

DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-1-59-76

УДК 58.039:581.149:581.198



Научная статья | Физиология и биохимия растений

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫМ ДАВЛЕНИЕМ НА ПЕРЕКИСНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ЛИПИДОВ И СОДЕРЖАНИЕ АНТИОКСИДАНТОВ В ЗЕРНОВКАХ ПШЕНИЦЫ В ПРОЦЕССЕ СТАРЕНИЯ

Я.И. Храмова, Е.Э. Нефедьева, В.Н. Храмова

Обоснование. Старение семян заключается в физиолого-биохимических изменениях: активность антиоксидантов (АО) снижается, а перекисное окисление липидов (ПОЛ) приводит к структурному и функциональному ухудшению белков, деградации мембран и ДНК.

Цель. Выявление особенностей антиоксидантной системы зерновок пшеницы с мучнистым и стекловидным эндоспермом в процессе старения и под действием стрессора.

Материалы и методы. Зерновки пшеницы мягкой обрабатывали импульсным давлением (ИД) и хранили 3 года. Определяли всхожесть, содержание АО о-фенантролиновым методом, продукты ПОЛ по реакции малонового диальдегида с тиобарбитуровой кислотой.

Результаты. Всхожесть контрольных зерновок с мучнистым эндоспермом после хранения в течение 3 лет была низкой (20%). У контрольных зерновок со стекловидным эндоспермом всхожесть составляла 27%. ИД способствовало увеличению количества зерновок со стекловидным эндоспермом и всхожести. Содержание АО в контрольных зерновках с мучнистым эндоспермом было выше, чем в стекловидных, а содержание продуктов ПОЛ – ниже. При обработке ИД у стекловидных зерновок содержание АО возросло, у мучнистых – не изменилось относительно контроля. ПОЛ в зерновках, обработанных ИД 11 МПа, было ниже контроля. Повышение ПОЛ при ИД 29 МПа свидетельствует о накоплении повреждений.

Заключение. В процессе хранения зерновок пшеницы всхожесть снизилась за счет появления мертвых зерновок. Наибольшее снижение всхожести наблюдали у зерновок с мучнистым эндоспермом. ИД способствовало витри-

фикации биополимеров, что привело к увеличению всхожести по сравнению с контролем через 3 года хранения. Более высокое содержание АО в зерновках со стекловидным эндоспермом после обработки ИД и хранения способствовало сохранению жизнеспособности зерна в процессе хранения.

Ключевые слова: старение семян; хранение семян; всхожесть; стекловидность зерна

Для цитирования. Храмова Я.И., Нефедьева Е.Э., Храмова В.Н. Влияние обработки импульсным давлением на перекисное окисление липидов и содержание антиоксидантов в зерновках пшеницы в процессе старения // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023. Т. 15, №1. С. 59-76. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-1-59-76

Original article | Plant Physiology and Biochemistry

THE INFLUENCE OF THE TREATMENT OF IMPULSE PRESSURE ON LIPID PEROXIDATION AND THE CONTENT OF ANTIOXIDANTS IN WHEAT GRAINS DURING AGING

Ya.I. Khramova, E.E. Nefed'eva, V.N. Khramova

Background. The aging of seeds results in physiological and biochemical changes such as decrease of the activity of antioxidants (AO), and structural and functional degradation of proteins due to lipid peroxidation (LP), as well as degradation of membranes and DNA.

Purpose. Identification of the traits of the antioxidant system of wheat grains with powdery and vitreous endosperm during aging and under the influence of a stressor.

Materials and methods. Soft wheat grains were treated with impulse pressure (IP) and stored for 3 years. Germination was determined. The content AO was determined by the o-phenanthroline method, and LP products were assessed by the reaction of malonic dialdehyde with thiobarbituric acid.

Results. Germination of control seeds with powdery endosperm after storage for 3 years was the lowest (20%). In control part of seeds with vitreous endosperm, germination was 27%. ID increased the amount of seeds with vitreous endosperm and germination. The content of AO in control grains with powdery endosperm was higher than in vitreous grains, and the content of LP products was lower. After the

treatment of IP the content of AO increased in vitreous grains; it did not change as compared to the control in powdery grains. The content of LP products in the grains treated with ID 11 MPa was lower than in the control variant. An increase in POL at ID 29 MPa indicates the accumulation of damage;

Conclusion. *During the storage of wheat grains, germination decreased mainly due to the appearance of dead grains. The greatest decrease in germination was observed in grains with powdery endosperm. IP promoted vitrification of biopolymers which led to an increase in germination as compared to the control after 3 years of storage. A higher content of AO in grains with vitreous endosperm after IP treatment and storage contributed to the preservation of grain viability during storage.*

