.

Путем цифрового сканирования и компьютерного анализа изображений изучены морфометрические параметры семян 8 образцов шнитт-лука, различающихся генетически (разные сортообразцы) и эколого-географическим происхождением, а также 3 образца лука Кристофа, матрикально разнокачественных. Информация об этих образцах лука приведена в Главе II.

Семена различных образцов шнитт-лука, многолетнего травянистого растения, используемого в декоративных и пищевых целях, по площади проекции варьировали в диапазоне от 2,39 до 3,06 мм², по длине – от 2,62 до 3,04 мм и ширине – от 1,27 до 1,47 мм, по среднему размеру от 2,02 до 2,24 мм (Табл. 1).

Таблица 1

Морфометрический анализ геометрических характеристик семян различных образцов шнитт-лука (n=100 шт.)

Образец	Площадь, (мм ²)	Периметр, (мм)	Длина, (мм)	Ширина, (мм)	Средний Размер, (мм)
Медонос	3,06±0,06	7,15±0,06	3,02±0,02	1,47±0,02	2,24±0,02
Чемал	3,03±0,05	7,12±0,06	3,04±0,02	1,43±0,02	2,23±0,02
Подвид Сибирский	2,68±0,05	6,61±0,05	2,78±0,02	1,38±0,02	2,08±0,02
Подвид Европейский	2,81±0,05	6,73±0,06	2,79±0,03	1,42±0,02	2,11±0,02
Мудрец	2,70±0,08	6,67±0,11	2,81±0,05	1,37±0,03	2,09±0,03
PražskýKrayova	2,50±0,08	6,48±0,12	2,76±0,05	1,27±0,03	2,02±0,04
Образец из ЮУБСИ	2,77±0,07	6,78±0,09	2,88±0,04	1,36±0,03	2,12±0,03
Образец из КузБС	2,39±0,06	6,25±0,08	2,62±0,03	1,33±0,02	1,97±0,02
C _v (%)	8,47	4,50	4,91	4,53	4,41

Также были проанализированы различные индексы формы семян. Семена шнитт-лука эллиптические: фактор эллипса у всех испытанных образцов составила 0,99 относительных единиц. Фактор круга варьировал в диапазоне от 0,73 до 0,78 относительных единиц, округлость – от 0,43 до 0,48 относительных единиц, удлиненность от 1,99 до 2,21 относительных единиц (Табл. 5). Самые удлиненные семена наблюдались у образца Pražský Krayova (2,21).

Морфометрический анализ характеристик формы семян различных образцов шнитт-лука (n=100 шт.)

Образец	Фактор круга (отн. ед.)	Округлость (отн. ед.)	Удлиненность (отн. ед.)
Медонос	0,75±0,01	0,45±0,01	2,08±0,03
Чемал	0,75±0,01	0,44±0,01	2,14±0,03
Подвид Сибирский	0,77±0,01	0,47±0,01	2,05±0,04
Подвид Европейский	0,78±0,01	0,48±0,01	1,99±0,03
Мудрец	0,75±0,01	0,45±0,01	2,08±0,04
Pražský Krajouva	0,73±0,01	0,43±0,01	2,21±0,04
Образец из ЮУБСИ	0,75±0,01	0,44±0,01	2,14±0,04
Образец из КузБС	0,76±0,01	0,47±0,01	1,99±0,03
C _v (%)	2,00	3,90	3,67

Использование автоматизированной системы анализа изображений, применяемой для оценки изменения яркостных параметров семян, позволило выявить, что максимальное значение средней яркости зафиксировано у сорта Медонос (61,6), что в 1,15-1,30 раза выше по сравнению с другими изученными образцами (Табл. 6). Это свидетельствует о том, что семена сорта Медонос более яркие, хорошо выполненные и вызревшие. Наиболее тусклые семена «Образца из ЮУБСИ», судя по величине средней яркости – 47,7 единиц, должно быть менее вызревшие и менее выполненные.

Результаты измерений цветовых характеристик семян выявили, что в окраске семян превалирует составляющая синего цвета (фиолетовый оттенок), за исключением образца Pražský Krajouva (преобладает составляющая красного цвета) (рис. 7).

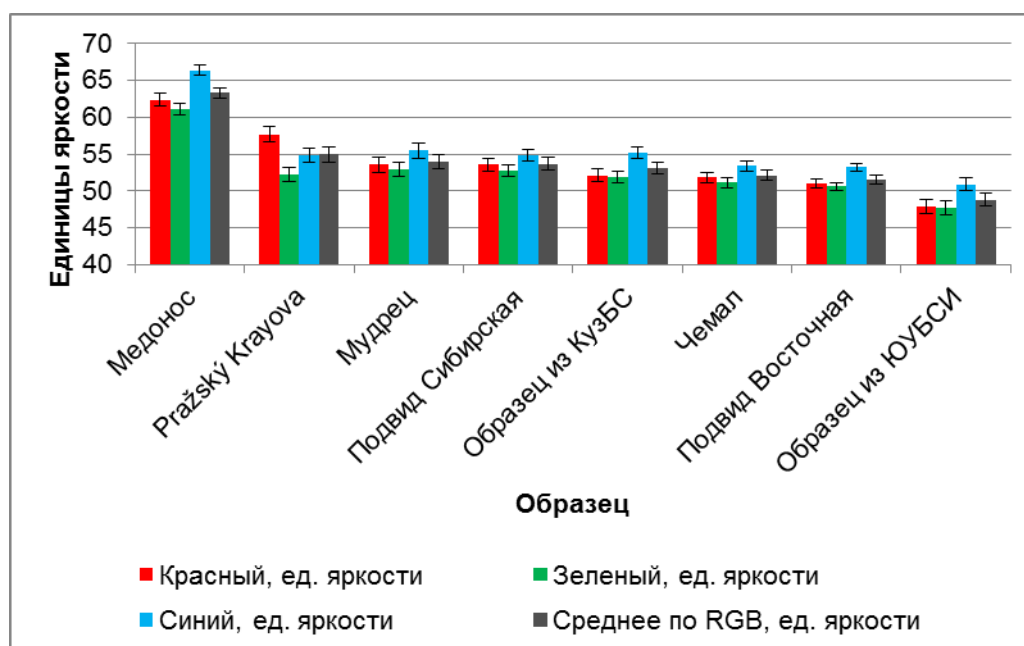


Рисунок 7. Морфометрический анализ цветовых характеристик семян различных образцов шнитт-лука (n=100 шт.)

Максимальное значение показателя средней яркости по цветовым каналам RGB наблюдалось у сорта Медонос (63,3), что в 1,15-1,30 раза выше по сравнению с другими изученными образцами.

Таким образом, метод цифрового сканирования семян в сочетании с компьютерной морфометрией цифровых сканированных изображений имеет следующие достоинства:

- Возможность работы с семенами широкого спектра ботанических семейств и хозяйственно-значимым группам;

- Сравнительная быстрота и объективизация получаемых результатов.

Наряду с этим, для оценки физиологической зрелости семян предлагается применять иные оптические методы, в частности, мультиспектральную визуализацию.

3.2. Изучение неоднородности и скрытой дефектности семян на основе методики микрофокусной рентгенографии.

В отличие от оптических методов, позволяющих исследовать главным образом состояние поверхности семян, метод микрофокусной рентгенографии позволяет исследовать внутреннюю неоднородность и скрытую дефектность семян, которая является важным элементом в оценке посевных качеств семян.

Метод отличается быстротой, объективностью получаемых результатов, возможностью работы с семенами, относящимся к разным ботаническим семействам и хозяйственно-значимым группам, а также неразрушающим характером воздействия на объект исследования (семена).

Кроме того, рентгенографический метод является единственным на сегодняшний день, стандартизированным инструментальным методом неинвазивной оценки качества семенного материала. В Агрофизическом научно-исследовательском институте разработан национальный стандарт ГОСТ Р 59603-2021 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии», документ вступил в силу с 1 января 2022 года. Это позволяет использовать, рентгеновский метод, наряду со стандартным методом оценки посевных качеств ГОСТ 12038-84, в качестве верифицирующего, при исследованиях качества семян другими методами, в частности, оптическими и электрофизическими.

3.2.1. Усовершенствование методики микрофокусной рентгенографии семян в сочетании с визуальным и автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений

Нами предложены следующие улучшения и доработки методики, разработанной совместно учеными ФГБНУ АФИ и СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Архипов, Потрахов, 2008):

1. Для удобства визуального дешифрирования цифровых рентгеновских изображений нами был разработан программный модуль улучшения качества цифровых рентгеновских изображений семян в программной среде MATLAB. Модуль позволяет восстанавливать слабо повреждённые снимки и приводить их к удобному, легко читаемому виду для дальнейшей расшифровки.

2. Подобран оптимальный набор параметров, рассчитываемых в программе «ВидеоТест-Морфология», характеризующих морфометрические и денситометрические характеристики рентген-образов семян: округлость, удлиненность, изрезанность, средняя яркость, среднеквадратическое отклонение яркости.

3. В отличие от семян большинства овощных культур, семена многих древесных лесных пород имеют сравнительно крупные семена, и зародыш у них отчетливо просматривается на рентгеновском снимке. Поэтому, для семян древесных пород нами предложен способ морфометрической и денситометрической оценки отдельных структур и органов семени, осуществляемый путем интерактивного выделения с расчетом геометрических индексов, индексов формы и яркостных показателей.

Таким образом, использование компьютерной программы «ВидеоТест-Морфология» позволяет получать и обрабатывать рентгенограммы, а также получать денситометрические характеристики персонализированных семян, идентифицировать при этом норму и отклонения от нее для семенного материала. При этом результаты получают вне зависимости от вида и рода растений, будь то одно- или двудольные растения, овощные или древесные культуры.

3.2.2.1. Изучение морфометрических и рентгеновских характеристик семян пшеницы *Triticum aestivum* L., полученных в разных агроэкологических условиях

С целью исследования экологической разнокачественности семян пшеницы, полученных в полевых и контролируемых условиях, был проведен их рентгенографический анализ.

Путем автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы 8 генетических линий (описание образцов приведено в Главе II), выращенных в полевых и контролируемых условиях, получены следующие экспериментальные данные, представленные на рисунке 8.

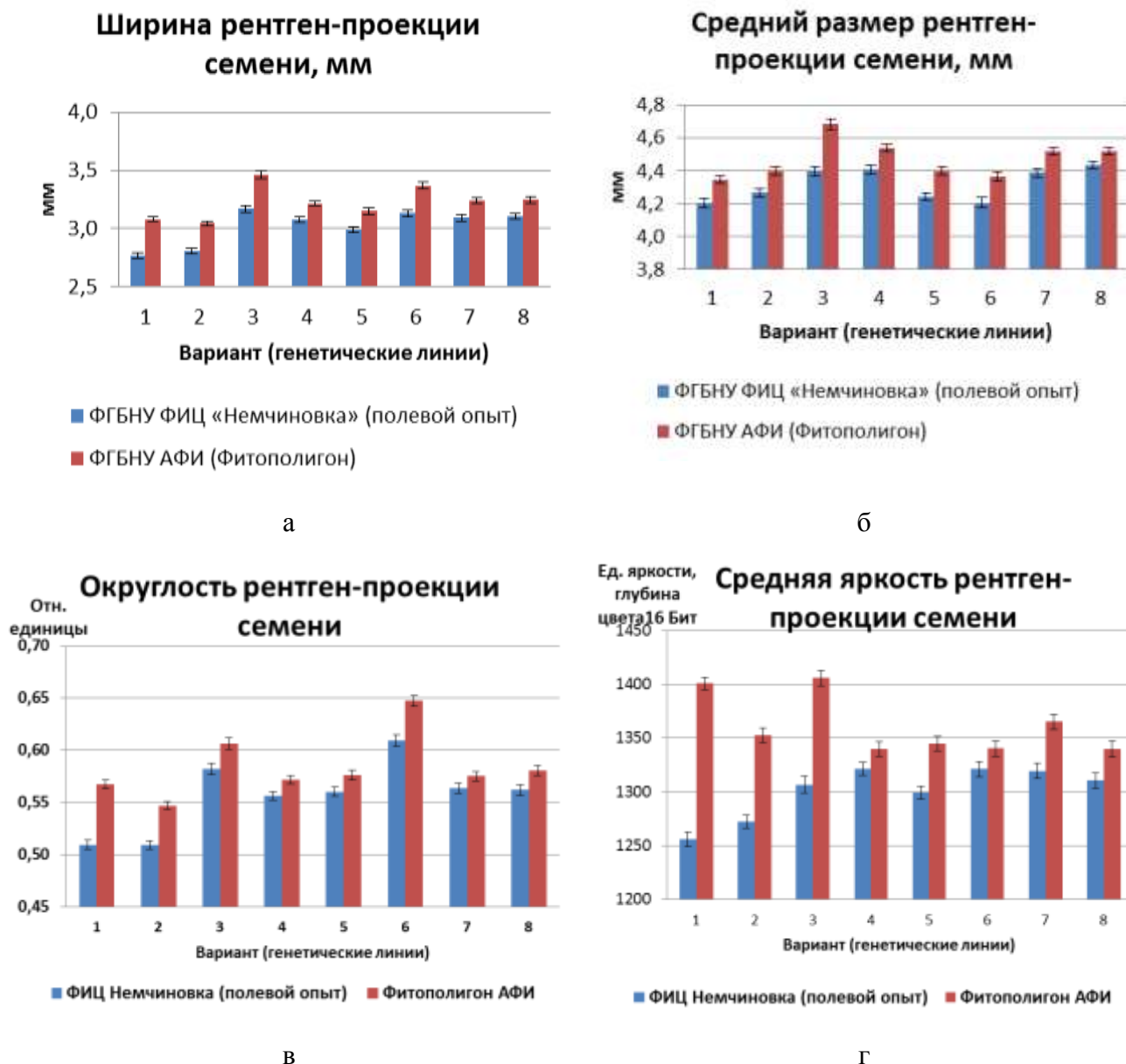


Рисунок 8. Характеристики цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы 8 генетических линий, полученных в полевых и контролируемых условиях: а – ширина рентген-проекции семени, мм; б – средний размер рентген-проекции семени, мм; в – округлость рентген-проекции семени, относительные единицы, г – средняя яркость рентген-проекции семени, единицы яркости (16 бит). Цифрами на диаграммах показаны генетические линии: 1 – Агата x ITMI29, 2 – Агата x ITMI47, 3 – Лиза x ITMI10, 4 - Злата, 5 - Радмира, 6 - Юбилейная 58, 7 - h2788 (Злата x Московская), 8 - h3021 (Биора x Злата)

Установлено, что семена, выращенные в контролируемых условиях (фитополигон ФГБНУ АФИ), характеризуются, по сравнению с семенами, выращенными в полевых условиях, более крупными размерами и более округлой формой. Показано, что более

высокие значения показателя «Средняя яркость» связаны с их большей толщиной, а также плотностью семени, что еще раз доказывает эффективность примененного нами подхода для оценки морфометрических и рентгеновских характеристик семян пшеницы *Triticum aestivum* L., полученных в различных агроэкологических условиях выращивания.

