

**ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СТЕКЛОВИДНОСТЬ, ВЛАЖНОСТЬ И ВСХОЖЕСТЬ
ЗЕРНОВОК ПШЕНИЦЫ ПРИ ХРАНЕНИИ**Я. И. Храмова¹, И. И. Дмитриевская², С. Л. Белопухов², Е. Э. Нефедьева^{1*}, В. Н. Храмова¹

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

400005, г. Волгоград, просп. Ленина, 28;

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
(РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

E-mail: nefedieva@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.12.2022, принята к печати 03.03.2023

Жизнеспособность семян изменяется при хранении, что связано с неферментативными реакциями окисления, гидролиза, аминокарбонильной реакцией, уменьшением водоудерживающей способности у биополимеров и др. В ходе хранения возможны фазовые переходы биополимеров из стеклообразного в кристаллическое состояние, следствием чего является ускорение неферментативных процессов. Сохранение жизнеспособности семян можно обеспечить посредством создания оптимальных условий хранения, а также обработки физическими и химическими агентами перед хранением и проращиванием. Зерновки со стекловидным эндоспермом благодаря физико-химическим свойствам биополимеров лучше сохраняют жизнеспособность в процессе хранения. У зерна пшеницы мягкого сорта при хранении снижались влажность и всхожесть, особенно у зерновок с мучнистым эндоспермом. Обработка зерна пшеницы мягкого сорта импульсным давлением способствовала увеличению влажности, особенно у стекловидных зерновок, и всхожести по сравнению с контролем через три года хранения. Уменьшение всхожести зерна пшеницы твердого сорта при хранении сопровождалось снижением влажности, но через три года хранения всхожесть зерновок со стекловидным эндоспермом была выше, чем зерновок с мучнистым эндоспермом. Обработка зерна пшеницы твердого сорта импульсным давлением 11 МПа не способствовала изменению влажности и всхожести в ходе хранения по сравнению с контролем. После обработки импульсным давлением 29 МПа влажность и всхожесть зерновок снизились в ходе хранения. Стекловидное состояние отличается хрупкостью, поэтому импульсное давление вызвало его разрушение и способствовало повреждению значительной части зерновок. Рост микротрещин продолжался при хранении, в результате такие зерновки характеризовались наименьшей долговечностью.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum*, хранение семян, жизнеспособность семян, стекловидность зерна.

**INFLUENCE OF IMPULSE PRESSURE ON VITREOUSNESS, MOISTURE CONTENT AND
GERMINATION OF WHEAT GRAINS DURING STORAGE**Ya. I. Khramova¹, I. I. Dmitrevskaya², S. L. Belopukhov², E. E. Nefed'eva¹, V. N. Khramova¹

Volgograd State Technical University, 28, Lenina pr., Volgograd, 400005, Russian Federation;

Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy

49, Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation

E-mail: nefedieva@rambler.ru

The viability of seeds changes during the storage, which is associated with non-enzymatic oxidation reactions, hydrolysis, amino-carbonyl reaction, a decrease in the water-holding capacity of biopolymers, etc. During storage, phase transition of biopolymers from a glassy to a crystalline state is possible, resulting in an acceleration of non-enzymatic processes. Seed viability can be ensured by creating optimal storage conditions, as well as by treatments with physical and chemical agents before storage and germination. Grains with vitreous endosperm, due to the physical and chemical properties of biopolymers, retain their viability better during storage. Moisture content and germination decrease in soft wheat grains during storage, especially in grains with powdery endosperm. The treatment of soft wheat grains with impulse pressure can contribute to an increase in moisture content, especially in vitreous grains, and germination compared to the control after 3 years of storage. A decrease in germination of durum wheat seeds during storage was accompanied by a decrease in moisture content, but after 3 years of storage, the germination of seeds with vitreous endosperm was higher than that of seeds with powdery endosperm. The treatment of durum wheat seeds with an impulse pressure of 11 MPa did not contribute to a change in moisture content and germination during storage compared to the control. After treatment with an impulse pressure of 29 MPa, moisture content and germination of the seeds decreased during storage. The vitreous state of seeds is characterized by fragility. The impulse pressure caused its destruction and contributed to damage of a significant part of the seeds. The growth of micro-cracks continued during storage and, as a result, the seeds were characterized by the least longevity.

Keywords: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum*, seed storage, seed viability, grain vitreousness.

ВВЕДЕНИЕ

Потеря жизнеспособности семян при старении связана с перекисным окислением липидов, аминокарбонильной реакцией, неферментативным гидролизом запасных веществ.

Снижение жизнеспособности семян в ходе хранения или под действием внешних факторов связано с переходом биополимеров из стеклообразного (аморфного) в кристаллическое состояние, следствием чего является ускорение неферментативных гидролитических и окислительных процессов (Veselovsky, Veselova, 2012; Bernal-Lugo, Leopold, 1998).

При старении семян протекают термодинамически разрешенные реакции. При неферментативном гидролизе крахмала (Pavlova et al., 2013) связанная вода включается в структуру продуктов (Veselovsky, Veselova, 2012). Гидролизу могут подвергаться и другие полимеры (Jones, 1941). Редуцирующие сахара, образовавшиеся в результате гидролиза, вступают в реакцию с аминокислотами – аминокарбонильную реакцию Амадори-Майяра. Реакция играет роль в потере семенами жизнеспособности (Murthy, Sun, 2000).

Старение биополимеров семян сопровождается их обезвоживанием. В процессе гибели влажность уменьшается на 1,5–2,0%, что является следствием необратимых перестроек макромолекул (Veselova et al., 1999). Всхожесть семян зависит от их влажности в воздушно-сухом состоянии (Veselovsky, Veselova, 2012), которая определяется содержанием связанной воды (Веселова, 2008).