Keywords: *seed aging; seed storage; germination; grain vitreousness*

For citation. *Khramova Ya.I., Nefed'eva E.E., Khramova V.N. The Influence of the Treatment of Impulse Pressure on Lipid Peroxidation and the Content of Antioxidants in Wheat Grains During Aging. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 59-76. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-1-59-76*

Введение

Пшеница (*Triticum aestivum* L.) является важной культурой во всем мире. Физиологическое ухудшение качества семян во время хранения тесно связано с последующим урожаем зерна. Семена подвергаются процессам старения, что приводит к постепенному разложению вещества, нарушению обмена веществ и энергии, ограничивает их жизнеспособность и в итоге вызывает потерю всхожести [18]. Хранение семян – важный научный вопрос, связанный с устойчивостью семян к множеству факторов, как внутренних (генетических, структурных, физиологических), так и внешних (микробиота, температура и влажность) [7].

Процесс старения семян заключается в физиолого-биохимических изменениях, происходящих при неблагоприятных условиях хранения, в накоплении ингибиторов роста и токсичных продуктов метаболизма [2; 6]. При старении воздушно-сухих семян в процессе длительного хранения происходят в основном неферментативные реакции, не требующие присутствия большого количества воды [2; 14].

Изменение состояния семян при старении или действии различных факторов связывают с ослаблением стеклообразного состояния биополимеров, гидролизом углеводов и множеством окислительных процессов [20; 15; 16].

По мере старения активность антиоксидантов (АО) семян значительно снижается [20]. Действие свободных радикалов и перекисное окисление

липидов приводят к деградации мембран и ДНК, а также снижается активность большинства ферментов в клетке [14]. Продолжительное хранение семян приводит к повышению концентрации продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ).

Продолжительное хранение приводит к резкому снижению активности каталазы, а также повышению концентрации продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ). По интенсивности протекания ПОЛ в семенах можно оценивать неспецифические адаптационные возможности организма, а по антиоксидантной системе – его компенсаторный потенциал. Эти показатели обычно взаимосвязаны и взаимозависимы [1]. Антиоксидантная система (АОС) выполняет важную роль в поддержании жизнеспособности покоящегося организма. При этом компоненты АОС могут не только обеспечивать продолжительность состояния покоя, но и, при создании благоприятных условий, активировать выход из состояния гипобиоза живых организмов.

Стрессовые воздействия (низкая температура, ультрафиолет, обработка химикатами, импульсное давление и т.п.), могут быть инициаторами окислительных процессов, таких как перекисное окисление липидов. При прорастании семян активируется комплекс окислительно-восстановительных реакций, образуются активные формы кислорода (АФК), которые инициируют разрушение клеточной мембраны, фосфолипидов, структурного и функционального ухудшения белков [6].

Защитой от АФК служит антиоксидантная система. Низкомолекулярные АО способны регулировать содержание свободных радикалов и влиять на величину пероксидазной активности, являясь субстратами пероксидазы. Кроме того, высокие концентрации АО служат индукторами синтеза пероксидазы [20]. Таким образом, устанавливаются взаимная связь и взаимное влияние компонентов АОС. При этом особая роль отводится пероксидазе, которая на начальных этапах прорастания может выступать в качестве инициатора дыхательной активности митохондрий, которые проявляли минимальную активность в покоящихся зерновках.

В ответ на стрессовые воздействия и при старении в тканях растения происходит увеличение содержания продукта ПОЛ – малонового диальдегида (МДА), что связано с активацией свободнорадикальных реакций клетках. Таким образом, содержание МДА может служить показателем активности окислительных процессов, обусловленных кислородными радикалами [22].

У пшеницы в процессе старения снижается всхожесть. Однако электропроводность, содержание МДА и пероксида водорода увеличивались

по мере старения. Растворимые сахара и белки снижались в процессе старения. Неферментативные антиоксиданты, такие как аскорбиновая кислота и пролин, а также антиоксидантные ферменты каталаза, пероксидаза и аскорбатпероксидаза увеличивались до 1-го и 2-го дней искусственного старения, затем они снижались. Увеличение содержания пероксида водорода при старении приводит к повреждению семян. При старении ферментативные антиоксиданты были более эффективными, чем неферментативные антиоксиданты, в удалении АФК [21].

При хранении накапливались органические свободные радикалы, скорее всего, семихиноны, обнаруженные методом электронного парамагнитного резонанса, в то время как глутатион частично терялся и частично превращался в глутатиондисульфид, обнаруженный методом ВЭЖХ [23].

Применение методов влияния на состояние покоя позволяет повысить всхожесть семян при посеве. Предпосевная обработка семян стимуляторами химической природы активизирует развитие микроорганизмов почв в значительно большей степени, чем ускоряет биохимические процессы в семенах [13]. Предпосевная обработка семян различными энергетическими методами (электромагнитное излучение, высокое гидростатическое давление) применяется как эффективный способ пробуждения семенного материала [10; 4].

