

УДК631.53.01+633.11+632.03

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-393-04-121-128

В.И. Левин

А.С. Ступин ✉

Рязанский государственный
агротехнологический университет
им. П.А. Костычева, Рязань, Россия

✉ stupin32@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.01.2025

Одобрена после рецензирования: 12.03.2025

Принята к публикации: 26.03.2025

© Левин В.И., Ступин А.С.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-393-04-121-128

Viktor I. Levin

Alexander S. Stupin ✉

Ryazan State Agrotechnological
University named after P.A. Kostychev,
Ryazan, Russia

✉ stupin32@yandex.ru

Received by the editorial office: 24.01.2025

Accepted in revised: 12.03.2025

Accepted for publication: 26.03.2025

© Levin V.I., Stupin A.S.

Механизм ингибирования интактных семян яровой пшеницы, индуцированный хранением с травмированными и поврежденными зерновками

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Экспериментально подтвержден и теоретически обоснован механизм ингибирующего воздействия травмированными и поврежденными зерновками на морфологические и посевные качества неповрежденных (интактных*) семян. В опыте были использованы три партии семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Агата. Всю совокупность семян делили на две части — семена-индукторы (СИ) и семена-детекторы (СД). Роль СД выполняли СИ: а) семена с микротравмами, б) семена с микро- и макротравмами, в) семена с гидротермическими повреждениями. Продолжительность хранения семян составляла 24 мес., включая различные условия воздухообмена между семенами. Контроль — интактные семена, отдельно хранившиеся.

Результаты. Хранение семян до 3 сут. сопровождалось ускорением прорастания у СД на 6,5%, увеличением массы проростков, линейных параметров ростка и наибольшего первичного корешка к контролю, соответственно, на 13,5–18,3%, 13,6–15,8%, 9,3–10,3%. При хранения от 12 до 24 мес. происходило снижение прорастания на 5,6–22,2%.

Морфометрические параметры проростков в зависимости от вариантов опыта составляли от уровня контроля, соответственно, 62,1–83,7%, 56,0–77,8% и 57,7–87,9%.

Концентрация этилена в межзерновой воздушной среде при пассивном воздухообмене в опытных вариантах превышала контроль в 3,5–5,7 раза. Механизм угнетения интактных семян обусловлен воздействием фитогормона этилена, выделяемого травмированными и поврежденными семенами. Блокировать эффект угнетения и пролонгировать кондиционные посевные качества у интактных семян позволяет хранение при гипоксии.

Ключевые слова: семена, яровая пшеница, хранение, ингибирование, травмирование, этилен

Для цитирования: Левин В.И., Ступин А.С. Механизм ингибирования интактных семян яровой пшеницы, индуцированный хранением с травмированными и поврежденными зерновками. *Аграрная наука*. 2025; 393(04): 121–128.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-121-128>

The mechanism of suppression of intact spring wheat seeds induced by storage with injured and damaged grains

ABSTRACT

Relevance. The mechanism of the inhibitory effect of injured and damaged grains on the morphophysiological and sowing qualities of intact seeds has been experimentally confirmed and theoretically substantiated. Three batches of spring wheat seeds (*Triticum aestivum* L.) of the Agate variety were used in the experiment. The whole set of seeds was divided into two parts: seed inductors (SI) and seed detectors (SD). The role of SD was performed by intact seeds, SI: a) seeds with microtrauma, b) seeds with micro- and macrotrauma, c) seeds with hydrothermal damage. The duration of seed storage was 24 months, including various conditions of air exchange between seeds. Control — intact seeds, stored separately.

Results. Storage of seeds for up to 3 days. It was accompanied by an acceleration of germination in DM by 6.5%, an increase in the mass of seedlings, linear parameters of the sprout and the largest primary root to control, respectively, by: 13.5–18.3%, 13.6–15.8%, 9.3–10.3%. During storage from 12 to 24 months, germination decreased by 5.6–22.2%. The morphometric parameters of the seedlings, depending on the experimental options, depended on the control level, respectively, 62.1–83.7%, 56.0–77.8% and 57.7–87.9%. The concentration of ethylene in the intergranular air during passive air exchange in the experimental versions exceeded the control by 3.5–5.7 times. The mechanism of inhibition of intact seeds is caused by the action of the ethylene phytohormone released by injured and damaged seeds. Block the effect of suppression and prolongation of conditioned sowing qualities in intact seeds allows storage under hypoxia.

Key words: seeds, spring wheat, storage, inhibition, injury, ethylene

For citation: Levin V.I., Stupin A.S. The mechanism of suppression of intact spring wheat seeds induced by storage with injured and damaged grains. *Agrarian science*. 2025; 393(04): 121–128 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-121-128>

Введение/Introduction

Базовой основой формирования высокоурожайных посевов зерновых культур, отличающихся повышенной устойчивостью на ранних этапах онтогенеза к неблагоприятным погодным условиям, является использование неповрежденных, физиологически зрелых с повышенными посевными качествами и урожайными свойствами семян высоких репродукций [1, 2]. Как ранее применяемая [3], так и современная механизированная уборка урожая зерновых культур, последующие технологические операции по очистке, сортировке, погрузке и транспортировке зерновой массы и доведению сушкой до кондиционной влажности не лишены недостатков и неизбежно сопровождаются механическими повреждениями (травмами) плодовых оболочек, эндосперма и зародыша более чем у половины зерновок [4–6].