3.2.2.2. Автоматический анализ и классификация цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы, поврежденных клопом - вредная черепашка, с сопряженной оценкой их посевных качеств

С целью выявления возможности автоматического анализа и классификации цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы, поврежденных клопом – вредная черепашка было проведено экспериментальное исследование цифровых рентгеновских изображений семян озимой мягкой пшеницы, неповрежденных и поврежденных в различной степени клопом – вредная черепашка, и их сопоставление с дополнительными показателями, характеризующими посевные качества семян (длина зародышевого побега и корня). Классификация цифровых рентгеновских семян была выполнена с использованием линейной дискриминантной функции Фишера, реализованной в программной среде MATLAB.

Для сопоставления степени повреждения семян пшеницы, поврежденных клопом – черепашка с их ростовыми показателями, семена были пророщены и были выделены 3 условных класса по длине зародышевого побега: Класс А – хорошие (длина побега > 15 см), класс В – средние (длина побега от 6 до 15 см) и класс С – плохие (длина побега < 6 см).

На основе анализа данных цифровых рентгенографических изображений индивидуальных зерновок по комплексу параметров, было проведено сопоставление с показателями морфофизиологического состояния проростков, с учетом подразделения их на условные классы (рис. 9).

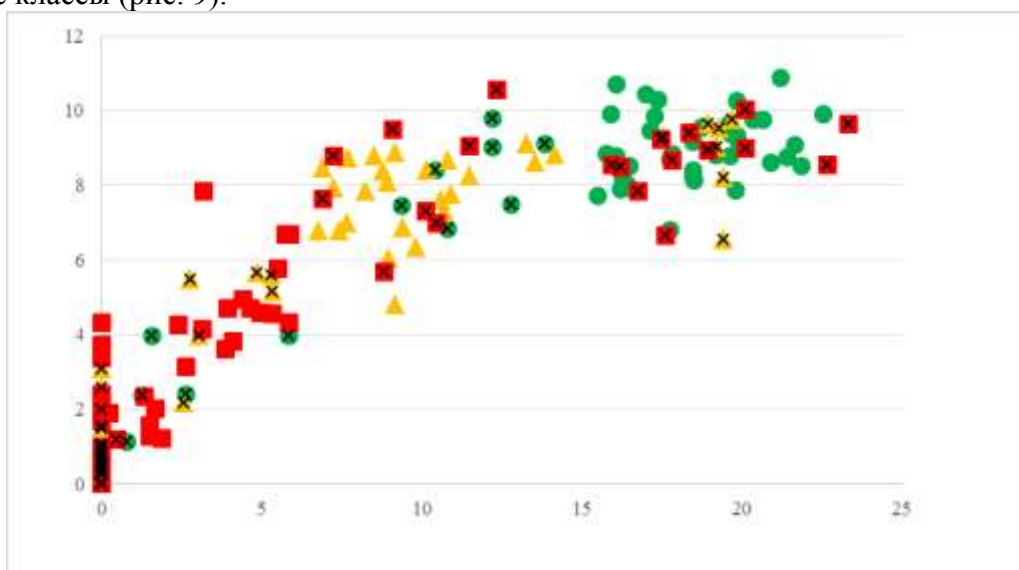


Рисунок 9. Сопоставление рентгенографических показателей с показателями морфофизиологического состояния проростков, с учетом подразделения их на условные классы: зеленые кружки – класс А – хорошие (длина побега > 15 см), желтые треугольники – класс В – средние (длина побега от 6 до 15 см), красные квадратики – класс С – плохие (длина побега < 6 см). Перечеркнутые значки – ошибки классификации. По оси абсцисс – длина ростка (см); по оси ординат – длина корня (см)

Рентгенографические показатели индивидуальных семян были сопоставлены с показателями морфофизиологического состояния проростков, с учетом подразделения их на условные классы: класс А – хорошие (длина побега > 15 см), класс В – средние (длина побега от 6 до 15 см), класс С – плохие (длина побега < 6 см).

Результаты классификации семян по каждому отдельному классу представлены в таблице 3.

Результаты классификации семян пшеницы по рентгеновским показателям

Классификация по данным анализа цифровых рентгеновских изображений	Классификация по ростовым показателям, количество объектов классификации (семян), шт.			Точность классификации, %	Погрешность классификации, %
	Класс А	Класс В	Класс С		
Класс А	38	7	27	52,78	47,22
Класс В	3	24	38	34,78	65,22
Класс С	12	8	88	81,48	18,52

Общая погрешность классификации, по данным анализа цифровых рентгеновских изображений, составила 38,09%.

3.2.2.3. Анализ трещиноватости семян пшеницы с сопряженной оценкой их посевных качеств

С целью изучения влияния скрытой трещиноватости на посевные качества семян (длина ростка, процент сильных проростков) был выполнен рентгенографический анализ шести образцов семян пшеницы, полученных в производственных посевах в Краснодарском крае. Установлено (рис. 10), что увеличение числа трещин, которые выявляются на рентген-проекции зерновки, снижает посевные качества семян.

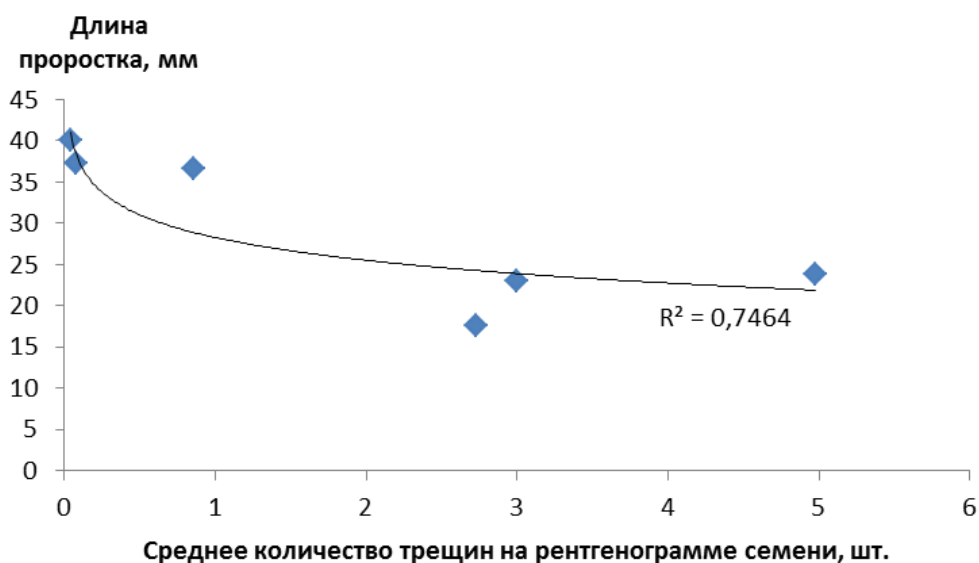


Рисунок 10. Показатели посевных качеств у шести образцов семян из производственных посевов пшеницы: длина ростка, мм, в зависимости от числа трещин, выявляемых на рентген-проекции зерновки

При среднем количестве трещин менее одной штуки на семя средняя длина ростка на 7-е сутки составляла 35-40 мм. При среднем количестве трещин более двух штук на одно семя средняя длина ростка снижалась до 25 мм и более. Аналогичным образом, с увеличением количества трещин снижался и процент сильных проростков. Мы связываем это с ростом вероятности проникновения грибной и бактериальной инфекции в зерновку при увеличении количества трещин в эндосперме. Кроме того, наличие трещин вблизи зародыша

нарушает поступление в него питательных веществ из эндосперма. Такое семя может оказаться либо невсхожим, либо иметь заниженные ростовые показатели.

3.2.2.4. Изучение связи морфометрических показателей и скрытой дефектности семян пшеницы с их посевными качествами

С целью проверки эффективности рентгенографического метода исследования на примере семян яровой мягкой пшеницы для оценки хозяйственной пригодности семенного материала изучены связи их посевных качеств с морфометрическими показателями и скрытой дефектностью.

В результате проведенных экспериментов выявлены корреляции слабой степени между длиной ростка и следующими показателями: длина семени ($r=0,29$, $r=0,29$); удлиненность ($r=0,30$, $r=0,37$); скрытое прорастание ($r=-0,29$, $r=-0,34$), суммарное количество дефектов ($r=-0,31$, $r=-0,38$) (Табл. 3).

Таблица 3 иллюстрирует, что наибольшее влияние на посевные качества оказывает форма семян (показатель округлость), а также суммарное количество скрытых дефектов из числа выявленных и идентифицированных: поврежденность грызущими насекомыми, поврежденность сосущими вредителями, поврежденность фитопатогенными грибами, внутреннее прорастание и скрытая трещиноватость.

Таблица 3

Количественная мера достоверной связи длины ростка с морфометрическими признаками и признаками скрытой дефектности качественная характеристика изученных связей

Признаки	r^2 коэффициент детерминации	p значимость	Влияние признака на длину ростка, %	Качественная характеристика силы связи*
R-Длина, мм	0,0840	0,041	8,4	очень слабая
R-Округлость, отн.ед.	0,2249	0,001	22,49	слабая
R-Удлиненность, отн.ед.	0,1344	0,009	13,44	слабая
Скрытое прорастание	0,1129	0,017	11,29	слабая
Суммарное количество дефектов	0,1412	0,007	14,12	слабая

*Примечание * - качественная оценка дана по шкале Чеддока*

3.2.2.5. Изучение рентгенографических характеристик семян сахарной кукурузы, пораженных бактериозом с сопряженной оценкой посевных качеств

Для того чтобы оценить пораженные бактериозом семена кукурузы были изучены скрытые дефекты биогенного происхождения методом микрофокусной рентгенографии, в сочетании с визуальным и автоматическим анализом изображений. Результаты анализа цифровых рентгеновских изображений семян кукурузы, представлены на рисунке 11.



А

б

Рисунок 11. Результаты визуального (а) и автоматизированного (б) анализа цифровых рентгеновских изображений семян кукурузы

Образец Краснодарский 194 МВ, выращенный в Алтайском Крае, характеризовался максимальными показателями дефектности - значение показателей «Аномалия формы ростка» $2,20 \pm 0,11$ баллов, «Аномалия формы корешка» $2,09 \pm 0,11$ балла, «Эндосперм. Потемнение» $2,94 \pm 0,02$ балла, «Средняя яркость рентген-проекции семени» $80,12 \pm 1,70$ единиц яркости, по сравнению с тремя другим образцами: РОСС 272 АМВ (Волгоградская обл.) $1,35 \pm 0,08$; $1,50 \pm 0,08$; $2,21 \pm 0,07$ балла, $94,18 \pm 2,02$; единиц яркости; РОСС 272 АМВ (Саратовская область) $0,86 \pm 0,10$, $0,87 \pm 0,08$, $1,79 \pm 0,06$ балла, $88,66 \pm 1,71$ единиц яркости; Лидер 165 F₁ (Астраханская область) $0,82 \pm 0,07$, $1,16 \pm 0,07$, $2,06 \pm 0,08$ балла, $97,48 \pm 1,55$ единиц яркости, соответственно.

Образец Краснодарский 194 МВ характеризовался при этом худшими посевными качествами и максимальной обсемененностью (см. раздел 3.1.1.2.2).

Таким образом, мы полагаем, что рентгенографический метод может быть использован для первичного скрининга скрытых дефектов семян не только грибной, но и бактериальной этиологии.

3.2.3. Изучение скрытой дефектности семян овощных культур

Ввиду сложности дифференцировки отдельных структур и органов семян капустных культур и шпината огородного, в частности, нами для их оценки был применен визуальный и автоматический анализ цифровых рентгеновских изображений.

3.2.3.1. Изучение скрытой дефектности семян капустных культур (*Brassica spp.*), с сопряженной оценкой посевных качеств

С целью изучения возможности рентгенографического метода выявлять скрытые дефекты, коррелирующие с посевными качествами, в семенах капустных культур, а также оценки сравнительной эффективности рентгенографического метода с оптическим (цифровое сканирование в сочетании с компьютерным анализом изображений) было проведено исследование 18 образцов капустных культур.

