

Физические методы исследований

УДК 633.11:631.53.011:57.084.1

doi: 10.15389/agrobiology.2022.5.911rus

ОЦЕНКА РАЗНОКАЧЕСТВЕННОСТИ И СКРЫТОЙ ДЕФЕКТНОСТИ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ (*Triticum aestivum* L.) ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ***Н.С. ПРИЯТКИН, М.В. АРХИПОВ, П.А. ШУКИНА, Г.В. МИРСКАЯ,
Ю.В. ЧЕСНОКОВ**

Для контроля качества семенного материала существует ряд стандартных тестов, регламентированных ISTA (International Seed Testing Association, Швейцария), а также перспективных инструментальных методов, оценивающих характеристики поверхности семян, их структурной целостности и интегральные электрофизические параметры. Цель исследования заключалась в оценке эффективности инструментальных физических методов при изучении скрытой дефектности у экологически разнокачественных семян пшеницы разного генетического происхождения. Разнокачественность и скрытую дефектность семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) оценивали с использованием оптической визуализации, микрофокусной рентгенографии и электрофотографии. Установлено, что метод оптической визуализации в сочетании с автоматическим анализом цифровых сканированных изображений позволяет статистически достоверно различать семена пшеницы разных сортов и генетических линий по цветовым характеристикам — составляющим цветовой модели RGB (red — красный, green — зеленый, blue — синий), а именно цветовому тону и насыщенности. Также выявлены различия между семенами одних и тех же сортообразцов и генетических линий, полученных в полевых и регулируемых условиях. Обнаружено, что цветовые характеристики поверхности семян, оцениваемые с помощью анализа цифровых сканированных изображений, статистически значимо различаются как у сортов и генетических линий пшеницы, так и у одного образца, выращенного в неодинаковых экологических условиях (полевых либо регулируемых). В частности, значения цветового тона цифровых сканированных изображений у семян разных сортов пшеницы, полученных в регулируемых условиях (фитополигон Агрофизического института), менялись от $0,081 \pm 0,0005$ до $0,090 \pm 0,0006$, в полевых — от $0,084 \pm 0,0005$ до $0,088 \pm 0,0005$, насыщенности — соответственно от $0,326 \pm 0,0005$ до $0,419 \pm 0,0006$ и от $0,371 \pm 0,0005$ до $0,444 \pm 0,0005$. Установлено, что увеличение числа трещин на рентген-проекциях зерновок пшеницы снижает их посевные качества. Выявлено, что поврежденность семян пшеницы клопом вредной черепашкой можно успешно детектировать с помощью микрофокусной рентгенографии в сочетании с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений, при этом с увеличением балла поврежденности посевные качества семян в целом снижаются. Показано, что электрофотографические характеристики цифровых газоразрядных изображений у семян разных сортов пшеницы неодинаковы: средняя интенсивность изображений варьировалась от $53,30 \pm 1,00$ до $60,60 \pm 1,17$, коэффициент формы — от $6,67 \pm 0,35$ до $8,28 \pm 0,48$, энтропия — от $1,84 \pm 0,06$ до $1,98 \pm 0,03$. Предложенные нами подходы и полученные экспериментальные данные указывают на эффективность инструментальных физических методов при оценке разнокачественности и скрытой дефектности семян пшеницы. Это позволило разработать новое направление в функциональной неинвазивной диагностике качества семян с учетом комплексной оценки внешних и внутренних аномалий и дефектов, существенно влияющих как на биологическую полноценность семян, так и на их хозяйственную пригодность при решении фундаментальных и прикладных задач селекции и управляемого семеноводства.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., пшеница, семена, качество, оптическая визуализация семян, микрофокусная рентгенография семян, электрофотография семян, анализ изображений.

Необходимым условием получения высокого урожая пшеницы и улучшения его качества служит использование полноценно сформированного и здорового зерна в качестве посевного материала (1-3). Отметим, что в настоящее время в Российской Федерации доля некондиционных семян зерновых культур может достигать до 40 % (4). Для контроля качества семенного материала существует ряд стандартных тестов, регламентированных ISTA (International Seed Testing Association, Швейцария), а также перспективных инструментальных методов (5-8).

Прогресс в семеноведении тесно связан с техническими инновациями

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-805 от 02 октября 2020 года).

и их доступностью для применения. Кроме того, на основе технологических достижений разрабатываются новые методы оценки качества семян для их тестирования (9).

Инструментальные методы, потенциально пригодные для неинвазивной оценки качества семян, можно разделить на три группы. Группа оптических методов включает цифровую оптическую визуализацию (10), мультиспектральную визуализацию (11), измерение флуоресценции хлорофилла (12); к интроскопическим методам относятся микрофокусная рентгенография (13, 14), компьютерная микрофотография (15) и магнитно-резонансная томография (16); третью группу составляют электрофизические методы (электрофотография) (17). Метод цифровой оптической визуализации на основе сканирования изображений семян с получением различных числовых характеристик, в том числе цветовых, используется для определения сортовой чистоты семян риса (18), описания и классификации семян сортов льна посевного (19). Метод мягколучевой микрофокусной рентгенографии на протяжении многих лет успешно применяется как в России (13, 20), так и за рубежом (21-24) и включен в международный (25) и российский (26) стандарты. Метод электрофотографии (17), позволяющий регистрировать и количественно оценивать свечение, возникающее вблизи поверхности объекта (семена), помещенного в электромагнитное поле высокой напряженности, имеет определенную перспективу, дополняя общепринятые приемы инструментальной оценки качества семян.