Цель работы – выявление особенностей антиоксидантной системы зерновок пшеницы с мучнистым и стекловидным эндоспермом в процессе старения и под действием стрессора.

Новым научным положением, направленным на раскрытие механизма реакции семян на внешнее воздействие, является выявление феномена улучшения посевных качеств семян, подвергнутых длительному хранению, после предварительной ИД. Экспериментально доказано, что действии на семена ИД 11 и 29 МПа в течение чрезвычайно малого времени сразу после обработки способствовало снижению всхожести, пропорциональному дозе, но приводило к увеличению доли зерновок со стеклообразным эндоспермом, всхожести, содержания АО и снижению уровня ПОЛ по сравнению с контролем через 3 года хранения.

Материалы и методы исследования

Использовали сорт яровой мягкой пшеницы Саратовская 73, созданный в научно - исследовательском институте сельского хозяйства Юго-Востока. Родословная сорта: Лютесценс 2014/ Tr. timopheevii. Разновидность – грекум. Колос белый, остистый, неопушенный, зерно белое. Колос по форме

цилиндрический, средней крупности и плотности. Колосковая чешуя удлиненно-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, стекловидное. Бороздка зерна по ширине средняя, не глубокая. Соломина средней толщины и прочности, длиной на 3 см больше, чем у стандарта. Сорт средне-поздний, вегетационный период - 87 дней. Практически устойчив к пыльной головне, толерантен к бурой листовой ржавчине и мучнистой росе. Высокая зерновая продуктивность по сравнению со стандартом и высокое качество зерна. Максимальная урожайность отмечена на уровне 47,4 ц/га [5].

Семена обрабатывали импульсным давлением (ИД), создаваемым ударной волной, 11 МПа и 29 МПа [8, 9]. При детонации взрывчатого вещества возникает ударная волна, которая передается через воду на семена и создает объемное сжатие в течение 14-25 мксек. Малая продолжительность действия давления позволяет назвать его импульсным.

ИД на фронте ударной волны рассчитывали по формуле [8, 9]:

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

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

Для обработки семян растений использовали ИД от 3 до 50 МПа.

Обработку семян проводили в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. На дно контейнера из нержавеющей стали (1) укладывали порононовые кассеты (2) с сухими семенами (3), закрытыми сетчатым материалом. Контейнер (1) заполняли водой (4). В контейнере под водой закрепляли 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 производили детонацию взрывчатого вещества при помощи электродетонатора (7). В одной кассете находилось до 500 г семян, что являлось одной повторностью для всех нижеизложенных экспериментов. После обработки семена высушивали в течение 24 час при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Контрольные семена

замачивали в воде в течение времени, соответствовавшего продолжительности пребывания в воде семян при обработке ИД, и подсушивали. Достоинством метода является возможность точной дозировки воздействия, учитывая его уникально малую продолжительность [8].

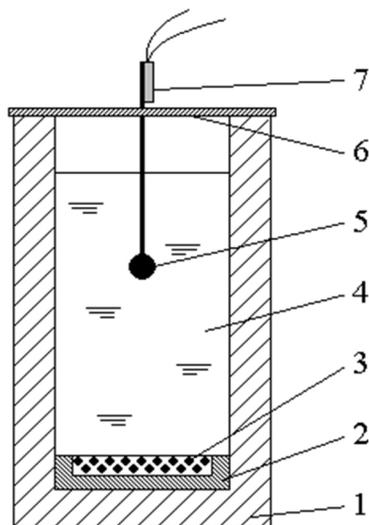


Рис. 1. Схема устройства для обработки семян ИД. Обозначения см. в тексте

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

Через 3 года после обработки и хранения (декабрь 2021 г.) зерновки были отсортированы на диафаноскопе на стекловидные (партия С) и мучнистые (партия М).

Определение всхожести проводили согласно ГОСТ 12038-84 Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Отбирали фракцию чистых выполненных семян. Четыре пробы по 50 семян в каждой проращивали рулонным методом. При учете энергии прорастания подсчитывали только нормально проросшие и явно загнившие семена, а при учёте всхожести отдельно подсчитывали нормально проросшие; набухшие, твердые, которые составили непроросшие семена и ненормально проросшие – невсхожие семена. За результат анализа принимали среднее арифметическое результатов определения всхожести всех проанализированных проб.

Содержание антиоксидантов (АО) определяли о-фенантролиновым методом по методу Рогожина [11; 17]. Метод основан на окислении хлоридом железа (III). При этом хлорид железа (III) восстанавливается до хлорида железа (II), количество которого определяли по интенсивности окраски при добавлении о-фенантролина при длине волны 510 нм. Для определения АО 0,5 г сырой массы проростков гомогенизировали в фарфоровой ступке с 1 мл 96%-ного этанолом. Экстракты количественно переносили в центрифужные пробирки, добавляя этанол до общего объема 3 мл. Экстракты центрифугировали в течение 10 минут при 10000 g.