Существенность различий яркостных характеристик рентгеновских изображений семян капустных культур отмечена по параметру Средняя яркость у 8 пар образцов из 9 (один сорт, разные годы репродукции, разные регионы выращивания семян), по параметру СКО яркости, у 7 пар образцов из 9.

Существенность различий качественных признаков рентгеновских изображений семян капустных культур, характеризующих их дефектность отмечена по параметрам «Сумма дефектов», «индекс е», «индекс d» и «индекс u» у 5 пар образцов из 9.

Существенность различий посевных качеств семян капустных культур отмечена по параметру Баллы всхожести у всех 9 пар образцов, по параметру Грунтовая всхожесть – у 7

пар образцов из 9. При расчете баллов всхожести была применена следующая методика: 3 балла – нормальный проросток, 1 балл – дефектный проросток, 0 баллов – семя не проросло.

Таким образом, рентгенографические показатели скрытой дефектности семян могут являться важным признаком, характеризующим особенности фенотипа семян, сформировавшихся как в условиях разных эколого-географических зон их созревания, так и в условиях их получения в разные годы репродукции.

Регрессионная модель, отражающая связь показателя «Средняя сумма дефектов» с посевными качествами (грунтовая всхожесть) семян капустных культур представлена на рисунке 12.

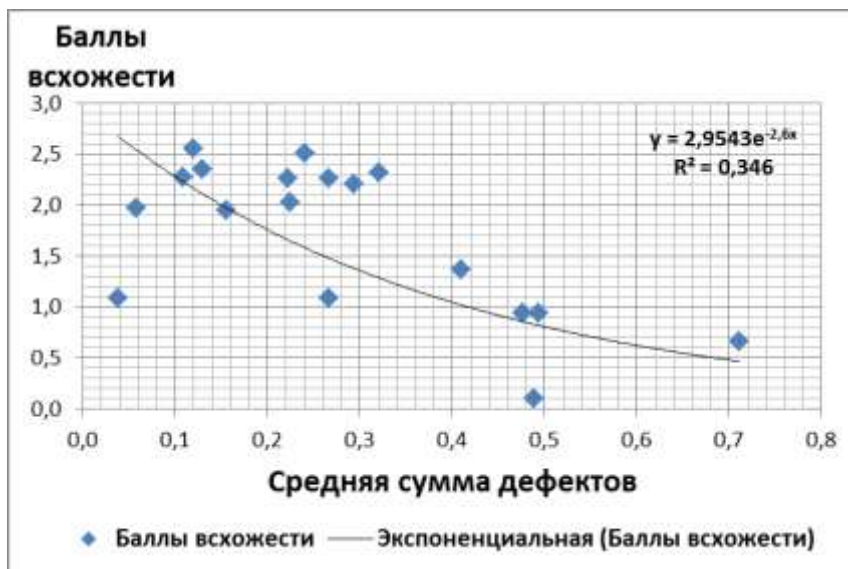


Рисунок 12. Регрессионная модель, отражающая связь показателя «Средняя сумма дефектов» с посевными качествами (грунтовая всхожесть) семян капустных культур

Как видно из представленного графика, с увеличением значений показателя «средняя сумма дефектов» грунтовая всхожесть падает, зависимость носит экспоненциальный характер.

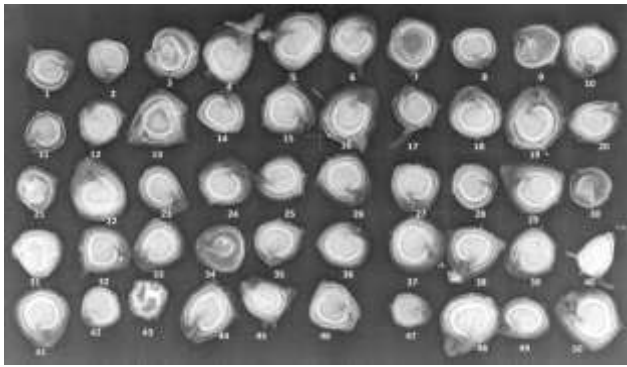
Сравнительный анализ эффективности двух методов: рентгенографического и оптического (цифровое сканирование в сочетании с компьютерным анализом изображений) (рис. 6) выявил, что максимальный процент значимых корреляций (>65%) при сопоставлении показателей, полученных инструментальными методами, и результатов проращивания семян имеют такие индексы, как средняя сумма дефектов, признак “d” и средняя яркость цифровых рентгеновских изображений.

Таким образом, рентгенографический метод оценки качества семян оказался, в случае капустных культур, более эффективным, по сравнению с оптическим.

3.2.3.2. Изучение скрытой дефектности семян шпината огородного (*Spinacia oleracea* L.) с сопряженной оценкой посевных качеств

С целью проверки эффективности рентгенографического метода для экспресс-оценки качества семенного материала шпината огородного, был выполнен визуальный и автоматический анализ цифровых рентгеновских изображений семян.

Автоматический анализ цифровых рентгеновских изображений семян шпината сорта Стоик, в сочетании с цифровой морфометрией проростков (рис. 13), выявил следующие закономерности. Семена №7, №9, №30, №34 характеризовались минимальными значениями средней яркости в диапазоне от 90 до 113 единиц яркости, и минимальным среднеквадратическим отклонением яркости в диапазоне от 40 до 49 единиц яркости. Семена №1, №3, №13 и №21 характеризовались пониженными значениями среднеквадратического отклонения яркости в диапазоне от 49 до 55 единиц яркости.



а



б

Рисунок 13. Рентгеновский снимок семян шпината сорта Стоик (а), цифровая фотография проростков семян шпината сорта Стоик (б).

Корреляционный анализ яркостных параметров цифровых рентгеновских изображений семян шпината сорта Стоик с 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 длины ростка составил $r=0,51$ ($p<0,01$).

Таким образом, рентгенографический метод исследования семян шпината огородного показал свою эффективность при выявлении невыполненности и недовыполненности семян. При этом использование автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений в данном случае наиболее перспективно, так как анализируются яркостные параметры всей проекции семени, что достаточно нетрудоёмко и оперативно.

3.2.4. Изучение скрытой дефектности семян плодовых и орехоплодных культур

Для экспресс-оценки посевных качеств семян плодовых и орехоплодных культур перспективным представляется рентгенографический метод, так как семена этих культур имеют плотную оболочку, не несущую полезной информации о дефектности их внутренних структур. Кроме того, семена плодовых культур имеют крупный зародыш и эндосперм, что создает предпосылку для дифференцированного анализа изображений отдельных структур и органов таких семян.

3.2.4.1. Формирование «параметрического паспорта» индивидуальных семян яблони домашней (*Malus domestica* Borkh.) на основе визуального и автоматического дифференцированного рентгенографического анализа отдельных структур и органов семени

С целью установления возможности экспресс-оценки посевных качеств семян яблони было проведено сравнительное исследование двух сортообразцов яблони домашней (*Malus domestica* Borkh.) методом микрофокусной рентгенографии.

На основе использования разработанного нами способа дифференцированного автоматизированного анализа цифровых рентгеновских изображений, применимого не только к семенам древесных лесных пород, но и к семенам плодовых культур, в частности, яблони, был сформирован «параметрический паспорт» семян двух сортов яблони.

Паспорт включал в себя следующие параметры: а) Контур эндосперма, Площадь, мм², Средняя яркость, единицы яркости, б) Контур зародышевого корешка, те же параметры, что и для эндосперма. Дополнительно способом визуальной расшифровки учитывались следующие скрытые дефекты: невыполненность и трещиноватость эндосперма.

Сравнение данных «параметрических паспортов» семян сортов яблони Антоновка и Китайка Керн представлены в таблице 4.

Результаты сравнительного анализа рентгенографических характеристик двух сортов яблони показали, что семена сортообразца Китайка Керн имеют большую площадь эндосперма и большую площадь проекции зародышевого корешка, по сравнению с сортообразцом Антоновка.

Сравнение данных «параметрических паспортов» семян сортов яблони Антоновка и Китайка Керн

Показатель, единицы измерения	Антоновка	Китайка Керн
Площадь эндосперма, мм ²	17,7±0,39	23,9±0,46 *
Средняя яркость эндосперма, ед. яркости	94,4±1,78	91,5±1,38
Невыполненность 1 - есть, 0 - нет	0,01±0,01	0,01±0,01
Трещиноватость 1 - есть, 0 - нет	0,05±0,03	0,01±0,01 *
Площадь зародышевого корешка, мм ²	0,81±0,05	1,10±0,05 *
Средняя яркость зародышевого корешка, Ед. яркости	53,8±2,1	51,4±1,4
Соотношение площадей зародышевый корешок/эндосперм, относит. ед.	0,046±0,003	0,047±0,003
Соотношение яркостей (зародышевый корешок/эндосперм, относит. ед.	0,562±0,023	0,559±0,016

Примечание *) Различия существенны при $p < 0,05$

Таким образом, есть все основания полагать, что семена сортообразца Китайка Керн имеют несколько лучшие посевные качества, по сравнению с сортообразцом Антоновка.

3.2.4.2. Интегральная оценка параметров цифровых рентгеновских изображений плодов миндаля обыкновенного (*Amygdalus communis* L.) для контроля качества семенного материала

С целью установления возможности экспресс-оценки качества семян миндаля обыкновенного было проведено рентгенографическое исследование их структурной целостности.

Предложен алгоритм обработки параметров цифровых рентгеновских изображений семян миндаля обыкновенного, который может служить эффективным инструментом товароведческой экспертизы семенного материала этой орехоплодной культуры. Алгоритм включает этапы интегральной оценки цифровых рентгенографических изображений образцов семян (выделение области интереса, пороговое выделение рентген-образа семени по яркости, расчет рентгенографических параметров) и фазовый анализ цифровых рентгенографических изображений (автоматическое выделение областей, соответствующих пустотам и ядру семени).

В результате ранжирования установлено, что и размерные (относительная площадь ядра), и оптические (средняя яркость проекции) рентгенографические параметры семян соответствуют их массе.

3.2.5. Изучение скрытой дефектности семян древесных лесных пород

Анализ цифровых рентгеновских изображений семян древесных лесных пород выполнялся с использованием следующих подходов:

А) Визуальный анализ цифровых рентгеновских изображений, выполняемый оператором-рентгенологом.

Б) Интегральный автоматический анализ – анализируется вся площадь проекции семени, при этом за расчет принимаются яркостные характеристики цифровых рентгеновских изображений, выраженные в баллах, либо в единицах яркости.

В) Дифференцированный автоматический анализ – анализируются геометрические и яркостные характеристики отдельных структур и органов семени, при этом выделение этих структур осуществляется интерактивно.

Такой комплексный подход позволяет обеспечить:

- визуальную дешифровку рентгеновских снимков семян для выявления скрытых дефектов по типам;
- оперативно проанализировать полнозернистость семян;
- оценить гармоничность развития отдельных структур и органов семени, прежде всего, зародыша.

3.2.5.1. Исследование качества семян ели европейской (*Picea abies* (L.) H.Karst.) методом микрофокусной рентгенографии с сопряженной оценкой посевных качеств

С целью выявления и идентификации невыполненных семян ели европейской (*Picea abies* (L.) H.Karst.) было проведено рентгенографическое исследование двух образцов, место сбора - спелые насаждения Ленинградской области естественного происхождения. Для проведения анализа семена ели обыкновенной были разделены на группы: непроросшие семена («группа 0») и семена, проросшие в течение 5-9 суток («группа 1»). Время прорастания фиксировалось для каждого семени в отдельности.

Семена, исследованные методом микрофокусной рентгенографии, обнаружили следующие различия: в обоих образцах (№3 и №35) рентгенограммы невыполненных семян, которые в дальнейшем не проросли, характеризовались меньшей яркостью, в отличие от семян, впоследствии проросших. Это подтверждается данными статистического анализа: в образце 3 яркость рентгенограмм (баллы) составила для группы «0» медиана – 1, для группы «1» медиана – 2, сравнение групп 0 и 1 по показателю «балл яркости» на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=0,00$; $p<0,05$). В образце 35 яркость рентгенограмм (баллы) составила для группы «0» медиана – 1, для группы «1» медиана – 2. Сравнение групп 0 и 1 по показателю «балл яркости» на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=40,50$; $p<0,05$).

В образце 3 длина корня семян (см) составила: «группа 0» – медиана 0,0; «группа 1» – 4,3. Сравнение групп 0 и 1 по показателю «длина корня» на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=0,00$; $p<0,05$). В образце 35 длина корня семян (см) составила для «группы 0» – медиана 0,0; для «группы 1» – 5,0. Сравнение групп 0 и 1 по показателю «длина корня» на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=0,00$; $p<0,05$).

Таким образом, метод микрофокусной рентгенографии может служить эффективным инструментом для выявления невыполненности семян ели европейской.

3.2.5.2. Исследование полнозернистости семян плосковеточника восточного (*Platyclusus orientalis* (L.) Franco) и туи сычуанской (*Thuja sutchuenensis* Franch.) методом микрофокусной рентгенографии с сопряженной оценкой посевных качеств

Аналогично предыдущему исследованию (раздел 3.1.2.5.1.), с целью проверки эффективности рентгенографического метода для выявления невыполненности семян других древесных лесных пород, мы выполнили исследование семян плосковеточника восточного и туи сычуанской. Семена плосковеточника восточного и туи сычуанской сравнительно мелкие, поэтому учитывали только интегральные параметры яркости рентген-проекций семян, оцениваемые с помощью программы «ВидеоТест-Морфология».

