

Комплексная неинвазивная экспресс-оценка разнокачественности семян у различающихся по фотопериодической реакции сельскохозяйственных культур в условиях светокультуры

© М.В. Архипов,^{1,2} Н.С. Прияткин,¹ Л.П. Гусакова,¹ Г.В. Мирская,¹ Н.Г. Синявина,¹ О.Р. Удалова,¹ Г.Г. Панова¹

¹ Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220 Санкт-Петербург, Россия

² Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения
Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,
196608 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: prini@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 февраля 2026 г.

В окончательной редакции 10 июля 2026 г.

Принято к публикации 10 июля 2026 г.

Представлены данные по изучению влияния различных фотопериодов на качество семян яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и сои культурной (*Glycine max* (L.) Merrill), выращенных в регулируемых условиях агробиополигона „Агрофизический научно-исследовательский институт“ (АФИ). Для исследования качества семян был использован набор методов: цифровое сканирование в сочетании с автоматическим анализом изображений; микрофокусная рентгенография, с визуальным и автоматическим дешифрированием рентгеновских снимков; морфометрия. Впервые с помощью оптических, рентгенографических и морфометрических методов установлено, что для исследованных образцов длиннодневной яровой мягкой пшеницы и короткодневной сои культурной более благоприятным для формирования биологически полноценных семян является: для семян пшеницы — более продолжительный фотопериод (18 h) по сравнению с фотопериодом 10 h; для семян сои — более короткий фотопериод (14 h) по сравнению с фотопериодом 18 h. Данные результаты совпадают с концепцией, разработанной ранее в отделе светофизиологии растений и биопродуктивности агроэкосистем АФИ о реакции длиннодневных и короткодневных растений на продолжительность светового и темного периодов.

Ключевые слова: технологии неинвазивной оценки, физические методы исследования семян, яровая мягкая пшеница *Triticum aestivum* L., соя культурная *Glycine max* (L.) Merrill, разнокачественность семян, оптометрические и рентгеновские показатели, различные фотопериоды, интенсивная светокультура.

DOI: 10.61011/JTF.2026.11.63781.38-26

Введение

Наличие скрытых дефектов и аномалий структуры семени требует применения высокоточных неинвазивных методов их выявления и корреляционного анализа оценки зависимости роста и продуктивности растений от наличия указанных нарушений качественных характеристик семенного материала. Такой подход уже давно используется в медицине. В отличие от медицинских объектов биологические объекты сельскохозяйственного назначения характеризуются существенно меньшими размерами, в связи с чем для них была разработана специализированная рентгеновская аппаратура с прямым рентгеновским увеличением [1]. Ее использование в исследовательских работах Агрофизического института (АФИ) в восьмидесятых-девяностых годах прошлого столетия позволило выявить и идентифицировать разные типы скрытых дефектов в семенах различных сельскохозяйственных культур [1]. В проведенных учеными института мелкоделяночных экспериментах и производственных посевах было установлено, что при использовании различных агротехнологий доля внутренней поврежден-

ности семени (как зародыша, так и эндосперма) может значительно варьироваться и достигать в отдельных случаях 100 суммарная доля повреждений и степень их влияния на ростовой потенциал и продуктивность растений в большей степени была характерна для промышленных партий семян [2].

Такой подход являлся принципиально новым в методике опытного дела, и его дальнейшее развитие как дополнительного метода контроля качества семенного материала привело к созданию первого цифрового рентгеновского стандарта в мировой практике семенного контроля при проведении прецизионных экспериментов и опытов с производственными партиями семян для однозначной трактовки причин изменения интенсивности прорастания семян на ранних этапах онтогенеза. К сожалению, при работе с семенами зависимость генетических, цитологических и физиологических показателей от условий формирования семян, приводящих к скрытой неоднородности их формообразующих органов, до настоящего времени не рассматривалась и не учитывалась [1]. Это требует выведения научных прикладных исследований в семенном контроле на новый уровень

строгой количественной оценки скрытой поврежденности семян, более глубокого понимания механизмов возникновения указанных дефектов при выращивании растений по различным агротехнологиям, а также разработки путей минимизации степени внутренней поврежденности семенного материала в целях получения высокого уровня его биологической полноценности и хозяйственной пригодности.

Разработанный в АФИ принципиально новый научно-методический подход для анализа скрытой целостности структуры семени в настоящее время в качестве дополнительного метода обязательной оценки качества семян прорабатывается для включения в качестве раздела методики опытного дела. Пионерные разработки ученых АФИ нашли свое отражение в работах отечественных и зарубежных исследователей на семенах зерновых, зернобобовых, масличных, овощных, многолетних трав, а также для семян лесных, лекарственных и цветочных растений [1,3].

Исследование особенностей взаимодействия „гено-тип-среда“ у различных сельскохозяйственных культур в регулируемых условиях, в частности, в зависимости от фотопериода, интенсивности и спектрального состава радиации дает возможность, с использованием комплексного подхода, включающего не только рентгеновские, но и оптические методы анализа, дающих информацию о состоянии внешних признаков семени, глубже понять фундаментальные основы продукционного процесса растений и возможности управления им в агроэкосистемах [4]. С применением современных биофизических и генетико-селекционных методик, био-, нано-, агротехнологий и прикладной цифровизации это может послужить фундаментом при создании высокоценных и продуктивных форм растений [5–7].