Калибровочную кривую строили по аскорбиновой кислоте; ее концентрация составляла от 2 до 10 мгк•мл⁻¹. В контрольной пробирке содержалось 0,2 мл о-фенантролина (концентрацией 25 ммоль), 2,6 мл 96%-ного раствора этанола, 0,2 мл раствора FeCl₃ (концентрацией 12,3 ммоль), 1 мл раствора соляной кислоты (концентрацией 0,4 моль). Измеряли величину оптической плотности при длине волны 505 нм на спектрофотометре СФ-2000.

В опытную пробирку вносили 0,2 мл экстракта, 0,2 мл о-фенантролина, 0,2 мл раствора FeCl₃. Объем доводили до 3 мл этанолом, реакцию проводили в темноте при комнатной температуре в течение 10 минут. Реакцию останавливали добавлением 1 мл соляной кислоты и измеряли оптическую плотность. Концентрацию АО определяли по калибровочному графику.

Содержание АО, мг•г сыр.м.⁻¹ рассчитывали по формуле

$$AO = \frac{C \cdot V_1 \cdot V_3}{m \cdot V_2 \cdot 1000}$$

где C – концентрация АО, определенная по калибровочному графику, мгк•мл⁻¹;

m – навеска сырого растительного материала, г;

V_1 – объем, взятый для экстракции, мл;

V_2 – объем, вносимый в пробирку, мл;

V_3 – конечный объем пробы в пробирке, мл.

Определяли влажность растительного материала и пересчитывали содержание АО, мгк•г с.м.⁻¹.

Продукты ПОЛ определяли по реакции малонового диальдегида с тиобарбитуровой кислотой [1; 19]. Для этого 0,5 г сырой массы проростков гомогенизировали в фарфоровой ступке с 1 мл реакционной среды, содержащей 0,25%-ный раствор тиобарбитуровой кислоты и 10% раствор трихлоруксусной кислоты. Экстракты количественно переносили в центрифужные пробирки, добавляя реакционную среду до общего объема 4

мл. Пробирки плотно закрывали пробками, содержимое тщательно перемешивали и выдерживали на кипящей водяной бане в течение 30 минут. Затем пробы резко охлаждали и центрифугировали в течение 10 минут при 10000 г. Оптическую плотность измеряли при длине волны 532 и 660 нм на спектрофотометре СФ-2000. Содержание ТБК-реагирующих продуктов (ТБКРП, ммоль г сыр.м.⁻¹) рассчитывали по формуле

$$\text{ТБКРП} = \frac{D_{532} - D_{660}}{155 \cdot m}$$

где D_{532} и D_{660} – соответственно оптическая плотность при длине волны 532 и 660 нм;

155 – коэффициент экстинкции ТБК, ммоль⁻¹ см⁻¹;

m – навеска сырого растительного материала, г

Определяли влажность растительного материала и пересчитывали содержание ТБКРП – продуктов ПОЛ, ммоль•г с.м.⁻¹.

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 1, А, Б, исходная энергия прорастания у контрольных зерновок пшеницы до начала хранения составляла 93-95%, всхожесть – 93,5-95,5%. Увеличение количества нормальных проростков в 8 сут по сравнению с 4 сут произошло за счет перехода аномальных проростков в нормальные. Имеется тенденция уменьшения исходной всхожести у зерновок со стекловидным эндоспермом по сравнению с зерновками с мучнистым эндоспермом.

Обработка ИД 11 МПа способствовала незначительному снижению всхожести главным образом за счет появления аномальных проростков. ИД 29 МПа способствовало существенному снижению энергии прорастания и всхожести как за счет аномальных, так и за счет мертвых зерновок. Это явление вызвано стрессирующим влиянием ИД в малых и больших дозах [12]. Во всех вариантах обнаружена тенденция незначительного уменьшения исходной всхожести у зерновок со стекловидным эндоспермом по сравнению с зерновками с мучнистым эндоспермом.

Через 3 года хранения энергия прорастания (рис. 1, В) и всхожесть (рис. 1, Г) контрольных зерновок с мучнистым эндоспермом была самой низкой (20%). Значительную часть составляли мертвые зерновки. Такое явление является результатом старения зерновок. У контрольных зерновок со стекловидным эндоспермом энергия прорастания составляла 33%, а всхожесть снизилась до 27% за счет появления аномальных проростков. В этом варианте было больше зерновок, способных к прорастанию.

Следовательно, переход в стекловидное состояние продляет жизнь семян [15]. Действие ИД – кратковременное сжатие – способствовало увеличению доли зерновок со стекловидным эндоспермом [16]. Торможение процесса старения при обработке ИД объясняется переходом крахмала из кристаллического в стеклообразное состояние [3]. Результатом явилось повышение энергии прорастания и всхожести, возрастающее с увеличением давления от 11 МПа до 29 МПа.