На основе анализа связи характеристик цифровых рентгеновских изображений семян исследованных видов древесных растений и посевных качеств установлено, что показатель средней яркости рентгенограмм имеет среднюю степень корреляции с всхожестью: $r=0,67$ (плюсочеточник восточный) и $r=0,60$ (туя сычуанская).

Таким образом, в результате проведенного эксперимента было установлено, что метод микрофокусной рентгенографии применим для экспресс-оценки невыполненности семян, являющейся одной из основных причин их невосхожести, у плюсочеточника восточного и туи сычуанской.

3.2.5.3. Исследование качества семян кедрового стланика *Pinus pumila* (Pall.) Regel методом микрофокусной рентгенографии в сочетании с дифференцированным анализом цифровых рентгеновских изображений и сопряженной оценкой посевных качеств

С целью проверки эффективности рентгенографического метода для экспресс-оценки качества семян кедрового стланика *Pinus pumila* (Pall.) Regel мы выполнили исследование четырех образцов семян, полученных в разных эколого-географических зонах. Семена кедрового стланика сравнительно крупные, поэтому было возможно проведение дифференцированного анализа рентгеновских изображений (с интерактивным выделением отдельных структур и органов семени).

В результате дифференцированного анализа характеристик цифровых рентгеновских изображений семян кедрового стланика и посевных качеств установлено, что образец семян с участка 71 Ботанического сада Петра Великого характеризовался максимальной площадью зародыша: $4,19 \pm 0,49$ мм², максимальным Отношением площадей зародыша/ложе: $60,95 \pm 7,45\%$, максимальной Площадью эндосперма $23,93 \pm 1,24$ мм², Максимальной относительной площадью зародыша: $9,45 \pm 1,17\%$. Этот же образец характеризовался максимальной абсолютной и почвенной всхожестью, по сравнению с другими образцами. Несмотря на то, что образец из Забайкалья характеризовался максимальными значениями таких параметров, как площадь зародыша ($6,05 \pm 0,06$ мм²), максимальная площадь эндосперма ($33,27 \pm 2,95$ мм²) и максимальное Отношение средней яркости зародыша к средней яркости проекции семени ($1,44 \pm 0,09$, Относительные единицы), абсолютная всхожесть и почвенная всхожесть образца несколько ниже, чем у семян из Ботанического сада Петра Великого. По всей вероятности, семена кедрового стланика из Забайкалья были физиологически еще не созревшими. (Табл. 17).

Корреляционный анализ расчетных геометрических и яркостных характеристик отдельных структур и органов семян и всхожести выявил следующие результаты: существует корреляция между фактором эллипса зародыша и всхожестью семян ($r=0,13$).

Полученные результаты позволяют сделать заключение об эффективности рентгенографического метода, в сочетании с дифференцированным анализом цифровых рентгеновских изображений семян кедрового стланика для оценки степени их биологической полноценности, обусловленной, в данном случае, эколого-географическими зонами их получения.

3.2.5.4. Исследование качества семян эвкоммии вязолистной (*Eucommia ulmoides* Oliv.) методом микрофокусной рентгенографии в сочетании с дифференцированным анализом цифровых рентгеновских изображений и сопряженной оценкой посевных качеств

С целью изучения эффективности рентгенографического метода для исследования скрытой дефектности семян не только хвойных пород, но и двудольных древесных лесных растений, было проведено сравнительное исследование двух образцов семян эвкоммии вязолистной (*Eucommia ulmoides* Oliv.), полученных в разных эколого-географических зонах. Образец 1 был собран в Краснодарском Крае, г. Кропоткин, Кавказское лесничество, Первомайское участковое лесничество, квартал 8Д, выдел 8. Образец 2 был собран в провинции Лайтау, Республика Вьетнам, описание образцов приведено в Главе II. Цифровые рентгеновские изображения семян эвкоммии вязолистной представлены на рисунке 14.

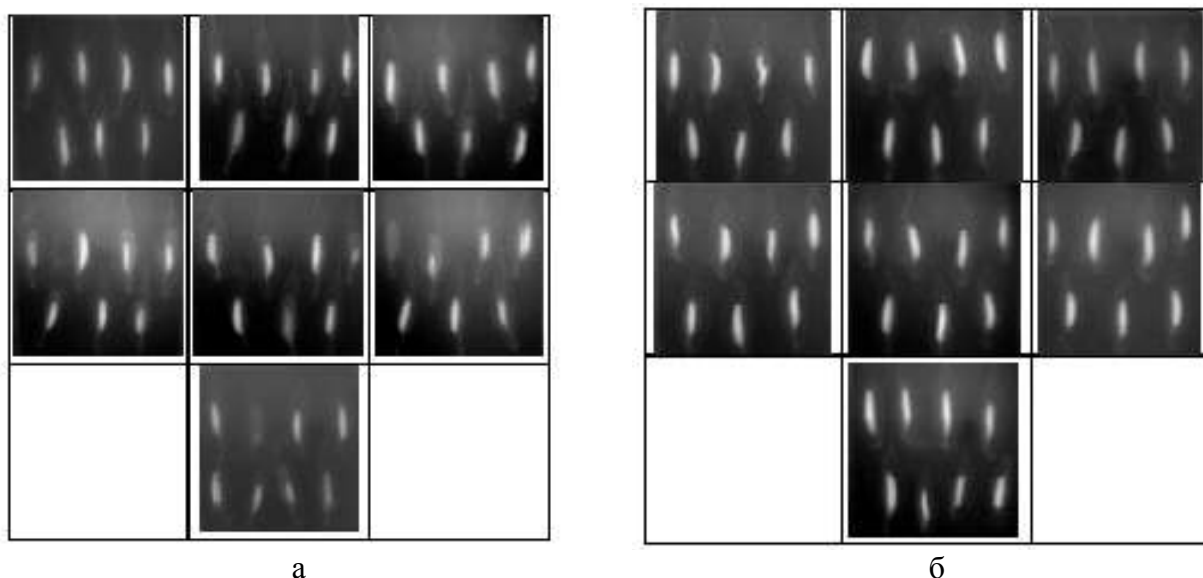


Рисунок 14. Цифровые рентгеновские изображения семян эвкоммии вязолистной: а – происхождение г. Крпоткин, б – происхождение Вьетнам

Визуальный анализ рентгенограмм образцов № 1 и № 2 семян эвкоммии вязолистной выявил в пробах образцов семян наличие скрытых дефектов.

Рентгенографическое исследование образцов семян эвкоммии вязолистной позволило идентифицировать следующие дефекты: образец №1 (г. Крпоткин) – невыполненность 4% (семя № 36 и 44), невыполненность 18% (Семя № 10, 20, 24, 25, 32, 34, 37, 49), трещиноватость 2% (семя № 47), аномалия формы семядолей 4% (семя № 21, 22); образец №2 (Вьетнам) – трещиноватость 2% (семя № 34), аномалия формы семядолей 6% (Семя № 2, 3, 10). Пораженности грибами и повреждений вредителями не выявлено.

Примеры выявленных скрытых дефектов семян эвкоммии вязолистной представлены на рисунке 15.

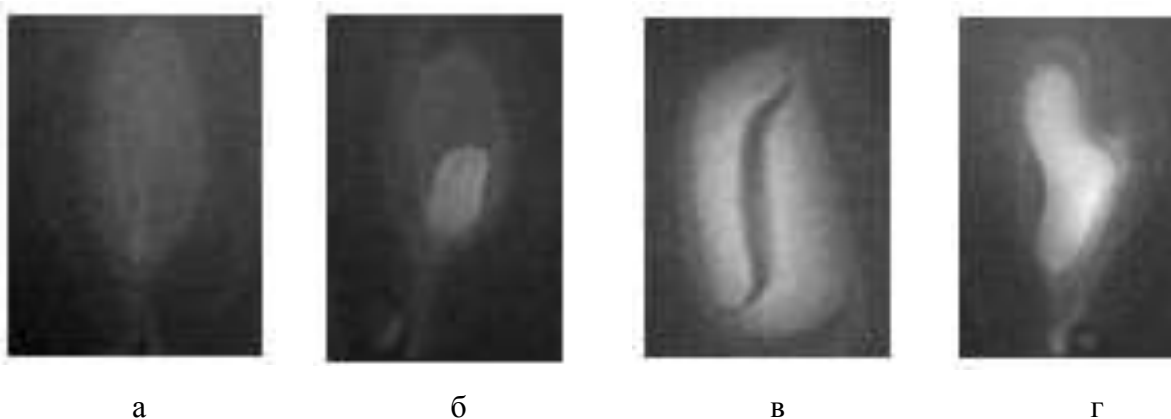


Рисунок 15. Примеры выявленных скрытых дефектов семян эвкоммии вязолистной: а – невыполненность, б – невыполненность, в – трещиноватость, г – аномалия формы семядолей

Невыполненность характеризуется затемнением всей рентген-проекции семени, невыполненность – затемнением части рентген-проекции семени, трещиноватость – наличием темной полосы или полос на рентген-проекции семени, аномалия формы семядолей – их нерегулярной формой.

Результаты автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений серий №1 и №2 семян эвкоммии вязолистной представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений образцов №1 и №2 семян эвкоммии вязолистной

Показатель	Образец № 1 (г. Кропоткин)	Образец № 2 (Вьетнам)
Отношение площадей семядоли / проекция семени, %	50,82±4,17	68,50±1,94
Отношение яркости семядоли / проекция семени, отн. ед.	1,20±0,07	1,18±0,02
Площадь семядолей, мм ²	28,83±2,36	34,75±1,42
Площадь проекции семени, мм ²	57,52±3,10	50,97±1,99
Фактор круга семядолей, отн. ед.	0,545±0,036	0,531±0,012
Округлость семядолей, отн. ед.	0,272±0,020	0,260±0,008
Удлиненность семядолей, отн. ед.	3,543±0,251	3,893±0,093
Средняя яркость семядолей, ед. яркости	140,109±8,936	144,000±7,510
Интегральная яркость семядолей, ед. яркости	2147017,1±223158,4	2584221,8±175075,0

Автоматический анализ цифровых рентгенографических изображений выявил большую относительную, абсолютную площадь семядолей, интегральную яркость семядолей у образца № 2 (Вьетнам), по сравнению с серией № 1 (г. Кропоткин). Таким образом, по наличию дефектов можно сделать заключение, что семена образца № 2 Вьетнам должны характеризоваться лучшими посевными качествами, по сравнению с серией № 1 г. Кропоткин.

Различия в биометрических параметрах сеянцев эвкоммии разного географического происхождения оказались не достоверны. Однако всхожесть семян образца №1 г. Кропоткин значительно выше (18%), чем образца №2 Вьетнам (6%). Это можно объяснить различной степенью естественной подготовленности семян к посеву.

Проведенная работа позволяет сделать вывод о том, что метод микрофокусной рентгенографии в сочетании с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений может быть эффективным инструментом для быстрого и неразрушающего определения качества семян эвкоммии вязолистной.

3.3. Изучение скрытой дефектности семян на основе методики электрографии (газоразрядной визуализации)

Задача оценки состояния покоящихся семян, решаемая с помощью метода электрофотографии (газоразрядной визуализации), является весьма актуальной для семеноводства, так как ее решение позволит получить дополнительные электрофизические характеристики, 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 семеноведении пока крайне немногочисленно, исследования в большинстве случаев носят пилотный характер.

3.3.1. Усовершенствование методики электрофотографии (газоразрядной визуализации) семян в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений

Для выполнения исследований неоднородности и скрытой дефектности семенного материала методика на основе электрофотографии анализа цифровых газоразрядных изображений была усовершенствована.

В методику предложены следующие приспособительные, для исследования семян, элементы:

1. Для получения репрезентативных газоразрядных снимков был разработан и изготовлен набор непрозрачных диэлектрических пластин (дисков разной толщины с отверстиями разного диаметра), обеспечивающими возможность работы с семенами различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных пород. При этом съемка каждого семени проводится индивидуально. Такой подход позволяет не только получить набор характеристик газоразрядного свечения для каждого исследуемого объекта, но и провести сопоставление этих данных с результатами исследований, полученных другими методами (микрофокусная рентгенография, люминесцентная микроскопия и др.)

2. Подобраны режимы импульсного напряжения (В) для исследуемых видов семян. Поскольку размер объектов исследования (семян), в зависимости от культуры, сильно варьирует, и составляет, в среднем, от 0,5 мм до 12-15 мм, толщина (высота) семени составляет от нескольких десятых миллиметра до 5-8 мм. Вследствие этого, подбор режимов инициации газоразрядного свечения (импульсного напряжения, В), проводится индивидуально для каждой культуры.

3. В ходе выполнения исследований нами было определено оптимальное количество снимков (5 штук) для съемки одного семени. Значения показателей, полученные при обработке цифровых газоразрядных изображений, усредняются.

Таким образом, предложенные в методику приспособительные элементы позволили проводить индивидуальную съемку индивидуальных семян, что очень важно для сопоставления полученных методом электрофотографии данных, с данными полученных другими методами (оптическим, рентгеновским), а также с результатами сопряженной оценки посевных качеств (энергия прорастания, всхожесть) и дополнительных показателей (длина корня и ростка). Кроме того, подобраны оптимальные режимы импульсного напряжения (В) для каждого исследуемого вида семян растений, и оптимальный алгоритм программной обработки цифровых газоразрядных изображений семян.