Одним из важнейших факторов окружающей среды, влияющих на качество семян и конечную урожайность, является продолжительность светового периода. Способность живых организмов реагировать на длину светового и темного периодов получила название фотопериодической реакции (ФПР) [8].

Фотопериод является важнейшим фактором, который влияет на процессы роста, развития и особенно цветения растений [9] и соответственно на закладку, формирование семян. Оценка состояния внешних и внутренних структур семени в регулируемых условиях позволит получить информацию, позволяющую глубже понять причины формирования семян с высоким уровнем биологической и хозяйственной продуктивности.

Выявление качества семян современными перспективными методами для успешного производства растительной продукции, в том числе зерновых и зернобобовых культур, является насущной и необходимой задачей. Существующие стандартные методы по проращиванию и/или биохимическому окрашиванию семян в лабораторных условиях довольно длительны и трудозатратны. При этом семена повреждаются и не могут быть использова-

ны для дальнейших исследований и/или последующего выращивания из них растениеводческой продукции.

В настоящее время наиболее перспективным методом исследования внутренней неоднородности и скрытой дефектности семян является цифровая микрофокусная рентгенография с прямым рентгеновским увеличением. Из всех имеющихся на сегодняшний день инструментальных методов оценки качества семян он — единственный стандартизованный (ГОСТ Р 59603-2021; ISTA Rules).

Физические принципы и методические аспекты метода микрофокусной рентгенографии детально описаны ранее в работах [10,11]. На сегодняшний день рентгенографический метод получил широкое распространение в области растениеводства как у нас в стране, так и за рубежом, и, в частности, для оценки семян зерновых [12,13], зернобобовых и масличных [14], овощных [15,16], плодовых и ягодных культур [17,18], декоративных и редких видов дикорастущих растений [19], а также древесных лесных пород [20].

Наряду с этим, для оценки внешних признаков семян широко применяется метод цифрового сканирования в сочетании с компьютерным анализом изображений.

Таким образом, цифровое сканирование, несмотря на свою методологическую простоту и высокую операционную эффективность, демонстрирует ряд ограничений. Частичное преодоление этих ограничений возможно посредством оптимизации программного обеспечения и расширения набора измеряемых параметров. Тем не менее для анализа более тонких характеристик семян, таких как их физиологическая зрелость, требуется применение более сложных систем получения изображений, функционирующих на основе альтернативных физических принципов, например, приборов для измерения флуоресценции хлорофилла и мультиспектральной визуализации [21–23].

Цель работы — изучить с помощью оптических, рентгенографических и морфометрических методов качество семян яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и сои культурной (*Glycine max* (L.) Merrill), сформированных при различных фотопериодах в условиях интенсивной светокультуры.

1. Материалы и методы исследований

Материалом исследований служили семена шести сортов и двух генетических линий яровой мягкой пшеницы, выращенных при различных фотопериодах (18 и 10 h), а также семена шести сортов сои культурной, выращенных при различных фотопериодах (18 и 14 h). Образцы семян получены в вегетационных опытах в регулируемых условиях агробиополигона АФИ. Описание растительных образцов и вариантов опыта приведено в табл. 1 и 2.

В настоящей работе использовались следующие методы исследований:

Таблица 1. Сорта яровой мягкой пшеницы и варианты опыта

№ п.п.	Наименование сорта	Вариант опыта (длина фотопериода), h
1	Сорт Агата	18
2	Сорт Агата	10
3	Сорт Лиза	18
4	Сорт Лиза	10
5	Сорт Opata	18
6	Сорт Opata	10
7	Сорт Asakaze Komudi	18
8	Сорт Asakaze Komudi	10
9	Сорт Ленинградская ранняя	18
10	Сорт Ленинградская ранняя	10
11	Сорт Sonora	18
12	Сорт Sonora	10
13	Линия АФИ 91	18
14	Линия АФИ 91	10
15	Линия АФИ 177	18
16	Линия АФИ 177	10

Таблица 2. Сорта сои культурной и варианты опыта

№ п.п.	Наименование сорта	Вариант опыта (длина фотопериода), h
1	Славия	18
2	Славия	14
3	Ирбис	18
4	Ирбис	14
5	Баргузин	18
6	Баргузин	14
7	Гном	18
8	Гном	14
9	Вилана	18
10	Вилана	14
11	Олимпия	18
12	Олимпия	14

1. Метод микрофокусной рентгенографии в сочетании с визуальным и автоматическим дешифрированием рентгеновских снимков. Цифровые рентгеновские

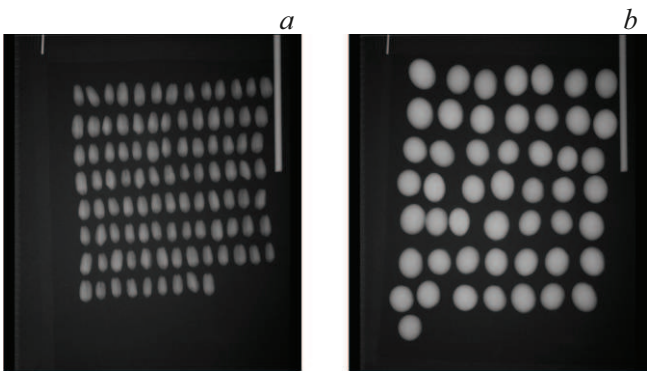


Рис. 1. Пример цифрового рентгеновского изображения семян пшеницы (а), сои (b).