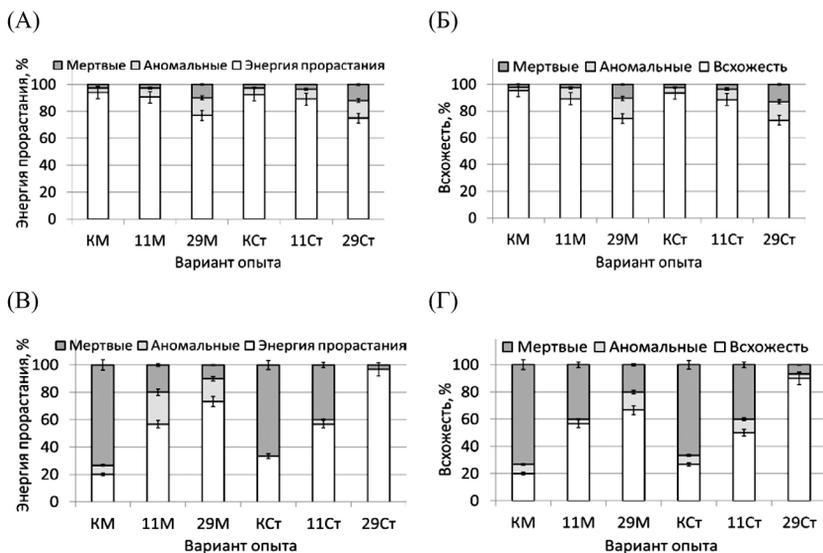


Рис. 2. Энергия прорастания пшеницы, 4 сут. до хранения (А), через 3 года (В) и всхожесть пшеницы, 8 сут. до хранения (Б), через 3 года (Г)

Через 3 года хранения содержание АО (рис. 2 А) в контрольных зерновках с мучнистым эндоспермом было выше, чем в контрольных зерновках со стекловидным эндоспермом, что связано с проявлением специфичности в корреляции компонентов АОС.

При обработке ИД 11 МПа у стекловидных зерновок (С) содержание АО значительно возросло по сравнению с контролем. Это может указывать на повреждения структуры эндосперма и высвобождение соединений с антиоксидантной активностью.

В зерновках с мучнистым эндоспермом (М), обработанных ИД 11 МПа, содержание АО не изменилось по сравнению с контролем. Обработка ИД 11 МПа продляет жизнь семян, ингибируя окислительные реакции.

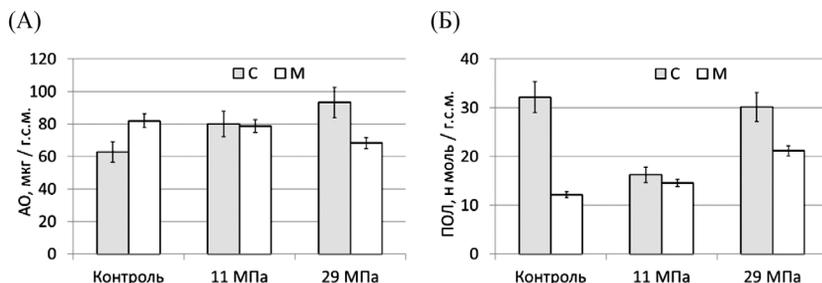


Рис. 3. Содержание антиоксидантов (А) и продуктов ПОЛ (Б) в зерновках

После обработки ИД 29 МПа у стекловидных зерновок также возросло содержание АО, а на мучнистые семена обработка не оказала подобного воздействия.

Следовательно, для партий мягкого сорта пшеницы, в которых преобладают мучнистые зерновки, обработка ИД может быть применена как метод продления состояния покоя.

Как видно на рис. 1 б, в контрольных зерновках со стекловидным эндоспермом партии С по сравнению с партией М содержание продуктов ПОЛ высокое. Содержание продуктов ПОЛ в зерновках, обработанных ИД 11 МПа, было существенно ниже контроля. Это указывает на работу антиоксидантной системы, связывающей свободные радикалы. Повышение ПОЛ при ИД 29 МПа свидетельствует о некоторой избыточности действующего фактора для данного типа семян, в них накапливаются и развиваются микроповреждения.

Таким образом, обработка ИД 11 МПа продляет жизнь семян мягкой пшеницы за счет снижения содержания скорости накопления продуктов ПОЛ.

Заключение

Исследования показали, что в процессе хранения зерновок пшеницы в течение трех лет всхожесть снизилась преимущественно за счет появления в партии мертвых зерновок. Наибольшее снижение всхожести наблюдали у зерновок с мучнистым эндоспермом. ИД как стрессор сразу после обработки способствовало снижению всхожести, пропорциональному дозе, но при этом ИД способствовало сжатию зерна и витрификации биополимеров. Увеличение доли зерновок со стеклообразным эндоспермом привело к увеличению всхожести по сравнению с контролем через 3 года хранения. Содержание антиоксидантов после хранения в целом увеличилось под действием ИД, а

уровень ПОЛ – снизился. Более высокое содержание АО выявлено в зерновках со стекловидным эндоспермом после обработки ИД и хранения. Перевод биополимеров в стеклообразное состояние с помощью ИД способствует сохранению жизнеспособности зерна в процессе хранения.