Кроме того, с появлением современных технических и программных средств в семеноведении во всем мире активно используется компьютерный анализ изображений семян (27, 28).

Из перечисленных методов в России стандартизована только микрофокусная рентгенография. С 2022 года она имеет статус действующего национального стандарта ГОСТ Р 59603-2021 (организация-разработчик — ФГБНУ АФИ).

В представленной работе впервые с использованием трех неинвазивных инструментальных физических методов — оптической визуализации, микрофокусной рентгенографии и электрофотографии получены характеристики семян и выявлены их достоверные различия у линий и сортов пшеницы (генетическая разнокачественность) при выращивании в полевых и регулируемых условиях (экологическая разнокачественность) и послеуборочной технологической подработке. Также показано, что поврежденность семян пшеницы клопом вредной черепашкой можно успешно детектировать с помощью микрофокусной рентгенографии в сочетании с автоматическим анализом цифровых рентгеновских изображений.

Цель исследования заключалась в оценке эффективности инструментальных физических методов при изучении скрытой дефектности у экологически разнокачественных семян пшеницы разного генетического происхождения.

Методика. Семена мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) яровых сортов Злата, Радмира, Юбилейная 58 и гибридных линий АФИ 1 (Агата × ITMI29) F₅, АФИ 2 (Агата × ITMI47) F₅, АФИ 7 (Лиза × ITMI10) F₄, h2788 (Злата × Московская) F₁₂, h3021 (Биора × 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). Объемы выборок — 100 семян каждого образца. Семена, полученные из посевов, анализировали оптическим методом цифрового сканирования.

Также использовали образцы семян озимой мягкой пшеницы сорта Светоч, в разной степени поврежденных клопом вредная черепашка (предоставлены А.В. Капусткиной, лаборатория сельскохозяйственной энтомологии ФГБНУ ВИЗР, г. Санкт-Петербург; степень повреждения оценивали визуально по 4-балльной шкале от 0 до 4 баллов) (29) и шесть образцов семян пшеницы из производственных посевов, подвергнутых механической послеуборочной обработке (предоставлены Н.И. Жуковым, ООО «Сильные семена», Краснодарский край, урожай 2020 года). Объемы выборок — по 100 семян. Образцы анализировали методом микрофокусной рентгенографии.

Дополнительно пять образцов семян яровой пшеницы сортов МиС, Злата, Любава, Эстер, Лиза поступили из коллекции ФИЦ Немчиновка (предоставлены академиком РАН Б.И. Сандухадзе, лаборатория селекции и первичного семеноводства озимой пшеницы). Объемы выборок — 50 семян каждого образца. Полученные образцы анализировали методом электрофотографии.

Сканированные изображения семян получали с использованием цифрового планшетного сканера HP ScanJet 200 («Hewlett-Packard», США), формат сохраняемых файлов *.tiff. Программную обработку цифровых сканированных изображений семян осуществляли в программе ВидеоТест-Морфология (ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия). Анализировали следующие параметры цифровых сканированных изображений: соотношение цветов по модели RGB (красный, зеленый, синий, Brightness, единицы яркости); тон (Hue, относительные единицы); насыщенность (Saturation, относительные единицы). Методика получения и обработки сканированных изображений описана ранее (30).

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 3,0×. Обработка цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы осуществлялась в программе ВидеоТест-Морфология. Анализировали два параметра изображений — площадь проекции семени (мм²) и расчетную среднюю яркость, нормированную на площадь проекции (относительные единицы). Методика получения и обработки цифровых рентгеновских изображений описана ранее (31). Электрофотографические (газоразрядные) изображения семян пшеницы получали с использованием программно-аппаратного комплекса ГРВ-Камера Про (разработчик и изготовитель ООО «Биотех-прогресс», г. Санкт-Петербург, Россия). Анализировали следующие параметры: средняя интенсивность (единицы яркости), коэффициент формы (относительные единицы), энтропия (относительные единицы). Методика получения и обработки изображений описана ранее (32).

Оценивали посевные качества семян согласно ГОСТ-12038-84 (М., 2011) с учетом дополнительных показателей — длины проростка (мм) и силы роста (доля сильных проростков, %) (33).

Статистическую обработку экспериментальных данных, в том числе построение регрессионных моделей, проводили с помощью компьютерной программы MS Excel («Microsoft Corp.», США). В тексте и таблицах приведены средние арифметические значения параметров (*M*) и их доверительные интервалы при 95 % уровне вероятности по *t*-критерию Стьюдента

($t_{0,05} \times SEM$).

Результаты. Результаты автоматического анализа цифровых сканированных изображений семян пшеницы представлены на рисунках 1 и 2.