В партии семян выделяются фракции: I – сильные семена, II – ослабленные семена, III – мертвые семена. Влажность семян фракций II и III ниже, чем семян фракции I (Веселова, 2008). При старении происходит переход семян из фракции I в фракцию II. У семян фракции II отмечено увеличение содержания глюкозы по сравнению с фракцией I (Veselovsky, Veselova, 2012). Уменьшение уровня глюкозы за счет аминокарбонильной реакции в семенах фракции II обуславливает их переход в категорию «улучшенных» с более высокой всхожестью. Данное явление способствует временному увеличению всхожести семян в ходе старения. Перекисное окисление липидов активируется в уже погибших семенах.

Исследование процессов, протекающих при хранении семян, является важной задачей. Долговечность семян связана с устойчивостью ко множеству факторов – как внутренних (генетических, структурных, физиологических), так и внешних (микрофлора, температура и влажность) (Мамедова, Бабаева, 2022; Shvachko, Khlestkina, 2020; Гурьева и др., 2020). Установлена связь между биохимическими особенностями, посевными качествами семян и ростом проростков (Рутковская и др., 2022).

Зараженность зерна играет важную роль в снижении всхожести семян. В зависимости от проникновения патогена зерно может быть или невосхожим, или из него развиваются слабые зараженные проростки (Гагкаева и др., 2011). Развитие грибов хранения *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp. и фитопатогенных грибов *Fusarium* sp., *Alternaria* sp.,

Erwinia herbicola снижает жизнеспособность семян в процессе хранения (Яицких, Степаненко, 2022).

Продолжительность старения семян может составлять от нескольких дней до десятков и сотен лет. На его скорость влияют влажность тканей и температура воздуха (Walters, 1998; Гурьева и др., 2020). В условиях ускоренного старения происходит быстрое снижение всхожести, но кривые изменения жизнеспособности соответствуют таковым при длительном хранении (Сафина, Филипенко, 2013). Использование методики ускоренного старения позволяет адекватно моделировать воздействия неблагоприятных факторов, прогнозировать их влияние на устойчивость семян, оценивать ее различия у сортов сельскохозяйственных культур (Смоликова, 2014), изучать метаболические изменения, происходящие в семенах под действием неблагоприятных условий среды, и прогнозировать долговечность семян при хранении (Handbook of vigour test methods, 1995).

Динамика жизнеспособности семян в процессе старения имеет фазовые особенности. Колебания всхожести практически отсутствуют у высококачественных семян и выражены у семян с низкой всхожестью (Леонова, 2000). Семена высокого качества лучше переносят экстремальные условия, из них формируются более устойчивые растения (Смоликова, 2014). Всхожесть семян пониженного качества может повыситься при старении, а позже уменьшиться. Реже наблюдается более сложная бимодальная зависимость (Леонова, 2000).

Сохранение жизнеспособности семян в процессе хранения можно обеспечить:

- оптимальными условиями хранения, например, при температуре 4–10°C и снижении исходной влажности семян (Филипенко и др., 2018; Гурьева и др., 2020);

- обработкой перед хранением высокочастотным электромагнитным полем (Калацкая и др., 2018), озонированным воздухом и полем отрицательного коронного разряда для подавления грибов р. *Fusarium* и р. *Aspergillus* (Авдеева и др., 2014), γ -излучением и ускоренными электронами для подавления бактерий и грибов хранения *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., *Alternaria* sp. (Яицких, Степаненко, 2022). Однако при оптимальных условиях хранения предварительная обработка семян плазмой стимулирует рост и развитие проростков, а ускоренное старение – затормаживает. В результате ускоренного старения всхожесть семян, обработанных плазмой, снижается практически в два раза, а прорастание значительно затормаживается (Калацкая и др., 2018);

- обработкой после хранения перед проращиванием ИУК в концентрации $2,5 \cdot 10^{-7}$ М, что повышает всхожесть семян пшеницы на 7,1–8,5% после 49–50-летнего хранения. Янтарная кислота в концентрации $5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$ М также повышает всхожесть семян на 2,3–5,0% после длительного хранения (Сафина, Филипенко, 2018).

Применение обработки для сохранения жизнеспособности семян в ходе длительного хранения должно быть основано на предварительном исследовании исходного качества семян, так как

изменение жизнеспособности и всхожести семян различного качества в процессе хранения происходит по-разному. Применение физических воздействий перед хранением оправдано в том случае, если условия хранения будут оптимальными, а семена отличаются высоким качеством. Определяющую роль играют условия хранения, обеспечивающие низкую скорость протекания естественных процессов разрушения семени. Крайне неблагоприятно для жизнеспособности семян сочетание предварительного физического воздействия с неудовлетворительными условиями хранения

Одним из способов активации роста, развития и повышения продуктивности растений является импульсное давление (ИД), создаваемое ударной волной (Нефедьева, Лысак, 2009). В зависимости от величины ИД происходит снижение потери жизнеспособности семян при хранении за счет перехода крахмала из кристаллического в стеклообразное состояние или обратный процесс при дроблении молекул крахмала (Nefedieva et al., 2020). Последствия ИД могут быть различными: распад сложного вещества на более простые, образование полимерных цепей из мономеров. В твердых телах возникают напряжения, сдвиговые деформации, разрывы химических связей, происходит дробление, разрушение кристаллической решетки. В воздушно-сухих семенах физические воздействия оставляют скрытые повреждения, которые проявляются во время перехода клеток в жизнедеятельное состояние (Веселова, 2008). При обработке ИД в семени образуются повреждения, которые развиваются в дальнейшем при хранении. Установлено, что после обработки ИД изменяется процесс поглощения воды семенами (Павлова и др., 2015).

Цель исследования заключалась в выявлении изменений влажности и всхожести зерновок пшеницы мягкого и твердого сорта после воздействия ИД и хранения.