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в практике производства зерна разных климатических зон травмирование семян относится к числу наиболее широко распространенных видов повреждения семенного материала [2, 7, 8].

Травмирование сопровождается ухудшением у семян хозяйственно ценных показателей: они становятся менее стойкими при хранении [9, 10], у них снижаются масса проростков и посевные качества [7, 11, 12], особенно полевая всхожесть [6] и урожайность [2].

Важная роль отводится обеспечению устойчивого хранения зерновой массы в регулируемой газовой среде [13, 14]. Кроме того, детальными исследованиями физиологических особенностей семян растений установлено, что на воздействие абиотических стресс-факторов семена как целостный саморегулирующий организм отвечают адапционно-защитными реакциями с выделением летучих физиологически активных метаболитов, в которых идентифицирован фитогормон этилен, обладающий способностью дистанционно модифицировать качество интактных семян [15].

Вышеизложенный экспериментальный материал позволяет дополнить сложившуюся биологическую парадигму семян растений ранее малоизвестными научными знаниями о их физиологических свойствах и дает основание сформулировать рабочую гипотезу, согласно которой механизм угнетения прорастания семян и снижения всхожести в партиях зерновых культур обусловлен наличием в них травмированных и поврежденных зерновок. Ключевую роль триггера в реализации физиологической программы угнетения семян выполняют летучие физиологические активные метаболиты (ЛФАМ), выделяемые при хранении поврежденными и травмированными семенами.

Цель работы заключается в экспериментальном доказательстве механизма ингибирующего воздействия травмированными и поврежденными

зерновками неповрежденных (интактных) семян зерновых культур, а также в теоретическом обосновании эффективных методов пролонгации кондиционной всхожести семян страховых и переходящих фондов, формирование и уборка урожая которых проходили при неблагоприятных метеорологических условиях.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили с 2020 по 2024 г. на трех партиях семян яровой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Агата, отвечающих требованиям ГОСТ Р 52325-2005¹. Лабораторные опыты включали использование семян, выращенных в полевых условиях в соответствии с зональными особенностями выращивания зерновых культур, адаптированных для центральных районов Нечерноземной зоны, и отражали последовательное выполнение следующих процессов:

1. Подготовку образцов семян-индукторов* и семян-детекторов**.

2. Последующее дистанционное хранение семян-индукторов с семенами-детекторами продолжительностью от 1 до 24 месяцев.

3. Мониторинг комплексной оценки влияния семян-индукторов на семена-детекторы в зависимости от условий их совместного хранения.

Подготовка образцов семян-индукторов (СИ) основывалась на уборке урожая при разных погодных условиях в диапазоне от стандартных до экстремальных и технологических операций послеуборочной доработки и подготовки зерновой массы к хранению (транспортировке, очистке, сортировке, сушке). В опыте СИ были представлены вариантами:

• вариант № 1 — семена-индукторы (стандарт) (ССИ). Семена с влажностью 14,5–6,0% убирали комбайном ACROS 595 Plus (ГК «Ростсельмаш», Россия) при оптимальных погодных условиях с низкой влажностью воздуха, своевременным выполнением всего комплекса послеуборочной подготовки семенного материала к хранению, в котором содержались от 29 до 43% зерновок с микроповреждениями и отсутствовали зерновки с макротравмами;

• вариант № 2 — семена-индукторы травмированные (СТИ). Уборку урожая данных семян проводили при погодных условиях с повышенной влажностью воздуха и зерна, жестком режиме обмола растений с отклонением от рекомендованных технологических операций послеуборочной доработки и сушки 40 ± 5 °C перед закладкой на хранение. Количество семян с микроповреждениями составляло 63–71%, содержание в них зерновок с макротравмами — от 8 до 11%;

вариант № 3 — семена-индукторы поврежденные (СПИ). В данном варианте семена варианта № 1 дополнительно инкубировали в термостате

¹ ГОСТ Р 52325-2005 Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия.

при положительной температуре 45 ± 5 °С и 75% относительной влажности воздуха в течение 3–5 сут. (по методу ускоренного старения), когда у семян всхожесть снижалась более чем на 15%, то есть моделировали экстремальные условия уборки урожая и послеуборочной доработки семенного материала.

Роль семян-детекторов (СД) выполняли семена яровой пшеницы, полученные ручным вышелушиванием зерновок из колоса. Данные семена одновременно являлись контролем с той лишь разницей, что их хранили отдельно от семян всех других вариантов опыта.