Список литературы

1. Верхотуров В.В. Физиолого - биохимические процессы в зерновках ячменя и пшеницы при их хранении, прорастании и переработке: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Москва, 2008. 44 с.
2. 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. дис. ... д-ра биол. наук. Москва, 2008. 48 с.
3. Влияние обработки импульсным давлением на динамику содержания протеина в зерновках пшеницы при хранении / В.А. Павлова, Е.Э. Нефедьева, В.И. Лысак, С.Л. Белопухов, В.В. Верхотуров // Хлебопродукты. 2013. № 12. С. 55-57.
4. Кругликов, Н. А., Быструшкин А. Г., Беляев А. Ю. Влияние экстремальных физических факторов на биологические свойства семян солодки уральской // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 2. С. 228-232. <https://doi.org/10.31857/S0367676522020144>
5. Куковский С. А. Совершенствование технологии возделывания яровой мягкой пшеницы в условиях Саратовского Левобережья: диссертация ... кандидата сельскохозяйственных наук: 06.01.01. Саратов, 2016
6. Мамедова С.А., Ахундов А.Ф. Сортовые различия герогенеза семян лука // Роль физиологии и биохимии в интродукции и селекции овощных, плодово-ягодных и лекарственных растений: материалы III Международной конференции. М.: Изд-во РУДН, 2017. С. 298-300.
7. Мамедова С.А., Бабаева М.А. Оценка стрессоустойчивости генотипов синтетической пшеницы японского происхождения // Успехи современного естествознания. 2022. № 2. С. 14-19. <https://doi.org/10.17513/use.37772>
8. Нефедьева Е.Э. Физиолого-биохимические процессы и морфогенез у растений после действия импульсного давления на семена / диссертация ... доктора биологических наук: 03.01.05 Москва 2011. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005086764>
9. Патент 2083073 Российская Федерация, МПК А01С 1/00, А01G 7/04 Способ предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур / Атрощенко Э.С. и др. 10.07.1997.

10. Предпосевная обработка семян подсолнечника, сои и кукурузы низкочастотным электромагнитным излучением / Левина Н.С., Тертышная Ю.В., Бидей И.А., Елизарова О.В. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018 Т. 12. №4. С. 22-28. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-22-28>
11. Рогожин В. В. Практикум по биохимии: учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 544 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/211406>
12. Содержание фитогормонов, рост и развитие растений гречихи под действием импульсного давления / Нефедьева Е.Э., Мазей Н.Г., Мирошниченко А.А., Хрянин В.Н. // Сельскохозяйственная биология. 2003. Т. 38. № 1. С. 54-61. URL: <http://www.agrobiology.ru/1-2003.html>
13. Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Багырев Ю.П. Микроорганизмы почв и стимуляторы прорастания семян // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2019. Т. 11. № 1. С. 47-64. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2019-11-1-47-64>
14. Швачко Н.А., Хлесткина Е.К. Молекулярно-генетические основы устойчивости семян к окислительному стрессу при хранении // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. Т. 24. № 5. С. 451-458. <https://doi.org/10.18699/VJ20.47-0>
15. Bernal-Lugo I., Leopold A.C. Changes in Soluble Carbohydrates during Seed Storage // Plant Physiol. 1992. V. 98. P. 1207-1210. <https://doi.org/10.1104/pp.98.3.1207>.
16. Dependence of germination of wheat grains after the treatment by impulse pressure and long-term storage on the vitreousness of endosperm / Nefedieva E.E., Khramova Ya.I., Khramova V.N., Gorlov I.F., Lysak V.I., Slozhenkina M.I. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021. P. 32078. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032078>
17. Hendry G.A.F. Oxygen, free radical processes and seed longevity // Seed Sci. Res. 1993. V. 3. P. 141-153. <https://doi.org/10.1017/S0960258500001720>
18. Lv Y., Zhang S., Wang J., Hu Y. Quantitative proteomic analysis of wheat seeds during artificial ageing and priming using the isobaric tandem mass tag labeling // PLoS ONE. 2016. Т. 11. № 9. С. e0162851. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162851>
19. Mihara M, Uchiyama M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. Anal Biochem. 1978. V. 86. P. 271-278. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(78\)90342-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(78)90342-1)
20. Navjot Singh Brar, Prashant Kaushik, Bagrawat Singh Dudi Assessment of Natural Ageing Related Physio-Biochemical Changes in Onion Seed. Agriculture. 2019. Vol. 9. № 163. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE9080163>