Задачи исследования:

1. Обработка ИД 11 и 29 МПа зерновок пшеницы мягкого и твердого сортов с последующим высушиванием до воздушно-сухого состояния.
2. Классификация зерновок мягкого и твердого сортов пшеницы по стекловидности эндосперма после действия ИД и через 3 года после обработки и хранения (разделение на 2 класса).
3. Определение влажности и всхожести партий семян мягкой и твердой пшеницы со стекловидным и мучнистым эндоспермом зерновок, обработанных ИД, до и после периода хранения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проводились в биологической лаборатории кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВО ВолГТУ и в УНЦ КП «Сервисная лаборатория комплексного анализа химических соединений» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева.

Объектами исследования служили два сорта яровой мягкой и твердой пшеницы.

Сорт яровой мягкой пшеницы Саратовская 73 создан в Научно-исследовательском институте

сельского хозяйства Юго-Востока. Родословная сорта: Лютесценс 2014 / Tr. Timopheevii, разновидность – graecum. Колос белый, остистый, неопушенный, зерно белое. Колос по форме цилиндрический, средней крупности и плотности. Колосковая чешуя удлинено-яйцевидной формы, средних размеров. Нервация колосковой чешуи очень слабо выражена, почти отсутствует. Зубец колосковой чешуи средний, острый, слегка изогнут в сторону плеча. Плечо колосковой чешуи слегка приподнятое или прямое, узкое. Киль выражен сильно, доходит до основания колосковой чешуи. Зерно крупное, яйцевидной формы. Бороздка зерна по ширине средняя, неглубокая. Соломина средней толщины и прочности, длина на 3 см больше, чем у стандарта. Сорт среднеспоздний, вегетационный период составляет 87 дней. Практически устойчив к пыльной головне, толерантен к бурой листовой ржавчине и мучнистой росе. Характеризуется высокой зерновой продуктивностью по сравнению со стандартом и высоким качеством зерна. Максимальная урожайность отмечена на уровне 4,74 т га⁻¹.

Сорт яровой твердой пшеницы Саратовская золотистая создан в Научно-исследовательском институте сельского хозяйства Юго-Востока. Родословная сорта: Леукурум 1838 / Леукурум 1830, разновидность – leucurum. Колос белый, неопушенный, ости белые, зерно белое. Колос цилиндрический, длиной 7–8 см. Колосковая чешуя средней величины, с ярко выраженной нервацией, ланцетной формы, боковой срез почти прямой. Килевой зубец короткий, прямой или слегка отогнут от плеча. Плечо узкое, скошенное, киль выражен сильно. Зерно крупное, полуудлиненной формы, с довольно глубокой бороздкой, основание зерна голое, окраска белая с выраженным янтарным оттенком, стекловидное. Сорт среднеспелый, высокоурожайный. Обладает широкой пластичностью. При урожае зерна выше 2,5 т га⁻¹ склонен к полеганию. Максимальная урожайность в производственных условиях достигает 3,5–4,0 т га⁻¹.

Зерновки пшеницы обрабатывались импульсным давлением (ИД) 11 МПа и 29 МПа, создаваемым ударной волной (Нефедьева, Лысак, 2009), на оборудовании кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО ВолГТУ. При детонации взрывчатого вещества возникает ударная волна, которая передается через воду на семена и создает объемное сжатие в течение 14...25 10⁻⁶ с. Малая продолжительность действия давления позволяет назвать его импульсным.

ИД на фронте ударной волны рассчитывалось по формуле (Нефедьева, Лысак, 2009):

$$P = 53,3 \left(Q^{\frac{1}{3}} / R \right)^{1,13},$$

где P – давление, МПа; Q – масса заряда взрывчатого вещества, кг; R – расстояние от центра взрыва до поверхности семян, м.

Для обработки семян растений использовалось ИД от 11 и 29 МПа. Для этого на дно контейнера из нержавеющей стали (1) укладывались пороховые

кассеты (2) с сухими семенами (3), закрытыми сетчатым материалом. Контейнер (1) заполнялся водой (4). В контейнере под водой закреплялось водостойкое взрывчатое вещество (5) с массой Q на расстоянии R от поверхности семян в соответствии с формулой (3). Толщина слоя воды над поверхностью семян соответствовала расчетным данным (52) и составляла 7–13 см. Затем производилась детонация взрывчатого вещества при помощи электродетонатора (7). В одной кассете находилось до 500 г семян, что являлось одной повторностью для всех нижеописанных экспериментов. После обработки семена высушивались в течение 24 часов при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Контрольные семена замачивались в воде в течение времени, соответствующего продолжительности пребывания в воде семян при обработке ИД, и высушивались на воздухе до воздушно-сухого состояния.

Семена, прошедшие обработку в ноябре 2018 г., хранились в упаковке из бумаги или ткани в сухом темном месте при комнатной температуре.

Через три года после обработки (декабрь 2021 г.) зерновки были отсортированы на диафаноскопе на стекловидные (партия С) и мучнистые (партия М).

Определение всхожести проводилось согласно ГОСТ 12038-84 Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Была отобрана фракция чистых выполненных семян. Четыре пробы по 50 семян в каждой проращивались рулонным методом в темноте в течение 7 суток при температуре 20°C. При учете всхожести отдельно подсчитывались: нормально проросшие семена; набухшие, твердые, к которым относились непроросшие семена и ненормально проросшие – невсхожие семена. За результат анализа принималось среднее арифметическое результатов определения всхожести всех проанализированных проб.

Влажность определялась гравиметрическим методом путем высушивания при температуре 130°C до постоянной массы и с помощью БИК-анализатора Spectra Star 2600 XT-R. Эксперименты проводились в трехкратной повторности.