изображения семян получали на передвижной рентгенодиагностической установке ПРДУ-02 — организация-разработчик и предприятие-изготовитель: ЗАО „ЭЛТЕХ-Мед“, Санкт-Петербург, Россия. Коэффициент увеличения изображения составлял 3.0× для рентгеновской съемки. Рентген-съемка образцов семян осуществлялась с использованием предложенного эталона (графитового стержня толщиной 2 mm) для обеспечения стандартизованных условий рентген-съемки и денситометрической автоматической оценки рентген-образов семян с целью повышения достоверности полученных результатов (рис. 1).

Визуальное дешифрирование полученных цифровых рентгеновских изображений семян осуществлялось оператором-рентгенологом. Выделялся ряд типов дефектов (рис. 2).

Количественный анализ цифровых рентгеновских изображений выполнен с использованием программного обеспечения „ВидеоТест-Морфология 5.2“. Анализировались параметры:

1) нормированная средняя яркость проекции (относительные единицы);

2) цифровое сканирование образцов семян. В исследованиях применялся планшетный сканер EPSON Perfection V39 II, программное обеспечение для анализа изображений „ВидеоТест-Морфология 5.2“. Анализировались:

- размер: площадь проекции (mm²),
- форма: округлость (относительные единицы),
- цвет: тон (относительные единицы);

3) статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью компьютерной программы MS Excel. В тексте и графиках приведены средние арифметические значения параметров и их доверительные интервалы при 95%-ном уровне вероятности по t-критерию.

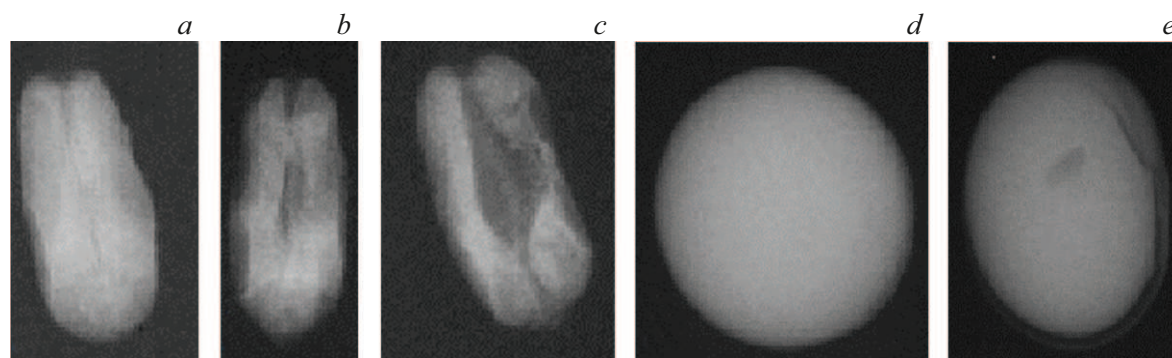


Рис. 2. Характерные рентгенографические признаки семян яровой мягкой пшеницы (*a–c*) и сои (*d, e*), влияющие на их качественные показатели: *a* — нормальное семя пшеницы; *b* — энзимо-микозное истощение (ЭМИС); *c* — характерное расширение бороздки; *d* — нормальное семя сои; *e* — затемнения по краям рентген-проекции семени.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Краткое описание комплексной методики на основе оптического, морфометрического и рентгеновского методов в сочетании с визуальным и автоматическим дешифрированием цифровых рентгеновских изображений семян

Методика на основе оптического (цифровое сканирование в сочетании с компьютерным анализом) и морфометрического методов (измерение размера, формы и цветности изображений семян) включала в себя получение цифровых сканированных изображений карточек с наклеенными семенами с разрешением 600 dpi в формате JPG. Компьютерный анализ сканированных изображений включал в себя калибровку (привязку к реальным геометрическим величинам), интерактивное выделение объектов (контуров семян) с использованием программного инструмента („объект сплайном“), автоматический морфометрический расчет основных параметров изображений семян, которыми являлись: площадь проекции (mm^2), округлость проекции (относительные единицы), цветовой тон (относительные единицы).