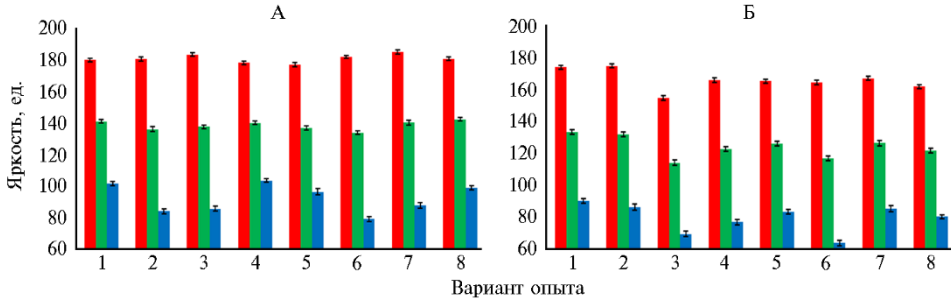


Рис. 1. Цветовые модели RGB (красный, зеленый, синий) семян у сортов и сортообразцов пшеницы, полученных в регулируемых (агробиополигон ФГБНУ АФИ, Ленинградская обл., 2022 год) (А) и полевых (ФГБНУ ФИЦ Немчиновка, Московская обл., 2020 год) (Б) условиях: 1 — АФИ 1 (Агата × ITM129) F₅, 2 — АФИ 2 (Агата × ITM147) F₅, 3 — АФИ 7 (Лиза × ITM110) F₄, 4 — Злата, 5 — Радмира, 6 — Юбилейная 58, 7 — h2788 (Злата × Московская) F₁₂, 8 — h3021 (Биора × Злата) F₄ (по $n = 100$). Представлены средние значения и доверительные интервалы, $M \pm (t_{0,05} \times SEM)$. Цифровой планшетный сканер HP ScanJet 200 («Hewlett-Packard», США); программа обработки цифровых сканированных изображений ВидеоТест-Морфология (ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия).

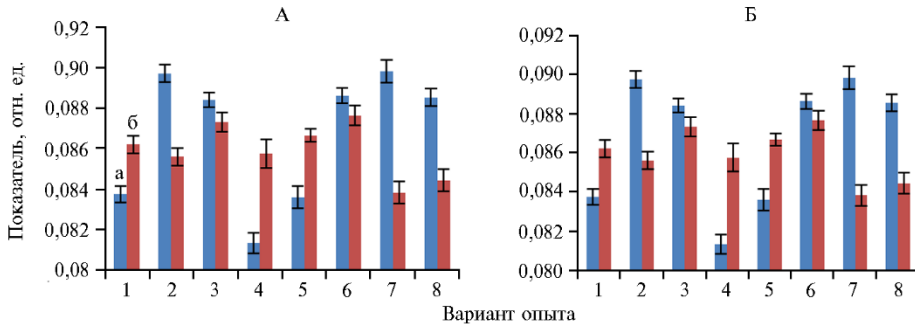


Рис. 2. Тон (А) и насыщенность (Б) цветовых RGB моделей семян у сортов и сортообразцов пшеницы, полученных в регулируемых (агробиополигон ФГБНУ АФИ, Ленинградская обл., 2022 год) и полевых (ФГБНУ ФИЦ Немчиновка, Московская обл., 2020 год) (б) условиях: 1 — АФИ 1 (Агата × ITM129) F₅, 2 — АФИ 2 (Агата × ITM147) F₅, 3 — АФИ 7 (Лиза × ITM110) F₄, 4 — Злата, 5 — Радмира, 6 — Юбилейная 58, 7 — h2788 (Злата × Московская) F₁₂, 8 — h3021 (Биора × Злата) F₄ (по $n = 100$). Представлены средние значения и доверительные интервалы, $M \pm (t_{0,05} \times SEM)$. Цифровой планшетный сканер HP ScanJet 200 («Hewlett-Packard», США); программа обработки цифровых сканированных изображений ВидеоТест-Морфология (ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия).

Было выявлено, что семена сортов и сортообразцов пшеницы различаются между собой по модели RGB — по соотношению цветов (рис. 1, А, Б), тону, и насыщенности цвета (рис. 2, А, Б). Кроме того, мы установили, что семена одних и тех же сортов и сортообразцов пшеницы, полученные в полевых и регулируемых условиях, также значительно различаются по тем же параметрам модели RGB (соотношение цветов, тон, насыщенность (см. рис. 1, А, Б, рис. 2, А, Б)).

Представленные данные дают основание предположить, что различия цветовых характеристик поверхности семян связаны с их сортовыми особенностями и генетическим происхождением изучаемого материала. Кроме того, важно отметить, что условия выращивания также влияют на цветовые характеристики получаемых семян (см. рис. 1, 2).

При визуальном анализе цифровых рентгеновских изображений ше-

сти образцов семян, полученных в производственных посевах пшеницы в Краснодарском крае (рис. 3, А, Б), мы установили, что увеличение числа трещин, которые выявляются на рентген-проекции зерновки, снижает посевные качества семян. Мы связываем это с ростом вероятности проникновения грибной и бактериальной инфекции в зерновку при увеличении числа 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.