Все полученные результаты подвергались статистической обработке. На рисунках приведены средние значения и их стандартные ошибки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

У пшеницы мягкого сорта Саратовская 73 в контрольном варианте зерновки с мучнистым эндоспермом характеризовались более высокой влажностью (рис. 1 а) до хранения по сравнению с зерновками со стекловидным эндоспермом. После хранения влажность зерновок в обоих вариантах снизилась, но у стекловидных зерновок она оказалась выше, чем у мучнистых. Как видно из рис. 1 в, исходная всхожесть контрольных зерновок мягкой яровой пшеницы сорта Саратовская 73 до начала хранения составляла 93,5–95,5%. Прослеживается тенденция к снижению исходной всхожести у зерновок со стекловидным эндоспермом по сравнению с

зерновками с мучнистым эндоспермом. Через три года хранения всхожесть (рис. 1 д) контрольных зерновок мягкой пшеницы Саратовская 73 с мучнистым эндоспермом была самой низкой (20%). Значительную часть составляли мертвые зерновки, что является результатом утраты жизнеспособности зерновок в ходе хранения. У контрольных зерновок со стекловидным эндоспермом всхожесть снизилась до 27% за счет появления аномальных проростков. В данном варианте отмечено большее количество зерновок, способных к прорастанию. Следовательно, переход в стекловидное состояние обеспечивает удержание влаги в зерновке и продлевает жизнь семян (Bernal-Lugo, Leopold, 1998).

Обработка ИД 11 МПа через один месяц хранения (рис. 1 а) не повлияла на влажность мучнистых зерновок, но способствовала некоторому увеличению влажности стекловидных зерновок. Через три года хранения влажность зерновок в обеих партиях была выше, чем в контроле. ИД 29 МПа также способствовало увеличению влажности зерновок обеих партий, но через три года хранения влажность незначительно снизилась по сравнению с контролем.

Обработка ИД 11 МПа через один месяц хранения (рис. 1 в) способствовала незначительному снижению всхожести по сравнению с контролем, главным образом за счет появления аномальных проростков. ИД 29 МПа через один месяц хранения (рис. 1 в) способствовало существенному снижению всхожести как за счет аномальных, так и мертвых зерновок. Данное явление обусловлено стрессирующим воздействием ИД (Pavlova et al., 2017). Во всех вариантах обнаружена тенденция к незначительному снижению исходной всхожести у зерновок со стекловидным эндоспермом по сравнению с зерновками с мучнистым эндоспермом. По-видимому, биополимеры в стеклообразном состоянии за счет своей хрупкости были повреждены в большей степени под действием ИД.

Обработка ИД 11 и 29 МПа способствовала увеличению энергии прорастания и всхожести зерновок как с мучнистым (56,7% и 66,7% соответственно), так и со стекловидным эндоспермом (50% и 90% соответственно) по сравнению с контролем через три года хранения (рис. 1 д). Тем не менее в партиях мертвые зерновки преобладали над аномальными. Такое существенное повышение всхожести по сравнению с контролем может быть связано с поведением аномальных зерновок.

Зерновки со стекловидным эндоспермом благодаря физико-химическим свойствам биополимеров лучше сохраняли жизнеспособность в процессе хранения.

Исходная влажность контрольных зерновок твердой яровой пшеницы сорта Саратовская золотистая (рис. 1 б) отличалась от влажности контрольных зерновок мягкой пшеницы: влажность мучнистых зерновок была ниже, чем влажность стекловидных зерновок. Через три года хранения влажность контрольных зерновок снизилась; она практически не различалась в двух партиях, но была выше у твердой пшеницы, чем у мягкой (рис. 1 а, б).