Методика рентгеновского метода в сочетании с визуальным и автоматическим дешифрированием цифровых рентгеновских изображений семян включала в себя рентген-съемку карточек с наклеенными семенами, сохранение изображений в формате JPG. Визуальная расшифровка снимков на предмет наличия скрытых дефектов в семенах осуществлялась оператором-рентгенологом. Результатом был протокол с указанием процента дефектных (по выделяемым типам) семян в исследуемом образце. Компьютерный анализ сканированных изображений включал в себя калибровку (привязку к реальным геометрическим величинам), интерактивное выделение объектов (контуров семян) с использованием программного инструмента „объект сплайном“, автоматический расчет яркостных параметров изображений

семян, в частности, нормированную среднюю яркость проекции семени (относительные единицы). В качестве эталона служила измеренная средняя яркость графитового стержня толщиной 2 mm.

Таким образом, комплексная методика позволила получить экспериментальные данные как по внешним, так и по внутренним признакам семян яровой мягкой пшеницы и сои культурной.

2.2. Результаты морфометрического анализа образцов семян яровой мягкой пшеницы и сои культурной

Морфометрический анализ проводился на примере восьми и шести образцов семян пшеницы и сои соответственно.

2.2.1. Семена пшеницы

Выявлено, что семена яровой мягкой пшеницы, выращенные в условиях фотопериода 18 h, в пяти случаях (вариантах) из восьми были более крупными (в среднем в 2 раза) и более округлыми (в среднем в 1.3 раза в семи случаях из восьми) по сравнению с семенами, выращенными в условиях десятичасового фотопериода (рис. 3).

Это свидетельствует о том, что длительный фотопериод является более благоприятным для формирования биологически полноценных семян пшеницы.

Значения индекса цвета „Тон поверхности семени“ в пяти случаях из восьми значимо был ниже у семян, выращенных в условиях фотопериода 10 h (в среднем в 1.3 раза) (рис. 4).

2.2.2. Семена сои

В результате морфометрического анализа семян сои культурной установлено, что семена, полученные в условиях четырнадцатичасового фотопериода, в четырех из шести случаев были значимо крупнее (в среднем

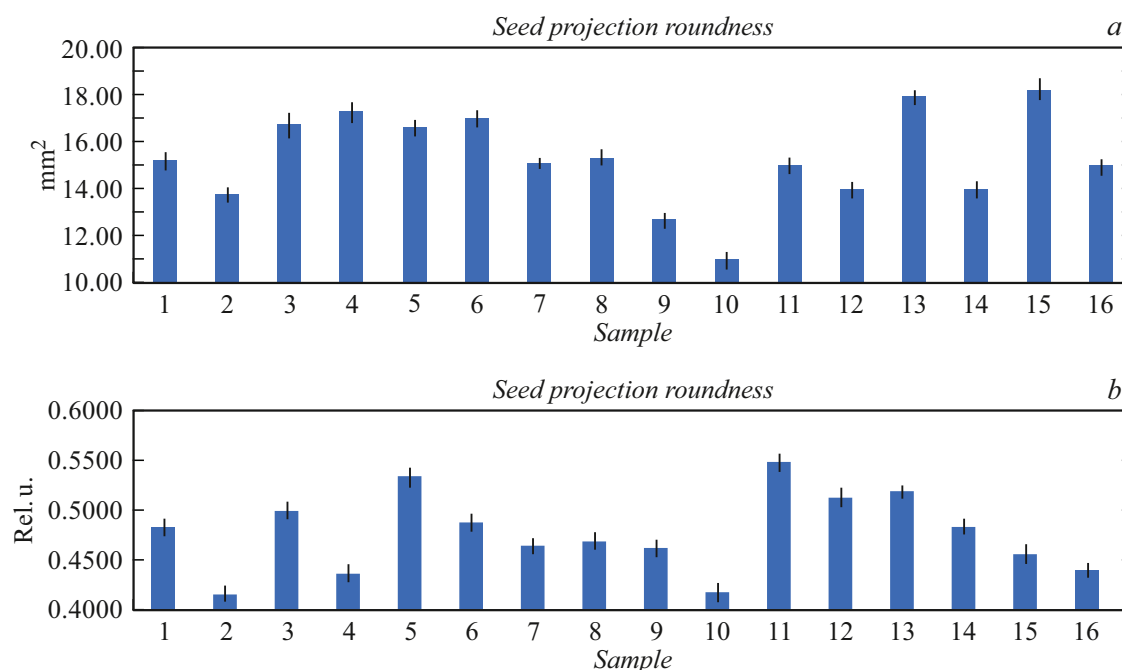


Рис. 3. Результаты морфометрического анализа семян яровой мягкой пшеницы по параметрам: *a* — площадь проекции семени; *b* — округлость проекции семени. Наименования сортов и длительности фотопериода приведены в табл. 1.

в 1.3 раза) по сравнению с семенами, полученными в условиях восемнадцатичасового фотопериода. Во всех шести случаях значения показателя „Тон поверхности семени“ был несколько выше (в среднем в 1.2 раза) в случае восемнадцатичасового фотопериода (рис. 5). Это свидетельствует о том, что четырнадцатичасовой (короткий) фотопериод по показателю „площадь проекции“ является более благоприятным для формирования биологически полноценных семян сои.