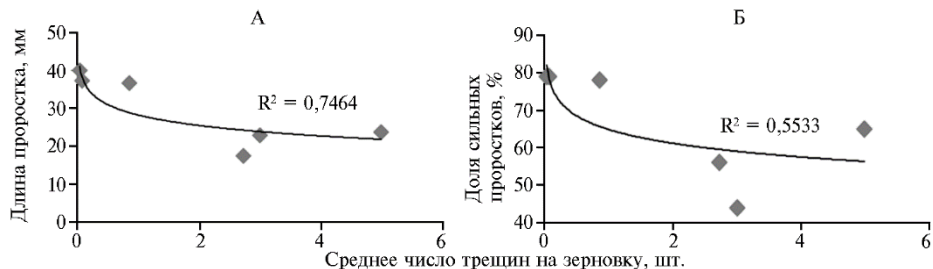


Рис. 3. Показатели посевных качеств у шести образцов семян из производственных посевов пшеницы (ООО «Сильные семена», Краснодарский край, урожай 2020 года) в зависимости от числа трещин, выявляемых на рентген-проекции зерновки (по каждому варианту $n = 100$). Аппаратно-программный комплекс на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», г. Санкт-Петербург, Россия), программа обработки цифровых рентгеновских изображений ВидеоТест-Морфология (ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия).

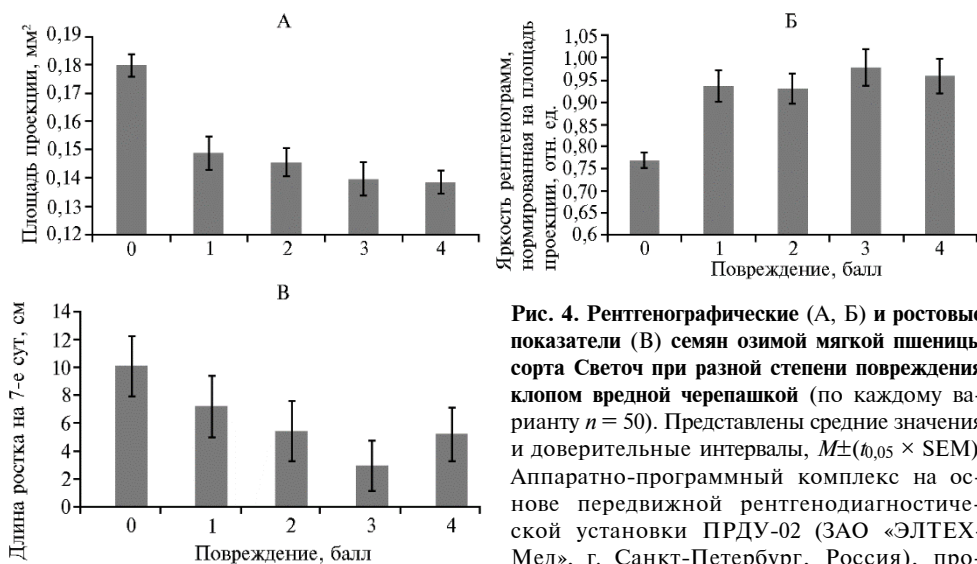


Рис. 4. Рентгенографические (А, Б) и ростовые показатели (В) семян озимой мягкой пшеницы сорта Светоч при разной степени повреждения клопом вредной черепашкой (по каждому варианту $n = 50$). Представлены средние значения и доверительные интервалы, $M \pm (t_{0,05} \times SEM)$. Аппаратно-программный комплекс на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», г. Санкт-Петербург, Россия), программа обработки цифровых рентгеновских изображений ВидеоТест-Морфология (ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия).

Оценка характеристик цифровых рентгеновских изображений семян пшеницы, поврежденных вредной черепашкой, показала, что площадь проекции цифровых рентгенограмм достоверно ($p < 0,05$) снижалась по сравнению с контролем и зависела от степени повреждения, оцененного визуально в баллах (рис. 4, А). Расчетная средняя яркость цифровых рентгенографий зерен, нормированная на площадь проекции, достоверно ($p < 0,05$) увеличивалась по сравнению с контролем при любой степени повреждения вредной черепашкой. Максимальное увеличение этого показателя отмечали при 3-балльном поражении (см. рис. 4, Б). При оценке ростовых показателей было установлено, что длина ростка на 7-е сут при повреждении зерна

вредной черепашкой снижалась, при этом максимальное снижение также отмечали при 3-балльном поражении зерна (см. рис. 4, В). Таким образом, поврежденность клопом вредной черепашкой детектировалась с помощью автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений зерновок. При этом, как было установлено проведенными нами исследованиями, посевные качества семян снижались с увеличением балла повреждения.