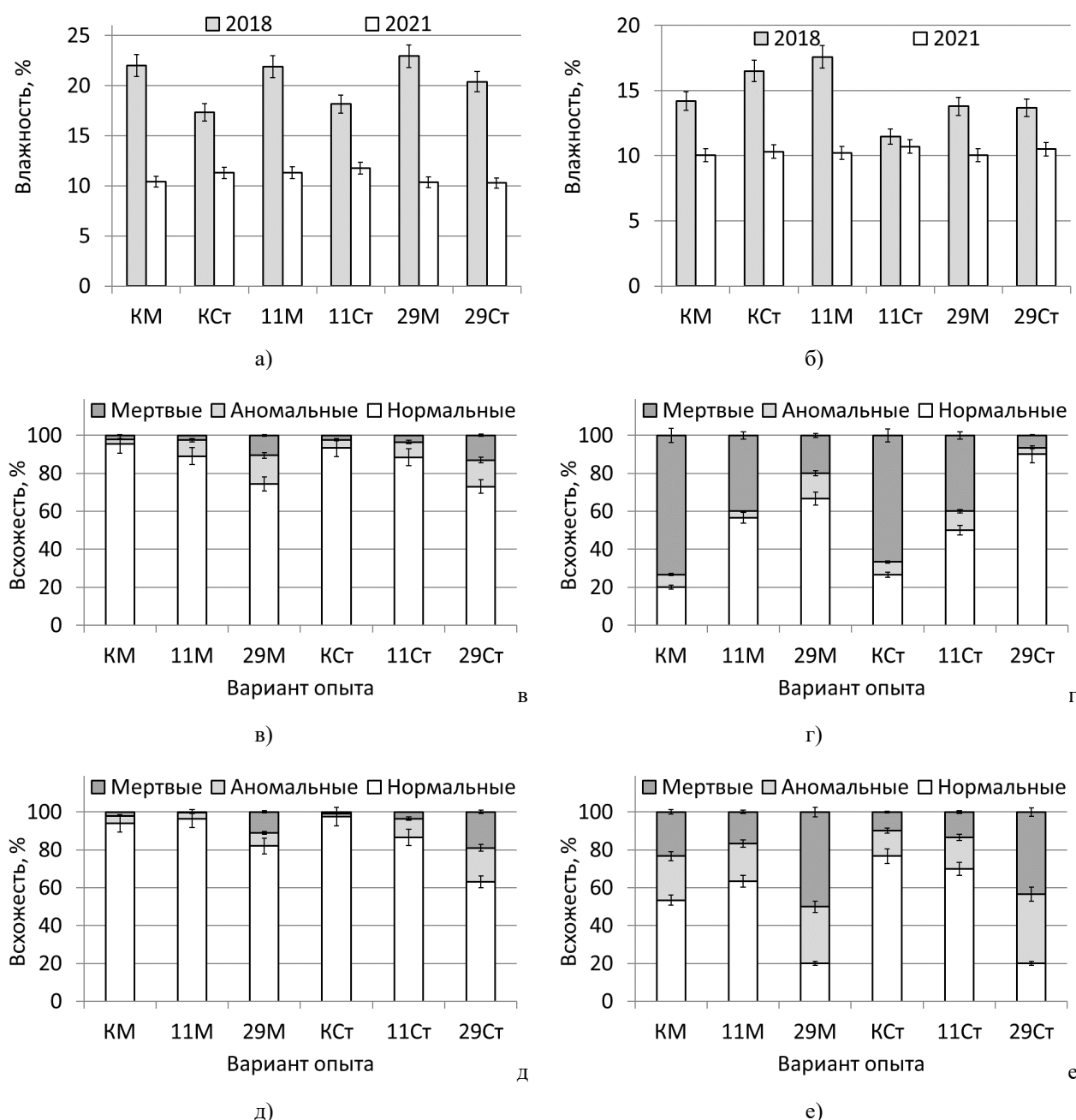


Рис. 1. Изменение состояния зерновок пшеницы после обработки ИД и хранения:

а – влажность зерновок пшеницы яровой мягкой Саратовская 73; б – влажность зерновок пшеницы яровой твердой Саратовская золотистая; в – всхожесть семян пшеницы Саратовская 73 через 1 месяц после обработки; г – всхожесть семян пшеницы Саратовская 73 через 3 года после обработки; д – всхожесть семян пшеницы Саратовская золотистая через 1 месяц после обработки; е – всхожесть семян пшеницы Саратовская золотистая через 3 года после обработки.

Обозначения: К – контроль; 11 – 11 МПа; 29 – 29 МПа; Мг – мягкая пшеница; Тв – твердая пшеница.

Как видно из рис. 1 г, исходная всхожесть контрольных зерновок твердой яровой пшеницы сорта Саратовская золотистая до начала хранения составляла 94,0–97,5%. У твердого сорта пшеницы выявлена тенденция к увеличению исходной всхожести зерновок со стекловидным эндоспермом по сравнению с зерновками с мучнистым эндоспермом.

Через три года хранения всхожесть контрольных зерновок твердой пшеницы с мучнистым эндоспермом была низкой (53,3%). В партии присутствовало приблизительно одинаковое количество аномальных и мертвых зерновок.

Всхожесть контрольных зерновок твердой пшеницы со стекловидным эндоспермом была значительно выше (рис. 1 е).

Всхожесть зерновок твердого сорта в контроле после хранения была выше, чем у мягкого сорта (рис. 1 д, е), а количество мертвых зерновок было существенно ниже (в 3,1 у зерновок с мучнистым эндоспермом и в 6,7 раз у зерновок со стекловидным эндоспермом). Отмеченное явление может быть связано с особенностями сорта, преобладанием стекловидного состояния и более высокой влажностью

биополимеров у зерновок твердого сорта пшеницы Саратовская золотистая.

У твердого сорта пшеницы Саратовская золотистая (рис. 1 б) через месяц после обработки ИД 11 МПа существенно увеличилась влажность зерновок с мучнистым эндоспермом, а влажность зерновок со стекловидным эндоспермом снизилась по сравнению с аналогичными партиями в контроле. Через три года хранения влажность зерновок обеих партий снизилась и стала соответствовать контролю. Через месяц после обработки ИД 29 МПа влажность зерновок обеих партий не различалась и была ниже, чем в аналогичных контрольных партиях. Через 3 года хранения влажность зерновок обеих партий снизилась и стала такой же, как в контроле.

Обработка ИД 11 МПа (рис. 1 г) не способствовала изменению всхожести зерновок с мучнистым эндоспермом, но привела к снижению всхожести стекловидных зерновок до 88,5%, главным образом за счет появления аномальных проростков. ИД 29 МПа способствовало существенному снижению всхожести (74,5% у мучнистых и 73% у стекловидных зерновок) как за счет аномальных, так и мертвых зерновок. Для твердой пшеницы, как и для мягкой, во всех вариантах была характерна тенденция к уменьшению исходной всхожести зерновок со стекловидным эндоспермом по сравнению с зерновками с мучнистым эндоспермом после обработки ИД.

Через три года хранения (рис. 1 е) после обработки ИД 11 МПа всхожесть зерновок твердой пшеницы как с мучнистым, так и со стекловидным эндоспермом существенно не отличалась от контроля, количество мертвых зерновок и соотношение мертвых и аномальных зерновок также отличались незначительно. Однако под действием ИД 29 МПа всхожесть мучнистых и стекловидных зерновок составила 20%. Количество аномальных проростков составляло 30,0% и 36,6% соответственно у зерновок с мучнистым и стекловидным эндоспермом. Около половины зерновок оказались мертвыми. Стекловидное состояние отличается хрупкостью, поэтому высокое ИД вызвало его разрушение и способствовало гибели и повреждению значительной части зерновок, причем рост микротрещин продолжался в процессе хранения. В связи с этим такие зерновки оказались наименее жизнеспособными при хранении.

Колебания всхожести под действием ИД и при хранении объясняются переходом семян из нормального состояния в аномальное и из аномального в мертвое. В партии семян всегда одновременно присутствуют все три указанные фракции. Фракция аномальных семян весьма лабильна: они могут в определенных условиях формировать нормальные проростки, проростки с морфологическими дефектами (без зародышевых корешков, пустой coleoptиль, первичные листочки обесцвечены, расщеплены) или не прорасти, т. е. вести себя как мертвые семена (Веселова, 2008). Известно, что при хранении семян, облученных ионизирующей радиацией, восстановление всхожести после ее начального снижения происходит за счет уменьшения числа семян

во фракции аномальных, а последующее снижение вызвано гибелью семян (Veselova et al., 1999).