3.3.2. Изучение скрытой дефектности семян зерновых культур на основе методики электрофотографии (газоразрядной визуализации)

Семена зерновых культур могут иметь дефекты биогенного происхождения, а именно – поврежденность фитопатогенными микроорганизмами и поврежденность сосущими вредителями. Наличие дефектов этих типов приводит к нарушению как внешних признаков семени, так и его внутренней структуры. Поэтому метод электрофотографии, как интегральный электрофизический метод оценки состояния семян имеет, в данном случае, определенную перспективу, особенно, в сочетании с рентгенографическим методом, который нами предлагается использовать в качестве верифицирующего, поскольку он показывает неоднородность и дефектность внутренней структуры семян.

3.3.2.1. Автоматический анализ и классификация цифровых газоразрядных изображений семян пшеницы, поврежденных клопом - вредная черепашка, с сопряженной оценкой их посевных качеств

С целью изучения возможности использования метода электрофотографии для выявления различий неповрежденных и дефектных семян зерновых культур, на примере озимой мягкой пшеницы проведено экспериментальное исследование по анализу цифровых газоразрядных изображений семян этой культуры, неповрежденных и поврежденных в различной степени клопом - вредная черепашка, и их сопоставлению с дополнительными ростовыми показателями (длина зародышевого побега и корня), характеризующими посевные качества изученных семян. Классификация цифровых газоразрядных изображений

семян выполнена с использованием линейной дискриминантной функции Фишера, реализованной в программной среде MATLAB.

Неповрежденная зерновка пшеницы имеет меньший размер свечения, по сравнению с зерновкой, поврежденной клопом – черепашкой.

Аналогичный, по отношению к данным, полученным методом микрофокусной рентгенографии, анализ был выполнен на основе данных, полученных по результатам обработки газоразрядных изображений зерновок (рис. 16).

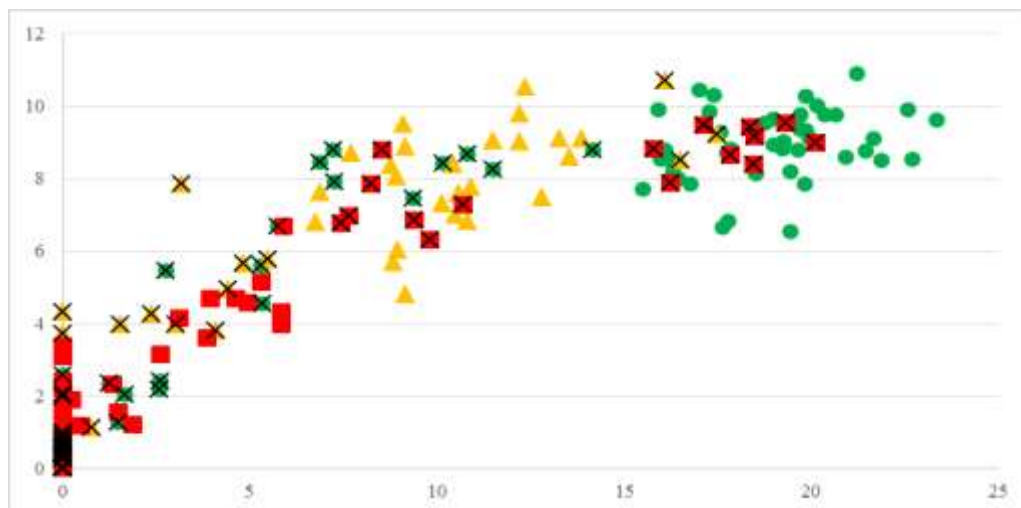


Рисунок 16. Сопоставление показателей газоразрядного свечения с показателями морфофизиологического состояния проростков, с учетом подразделения их на условные классы: зеленые кружки – класс А – хорошие (длина побега > 15 см), желтые треугольники – класс В – средние (длина побега от 6 до 15 см), красные кружки – класс С – плохие (длина побега < 6 см). Перечеркнутые значки – ошибки классификации. По оси абсцисс – длина ростка (см); по оси ординат – длина корня (см)

Газоразрядные показатели индивидуальных семян были сопоставлены с показателями морфофизиологического состояния проростков, с учетом подразделения их на условные классы: класс А – хорошие (длина побега > 15 см), класс В – средние (длина побега от 6 до 15 см), класс С – плохие (длина побега < 6 см).

Результаты классификации семян по каждому отдельному классу представлены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты классификации семян пшеницы по газоразрядным показателям

Классификация по данным анализа газоразрядных изображений	Классификация по ростовым показателям количество объектов классификации (семян), шт.			Точность классификации, %	Погрешность классификации, %
	Класс А	Класс В	Класс С		
Класс А	45	8	47	45,00	55,00
Класс В	3	24	29	42,86	57,14
Класс С	9	7	77	82,80	17,20

Семена пшеницы, относящиеся к классу А удалось классифицировать с точностью 45%, класса В – 43%, класса С – 83%. То есть, с помощью метода электрографии оказалось возможным классифицировать сильно поврежденные клопом вредная черепашка семена. Общая погрешность классификации, по данным анализа цифровых газоразрядных изображений составила 36,40%. Эффективность метода электрофотографии для выявления

зерен пшеницы, поврежденных клопом – вредная черепашка, оказалась сопоставима с рентгеновским методом (раздел 1.3.2.2.2.).

3.3.2.2. Изучение газоразрядных характеристик семян сахарной кукурузы (*Zea mays* L.), пораженных бактериозом с сопряженной оценкой посевных качеств

С целью изучения возможности использования метода электрофотографии для выявления различий неповрежденных и дефектных семян (повреждение фитопатогенной микробиотой) сахарной кукурузы (*Zea mays* L.) проведена сравнительная оценка газоразрядных показателей и всхожести изученных семян, как интегральных показателей, играющих важную роль для оценки биологической полноценности семян этого вида растений. Установлено, что образец семян сахарной кукурузы гибрида Краснодарский 194 МВ характеризовался более низкими значениями показателя «средняя интенсивность» газоразрядных изображений, а также «средняя яркость» цифровых рентгеновских изображений, по сравнению с тремя другими образцами семян.

Результаты сравнительного анализа цифровых газоразрядных изображений образцов семян кукурузы представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты сравнительного анализа характеристик цифровых газоразрядных изображений образцов семян кукурузы

Наименование параметра, единицы измерения	Наименование образца			
	РОСС 272 АМВ (В)	Краснодарский 194 МВ	Лидер 165F ₁	РОСС 272 АМВ (С)
Площадь, пиксели	3434,33±131,45 **	2607,41±136,49	3813,08±127,43 **	3516,49±147,17 **
Средняя интенсивность, единицы яркости	64,96±2,32 **	57,18±2,51	67,24±2,27 **	68,47±2,53 **
Энтропия, относительные единицы	1,77±0,09	1,66±0,09	1,87±0,07 **	1,80±0,08 *
Фрактальность, относительные единицы	1,72±0,01 **	1,64±0,02	1,71±0,01 **	1,73±0,01 **
Суммарная интенсивность, относительные единицы	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 МВ.

Обработка данных анализа цифровых газоразрядных изображений кукурузы показала, что гибрид Краснодарский 194 МВ (Алтайский Край), 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 среднеквадратичное отклонение фрактальности и нормализованное среднеквадратичное отклонение радиуса изолинии.

Корреляционный анализ Спирмана выявил следующие закономерности взаимосвязи характеристик газоразрядного свечения семян кукурузы, некоторых рентгеновских характеристик и посевных качеств. Была обнаружена средняя, обратная корреляция ряда характеристик газоразрядного свечения (площадь, суммарная интенсивность) с показателем «Среднеквадратическое отклонение яркости цифровых рентгеновских изображений», а также слабая достоверная связь большинства газоразрядных характеристик с посевными качествами.

Таким образом, исследованиями подтверждено, что метод газоразрядной визуализации (электрофотографии) в сочетании с автоматическим анализом цифровых газоразрядных изображений, может служить эффективным дополнительным инструментом для оперативного выявления дефектных семян кукурузы, зараженных бактериальной инфекцией.

3.3.3. Изучение скрытой дефектности семян древесных лесных пород на основе методики электрофотографии (газоразрядной визуализации)

Одним из распространенных скрытых дефектов семян древесных лесных пород является их невыполненность – отсутствие эндосперма и зародыша при наличии оболочки (Mіcó et al., 1999). Такие семена имеют разную электропроводность, что неизбежно сказывается на характеристиках их газоразрядного свечения. Для изучения эффективности метода электрофотографии для выявления невыполненности семян различных древесных лесных пород, была проведена серия опытов, с привлечением рентгенографического метода в качестве верифицирующего и стандартизованного.

3.3.3.1. Выявление скрытой дефектности семян ели обыкновенной (*Picea abies* L.) с использованием метода электрофотографии

С целью установления эффективности метода электрофотографии для выявления невыполненности семян у лесных пород проведено сравнительное исследование качества семян ели европейской (*Picea abies* L.).

Для проведения анализа семена ели обыкновенной были разделены на группы: непроросшие семена («группа 0») и семена, проросшие в течение 5-9 суток («группа 1»). Время прорастания фиксировалось для каждого семени в отдельности.

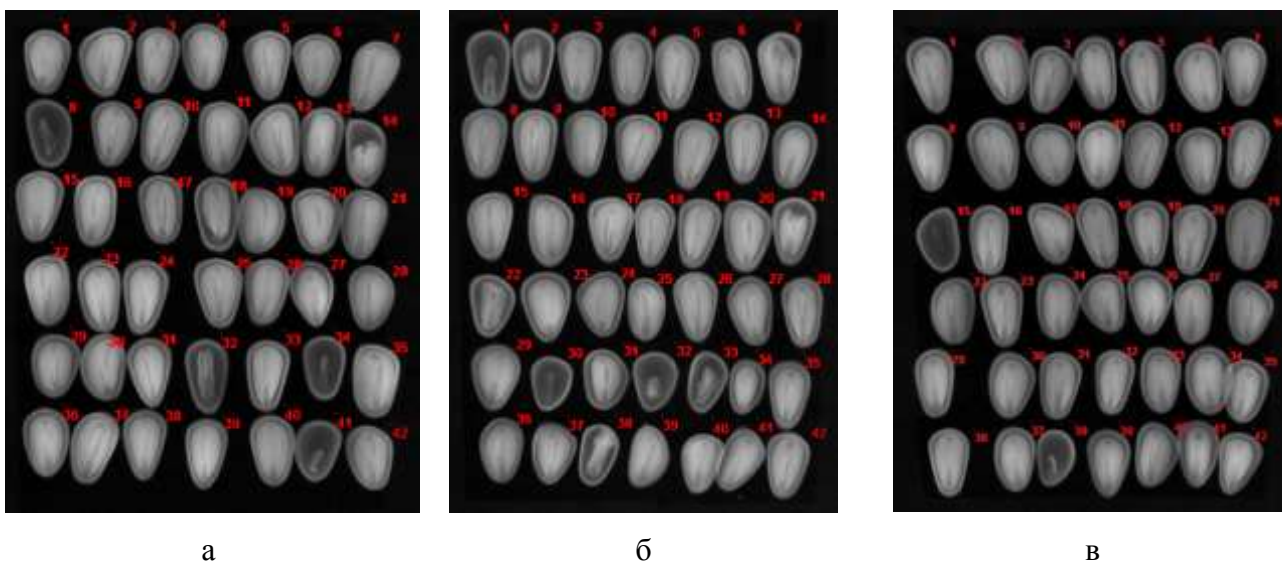
В образце №3 длина (см) корня семян составила: «группа 0» – медиана 0,0; «группа 1» – 4,3. Сравнение групп 0 и 1 по показателю «длина корня» на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=0,00$; $p<0,05$). В образце №35 длина корня семян (см) составила для «группы 0» – медиана 0,0; для «группы 1» – 5,0. Сравнение групп 0 и 1 по показателю «длина корня» на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=0,00$; $p<0,05$).

Установлено, что в обоих образцах (№3 и № 35) невыполненные семена не обнаружили газоразрядного свечения, в отличие от нормально сформированных семян, давших проростки. В образце №3 Площадь свечения (пиксели) составила для группы «0» – медиана 0, для группы «1» – медиана 882. Сравнение групп 0 и 1 по показателю «площадь свечения» на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=0,00$; $p<0,05$). В образце №35 Площадь свечения (пиксели) составила для группы «0» – медиана 0, для группы «1» – медиана 842. Сравнение групп 0 и 1 по показателю Площадь свечения на основе критерия Манна Уитни показало, что различия между указанными группами достоверны ($U=24,00$; $p<0,05$).

Полученные результаты свидетельствуют, что газоразрядной визуализации (электрофотографии) может служить достоверным дополнительным к рентгеновскому методу инструментом неразрушающего контроля состояния семян ели европейской.

3.3.3.2. Выявление скрытой дефектности семян сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* DuRoi) с использованием метода электрофотографии

Также методом электрофотографии, с сопряженным рентгенографическим методом, были выявлены и проанализированы скрытые дефекты образцов семян сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* DuTour), имеющие, в сравнение с семенами ели европейской, более крупные размеры и массу. Цифровые рентгеновские изображения образцов семян сосны кедровой сибирской представлены на рисунке 17.



а

б

в

Рисунок 17. Цифровые рентгеновские изображения сосны кедровой сибирской, происхождение – Новосибирск (а, б) и Республика Тыва (в)

На рисунке 17 видно, что некоторые семена сосны кедровой сибирской образца №1, полученного из Новосибирска являются невыполненными (семя № 8, 32, 34, 41), а семена № 14 и 18 – недовыполненными. Показано, что некоторые семена сосны кедровой сибирской образца №2, полученного из Новосибирска также являются невыполненными (семя № 1, 2, 30, 32, 33), а семена № 21, 22 и 38 – недовыполненными. Образец семян, собранный в республике Тыва, также характеризовался наличием невыполненных (семя № 15 и 38).