2.3. Результаты рентгенографического анализа образцов семян яровой мягкой пшеницы и сои культурной

2.3.1. Семена пшеницы

Выявлено, что частота встречаемости признака „ЭМИС (энзимо-микозное истощение семян (EMSE — *enzymo-mycotic seed exhaustion*))“ в исследованных образцах семян яровой мягкой пшеницы варьировалась в диапазоне от 0% до 38%; признака „характерное расширение бороздки“ — в диапазоне от 0% до 58% (рис. 6).

Необходимо отметить, что выращивание растений яровой мягкой пшеницы в условиях десятичасового фотопериода в среднем значительно увеличило процент зерновок с ЭМИС в семи случаях из восьми. Закономерностей в частоте встречаемости дефекта „характерное расширение бороздки“ в зависимости от длины фотопериода выявлено не было.

Автоматический анализ цифровых рентгеновских изображений семян яровой мягкой пшеницы позволяет говорить о тенденции к снижению значения показателя „Средняя яркость рентген-проекции семени, нормированная на эталон“, полученных при десятичасовом фотопериоде по сравнению с восемнадцатичасовым фотопериодом (рис. 7). Это может потенциально свидетельствовать о негативном влиянии избыточного темнового периода на качество семян пшеницы.

2.3.2. Семена сои

Визуальное дешифрирование цифровых рентгеновских изображений семян сои культурной по показателю „затемнения по краям рентген-проекции семени“, выявило повышенное значение этого показателя (в среднем в 1.2 раза) у семян, полученных в условиях четырнадцатичасового фотопериода (рис. 8). Эти результаты требуют проведения дополнительных экспериментов.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологии посева семян и имеют большое значение для развития, как теории экологической науки, так и сельскохозяйственной практики. К настоящему времени по данной тематике можно отметить следующие работы: на семенах зерновых культур — овса, пшеницы и тритикале, ячменя [24–27], и зернобобовых — сои [28,29]. В частности, было показано, что в условиях фитотрона в зависимости от фотопериода (8, 16 или 24 h) больше всего изменялись такие посевные качества, как крупность и показатели силы роста семян [30]. Удлинение периода освещения при

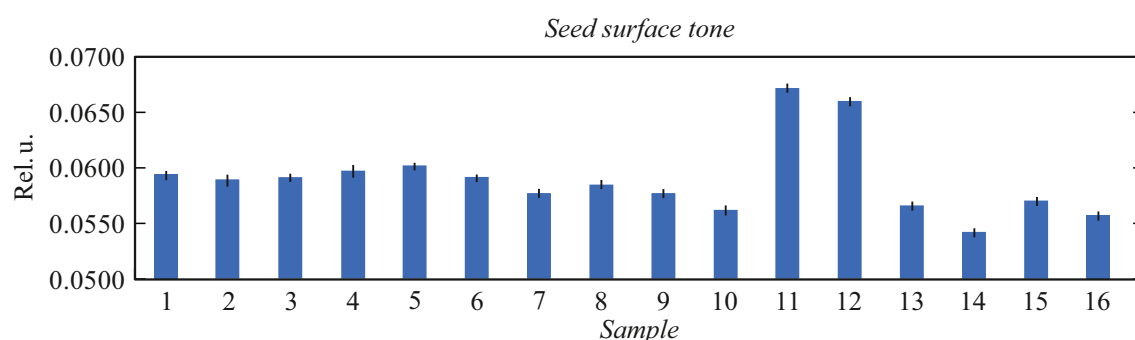


Рис. 4. Результаты морфометрического анализа семян яровой мягкой пшеницы по параметру „Тон поверхности семени“. Наименования сортов и длительности фотопериода приведены в табл. 1.