У пшеницы твердого сорта Саратовская золотистая в контроле влажность (рис. 1 б) и всхожесть (рис. 1 д) до хранения были, наоборот, выше у зерновок со стекловидным эндоспермом, чем у зерновок с мучнистым эндоспермом. После хранения влажность стекловидных и мучнистых зерновок различалась незначительно, а всхожесть (рис. 1 е) стекловидных зерновок также увеличилась по сравнению с мучнистыми.

Авторы предполагают, что обработка ИД может затормаживать процесс разрушения полипептидных связей в эндосперме мягких семян, что выражается в повышении степени полимеризации молекул, гигроскопичности и влажности семян после обработки (за счет поглощения воды из воздуха). Данные о повышении стекловидности мягких семян, коррелирующей с количеством полипептидных связей, являются подтверждением выдвинутой гипотезы. Также повышение влажности может свидетельствовать о переходе мягких семян с низкой всхожестью в разряд «улучшенных» семян (Veselovsky, Veselova, 2012).

ВЫВОДЫ

1. Потеря жизнеспособности зерна пшеницы мягкого сорта при хранении сопровождалась снижением влажности и всхожести, особенно у зерновок с мучнистым эндоспермом.

2. Обработка зерна пшеницы мягкого сорта ИД способствовала увеличению всхожести через 3 года хранения по сравнению с контролем, что связано с переходом аномальных зерновок в партию нормальных (всхожих).

3. У пшеницы мягкого сорта переход части биополимеров в стекловидное состояние под действием ИД обеспечил удержание влаги. Зерновки со стекловидным эндоспермом благодаря физико-химическим свойствам биополимеров лучше сохраняли жизнеспособность в процессе хранения.

4. Потеря жизнеспособности зерна пшеницы твердого сорта при хранении также сопровождалась снижением влажности, но через три года хранения в контроле всхожесть зерновок со стекловидным эндоспермом была выше, чем зерновок с мучнистым эндоспермом.

5. Обработка зерна пшеницы твердого сорта ИД 11 МПа не способствовала изменению влажности и всхожести в ходе хранения по сравнению с контролем. После обработки ИД 29 МПа влажность зерновок в ходе хранения снизилась, а всхожесть существенно уменьшилась.

6. Стекловидное состояние отличается хрупкостью, поэтому ИД вызвало его разрушение и способствовало гибели и повреждению значительной части зерновок. Рост микротрещин продолжался при хранении, в результате чего такие зерновки характеризовались наименьшей долговечностью.

Механизмы физических воздействий сводятся прежде всего к скрытому повреждению структуры семени, действующему зачастую в том же направлении, что и старение. Повышение всхожести

после хранения или физического воздействия, особенно если качество семян было невысоким, определяется протеканием реакции Амадори-Майяра в семенах II фракции и их переходом в категорию «улучшенных». Дальнейшие исследования должны быть ориентированы на поиск однонаправленных и противоположно направленных механизмов физических воздействий и старения. Важно выявить механизмы, противодействующие старению. Сейчас

понятно, что это обеззараживание и уплотнение структуры семени, препятствующие проникновению кислорода и потере влаги. ИД способствовало переходу части биополимеров у семян с мучнистым эндоспермом в стекловидное состояние, что продлило их жизнеспособность. Поэтому такое воздействие рекомендуется для предварительной обработки семян с рыхлой структурой перед хранением.