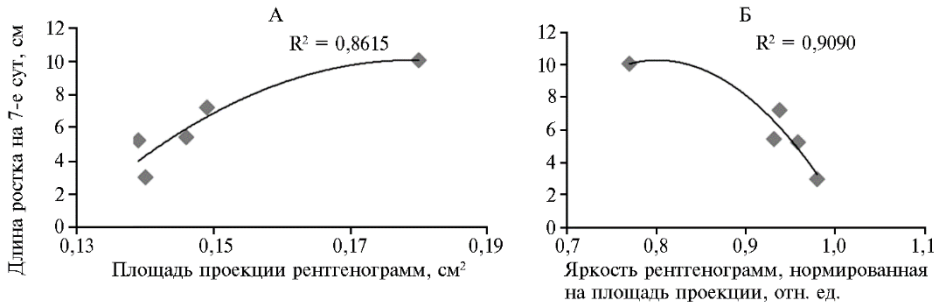


Рис. 5. Ростовые показатели семян озимой мягкой пшеницы сорта Светоч при разной степени повреждения клопом вредной черепашкой в зависимости от площади проекции рентгенограммы зерновки (А) и яркости рентгенограммы, нормированной на площадь проекции (Б) (по каждому варианту $n = 50$; точки на графиках соответствуют баллам повреждения). Аппаратно-программный комплекс на основе передвижной рентгенодиагностической установки ПРДУ-02 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», г. Санкт-Петербург, Россия), программа обработки цифровых рентгеновских изображений ВидеоТест-Морфология (ООО «АргусСофт», г. Санкт-Петербург, Россия).

Результаты электрофотографического анализа цифровых газоразрядных изображений семян у разных сортов яровой пшеницы (образцы из коллекции ФИЦ Немчиновка, по каждому варианту $n = 50$)

Параметр	МиС	Злата	Любава	Эстер	Лиза
Средняя интенсивность, ед. яркости	56,26±0,73	53,30±1,00	55,74±0,97	57,75±0,84	60,60±1,17
Коэффициент формы, отн. ед.	8,28±0,48	8,25±0,38	7,78±0,44	7,12±0,30	6,67±0,35
Энтропия, отн. ед.	1,84±0,06	1,94±0,04	1,87±0,04	1,98±0,03	1,97±0,02

Пр и м е ч а н и е. Представлены средние значения и доверительные интервалы, $M \pm (n,05 \times SEM)$.

Результаты электрофотографического анализа цифровых газоразрядных изображений семян у пяти сортообразцов пшеницы разного генетического происхождения (табл.) показали, что минимальной средней интенсивностью изображений характеризовался сортообразец Злата, максимальной — Лиза, минимальным коэффициентом формы — сортообразец Лиза, максимальным — МиС, минимальной энтропией цифровых газоразрядных изображений — сортообразец МиС, максимальной — Любава. Эти различия, по-видимому, отражают неодинаковое генетическое происхождение изученных образцов, а не влияние эколого-географических факторов (семена были получены в посевах ФИЦ Немчиновка в Московской области в 2015 году). Причины выявленных различий характеристик газоразрядного свечения у семян пшеницы разных сортов нуждаются в дальнейшем исследовании.

Ранее мы установили связь электрофотографических характеристик семян с показателями их жизнеспособности (34), а также биопродуктивностью растений (35). Согласно полученным данным (32), средняя интенсивность цифровых газоразрядных изображений (мера яркости) отрицательно коррелирует с длиной ростка и площадью флагового листа, коэффициент формы (мера изрезанности контура изображения) имеет положительную корреляционную связь с массой 1000 семян (показатель может отражать щуплость зерен, вызванную энзимомикозным истощением).

Примеры изображений семян пшеницы, полученные с использованием различных инструментальных методов, представлены на рисунке 6.

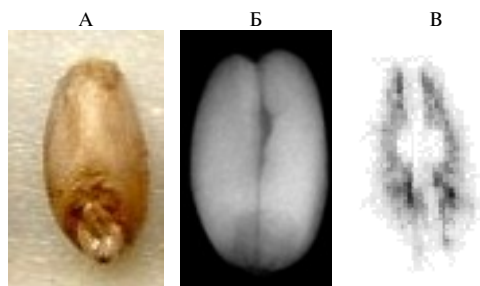


Рис. 6. Примеры цифровых изображений семян пшеницы, полученных с использованием различных инструментальных методов: А — цифровое сканированное изображение (HP ScanJet 200, «Hewlett-Packard», США), Б — цифровое рентгеновское изображение (передвижная рентгенодиагностическая установка ПРДУ-02, Россия), В — цифровое газоразрядное изображение (программно-аппаратный комплекс ГРВ-Камера Про, Россия).

Анализируя представленные результаты, которые были получены с помощью неинвазивных методик и отражают внешние особенности и внутренние структурные нарушения в зерновках, сопряженные с морфофизиологическими показателями проростков, следует отметить, что имеющиеся

в литературе данные по аналогичной тематике носят, в основном, чисто методический характер (14, 15). Они касаются особенностей анализа образов зерновки в зависимости от топографии дефекта, степени его выраженности, а также создания адекватных методов цифровой обработки изображений зерновки для их оценки. Поэтому мы можем сопоставлять представленные данные только с полученными в наших предыдущих исследованиях, которые были посвящены связи рентгенообразов семени и его ростового потенциала. В мировой литературе по семеноведению и семеноводству сведения о влиянии биотических и абиотических факторов (условий выращивания растений) в селекционных и производственных посевах зерновых культур практически отсутствуют.