21. Shaaban M. The effect of ageing on antioxidant and biochemical changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds // Iranian Journal of Plant Physiology. 2016. T. 6. № 4. P. 1805-1815. <https://doi.org/10.22034/IJPP.2016.532651>
22. Veselovsky V.A., Veselova T.V. Lipid peroxidation, carbohydrate hydrolysis, and Amadori-Maillard reaction at early stages of dry seed aging // Russian Journal of Plant Physiology. 2012. Vol. 59. № 6. P. 811-817. <https://doi.org/10.1134/S1021443712030181>
23. Wheat seed ageing viewed through the cellular redox environment and changes in pH / Nagel M., Richter J., Börner A., Seal C.E., Colville L., Pritchard H.W., Rodenstein A., Un S., Kranner I. // Free Radical Research. 2019. V. 53. № 6. P. 641-654. <https://doi.org/10.1080/10715762.2019.1620226>

References

1. Verkhoturor V.V. *Fiziologo - biokhimicheskie protsessy v zernovkakh yach-menya i pshenitsy pri ikh khraneni, prorastanii i pererabotke* [Physiological and biochemical processes in barley and wheat grains during their storage, germination and processing]: Abstract of Dr dissertation. Moscow, 2008, 44 p.
2. Veselova T.V. *Izmenenie sostoyaniya semyan pri ikh khraneni, prorashchivani i pod deystviem vneshnikh faktorov (ioniziruyushchego izlucheniya v malykh dozakh i drugikh slabykh vozdeystviy), opredelyaemoe metodom zamedlennoy lyuminestsentsii* [Changes in the state of seeds during 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]. Abstract of Dr dissertation. Moscow, 2008, 48 p.
3. Pavlova V.A., Nefed'eva E.E., Lysak V.I., Belopukhov S.L., Verkhoturor V.V. Vliyanie obrabotki impul'snym davleniem na dinamiku sodержaniya proteina v zernovkakh pshenitsy pri khraneni [The effect of pulse pressure treatment on the dynamics of protein content in wheat grains during storage]. *Khleboprodukt*, 2013, no. 12, pp. 55-57.
4. Kruglikov N.A., Bystrushkin A.G., Belyaev A.Yu. Vliyanie ekstre-mal'nykh fizicheskikh faktorov na biologicheskie svoystva semyan solodki ural'skoy [The influence of extreme physical factors on the biological properties of licorice Ural seeds]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 2022, vol. 86, no. 2, pp. 228-232. <https://doi.org/10.31857/S0367676522020144>
5. Kukovskiy S. A. *Sovershenstvovanie tekhnologii vzdelyvaniya yarovoy myagkoy pshenitsy v usloviyakh Saratovskogo Levoberezh'ya* [Improving the technology of cultivation of spring soft wheat in the conditions of the Saratov Left Bank]: dissertation ... candidate of agricultural sciences: 06.01.01. Saratov, 2016.

6. Mamedova S.A., Akhundov A.F. *Rol' fiziologii i biokhimii v introduksii i selektsii ovoshchnykh, plodovo-yagodnykh i lekarstvennykh rasteniy* [Varietal differences in the gerogenesis of onion seeds]: materials of III International Conference. Moscow: RUDN, 2017, pp. 298-300.
7. Mamedova S.A., Babaeva M.A. Otsenka stressoustoychivosti genotipov sinteticheskoy pshenitsy yaponskogo proiskhozhdeniya [Assessment of stress resistance of genotypes of synthetic wheat of Japanese origin]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 2, pp. 14-19. <https://doi.org/10.17513/use.37772>
8. Nefed'eva E.E. Deystvie impul'snogo davleniya na rost, razvitie i produktivnost' rasteniy grechikhi [The effect of impulse pressure on the growth, development and productivity of buckwheat plants]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region*, 2003, no. 6 (9), pp. 193-201.
9. Atroshchenko E.S. et al. Patent 2083073 Russian federation, IPC A01C 1/00, A01G 7/04 *Sposob predposevnoy obrabotki semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Method of pre-sowing treatment of seeds of agricultural crops] 10.07.1997. URL: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=6b45cdb89c442cd40dc5614f01a53c13>
10. Levina N.S., Tertyshnaya Yu.V., Bidey I.A., Elizarova O.V. Predposevnaya obrabotka semyan podsolnechnika, soi i kukuruzy niz-kochastotnym elektromagnitnym izlucheniem [Pre-sowing treatment of sunflower seeds, soybeans and corn with low-frequency electromagnetic radiation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*, 2018, V. 12, no. 4. P. 22-28. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-4-22-28
11. Rogozhin V. V. *Praktikum po biokhimii* [Workshop on biochemistry] Saint-Petersburg: Lan', 2022, 544 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/21140>
12. Nefed'eva E.E., Mazey N.G., Mirosnichenko A.A., Khryanin V.N. Soderzhanie fitogormonov, rost i razvitie rasteniy grechikhi pod deystviem impul'snogo davleniya [The content of phytohormones, growth and development of buckwheat plants under the action of pulsed pressure]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2003, vol. 38, no. 1, P. 54-61. URL: <http://www.agrobiology.ru/1-2003.html>
13. Fedotov G.N., Shalaev V.S., Batyrev Yu.P. Mikroorganizmy pochv i stimulyatory prorastaniya semyan [Soil microorganisms and seed germination stimulators]. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 47-64. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2019-11-1-47-64>
14. Shvachko N.A., Khlestkina E.K. Molekulyarno-geneticheskie osnovy ustoychivosti semyan k oksislitel'nomu stressu pri khranении [Molecular genetic foundations of seed resistance to oxidative stress during storage]. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. 451-458. <https://doi.org/10.18699/VJ20.47-o>