Список литературы

- Авдеева В.Н., Безгина Ю.А., Гринченко В.А. Влияние физических факторов на состав грибной инфекции в зерне озимой пшеницы // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 2. С. 614.
- Веселова Т.В. Изменение состояния семян при их хранении, проращивании и под действием внешних факторов (ионизирующего излучения в малых дозах и других слабых воздействий), определяемое методом замедленной люминесценции: автореф. дисс. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2008. 48 с.
- Гагкаева Т.Ю., Гаврилова О.П., Левитин М.М., Новожилов К.В. Фузариоз зерновых культур // *Приложение к журналу «Защита и карантин растений»*. 2011. № 5. С. 1–94.
- Гурьева К.Б., Белецкий С.Л., Хаба Н.А., Шилкова О.С. Исследование влияния температурных режимов хранения на показатели сохранности и технологические показатели пшеницы // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2020. № 2. С. 8–21.
- Калацкая Ж.Н., Ламан Н.А., Филатова И.И., Фролова Т.В., Люшкевич В.А., Чубрик Н.И., Гончарик С.В. Влияние плазменно-радиоволновой обработки семян кукурузы и последующего их хранения в неблагоприятных условиях на физиолого-биохимические особенности проростков // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук*. 2018. Т. 63. № 1. С. 7–19.
- Леонова Е.А. Механизмы бимодального изменения всхожести семян в процессе ускоренного старения: дисс. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2000. 127 с.
- Мамедова С.А., Бабаева М.А. Оценка стрессоустойчивости генотипов синтетической пшеницы японского происхождения // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 2. С. 14–19. DOI: 10.17513/use.37772
- Нефедьева Е.Э., Лысак В.И. Давление как фактор регуляции у растений. Волгоград: ВолГТУ, 2009. 187 с.
- Павлова В.А., Лысак В.И., Нефедьева Е.Э., Булгакова Е.В., Шайхиев И.Г. Влияние параметров ударно-волнового нагружения на состояние биополимеров и поглощение воды семенами гречихи // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 10. С. 79–84.
- Рутковская Т.С., Архипов М.В., Пасынкова Е.Н., Прияткин Н.С., Конончук П.Ю., Кочерина Н.В., Симон К.В. О связи посевных качеств семян и биохимических показателей качества зерна яровой мягкой пшеницы // *Агрофизика*. 2022. № 1. С. 42–48.
- Сафина Г.Ф., Филипенко Г.И. Влияние гетероауксина и янтарной кислоты на всхожесть семян пшеницы после их длительного хранения // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. № 11-1(77). С. 143–147.
- Сафина Г.Ф., Филипенко Г.И. Долговечность семян при хранении и ее прогнозирование методом ускоренного старения // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2013. Т. 174. С. 123–130.
- Смоликова Г.Н. Применение метода ускоренного старения для оценки устойчивости семян к стрессовым воздействиям // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3. Биология*. 2014. № 2. С. 82–93.
- Филипенко Г.И., Забегаева О.Н., Баранова Е.А., Герасимова Т.В. Альтернативный путь сохранения коллекции генетических ресурсов кормовых культур // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. № 9–1(75). С. 106–112.
- Яицких А.В., Степаненко Д.С. Воздействие гамма-лучей и ускоренных электронов на поверхностную микробиоту зерна пшеницы // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. Т. 389. № S5. С. 46–49.
- Bernal-Lugo I., Leopold A. The dynamics of seed mortality // *Journal of Experimental Botany*. 1998. Vol. 49. pp. 1455–1461.
- Handbook of vigour test methods / Eds J.G. Hampton, D.M. TeKrony. Zurich: ISTA Vigour Test Committee, 1995. 120 p.
- Jones D.B., Gersdorff C.E.F. The effect of storage on the proteins of wheat, white flour and whole-wheat flour // *Cereal Chem.* 1941. № 18. p. 417.
- Murthy U.M.N., Sun W.Q. Protein Modification by Amadori and Maillard Reaction during Seed Storage: Roles of Sugar Hydrolysis and Lipid Peroxidation // *J. Exp. Bot.* 2000. Vol. 51. pp. 1221–1228.
- Nefedieva E.E., Khramova Ya.I., Khramova V.N., Gorlov I.F., Lysak V.I., Slozhenkina M.I. Dependence of germination of wheat grains after the treatment by impulse pressure and long-term storage on the vitreousness of endosperm // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 677: IV International Scientific Conference: AGRITECH-IV-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk, Russian Federation, 18–20 November 2020 [IOP Publishing]. 2021. 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032078
- Pavlova V., Vasichkina E., Nefed'eva E., Lysak V. Influence of Pulse Pressure on the State of Biopolymers and the Probability of Hydrolysis of Starch in Seeds [Electronic resource] // *European Journal of Molecular Biotechnology*. 2013. Vol. 1. № 1. pp. 38–44. DOI: 10.13187/ejmb.2013.1.38

- Shvachko N.A., Khlestkina E.K. Molecular genetic bases of seed resistance to oxidative stress during storage // Vavilovskiy Zhurnal Genetiki i Selektzii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020. Vol. 24. № 5. pp. 451–458. DOI: 10.18699/VJ20.47-o
- Veselova T.V., Veselovskii V.A., Leonova E.A. What are the implications of changes in the heterogeneity of a seed population upon accelerated aging? // Russian Journal of Plant Physiology. 1999. Vol. 46. № 3. pp. 409–441.
- Veselovsky V.A., Veselova T.V. Lipid Peroxidation, Carbohydrate Hydrolysis, and Amadori-Maillard Reaction at Early Stages of Dry Seed Aging // Russian Plant Physiology. 2012. Vol. 59. № 6. pp. 811–817.
- Walters C. Understanding the mechanisms and kinetics of seed aging // Seed Science Research. 1998. Vol. 8. pp. 223–244.