Данные, представленные на рисунке 18, показывают, что при пороговом значении средней интенсивности газоразрядных изображений (82 единицы яркости) возможно идентифицировать невыполненные семена сосны кедровой сибирской, однако в данный диапазон частично попадают и недовыполненные, и нормально сформированные семена.

Недовыполненные семена сосны кедровой сибирской (образец №1, г. Новосибирск) были, с помощью метода электрофотографии, ошибочно классифицированы как нормально сформированные, в образце №2 (г. Новосибирск), одно из двух недовыполненных семян было ошибочно классифицировано как нормально сформированное.

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 8. Классификация выполнена на основании данных визуального анализа цифровых рентгеновских изображений.

Как следует из данных в таблице 8, метод электрофотографии наиболее эффективно показал себя при выявлении семян, относящихся к классу С – точность классификации близка к 100%, и выше, в данном случае, чем у рентгенографического метода в сочетании с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений семян. Согласно нашим исследованиям на выбранных образцах, оба метода показали высокую эффективность (> 90%) точности при выявлении невыполненных семян сосны кедровой сибирской.



а



б



в

Рисунок 18. Средняя интенсивность цифровых газоразрядных изображений семян сосны кедровой сибирской: а – образец №1, (происхождение Новосибирск); б – образец №2, (происхождение Новосибирск); в – образец происхождения Республика Тыва. Столбцы зеленого цвета (Класс А) – нормально сформированные семена, желтого (Класс В) – недоразвитые, красного (Класс С) – невыполненные семена

Таблица 8

Результаты сравнения эффективности методик электрофотографии и микрофокусной рентгенографии

Классы объектов	Количество объектов	Точность, % / Погрешность, %	
		Электрофотография	Рентгенография
Класс А	110	88 / 12	98 / 2
Класс В	4	25 / 75	50 / 50
Класс С	12	100 / 0	92 / 8

Примечание: общее количество объектов – 126.

Полагаем, что метод электрофотографии позволяет выявлять скрытые дефекты семян древесных лесных пород, обусловленных действием абиотических факторов, в том числе, особенностями климатических зон произрастания, приводящих к появлению таких дефектов, как невыполненность и недоразвитость (не более 50% площади проекции семени занимает пустое пространство).

3.3.3.3. Исследование газоразрядных характеристик семян дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) для оценки их посевных качеств

Для изучения качества семян древесных лесных растений, относящихся к классу двудольные, было выполнено исследование газоразрядных характеристик с сопряженной оценкой рентгенографических и ростовых показателей желудей дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). Показано, что использование метода газоразрядной визуализации (электрофотографии) делает возможным обнаруживать скрытые дефекты желудей дуба черешчатого, в частности, поражение желудей грибной инфекцией (энзимо-микозное истощение).

Статистически значимых различий газоразрядных характеристик у проросших и не проросших желудей дуба черешчатого обнаружено не было. Однако, установлена взаимосвязь интроскопических (рентгенографических, газоразрядных) характеристик и ростовых показателей (длина ростка) желудей дуба черешчатого (рис. 19).

На рисунке 19 показано, что желуди дуба черешчатого с высокими значениями показателя Средняя яркость цифровых рентгеновских изображений дают, преимущественно, лучшие проростки, равно как и желуди, имеющие минимальные значения показателя Нормализованное СКО радиуса изолинии цифровых газоразрядных изображений (рис. 19б).

Корреляционный анализ Спирмана выявил ряд взаимосвязей интроскопических (рентгеновских, газоразрядных) и дополнительных показателей посевных качеств (длина ростка, 20-е сутки) желудей дуба черешчатого. В частности, коэффициент корреляции между минимальной яркостью цифровых рентгеновских изображений и длиной ростка составил $r=0,3775$, $p=0,0053$; между нормализованным СКО радиуса изолинии газоразрядных изображений и длиной ростка $r=-0,3429$, $p=0,0120$.

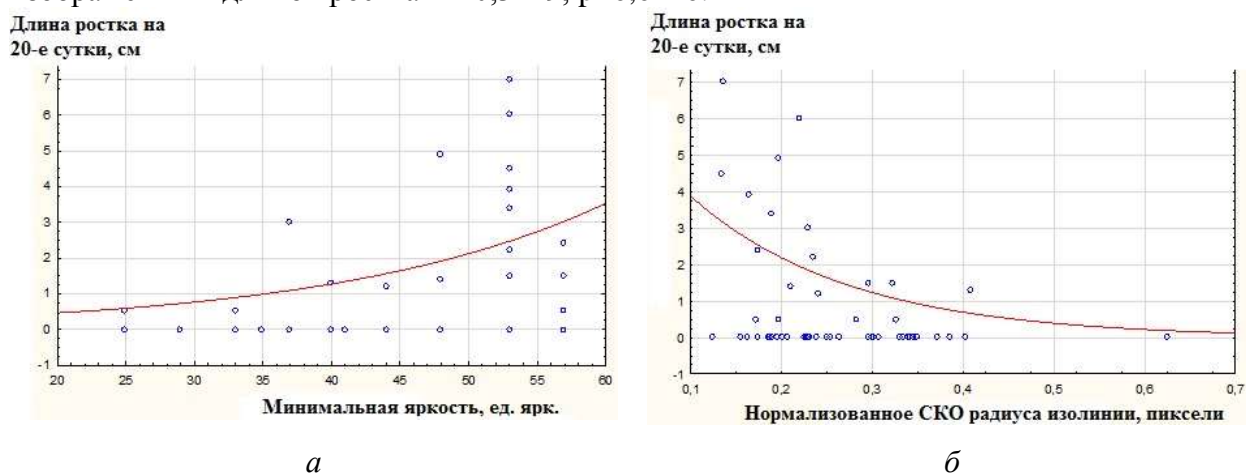


Рисунок 19. Зависимости параметров: а – цифровых рентгеновских (Минимальная яркость, единицы яркости) с ростовыми показателями (Длина ростка на 20-е сутки, см); б – газоразрядных изображений (Нормализованное СКО радиуса изолинии, пиксели) с ростовыми показателями (Длина ростка на 20-е сутки, см); в – трехмерная диаграмма зависимости рентгеновских, газоразрядных и ростовых показателей

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

Разработанная на основе методов микрофокусной рентгенографии и газоразрядной визуализации комплексная методика, в дополнение к существующим стандартным тестам, может служить еще одним инструментом для оценки качества желудей дуба черешчатого, как и семенного материала лесных пород в целом, вне зависимости от вида растений.

Глава 4. Обсуждение результатов

В Главе 4 приводится обсуждение полученных нами результатов оценки разнокачественности и скрытой дефектности семян, полученных методами цифрового сканирования, в сочетании с компьютерным анализом изображений, микрофокусной рентгенографии и электрофотографии, проводится их сопоставление с литературными данными.

Рассматривается методология исследования разнокачественности и скрытой дефектности семян на основе «каскада» инструментальных физических методов. В ней предлагается при выборе оптимальной методики нами предлагается учитывать вид сельскохозяйственной культуры, производительность, а также факторы (стрессоры) среды, которым были подвергнуты образцы семян, с учетом сортовых особенностей, места сбора, года и категории репродукции, технологии выращивания. Такой анализ необходим для выбора наиболее оптимальной неинвазивной методики, или сочетания нескольких методик, для экспресс-оценки качества семенного материала.

Диагностические возможности данных методик приведены на рисунке 20.

Диагностические возможности оценки качества семян	Название метода		
	Цифровое сканирование	Микрофокусная рентгенография	Электрофотография
<i>Разнокачественность</i>			
- Генетическая	●	●	●
- Матричная	●	●	●
- Экологическая	●	●	●
<i>Скрытая дефектность</i>			
- Биогенного происхождения	●	●	●
- Техногенного происхождения	●	●	●
Жизнеспособность	●	●	●
Связь с ростовыми показателями	●	●	●

Рисунок 20. Диагностические возможности неразрушающих инструментальных методик оценки разнокачественности семенного материала. Зеленые кружки обозначают высокую эффективность методики; желтые кружки – методика имеет определенные ограничения; красные кружки – методика имеет значительные ограничения, либо в данном случае, неприменима; фиолетовые кружки – методика нуждается в дополнительной апробации

Мы полагаем, что генетическая разнокачественность, обнаруживаемая в различном проявлении фенотипа и морфологии семян, прежде всего, их цветности, может быть эффективно объективизирована с помощью цифрового сканирования, в сочетании с компьютерной обработкой изображений. Аналогичного рода работы широко представлены в мировой научной практике (Sau et al., 2019; Sharma et al., 2021; Huang et al., 2022 и др.).

Применение же рентгеновского метода для объективизации генетической и матричной разнокачественности семян мы считаем нецелесообразным, хотя в литературе данный подход также предлагается (Demianchuk et al., 2013). Рентгеновский метод может объективизировать максимум форму семян – гораздо быстрее и бюджетнее для решения этой задачи применить методику цифрового сканирования. Это касается и матричной разнокачественности, когда требуется определить не только размер и форму семян на различных частях материнского растения, но и их цветности. Экологическая разнокачественность семян, особенно обусловленная воздействием на семена неблагоприятных условий внешней среды, и являющаяся причиной возникновения скрытых

дефектов в семенах – прямая прерогатива для рентгенографического метода исследований. В отличие от методики цифрового сканирования, микрофокусная рентгенография позволяет заглянуть «вглубь» семени, а съемка с прямым рентгеновским увеличением дает возможность получать цифровые изображения семян с визуализацией дефектов внутренней их структуры, невидимых оптическим методом, прежде всего, это скрытая трещиноватость и травмы зародыша.

Электрофотография вполне информативна при сравнении листовых пластинок малины устойчивых и неустойчивых к болезням листьев этой культуры (Джигадло М.И., Джигадло Е.Н., 2010), в отношении семян малины требуется провести дополнительные масштабные исследования. Это касается напрямую и других видов разнокачественности семян зерновых, зернобобовых культур, древесных лесных растений, а также оценки скрытых дефектов семян зерновых культур, обусловленных причинами техногенного характера.

Также приводятся сравнительные характеристики использованных инструментальных физических методов исследования качества семян (Рис. 21).

Критерии оценки метода	Название метода		
	Цифровое сканирование	Микрофокусная рентгенография	Электрофотография
Сохранение жизнеспособности объекта	●	●	●
Получение характеристик индивидуального семени	●	●	●
Возможность работы с семенами любых культур	●	●	●
Объективизация проводимых наблюдений	●	●	●
Автоматизация проводимых измерений	●	●	●
Быстрота измерений и обработки данных	●	●	●
Бюджетность методики	●	●	●
Легитимность методики	●	●	●

Рисунок 21. Сравнительные характеристики неразрушающих инструментальных методик оценки разнокачественности семенного материала. Зеленые кружки обозначают высокую эффективность методики; желтые кружки – методика имеет определенные ограничения; красные кружки – методика имеет значительные ограничения

В целом, что касается жизнеспособности семян, ростовых показателей и их связи с характеристиками покоящихся семян, измеряемых инструментальными методами, то нами было установлено, что все три метода (цифровое сканирование, микрофокусная рентгенография, электрофотография) показали свою информативность, корреляции существуют. В частности, при исследовании образцов семян сахарной кукурузы каскадом из трех инструментальных методики (цифровая фотография с двумя источниками света разных длин волн, микрофокусная рентгенография и электрофотография), нами было выявлены различия характеристик газоразрядного свечения поврежденных и неповрежденных образцов семян кукурузы, причем максимальные значения коэффициентов корреляции были зафиксированы в случае метода цифровой фотографии, минимальные – в случае метода электрофотографии.

Представлена сравнительная характеристика использованных инструментальных физических методов оценки разнокачественности и скрытой дефектности семенного материала.

Показано, что все используемые нами в работе инструментальные физические методы отвечают основным критериям оценки разнокачественности семенного материала: они не повреждают семя при их исследовании, также возможно получать информацию по каждому

семени в отдельности, что позволяет сравнить в дальнейшем характеристики покоящихся семян с их ростовыми показателями. Все три метода позволяют получать количественные характеристики исследуемых семян при оценке разнокачественности семенного материала. Вместе с тем есть и ограничения – рентгеновский метод несколько уступает в информативности методу компьютерной микротомографии, когда речь идет об анализе семян большой толщины (Gomes-Junior, 2017), а методика электрофотографии, по крайней мере, в текущем ее исполнении, не позволяет работать с мелкими (<1 мм) и плоскими семенами. Методика микрофокусной рентгенографии, в части выявления скрытых дефектов по типам (ГОСТ Р 59603-2021) реализована, на данный момент путем визуальной расшифровки дефектов, хотя определенные разработки по выявлению дефектов с учетом компьютерных программ имеются (Белецкий и др., 2022).

По скорости измерений методика электрофотографии уступает рентгенографическому методу и методу цифрового сканирования. Оборудование для реализации рентгеновского метода является самым дорогостоящим, по сравнению с прибором для электрофотографии и тем более, с планшетным сканером.

Однако, важно отметить, что рентгеновский метод является, единственным инструментальным методом, прошедшим процедуру стандартизации, как в России (ГОСТ Р 59603-2021), так и за рубежом (ISTA Rules, 2023), что позволяет рекомендовать его, наряду со стандартными методами оценки посевных качеств семян (ГОСТ 12038-84), в качестве опорного и верифицирующего при комплексных исследованиях качества семенного материала.