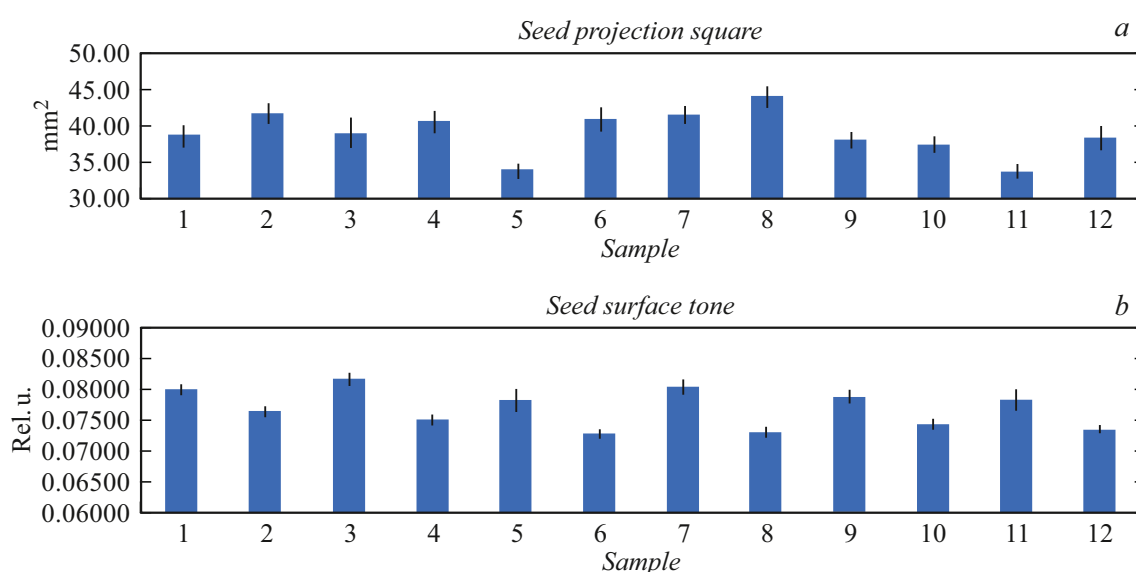


Рис. 5. Результаты морфометрического анализа семян сои культурной по параметрам „Площадь проекции семени и „Тон поверхности семени“. Наименования сортов и длительности фотопериода приведены в табл. 2.

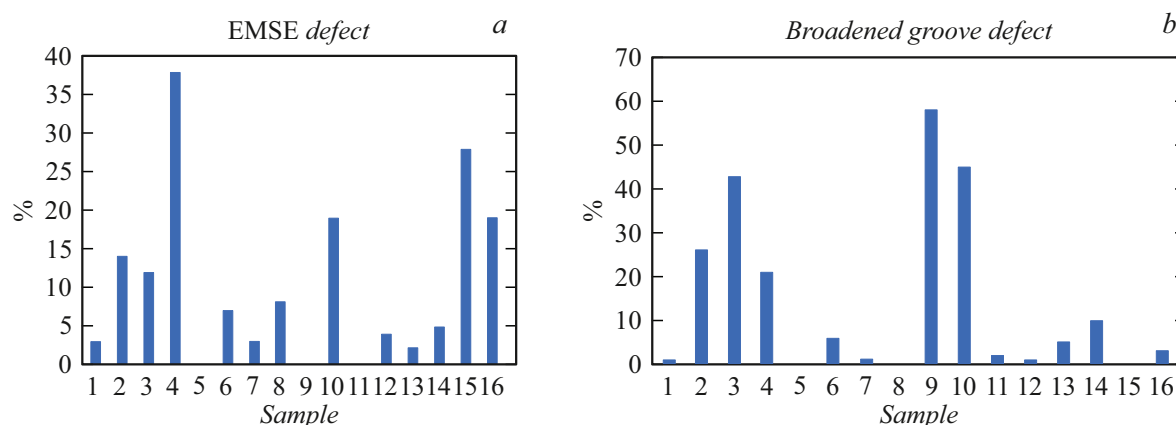


Рис. 6. Результаты анализа скрытой дефектности семян яровой мягкой пшеницы по выделяемым типам: *a* — ЭМИС; *b* — характерное расширение бороздки. Наименования сортов и длительности фотопериода приведены в табл. 1.

выращивании проростков пшеницы методом аэропоники привело к увеличению длины и массы проростков на

15% и 38%, а корневой системы на 65% и 118% соответственно [27].

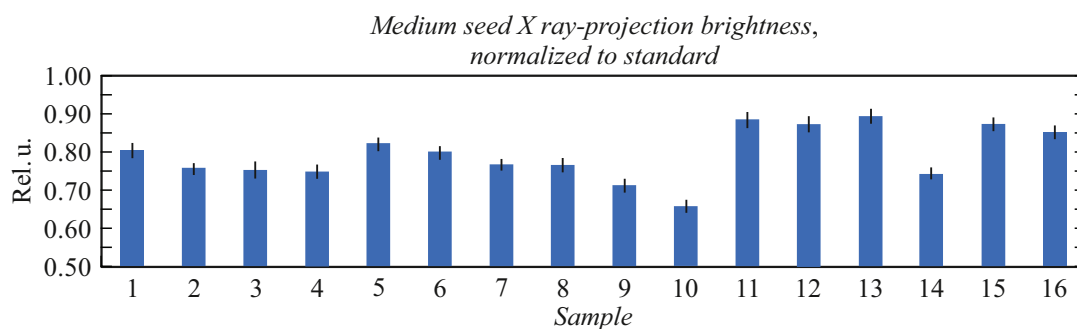


Рис. 7. Нормированная средняя яркость цифровых рентгеновских изображений семян яровой мягкой пшеницы. Наименования сортов и длительности фотопериода приведены в табл. 1.

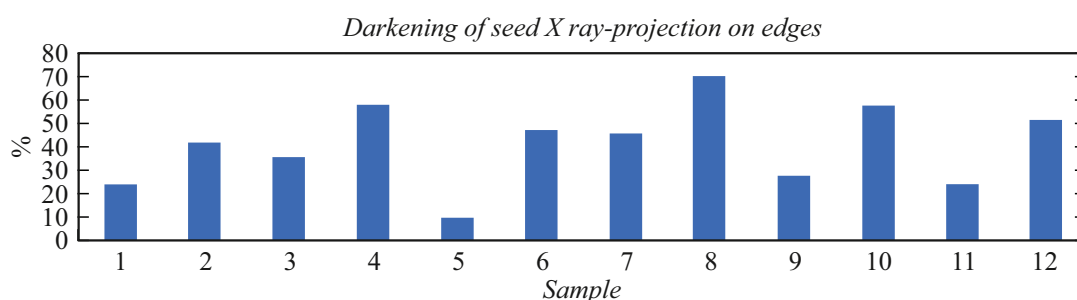


Рис. 8. Затемнения по краям рентген-проекции семян сои культурной. Наименования сортов и длительности фотопериода приведены в табл. 2.