References

- Avdeyeva V.N., Bezgina Yu.A., Grinchenko V.A. Vliyaniye fizicheskikh faktorov na sostav gribnoy infektsii v zerne ozimoy pshenitsy [Influence of physical factors on the composition of fungal infection in winter wheat grain] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 2, p. 614.
- Bernal-Lugo I., Leopold A. The dynamics of seed mortality // *Journal of Experimental Botany*, 1998, vol. 49, pp. 1455–1461.
- Filipenko G.I., Zabegayeva O.N., Baranova Ye.A., Gerasimova T.V. Al'ternativnyy put' sokhraneniya kollektzii geneticheskikh resursov kormovykh kul'tur [An alternative way to preserve the collection of genetic resources of forage crops] // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2018, no. 9-1(75), pp. 106–112.
- Gagkayeva T.Yu., Gavrilova O.P., Levitin M.M., Novozhilov K.V. Fuzarioz zernovykh kul'tur [Fusarium disease of grain crops] // *Prilozheniye k zhurnalu «Zashchita i karantin rasteniy»*, 2011, no. 5, pp. 1–94.
- Gur'yeva K.B., Beletskiy S.L., Khaba N.A., Shilkova O.S. Issledovaniye vliyaniya temperaturnykh rezhimov khraneniya na pokazateli sokhrannosti i tekhnologicheskoye pokazateli pshenitsy [Investigation of the influence of temperature storage conditions on the safety and technological indicators of wheat] // *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya*, 2020, no. 2. pp. 8–21.
- Handbook of vigour test methods / Eds J.G. Hampton, D.M. TeKrony. Zurich: ISTA Vigour Test Committee, 1995, 120 p.
- Yaitskikh A.V., Stepanenko D.S. Vozdeystviye gamma-luchey i uskorenykh elektronov na poverkhnostnuyu mikrobiotu zerna pshenitsy [The effect of gamma rays and accelerated electrons on the surface microbiota of wheat grain] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya*, 2022, vol. 389, no. S5, pp. 46–49.
- Jones D.B., Gersdorff C.E.F. The effect of storage on the proteins of wheat, white flour and whole-wheat flour // *Cereal Chem.*, 1941, no. 18, pp. 417.
- Kalatskaya Zh.N., Laman N.A., Filatova I.I., Frolova T.V., Lyushkevich V.A., Chubrik N.I., Goncharik S.V. Vliyaniye plazmenno-radiovolnovoy obrabotki semyan kukuruzy i posleduyushchego ikh khraneniya v neblagopriyatnykh usloviyakh na fiziologo-biokhimicheskiye osobennosti prorostkov [The effect of plasma-radio wave treatment of corn seeds and their subsequent storage in unfavorable conditions on the physiological and biochemical characteristics of seedlings] // *Ves. Nats. akad. navuk Belarusi. Ser. biyal. navuk*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 7–19.
- Leonova E.A. *Mekhanizmy bimodal'nogo izmeneniya vskhozhesti semyan v protsesse uskorennogo stareniya*: diss. ... cand. biol. nauk [Mechanisms of bimodal change in seed germination during accelerated aging. Cand. biol. sci. abst. diss.]. Moscow, MSU, 2008, 127 p.
- Mamedova S.A., Babayeva M.A. Otsenka stressoustoychivosti genotipov sinteticheskoy pshenitsy yaponskogo proiskhozhdeniya [Assessment of stress resistance of genotypes of synthetic wheat of Japanese origin] // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2022, no. 2, pp. 14–19. DOI: 10.17513/use.37772
- Murthy U.M.N., Sun W.Q. Protein Modification by Amadori and Maillard Reaction during Seed Storage: Roles of Sugar Hydrolysis and Lipid Peroxidation // *J. Exp. Bot.*, 2000, vol. 51, pp. 1221–1228.
- Nefed'yeva E.E., Lysak V.I. *Davleniye kak faktor regulyatsii u rasteniy* [Pressure as a regulatory factor for plants]. Volgograd: VolgSTU, 2009, 187 p.
- Nefedieva E.E., Khramova Ya.I., Khramova V.N., Gorlov I.F., Lysak V.I., Slozhenkina M.I. Dependence of germination of wheat grains after the treatment by impulse pressure and long-term storage on the vitreousness of endosperm [Materials of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 677: IV International Scientific Conference: AGRITECH-IV-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk, Russian Federation, 18-20 November 2020] [IOP Publishing], 2021, p. 7. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032078.
- Pavlova V., Vasichkina E., Nefed'eva E., Lysak V. Influence of Pulse Pressure on the State of Biopolymers and the Probability of Hydrolysis of Starch in Seeds [Electronic resource] // *European Journal of Molecular Biotechnology*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 38–44. DOI: 10.13187/ejmb.2013.1.38
- Pavlova V.A., Lysak V.I., Nefed'yeva Ye.E., Bulgakova Ye.V., Shaykhiyev I.G. Vliyaniye parametrov udarno-volnovogo nagruzheniya na sostoyaniye biopolimerov i pogloshcheniye vody semenami grechikhi [Influence of shock-wave loading parameters on the state of biopolymers and water absorption by buckwheat seeds] // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 10, pp. 79–84.
- Rutkovskaya T.S., Arkhipov M.V., Pasyukova Ye.N., Priyatkin N.S., Kononchuk P.Yu., Kocherina N.V., Simon K.V. O svyazi posevnykh kachestv semyan i biokhimicheskikh pokazateley kachestva zerna yarovoy myagkoy pshenitsy [On the relationship of seed sowing qualities and biochemical quality indicators grains of spring soft wheat] // *Agrofizika*, 2022, no. 1, pp. 42–48.

- Safina G.F., Filipenko G.I. Vliyaniye geteroauksina i yantarnoy kisloty na vskhozhest' semyan pshenitsy posle ikh dlitel'nogo khraneniya [The effect of heteroauxin and succinic acid on the germination of wheat seeds after their long-term storage] // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2018, no. 11–1(77), pp. 143–147.
- Safina G.F., Filipenko G.I. Dolgovechnost' semyan pri khranении i yeye prognozirovaniye metodom uskorennoy stareniya [The durability of seeds during storage and its prediction by the accelerated aging method] // *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii*, 2013, vol. 174, pp. 123–130.
- Smolikova G.N. Primeneniye metoda uskorennoy stareniya dlya otsenki ustoychivosti semyan k stressovym vozdeystviyam [Application of the accelerated aging method to assess the resistance of seeds to stress] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 3. Biologiya*, 2014, no. 2. pp. 82–93.
- Shvachko N.A., Khlestkina E.K. Molecular genetic bases of seed resistance to oxidative stress during storage // *Vavilovskiy Zhurnal Genetiki i Selektsii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 451–458. DOI: 10.18699/VJ20.47-o
- Veselova T.V. *Izmeneniye sostoyaniya semyan pri ikh khranении, prorashchivaniі i pod deystviyem vneshnikh faktorov (ioniziruyushchego izlucheniya v mal'kikh dozakh i drugikh slab'kikh vozdeystviy), opredelyayemoye metodom zamedlennoy lyuminesentsii: avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk* [Changes in the condition of seeds during their storage, germination and under the influence of external factors (ionizing radiation in small doses and other weak influences), determined by the method of delayed luminescence. Dr. biol. sci. abst. diss.]. Moscow, MSU, 2008.
- Veselova T.V., Veselovskiy V.A., Leonova E.A. What are the implications of changes in the heterogeneity of a seed population upon accelerated aging? // *Russian Journal of Plant Physiology*, 1999, vol. 46, no. 3, pp. 409–441.
- Veselovsky V.A., Veselova T.V. Lipid Peroxidation, Carbohydrate Hydrolysis, and Amadori-Maillard Reaction at Early Stages of Dry Seed Aging. // *Russian Plant Physiology*, 2012, vol. 59, no. 6, pp. 811–817.
- Walters C. Understanding the mechanisms and kinetics of seed aging // *Seed Science Research*, 1998, vol. 8. pp. 223–244.