Совокупность параметров, измеряемых инструментальными методами удобно, на наш взгляд, представить в виде «параметрического паспорта». «Параметрический паспорт» семени, в дополнение к генетическому паспорту сорта и сопроводительной информации об образцах семян (сорт, год репродукции, место сбора и др.), может включать в себя группу морфометрических, рентгеновских, электрофизических, весовых и морфофизиологических показателей. Такой подход, на наш взгляд, должен обеспечить характеристики индивидуальных семян по более 50 показателям, измеряемым с использованием инструментальных физических методик, а также исследуемой партии семян в целом, включая показатели её неоднородности. Данные показатели могут быть использованы в качестве дополнительных при паспортизации сортов и партий семян сельскохозяйственных культур.

В работе приводится описание и обсуждение физических принципов используемых нами неинвазивных инструментальных физических методов.

Таким образом, нами было задействовано три метода (цифровое сканирование, микрофокусная рентгенография, электрофотография), которые основаны на различных физических принципах, и которые позволяют в комплексе получать независимую друг от друга информацию о состоянии поверхности, внутренней неоднородности и скрытой дефектности семян. При этом комплексность исследований значительно расширяет спектр получаемой информации, предоставляет более полную, а потому более объективную оценку изучаемого образца. Такой подход, в конечном счете, позволяет исследователю принимать взвешенное, точное, а главное отражающее существо изучаемого вопроса, решение, что и было продемонстрировано в нашей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была разработана методология комплексной неинвазивной экспресс-оценки качества семян различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений с использованием набора инструментальных физических методов, которая позволяет получать новые знания о структурных внешних и внутренних характеристиках формирующихся структур семени. Данный подход является актуальным, как с точки зрения фундаментальных исследований, т.к. позволяет судить о степени гармоничности развития формирующихся органов семени, так и в методическом плане, т.к. позволяет за короткий промежуток времени проводить не только качественную, но и

количественную оценку разнокачественности семян и на основе проведенных анализов выявлять семена с высоким уровнем потенциальной продуктивности, отделяя их от семян с низким уровнем жизнеспособности.

В целом полученные результаты исследований характеристик поверхности семян на примере сельскохозяйственных растений (зерновые, зернобобовые, овощные, декоративные) позволили: количественно описать характеристики размера, формы и цветности семян, что дало возможность выявить их разнокачественность – как генетическую, так и экологическую. Так, например, было установлено, что одни и те же сортообразцы фасоли овощной, выращенные в разные годы и в разных эколого-географических зонах, имеют отличные друг от друга размер и форму.

Для пшеницы было показано, что семена, полученные в строго контролируемых условиях, имеют иные, по сравнению с полученными в полевых условиях, оптические и рентгенографические показатели. Для капустных культур установлено, что характеристики геометрии, формы, цветности, а также скрытой дефектности семян высокой и низкой потенциальной продуктивности достоверно различаются.

Показано, что рентгенографический метод исследования семян эффективен для выявления внутренней неоднородности и скрытой дефектности семян как сельскохозяйственных культур (зерновые, овощные, орехоплодные, плодовые), так и семян древесных лесных растений. С помощью микрофокусной рентгенографии, в сочетании с сопряженным визуальным и автоматическим анализом рентгенограмм семян, возможно выявлять скрытые дефекты различного типа происхождения, в частности, повреждения патогенной микрофлорой бактериальной этиологии, повреждения зерновыми клопами), трещиноватость, дефектность зародыша, а также невыполненность и недовыполненность семян. Установлено, что данные дефекты оказывают влияние на посевные качества дополнительные ростовые показатели семян, что подтверждается результатами корреляционного анализа.

На примере семян яблони домашней (*Malus domestica* Borkh.) показано, что дифференцированный рентгенографический анализ отдельных структур и органов семени является важным инструментом для формирования его «параметрического паспорта».

Все полученные нами результаты фундаментального характера имеют выраженный прикладной аспект, а именно: учет скрытой поврежденности семян и степени их выраженности позволит разработать новые нормативные документы, отражающие допустимую долю скрытых дефектов, существенно влияющих на хозяйственную пригодность семян; и будут способствовать разработке технологических режимов уборки, сушки, сортировки, а также условий кратковременного и длительного хранения семенного материала. Такой подход может рассматриваться и при обосновании показателей ценообразования при совершении торговых операций и агростраховании. Это делает в перспективе отрасль управляемого семеноводства вполне конкурентноспособной не только на отечественном, но и мировом рынке семян.

Данный подход на современном этапе развития отечественного сельского хозяйства весьма актуален, поскольку в настоящее время в России создается единая Федеральная информационная система (ФИС), задача которой отследить жизненный цикл семян (зерна) от производства до выпуска в обращение. Федеральный закон о создании такой системы подписан Президентом РФ 30 декабря 2021 года.

Разработанная в настоящей работе методология комплексной неинвазивной экспресс-оценки качества семенного материала является актуальным структурным элементом ФИС, позволяющим минимизировать производственные и экологические риски, связанные с возможной реализацией семенного рынка фальсифицированной продукции, а также попытками реализовать явно некондиционные семена, имеющие высокий уровень скрытых дефектов и аномалий.

Таким образом, в работе представлены и обобщены результаты комплексных исследований по оценке разнокачественности и скрытой дефектности семян изученных нами сельскохозяйственных культур и древесных пород, что было сделано на основе

использования набора инструментальных физических методов (цифровое сканирование, микрофокусная рентгенография, электрофотография). Приведены сравнительные характеристики всех трех использованных в работе методов неинвазивной оценки качества семян, а также обсуждены их достоинства и ограничения. Кроме того, установлены взаимосвязи скрытой дефектности семян и их посевных качеств, что имеет важное значение для экспресс-оценки хозяйственной пригодности семенного материала.

В целом все полученные в процессе выполнения данной работы результаты являются оригинальными и представляют интерес не только для фундаментальной, но и практической сельскохозяйственной науки, что, как мы полагаем, может найти свое применение в отечественной селекции и семеноводстве.

Выводы

1. Для оперативной проверки хозяйственной пригодности семенного материала, с использованием набора инструментальных физических методов (цифрового сканирования, микрофокусной рентгенографии, электрофотографии), разработаны научные и практические основы методологии комплексной неинвазивной экспресс-оценки разнокачественности и скрытой дефектности семян различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений;

2. Усовершенствованы технические и программные элементы методик цифрового сканирования, микрофокусной рентгенографии и электрофотографии, что позволило адаптировать эти методы для исследования разнообразных семян различных сельскохозяйственных культур и древесных лесных растений, а также осуществлять «каскадную» съемку одних и тех же образцов семян разными методами;

3. На основе усовершенствованной методики цифрового сканирования, в сочетании с компьютерным анализом изображений, впервые получены оригинальные экспериментально-систематизированные данные по выявлению и количественной оценке генетической, матрикальной и экологической разнокачественности семян исследованных сельскохозяйственных культур;

4. На основе усовершенствованной методики микрофокусной рентгенографии, в сочетании с визуальным и компьютерным анализом цифровых рентгеновских изображений, впервые получены оригинальные экспериментально-систематизированные данные по количественной оценке скрытой дефектности семян исследованных сельскохозяйственных культур и древесных лесных пород;

5. С использованием усовершенствованной методики электрофотографии, и последующим компьютерным анализом цифровых газоразрядных изображений, впервые получены оригинальные экспериментально-систематизированные данные по количественной оценке невыполненности семян древесных лесных пород и первичного скрининга скрытых дефектов биогенного происхождения семян зерновых культур;

6. Получены новые знания о структурных внешних и внутренних характеристиках формообразующих структур, описывающих скрытую неоднородность семян ряда зерновых, овощных, декоративных, плодовых, орехоплодных культур, а также семян некоторых древесных лесных пород.

7. Впервые установлены взаимосвязи характеристик разнокачественности и скрытой дефектности семян некоторых сельскохозяйственных культур и древесных лесных пород, исследованных с использованием инструментальных физических методов, с посевными качествами (энергия прорастания, всхожесть) семян, а также с дополнительными ростовыми показателями (длина корня и ростка).

8. Впервые предложена концепция «параметрического паспорта» семени, включающая, дополнительно к генетическому паспорту сорта информацию о морфометрических, рентгеновских, электрофизических и морфофизиологических показателях индивидуальных семян и партий семенного материала.

Практические рекомендации

1. Предлагается использовать методику цифрового сканирования семян, в сочетании с компьютерным анализом изображений, для экспресс-оценки и объективного описания количественных характеристик (размер, форма, цветность) разнокачественности семян, а также формирования «параметрических паспортов», для внедрения этих подходов в организациях, занимающихся селекцией и первичным семеноводством сельскохозяйственных растений.

2. Для проведения экспертиз качества семенного материала семян сельскохозяйственных культур и древесных лесных с целью выявления их скрытой дефектности рекомендуется использовать стандартизованную методику микрофокусной рентгенографии, описанную в ГОСТ Р 59603-2021 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии».

3. Для анализа малых партий семенного материала в качестве дополнительной неразрушающей методики оценки невыполненности семян древесных лесных пород, а также первичного скрининга скрытых дефектов биогенного происхождения (повреждение микрофлорой бактериальной этиологии семян, поврежденности зерновыми клопами) семян зерновых культур предлагается использовать метод электрофотографии, позволяющий получать дополнительную информацию о скрытой дефектности и жизнеспособности семян.

4. Полученные фундаментально-экспериментальные данные и накопленный фактический материал предлагается использовать в курсе лекций по дисциплинам «Семеноведение», «Цифровизация в защите растений», «Физико-химические методы в биотехнологии» и «Биофизика» высших и средних специальных учебных заведений.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Биологический вектор – расширение спектра изучаемых неинвазивными физическими методами хозяйственных групп семян и ботанических видов исследуемых растений. Неинвазивная экспресс-оценка качества семян в период послепосевного дозревания семян, и процессы, происходящие в семенах на сверххранных этапах прорастания (до 1 суток).

2. Технический вектор - разработка программных средств, в том числе распознавания рентген-образов семян на основе систем искусственного интеллекта, разработка специализированного прибора для электрофотографии семян.

Список публикаций по теме диссертации

Избранные статьи в Российских журналах из перечня ВАК:

1. Архипов, М.В. Применение методов мягколучевой рентгенографии и газоразрядной визуализации для оценки качества семян ели европейской / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, А.С. Бондаренко // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 31. – С.62-66.

2. Архипов М.В., Возможности биофизических методов в агрофизике и растениеводстве / М.В. Архипов, Л.П. Великанов, А.Г. Желудков, Л.П. Гусакова, Д.В. Алферова, Н.Н. Потрахов Н.С. Прияткин // Биотехносфера. – 2013. – №6 (30). – С.40-43.

3. Архипов, М.В. Системный подход к оценке разнокачественности семян зерновых культур на основе использования современных методов интроскопической диагностики / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, Н.Н. Потрахов, Е.В. Журавлева // Труды кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – Вып.3 (54). – С. 79-83.

4. Прияткин, Н.С. Автоматический анализ и классификация цифровых рентгеновских и газоразрядных изображений семян пшеницы, поврежденных клопом вредная черепашка, для прогноза их посевных качеств / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, А.А. Бойцов, Н.Н. Потрахов, Н.Е. Староверов, П.А. Щукина, А.В. Капусткина // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2018. – № 6. – С. 60-67.

5. Прияткин, Н.С. Интроскопические методы исследования качества семенного материала: состояние проблемы и перспективы использования / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, Н.Н. Потрахов, Г.И. Кропотов, И.А. Цибизов, И.А. Винеров // *Агрофизика*. – 2018. – № 2. – С. 29-39. – DOI: 10.25695/AGRPH.2018.02.05
6. Прияткин, Н.С. Исследование рентгеновских и газоразрядных характеристик желудей дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) для оценки их посевных качеств / Н.С. Прияткин, О.Ю. Бутенко, Д.А. Шабунин и др. // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. – 2018. – № 2. – С. 4-17. – DOI: 10.21178/2079-6080.2018.2.4
7. Архипов, М.В. Выявление скрытой дефектности семян зерновых культур методом микрофокусной рентгенографии / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова // *Таврический вестник аграрной науки*. – 2018. – № 3 (15). – С. 8-14. – DOI: 10.25637/TVAN.2018.03.01
8. Архипов, М.В. Комплексное исследование интроскопических и ростовых показателей малых партий семян, сформированных посредством электростатической сепарации / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П., Гусакова, Н.Н. Потрахов, С.В. Дмитриев // *Агрофизика*. – 2018. – № 3. – С. 38-42. – DOI: 10.25695/AGRPH.2018.03.07
9. Колесников, Л.Е. Совместное использование штаммов микроорганизмов и хитозановых комплексов для повышения урожайности пшеницы (*Triticum aestivum* L.) / Л.Е. Колесников, Э.В. Попова, И.И. Новикова, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Ю.Р. Колесникова, Н.Н. Потрахов, В. Van Duijn, А.С. Гусаренко // *Сельскохозяйственная биология*. - 2019. - Т. 54. - № 5. - С. 1024-1040 DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.1024rus
10. Архипов, М.В. Рентгеновские компьютерные методы исследований структурной целостности семян и их значение в современном семеноведении / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова Н.Н. Потрахов, А.Ю. Грязнов, В.Б. Бессонов, А.В. Ободовский, Н.Е. Староверов // *Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 89. – № 4. – С. 627-638. – DOI: 10.21883/JTF.2019.04.47324.170
11. Карамышева, А.В. Исследование полнозернистости семян *Platycladus orientalis* и *Thuja sutchuenensis* (*Cupressaceae*) методом микрофокусной рентгенографии для определения их посевных качеств / А.В. Карамышева, Л.П. Трофимук, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, Н.Н. Потрахов, В.Б. Бессонов, П.А. Щукина // *Растительные ресурсы*. – 2019. – Т. 55. – № 4. – С. 501-515. –DOI: 10.1134/S0033994619040058
12. Мусаев, Ф.Б. Исследование разнокачественности семян овощных культур с использованием компьютерного анализа изображений / Ф.Б. Мусаев, А.В. Солдатенко, Д.Н. Балеев., Н.С. Прияткин, П.А. Щукина // *Агрофизика*. –2019. – № 1. – С. 38-44. – DOI: 10.25695/AGRPH.2019.01.05
13. Архипов, М.В. Методика микрофокусной рентгенографии для выявления скрытой дефектности семян древесных лесных пород и других видов сосудистых растений / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, А.В. Карамышева, Л.П. Трофимук, Н.Н. Потрахов, В.Б. Бессонов, П.А. Щукина // *Журнал технической физики*. – 2020. – Т. 90. – № 2. – С. 338-346. – DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48830.178-19
14. Мусаев, Ф.Б.О. Анализ разнокачественности семян лука кристофа (*Alium cristophii* Trautv.) с помощью цифровой морфометрии / Ф.Б.О. Мусаев, Н.С. Прияткин, А.Ф. Бухаров, М.И. Иванов, А.И. Кашлева, П.А. Щукина, С.Л. Белецкий, О.В. Ушакова // *Овощи России*. – 2020. – № 2. – С. 32-37. – DOI: 10.18619/2072-9146-2020-2-32-37
15. Щукина, П.А.. Методика подготовки цифровых рентгеновских изображений семян к визуальному дешифрированию / П.А. Щукина, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, Н.С. Прияткин // *Агрофизика*. – 2020. – № 3. – С. 36-44. – DOI: 10.25695/AGRPH.2020.03.06
16. Karamysheva, A. 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 northwestern russia by microfocus x-ray radiography to predict their sowing qualities / A. Karamysheva, L. Trofimuk, N. Priyatkin, M. Arkhipov, L. Gusakova, P. Shchukina, N. Staroverov,