Отметим, что исследования других авторов включают в себя изучение влияния длины фотопериода на посевные качества семян (масса 1000 семян, всхожесть), а также биометрические показатели проростков. Данные по инструментальной оценке разнокачественности семян, полученные при выращивании растений в условиях различных фотопериодов, в литературе отсутствуют.

Заключение

Проблема сохранения биоразнообразия растений, проявляющаяся в гетерогенности семенных партий, остается актуальной задачей современного растениеводства. Данная проблема усугубляется различиями в абиотических и биотических факторах среды, влияющих на формирование семенного материала как в естественных экосистемах, так и в условиях агроценозов. Обширный массив экспериментальных данных в области семеноведения и семеноводства свидетельствует о том, что семенная партия является полиморфной совокупностью, где отдельные семена обладают неравноценным потенциалом продуктивности. Эти различия выражаются в вариабельности биохимических, морфометрических, химических и иных признаков. Эти вариации детерминированы как лимитирующими факторами внешней среды произрастания, так и эндогенными процессами, регулирующими формирование биологически полноценной зерновки на различных стадиях онтогенеза рас-

тительного организма. Работы по комплексной оценке качества семян по оптическим, морфометрическим и рентгенографическим показателям проводятся в секторе биофизики растений и были посвящены, в том числе, влиянию режимов формирования семян в регулируемых условиях. Однако влияние фотопериода на показатели качества семян, учитывающие скрытую целостность зерновки, детально не изучалось.

В работе впервые были получены данные по комплексной (оптической, морфометрической и рентгеновской) оценке качества семян для различных сортов и сортообразцов пшеницы и сои, контрастных по длине фотопериода. В работе для длиннодневной пшеницы продолжительность светового периода составляла 18 и 10 h, а для короткодневной сои — 18 и 14 h.

Показано, что у семян яровой мягкой пшеницы, сформированных в условиях длительного фотопериода (18 h), морфометрические показатели были в 1.3–2 раза выше, чем у семян, сформированных при более коротком фотопериоде (10 h). Эти результаты свидетельствуют о большей крупности семян, сформированных при длительном фотопериоде.

Установлено с помощью метода рентгенографии, что у семян яровой мягкой пшеницы скрытый дефект — ЭМИС (описанный в ГОСТ Р 59603-2021) имеет достоверно более высокие значения в условиях десятичасового фотопериода, кроме одного варианта (линия АФИ 177), а различия по показателю дефекта — рас-

ширенная бороздка — определяются в большей степени сортовыми различиями, чем длиной фотопериода.

Показано, что у семян сои, сформированных в условиях более короткого фотопериода (14 h), оптометрические показатели площади проекции сканированных семян были в 1.3 раза выше, чем у семян, сформированных при более длительном фотопериоде (18 h). Эти результаты свидетельствуют о большей крупности семян, сформированных при коротком фотопериоде.