Представленные здесь результаты являются пионерными в плане оценки влияния экогенных и техногенных факторов на показатели структурной целостности зерновки как в условиях прецизионных опытов, так и в массовых посевах. На основании проведенных исследований нами сформулированы принципы нового направления в функциональной неинвазивной диагностике качества семенного материала. На практике предлагаемая методология позволяет перейти от характеристики биологической полноценности индивидуальной зерновки к показателю хозяйственной пригодности партий семян, получаемых в условиях промышленного семеноводства. Это направление в настоящее время не имеет мировых аналогов. Оно открывает широкие возможности в изучении фундаментальных аспектов контрольно-семенного дела и в разработке принципиально новых способов определения коммерческой стоимости семян на основе комплексной неинвазивной оценки. Такая методология в целом позволяет вывести контрольно-семенное дело в России на уровень выше мирового. Дальнейшие фундаментальные исследования будут посвящены детальному анализу зависимости между физическими и ростовыми показателями. Кроме того, мы планируем в ближайшее время впервые в мире получить данные о связи физических характеристик зерновки, полученных с помощью неинвазивных инструментальных методов, с репродуктивной функцией, количественными и качественными характеристиками индивидуального растения и урожайностью партий семян.

Итак, нами установлено, что цветовые характеристики поверхности семян, оцениваемые с помощью анализа цифровых сканированных изображений, статистически значимо различаются как у разных сортов и

генетических линий пшеницы, так и у одного образца, выращенного в различных экологических условиях (полевых либо регулируемых). Так, тон изображений у семян разных сортов пшеницы при регулируемых условиях выращивания (фитополигон Агрофизического института) изменялся в пределах значений от $0,081 \pm 0,0005$ до $0,090 \pm 0,0006$, в полевых условиях — от $0,084 \pm 0,0005$ до $0,088 \pm 0,0005$, насыщенность — соответственно от $0,326 \pm 0,0005$ до $0,419 \pm 0,0006$ и от $0,371 \pm 0,0005$ до $0,444 \pm 0,0005$. Это может быть использовано как для различения партий семян, так и для определения степени их вызревания. Наличие скрытых дефектов (в частности, трещиноватость эндосперма, выявляемая и оцениваемая с помощью метода микрофокусной рентгенографии в сочетании с визуальной расшифровкой) снижает посевные качества зерна, причем степень выраженности дефекта отражается на ростовых показателях зерновки. Подтверждено, что поврежденность зерна клопом вредной черепашкой можно эффективно выявлять с помощью автоматического анализа цифровых рентгеновских изображений (посевные качества семян снижаются с увеличением балла повреждений). Между сортами пшеницы разного генетического происхождения выявлены статистически значимые ($p < 0,05$) различия характеристик газоразрядного свечения изображений семени. Так, величина средней интенсивности свечения менялась от $53,30 \pm 1,00$ до $60,60 \pm 1,17$, коэффициент формы — от $6,67 \pm 0,35$ до $8,28 \pm 0,48$, энтропия — от $1,84 \pm 0,06$ до $1,98 \pm 0,03$. Предлагаемый нами подход к оценке разнокачественности и скрытой дефектности семян на основе неинвазивных физических методов в настоящее время не имеет мировых аналогов и позволяет перейти от характеристики биологической полноценности индивидуальной зерновки к определению хозяйственной пригодности партий семян, получаемых в условиях промышленного семеноводства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Šramková Z., Gregová E., Šturdíka E. Chemical composition and nutritional quality of wheat grain. *Acta Chimica Slovaca*, 2009, 2(1): 115-138.
2. Ricachenevsky F.K., Vasconcelos M.W., Shou H., Johnson A.A.T., Sperotto R.A. Improving the nutritional content and quality of crops: promises, achievements, and future challenges. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 738 (doi: 10.3389/fpls.2019.00738).
3. Шпилев Н.С., Ториков В.Е., Клименков Ф.И. Совершенствование оригинального семеноводства зерновых культур. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*, 2018, 3(67): 3-5.
4. Архипов М.В., Великанов Л.П., Желудков А.Г., Гусакова Л.П., Алферова Д.В., Потрахов Н.Н., Прияткин Н.С. Возможности биофизических методов в агрофизике и растениеводстве. *Биотехносфера*, 2013, 6(30): 40-43.
5. Pearson T.C., Cetin A.E., Tewfik A.H., Haff R.P. Feasibility of impact-acoustic emissions for detection of damaged wheat kernels. *Digital Signal Processing* 2007, 17(3): 617-633 (doi:10.1016/j.dsp.2005.08.002).
6. Arruda N., Silvio M.C., Gomes F.G.J. Radiographic analysis for the evaluation of polyembryony in Swingle citrangelo seeds. *Journal of Seed Science*, 2018, 40(2): 118-126 (doi: 10.1590/2317-1545v40n2175172).
7. Abud H.F., Cicero S.M., Gomes F.G.J. Radiographic images and relationship of the internal morphology and physiological potential of broccoli seeds. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 2018, 40: e34950 (doi: 10.4025/actasciagr.v40i1.34950).
8. Huang M., Wang Q.G., Zhu Q.B., Qin J.W., Huang G. Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. *Seed Science and Technology*, 2015, 43(3): 337-366 (doi: 10.15258/sst.2015.43.3.16).
9. van Duijn B., Priyatkin N.S., Bruggink H., Gomes F., Boelt B., Gorian F., Martinez M.A. Advances in technologies for seed science and seed testing. *Informativo ABRATES*, 2017, 27(2): 18-22.
10. Dell'Aquila A. Computerised seed imaging: a new tool to evaluate germination quality. *Commun. Biometry Crop Sci.*, 2006, 1(1): 20-31.
11. Boelt B., Shrestha S., Salimi Z., Jørgensen J.R., Nicolaisen M., Carstensen J.M. Multispectral