N. Potrakhov // Biological Communications. – 2020. – Vol. 65. – No. 4. – С. 297-306. – DOI: 10.21638/spbu03.2020.403

17. Нгуен Куинь, Ч. Рентгенографический анализ качества семян *Euscomia ulmoides* Oliv. разного географического происхождения / Ч. Нгуен Куинь, С.Г. Сахарова, Н.С. Прияткин, А.В. Жигунов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. – № 234. – С. 134-151. - DOI: 10.21266/2079-4304.2021.234.134-151

18. Колесников, Л.Е. Агрэкологическое варьирование продуктивности и поражаемости пшеницы болезнями: элементы и моделирование / Л.Е. Колесников, В.А. Павлюшин, М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Ю.Р. Колесникова // Агрофизика. – 2022. – № 3. – С. 40-52. – DOI: 10.25695/AGRPH.2022.03.06

19. Мусаев Ф.Б. Анализ морфометрических и оптических параметров семян подрода *Cera* (*Allium* L., *Alliaceae*) методом цифрового сканирования / Ф.Б. Мусаев, Н.С. Прияткин, М.И. Иванова, А.Ф. Бухаров, А.И. Кашлева // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2022. – Т. 52. – № 2. – С. 22-31. – DOI: 10.26898/0370-8799-2022-2-3

20. Прияткин, Н.С. Оценка разнокачественности и скрытой дефектности семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) инструментальными физическими методами / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, П.А. Щукина, Г.В. Мирская, Ю.В. Чесноков // Сельскохозяйственная биология. – 2022. – Т. 57. – № 5. – С. 911-920. – DOI: 10.15389/agrobiology.2022.5.911

21. Прияткин, Н.С. Применение метода газоразрядной визуализации для оценки скрытых дефектов семян / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, В.Н. Пищик, Т.А. Кузнецова, А.В. Карамышева, Л.П. Трофимук, П.А. Щукина, М.А. Кузнецова // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 3. – С. 37–48. – DOI: 10.25750/1995-4301-2023-3-037-048

Статьи в иностранных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus:

22. Kolesnikov, L.E. The effectiveness of biopreparations in soft wheat cultivation and the quality assessment of the grain by the digital x-ray imaging / L.E. Kolesnikov, M.D. Solodyannikov, I.I. Novikova, E.V. Popova, N.S. Priyatkin, E.V. Zuev, Y.R. Kolesnikova // Agronomy Research. – 2020. – Vol. 18. – No. 4. – P. 2436-2448. – DOI: 10.15159/AR.20.206

23. Musaev, F.B. Geometrical parameters and colour index of chive (*Allium schoenoprasum*) seed / F.B. Musaev, N.S. Priyatkin, P.A. Shchukina, M.I. Ivanova, I.H. Jafarov, M. Nowar // Research on Crops. – 2020. – Vol. 21. – No. 4. – P. 775-782. – DOI: 10.31830/2348-7542.2020.119

24. Kolesnikov, L.E. Influence of the structural and functional characteristics of the seeding material on the yield structure elements and resistance to leaf diseases of spring soft wheat / L.E. Kolesnikov, I.E. Razumova, D.Y. Radishevskiy, N.S. Priyatkin, M.V. Arkhipov, Y.R. Kolesnikova // Agronomy Research. – 2021. – Vol. 19. – No. 4. – P. 1791-1812. – DOI: 10.15159/AR.21.152

25. Bukharov, A.F. Impacts of high temperature on embryonic growth and seed germination of dill (*Anethum graveolens*) / A.F. Bukharov, D.N. Baleev, A.V. Soldatenko, F.B. Musaev, P. Kezimana, N.S. Priyatkin // Seed Science and Technology. – 2021. – Vol. 49. – No. 1. – P. 7-12. – DOI: 10.15258/sst.2021.49.1.02

26. Musaev, F. Assessment of Brassicaceae seeds quality by x-ray analysis / F. Musaev, N. Priyatkin, N. Potrakhov, S. Beletskiy, Y. Chesnokov // Horticulturae. – 2022. – Vol. 8. – No. 1. – DOI: 10.3390/horticulturae8010029

Материалы избранных конференций, конгрессов:

27. Архипов, М.В. Применение методов газоразрядной визуализации и мягколучевой рентгенографии для контроля качества семян ели европейской / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, А.С. Бондаренко // Инновации и технологии в лесном хозяйстве. Материалы III Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 22–24 мая 2013 года. – СПб, 2013. – С. 46-55.

28. Прияткин, Н.С. Комплексный анализ морфометрических и оптических параметров рентгенограмм, характеристик газоразрядного свечения и ростовых показателей образцов зерен ячменя / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова // Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине: Материалы VII Международного конгресса 07 - 11 сентября 2015 г. – СПб, 2016. – С.190.
29. Прияткин, Н.С. Перспективы использования методик автоматизированного анализа изображений в лесном семеноводстве и лесной фитопатологии / Н.С. Прияткин, Л.Е. Колесников, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова, С.М. Кузнец // «Инновации и технологии в лесном хозяйстве» ITF-2016: V Междунар. науч.-практ. конф. СПб, ФБУ «СПбНИИЛХ», 31 мая – 2 июля 2016 г. – СПб: СПбНИИЛХ, 2016. – С.116.
30. Прияткин, Н.С. Интроскопический анализ семенного материала в аспекте решения частных проблем продовольственной и экологической безопасности / Н.С. Прияткин, А.А. Бойцов, К.А. Саввина, П.А. Щукина, Н.Р. Борисова // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 14-16 ноября 2016 г. Лучшие доклады. - СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2016. – С. 430-434.
31. Прияткин, Н.С. Методика неразрушающего интроскопического экспресс-контроля качества желудей дуба на основе технологий микрофокусной рентгенографии и газоразрядной визуализации / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Д.А. Шабунин, О.Ю. Бутенко, К.А. Саввина // Неделя науки СПбПУ: Материалы XIV научной конференции с международным участием: Высшая школа биотехнологии и пищевых технологий, 14-19 ноября 2016 г. – СПб: Изд-во Политехнического университета. – С. 91-92.
32. Прияткин, Н.С. Методика количественного рентгенографического анализа семенного зерна пшеницы, поврежденного клопом вредная черепашка / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, А.В. Капусткина, Л.П. Гусакова, П.А. Щукина // Неделя науки СПбПУ: Материалы XIV научной конференции с международным участием: Высшая школа биотехнологии и пищевых технологий, 14-19 ноября 2016 г. – СПб: Изд-во Политехнического университета. – С. 103-105.
33. Priyatkin, N. Introscopic techniques to identify structural defects of grain and forestry seeds, caused by various environmental effects / N. Priyatkin, M. Arkhipov, L.Gusakova, N. Potrakhov, K. Korotkov // Abstracts of 31th Seed Symposium 31th ISTA Congress, Tallinn, Estonia 15-17 June 2016. - Tallinn, Estonia - 2016. – P. 70-71.
34. Мусаев, Ф.Б. Метод микрофокусной рентгенографии для анализа качества семян овощных культур / Ф.Б. Мусаев, М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Н.Е. Староверов, Н.Н. Потрахов // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. Материалы Международной научной конференции, посвященной 85-летию Агрофизического НИИ. Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2017 года. - СПб, 2017. – С. 332-336.
35. Бойцов, А.А. Применение автоматизированной методики интроскопической визуализации и количественной обработки изображений зерновок пшеницы, поврежденных клопом "вредная черепашка" / А.А. Бойцов, Н.Н. Потрахов, Н.С. Прияткин, П.А. Щукина // 70-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета. Материалы конференции аспирантов, студентов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 01–11 февраля 2017 года. - СПб, 2017. – С. 272-276.
36. Архипов, М.В. Агрофизический подход в реализации задач управляемого семеноводства при выращивании сельскохозяйственной продукции в естественных и искусственных условиях / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. Материалы II Международной научной конференции, посвященной памяти академика Е. И. Ермакова. Санкт-Петербург, 2-4 октября 2019 г. СПб, 2019. – С. 165-170.
37. Priyatkin, N.S. Influence of bacterial infection on physical characteristics and sowing qualities of *Zea mays* seeds / N.S. Priyatkin, M.V. Arkhipov, L.P. Gusakova, V.N. Pishchik, T.A. Kuznetsova, M.A. Kuznetsova, N.N. Potrakhov, N.E. Staroverov, L.E. Kolesnikov // 32nd ISTA Congress. Seed Symposium. Hay Fyona, Denmark; Kunsoth Keshavalu, India; Mc Evan Marian,

UK; Nagel Manuela, Germany; Wagner marie-Helene, France; Walcott Ron, USA; Waterworth Wanda, UK, 2019. – P. 86.

38. Arkhipov M.V. Prospects for digital radiographic assessment of seed lots hidden damage to lots for their economic suitability prediction / M.V. Arkhipov, Yu.A. Tkalov, N.S. Priyatkin, L.P. Gusakova, N.N. Potrakhov, V.V. Terleev, A.O. Nikonorov // AIP CONFERENCE PROCEEDINGS. 5th International Conference on X-Ray, Electrovacuum and Biomedical Technique. Сер. "AIP Conference Proceedings", 2019. – С. 020003. DOI: 10.1063/1.5095732

39. Щукина, П.А. Возможности программной среды matlab для подготовки цифровых рентгеновских изображений семян к визуальному дешифрированию / П.А. Щукина, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова // Вклад агрофизики в решение фундаментальных задач сельскохозяйственной науки: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, 2020. – С. 288-294.

40. Карамышева, А.В. Рентгенографический метод выявления скрытых дефектов экогенного происхождения семян древесных лесных пород / А.В. Карамышева, Л.П. Трофимук, Н.С. Прияткин // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения. Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции: «Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий». СПб: СПбГАУ, 2020. – С. 28-30.

41. Архипов, М.В. Новый ГОСТ Р 59603-2021 для растениеводства: «Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии» / М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, П.А. Щукина, Н.Н. Потрахов, Ю.В. Чесноков // Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией И.А. Устюжанина. Киров: ФАНЦ Северо-Востока, 2022. – С. 130-135.

42. Щукина, П.А. Разработка технологии оценки скрытой дефектности семян древесных лесных пород на основе микрофокусной рентгенографии и автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений / П.А. Щукина, Н.С. Прияткин, Л.П. Трофимук, А.В. Карамышева // Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства: Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2022. – С. 327-331.

43. Севастьянова, А.Д. Интегральная оценка параметров цифровых рентгеновских изображений плодов *Amygdalus communis* L. для контроля качества семенного материала / А.Д. Севастьянова, С.Ю. Хохлов, Н.С. Прияткин, Ю.Г. Базарнова // Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства: Материалы международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт, 2022. – С. 391-397.

44. Прияткин, Н.С. Возможности инструментальных физических методов для выявления в семенах скрытых дефектов биогенного происхождения / Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Ю.В. Чесноков // Биологические основы защиты растений: сборник научных трудов по материалам Жученковских чтений VII. Федеральный научный центр биологической защиты растений. Краснодар, 2022. – С. 191-197.

Методические пособия:

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

46. Архипов М.В. Неинвазивные технологии экспресс-оценки и отбора биологически полноценных семян для выращивания растительной продукции в вегетационно-облучательном оборудовании нового типа / М.В. Архипов, Н.Н. Потрахов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, П.А. Щукина, Н.Р. Борисова – СПб.: АФИ, 2019. 56 с.