Таким образом, проведение комплексной неинвазивной экспресс-оценки разнокачественности сформированных в условиях светокультуры семян сельскохозяйственных растений с различным фотопериодом позволяет получить новые знания о его влиянии на качество получаемых семян.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.В. Архипов, Н.Н. Потрахов. *Микрофокусная рентгенография растений* (Технолит, СПб., 2008)
- [2] В.Н. Савин, М.В. Архипов, Л.П. Гусакова. *Аграрная наука*, **2**, 23 (1997).
- [3] Ф.Б.О. Мусаев, С.Л. Белецкий. *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*, **24** (6), 6 (2021). DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-6-15
- [4] И.Б. Усков, В.П. Якушев, Ю.В. Чесноков. *С.-х. биол.*, **57** (3), 403 (2022). DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.403
- [5] Ю.В. Чесноков. *С.-х. биол.*, **54** (5), 863 (2019). DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.863
- [6] Г.Г. Панова, О.Р. Удалова, Е.В. Канаш, А.С. Галушко, А.А. Кочетов, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, И.Н. Черноусов. *ЖТФ*, **90** (10), 1633 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429.19 [G.G. Panova, O.R. Udalova, E.V. Kanash, A.S. Galushko, A.A. Kochetov, N.S. Priyatkin, M.V. Arkhipov, I.N. Chernousov. *Tech. Phys.*, **90** (10), 1533 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220100163]
- [7] Н.Г. Синявина, Г.Г. Панова, Т.Э. Кулешова, Ю.В. Чесноков. *С.-х. биол.*, **59** (5), 869 (2024). DOI: 10.15389/agrobiology.2024.5.869
- [8] Т.И. Голованова. Автореф. докт. дисс. (Красноярск, Сибирский Федеральный университет, 2009)
- [9] М.Х. Чайлахян. *Успехи соврем. биол.*, **78** (01), 92 (1974).
- [10] М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, Н.Н. Потрахов, А.Ю. Грязнов, В.Б. Бессонов, Н.Е. Староверов. *ЖТФ*, **89** (4), 627 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.04.47324.170-18 [M.V. Arkhipov, N.S. Priyatkin, L.P. Gusakova, N.N. Potrakhov, A.Yu. Gryaznov, V.B. Bessonov, A.V. Obodovskiy, N.E. Staroverov. *Tech. Phys.*, **64** (4), 582 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219040030]
- [11] М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, А.В. Карамышева, Л.П. Трофимук, Н.Н. Потрахов, В.Б. Бессонов, П.А. Щукина. *ЖТФ*, **90** (2), 338 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48830.178-19 [M.V. Arkhipov, N.S. Priyatkin, L.P. Gusakova, A.V. Karamysheva, L.P. Trofimuk, N.N. Potrakhov, V.B. Bessonov, P.A. Shchukina. *Tech. Phys.*, **65** (2), 324 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220020024]
- [12] F.G. Gomes Junior, S.M. Cicero, C.M.P. Vaz, P.R.O. Lasso. *Acta Sci. Agron.*, **41** (1), e42608 (2019). DOI: 10.4025/actasciagron.v41i1.42608
- [13] F. França-Silva, S.M. Cicero, F.G. Gomes Junior, A.D. Medeiros, J.B. França-Neto, D.C.F.S. Dias. *J. Seed Sci.*, **44**, e202244023 (2022). DOI: 10.1590/2317-1545v44258703
- [14] C.H.Q. Rego, S.M. Cicero, F. França-Silva, F.G. Gomes Junior. *J. Seed Sci.*, **45**, e202345011 (2023). DOI: 10.1590/2317-1545v45259022
- [15] Ф.Б.О. Мусаев, С.Л. Белецкий. *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*, **24** (6), 6 (2021). DOI: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-6-15
- [16] M.R. Ahmed, J. Yasmin, E. Park, G. Kim, M.S. Kim, W. Collins, C. Mo, B.K. Cho. *Sens.*, **20** (2020). DOI: 10.3390/s20236753
- [17] М.А. Никольский, М.Д. Ларькина. *Русский виноград*, **2**, 18 (2015).
- [18] Е.П. Безух, С.Ф. Логинова, Н.Н. Потрахов. *Известия СПб ГАУ*, **1** (54), 20 (2019). DOI: 10.24411/2078-1318-2019-11020
- [19] К.Г. Ткаченко, Н.Е. Староверов, Е.А. Варфоломеева, А.И. Капелян, А.Ю. Грязнов. *Бюл. Бот. сада-ин-та ДВО РАН*, **21**, 39 (2019). DOI: 10.17581/bbgi2104
- [20] D.T. Pinheiro, A.D. Medeiros, T.F.S.N. Soares, N.P. Capobianco, D.C.T. dos Santos Dias. *Ciênc. Florest.*, Santa Maria, **32** (3), 1309 (2022). DOI: 10.5902/1980509863239
- [21] H. Jalink, A. Frandas, R. Van Der Schoor, J.B. Bino. *Sci. Agric. Piracicaba*, **55**, 88 (1998). DOI: 10.1590/SO103-90161998000500016
- [22] A.S. Silva, S.M. Cicero, F.F. da Silva, F.G. Gomes Junior. *J. Seed Sci.*, **45**, e202345003 (2023). DOI: 10.1590/2317-1545v45257617
- [23] X. Zhao, L. Pang, L. Wang, S. Men, L. Yan. *Math. Comput. Appl.*, **27** (6), 109 (2022). DOI: 10.3390/mca27060109.
- [24] D.B. Fowler, G. Breton, A.E. Limin, S. Mahfoozi, F. Sarhan. *Plant Physiol.*, **127** (4), 1676 (2001). PMID: PMC133572 PMID: 11743112
- [25] В.И. Никитина. *Вестник КрасГАУ*, **4**, 98 (2015).
- [26] Т.Г. Голова, Л.А. Ершова, С.А. Кузьменко. *Зернобобовые и крупяные культуры*, **4** (36), 130 (2020). DOI: 10.24411/2309-348X-2020-11215
- [27] А.А. Ветчинников, С.В. Круглова, Д.В. Анциферова. *Матер. Междунар. Научно-практич. конф. Роль вузовской науки в развитии агропромышленного комплекса* (Нижний Новгород, Россия, 2021), с. 128–133.
- [28] Д.С. Гаврилин. Автореф. канд. дисс. (Мичуринск, Мичуринский ГАУ, 2015)
- [29] В.Т. Синеговская. *Агронаука*, **3**, 23 (2023). DOI: 10.24412/2949-2211-2023-1-3-23-28
- [30] Е.Д. Кузнецов, Л.К. Сечняк, Н.А. Киндрук, О.К. Слюсаренко. *Роль фитохрома в растениях* (Агропромиздат, М., 1986)