- imaging — a new tool in seed quality assessment? *Seed Science Research*, 2018, 28(3): 222-228 (doi: 10.1017/S09602585180002353).
12. Jalink H., Frandas A., van der Schoor R., Bino J.B. Chlorophyll fluorescence of the testa of *Brassica oleracea* seeds as an indicator of seed maturity and seed quality. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)*, 1998, 55: 88-93 (doi: 10.1590/S0103-90161998000500016)
 13. Архипов М.В., Потрахов Н.Н. *Микрофокусная рентгенография растений*. СПб, 2008.
 14. Gomes-Junior F.G., Yagushi J.T., Belini U.L., Cicero S.M., Tomazello-Filho M. X-ray densitometry to assess internal seed morphology and quality. *Seed Science and Technology*, 2012, 40(1): 102-107 (doi: 10.15258/sst.2012.40.1.11).
 15. Del Nobile M.A., Laverse J., Lampignano V., Cafarelli B., Spada A. Applications of tomography in food inspection. In: *Industrial tomography. Systems and applications*. Woodhead Publishing, 2015: 693-710 (doi: 10.1016/B978-1-78242-118-4.00025-3)
 16. Foucat L., Chavagnat A., Renou J.-P. Nuclear magnetic resonance micro-imaging and X-radiography as possible techniques to study seed germination. *Scientia Horticulturae*, 1993, 55: 323-331.
 17. Martinez M.A., Priyatkin N.S., van Duijn B. Electrophotography in seed analysis: basic concepts and methodology. *Seed Testing International*, 2018, 156: 53-56.
 18. Widiastutia M.L., Hairmansisb A., Palupia E.R. and Ilyasa S. Digital image analysis using flatbed scanning system for purity testing of rice seed and confirmation by grow out test. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 2018, 19(2): 49-56 (doi: 10.21082/ijas.v.19.n2.2018.p.49-56).
 19. Wiesnerová D., Wiesner I. Computer image analysis of seed shape and seed color for flax cultivar description. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 61(2): 126-135 (doi: 10.1016/j.compag.2007.10.001).
 20. Musaev F., Priyatkin N., Potrakhov N., Beletskiy S., Chesnokov Y. Assessment of *Brassicaceae* seeds quality by X-ray analysis. *Horticulturae*, 2022, 8(1): 29 (doi: 10.3390/horticulturae8010029).
 21. van der Burg W.J., Jalink H., van Zwol R.A., Aartse J.W., Bino R.J. Non-destructive seed evaluation with impact measurements and X-ray analysis. *Acta Horticulturae*, 1995, 362: 149-157.
 22. de Moreira M.L., van Aelst A.C., van Eck J.W., Hoekstra F.A. Pre-harvest stress cracks in maize (*Zea mays* L.) kernels as characterized by visual, X-ray and low temperature scanning electron microscopical analysis: effect on kernel quality. *Seed Science Research*, 1999, 9(3): 227-236 (doi: 10.1017/S0960258599000239).
 23. Silva V.N., Cicero S.M., Bennett M. Relationship between eggplant seed morphology and germination. *Revista Brasileira de Sementes*, 2012, 34(4): 597-604 (doi: 10.1590/S0101-31222012000400010).
 24. Bruggink H., van Duijn B. X-ray based seed image analysis. *Seed Testing International*, 2017, 153: 45-50.
 25. *International Rules for Seed Testing, Full Issue i-19-8*. Switzerland, 2020 (doi: 10.15258/ista-rules.2020.F).
 26. *ГОСТ Р 59603-2021. Семена сельскохозяйственных культур. Методы цифровой рентгенографии*. М., 2021.
 27. Sandeep V.V., Kanaka D.K., Keshavulu K. Seed image analysis: its applications in seed science research. *International Research Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 1(2): 30-36.
 28. Kapadia V.N., Sasidharan N., Patil K. Seed image analysis and its application in seed science research. *Advances in Biotechnology and Microbiology*, 2017, 7(2): 555709 (doi: 10.19080/AIBM.2017.07.555709).
 29. Павлюшин В.А., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Нефедова Л.И., Капусткина А.В. *Вредная черепашка и другие хлебные клопы*. СПб, 2015.
 30. Мусаев Ф.Б., Солдатенко А.В., Балеев Д.Н., Прияткин Н.С., Шукина П.А. Исследование разнокачественности семян овощных культур с использованием компьютерного анализа изображений. *Агрофизика*, 2019, 1: 38-44 (doi: 10.25695/AGRP.2019.01.05).
 31. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Гусакова Л.П., Карамышева А.В., Трофимук Л.П., Потрахов Н.Н., Бессонов В.Б., Шукина П.А. Методика микрофокусной рентгенографии для выявления скрытой дефектности семян древесных лесных пород и других видов сосудистых растений. *Журнал технической физики*, 2020, 90(2): 338-346 (doi: 10.21883/JTF.2020.02.48830.178-19).
 32. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Гусакова Л.П., Борисова М.В., Колесников Л.Е. *Методика исследования характеристик газоразрядного свечения семян*. СПб, 2016.
 33. Алексейчук Г.Н., Ламан Н.А. *Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки (методическое руководство)*. Минск, 2005.
 34. Kolesnikov L.E., Razumova I.E., Radishevskiy D.Y., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Kolesnikova Y.R. 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. *Agronomy Research*, 2021, 19(4): 1791-1812 (doi: 10.15159/ar.21.152).
 35. Архипов М.В., Прияткин Н.С., Колесников Л.Е. Прогнозирование урожайности и устой-