15. Bernal-Lugo I., Leopold A.C. Changes in Soluble Carbohydrates during Seed Storage. *Plant Physiol.*, 1992, vol. 98, pp. 1207-1210. <https://doi.org/10.1104/pp.98.3.1207>
16. 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*. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021, 32078. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032078>
17. Hendry G.A.F. Oxygen, free radical processes and seed longevity. *Seed Sci. Res.*, 1993, vol. 3, pp. 141– 153. <https://doi.org/10.1017/S0960258500001720>
18. Lv Y., Zhang S., Wang J., Hu Y. Quantitative proteomic analysis of wheat seeds during artificial ageing and priming using the isobaric tandem mass tag labeling. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, no. 9, e0162851. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162851>
19. Mihara M, Uchiyama M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. *Anal Biochem.*, 1978, vol. 86, pp. 271-278. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(78\)90342-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(78)90342-1)
20. Navjot Singh Brar, Prashant Kaushik, Bagrawat Singh Dudi Assessment of Natural Ageing Related Physio-Biochemical Changes in Onion Seed. *Agriculture*, 2019, vol. 9, no. 163. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE9080163>
21. Shaaban M. The effect of ageing on antioxidant and biochemical changes in wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 2016, vol. 6, no. 4, pp. 1805-1815. <https://doi.org/10.22034/IJPP.2016.532651>
22. Veselovsky V.A., Veselova T.V. Lipid peroxidation, carbohydrate hydrolysis, and Amadori-Maillard reaction at early stages of dry seed aging. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2012, vol. 59, no. 6, pp. 811-817. <https://doi.org/10.1134/S1021443712030181>
23. Wheat seed ageing viewed through the cellular redox environment and changes in pH. Nagel M., Richter J., Börner A., Seal C.E., Colville L., Pritchard H.W., Rodenstein A., Un S., Kranner I. *Free Radical Research*, 2019, vol. 53, no. 6, pp. 641-654. <https://doi.org/10.1080/10715762.2019.1620226>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Храмова Ярославна Игоревна, аспирант кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

пр-т Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Российская Федерация

yaroslavnacosmos@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2194-461X>

Scopus Author ID: 57222573097

Нефедьева Елена Эдуардовна, д-р биол. наук, профессор кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

пр-т Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Российская Федерация

nefedieva@rambler.ru

SPIN-code: 9879-6283

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4782-3835>

ResearcherID: E-9959-2014

Scopus Author ID: 8234407800

Храмова Валентина Николаевна, д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры «Технология пищевых производств», декан факультета технологии пищевых производств

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

пр-т Ленина, 28, г. Волгоград, 400005, Российская Федерация

hramova_vn@mail.ru

SPIN-code: 5483-6255

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7630-7672>

ResearcherID: ID 8038-2015

Scopus Author ID: 57190736311

DATA ABOUT THE AUTHORS

Yaroslavna I. Khramova, Postgraduate Student of the Department “Industrial Ecology and Life Safety”

Volgograd State Technical University
28, Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation
yaroslavnacosmos@icloud.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2194-461X>
Scopus Author ID: 57222573097

Elena E. Nefed'eva, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department “Industrial Ecology and Life Safety”
Volgograd State Technical University
28, Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation
nefedieva@rambler.ru
SPIN-code: 9879-6283
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4782-3835>
ResearcherID: E-9959-2014
Scopus Author ID: 8234407800

Valentina N. Khramova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department “Food Production Technology”, Dean of the Faculty of Food Production Technology
Volgograd State Technical University
28, Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation
hramova_vn@mail.ru
SPIN-code: 5483-6255
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7630-7672>
ResearcherID: ID 8038-2015
Scopus Author ID: 57190736311

Поступила 17.08.2022

После рецензирования 29.08.2022

Принята 30.09.2022

Received 17.08.2022

Revised 29.08.2022

Accepted 30.09.2022