чивости к болезням мягкой пшеницы с использованием методов интроскопического анализа зерна. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*, 2016, 44: 21-27.

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,
e-mail: prini@mail.ru ✉, agrorentgen@mail.ru, art122@bk.ru,
galinanm@gmail.com, yuv_chesnokov@agrophys.ru

Поступила в редакцию
29 июля 2022 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2022, V. 57, № 5, pp. 911-920

EVALUATION OF HETEROGENEITY AND HIDDEN DEFECTS OF WHEAT (*Triticum aestivum* L.) SEEDS BY INSTRUMENTAL PHYSICAL METHODS

N.S. Priyatkin✉, M.V. Arkhipov, P.A. Shchukina, G.V. Mirskaya, Yu.V. Chesnokov

Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail prini@mail.ru (✉ corresponding author), agrorentgen@mail.ru, art122@bk.ru, galinanm@gmail.com, yuv_chesnokov@agrophys.ru
ORCID:

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

Mirskaya G.V. orcid.org/0000-0001-6207-736X

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

Chesnokov Yu.V. orcid.org/0000-0002-1134-0292

Shchukina P.A. orcid.org/0000-0002-5223-8374

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported financially from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement with the Ministry of Education and Science of Russia No. 075-15-2020-805 dated 10/02/2020)

Received July 29, 2022

doi: 10.15389/agrobiologia.2022.5.911eng

Abstract

For quality control of seed material, there are a number of standard tests adopted by ISTA (International Seed Testing Association, Switzerland) as well as promising instrumental methods evaluating the characteristics of seed surface, structural integrity and integral electrophysical parameters. The aim of the study was to evaluate the efficiency of instrumental physical methods in detection of latent defects of ecologically heterogeneous wheat seeds of various genetic origin. Diversity and latent defectiveness of wheat seeds (*Triticum aestivum* L.) were evaluated using optical imaging, microfocus radiography, and electrophotography. It was found that the optical imaging method combined with automatic analysis of digital scanned images is statistically reliable to distinguish wheat seeds of different varieties and genetic lines by color characteristics of the RGB (red, green, blue) model, e.g., Hue and Saturation. Differences were also found between the seeds of the same variety and genetic line grown under field and regulated conditions. E.g., the Hue values varied from 0.081 ± 0.0005 to 0.090 ± 0.0006 for regulated conditions (the phytopolygon of the Agrophysical Research Institute) and from 0.084 ± 0.0005 to 0.088 ± 0.0005 for field conditions, the Saturation values — from 0.326 ± 0.0005 to 0.419 ± 0.0006 and from 0.371 ± 0.0005 to 0.444 ± 0.0005 , respectively. With an increase in the number of cracks in the X-ray projections of wheat grains, their sowing qualities decrease. Microfocus radiography combined with automatic analysis of digital X-ray images successfully detects the damage to wheat seeds by the corn bug, and with the increase of the damage score the sowing quality of seeds in general decreases. Parameters of the digital X-ray images of seeds (Average Intensity, Shape Coefficient, and Entropy) differed between wheat varieties. The Average Intensity varied from 53.30 ± 1.00 to 60.60 ± 1.17 , the Form coefficient from 6.67 ± 0.35 to 8.28 ± 0.48 , and Entropy from 1.84 ± 0.06 to 1.98 ± 0.03 . The research data indicate the effectiveness of the approaches we propose based on instrumental physical methods in the assessment of different quality and latent defectiveness of wheat seeds. Our findings make a background for the functional non-invasive diagnosis of seed quality based on the complex evaluation of external and internal anomalies and defects, significantly affecting both the biological quality of seeds and their economic suitability. This is a methodologically new tool to be used in breeding and controlled seed production.

Keywords: *Triticum aestivum* L., wheat, seed quality, optical imaging, microfocus X-ray imaging, electrophotography, image analysis.