Для предупреждения смешивания СИ с СД их хранили в отдельных пакетах из тканых материалов.

Опыты проводили в соответствии со схемой:

1. Контроль — интактные семена (отдельное хранение).

2. СД + ССИ.

3. СД + СТИ.

4. СД + СПИ.

Дополняли ее различными режимами воздухообмена между СД и СИ: а) пассивным воздухообменом, б) активной аэрацией за счет приточно-вытяжной вентиляции, в) контейнерным хранением в общем объеме воздушной среды (гипоксия), г) контейнерным изолированным хранением (воздухонепроницаемые полисинтетические материалы).

Семена СД хранили дистанционно с семенами СИ на расстоянии друг от друга $5,0 \pm 0,5$ см в течение 24 месяцев.

Соотношение по массе между семенами СД и СИ составляло от 1:1 до 3–5:1, по абсолютной массе образцов — от 1 до 3 кг, влажность — 12,5–14% (в лабораторных условиях), в диапазоне положительных температур 18–21 °С с относительной влажностью воздуха 55–65%, были защищены от фотоактивации прямым светом.

Критерием оценки влияния семян СИ на СД являлись динамика прорастания семян, морфофизиологические показатели проростков, энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян.

Прорастание семян регистрировали по разрыву целостности, первичным корешком, плодовой оболочкой зерновок, морфофизиологические показатели по параметрам длины ростка и наибольшего первичного корешка у 3-суточных проростков — методом проращивания в рулонах из фильтровальной бумаги по 25 шт. 4-кратной повторности. Энергию прорастания и лабораторную всхожесть — по ГОСТ 12038-84². Наличие микроповреждений у семян определяли методом окрашивания зерновок³ красителями³ с последующим использованием лупы с 10-кратным увеличением.

Методом газовой хроматографии с использованием хроматографа марки «Кристалл-2000М»

(ЗАО СКБ «Хроматэк», Россия) определяли концентрацию этилена в продуцируемых СИ летучих физиологически активных метаболитов.

Статистическую обработку исследуемых морфометрических показателей проростков семян оценивали по критерию Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты представлены в виде среднего значения и стандартной ошибки среднего.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В результате исследований обнаружена способность травмированных и поврежденных семян-индукторов яровой пшеницы дистанционно (бесконтактно, на расстоянии) при пассивном воздухообмене изменять интенсивность прорастания (наклева) у семян-детекторов по отношению к контролю (табл. 1).

Динамика прорастания семян при хранении сопровождалась слабовыраженной стимуляцией у семян-детекторов, хранившихся с поврежденными семенами-индукторами, к 3 мес. хранения, на 1-е сут. проращивания, которая на 12 и 24 мес. хранения сменялась существенным снижением интенсивности прорастания к контролю, соответственно, на 7,8–13,1% и 18,2–22,2%. В варианте с семенами-детекторами, хранившимися с травмированными семенами-индукторами, только к 24 мес. хранения интенсивность прорастания была значимо ниже контроля на 5,6–10,7%.

У семян-детекторов, хранившихся с семенами-индукторами (стандарт), наблюдалась только устойчивая тенденция снижения интенсивности прорастания в момент завершения совместного хранения — 24 мес.

Хранение семян до 18 мес. в режиме активной аэрации не выявило угнетающего воздействия СИ на СД, за исключением снижения интенсивности прорастания семян в 1-е сутки на 6,0% и 8,8% в вариантах семена-детекторы, хранившиеся с травмированными семенами-индукторами, и семена-детекторы, хранившиеся с поврежденными семенами-индукторами 24 мес.

Наличие свободного воздухообмена создает условия для образования семенами-индукторами летучих физиологически активных метаболитов и обуславливает их влияние на семена-детекторы. Но при активной аэрации образующиеся летучие соединения непрерывно элиминируются (вымываются) из межзерновой воздушной среды, минимизируя влияние семян-индукторов на семена-детекторы.

Режим контейнерного хранения семян-индукторов и семян-детекторов включал максимальное заполнение всего объема контейнера семенным материалом. Данные условия исключали воздухообмен семенного материала с кислородом атмосферного воздуха, то есть обеспечивали

² ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести.

³ Гриценко В.В., Колошина З.М. Семеноведение полевых культур. 1984.

Таблица 1. Интенсивность прорастания семян-детекторов в зависимости от условий и продолжительности их хранения с семенами-индукторами

Table 1. The germination rate of detector seeds depends on the conditions and duration of their storage with inductor seeds

Варианты опыта	Продолжительность хранения, мес.											
	3			6			12			24		
	Интенсивность прорастания семян в сутки, %											
	1-е	2-е	3-е	1-е	2-е	3-е	1-е	2-е	3-е	1-е	2-е	3-е
<i>Пассивный воздухообмен</i>												
Контроль	71,3±3,5	94,7±1,9	95,2±1,3	74,6±2,8	95,1±1,2	97,0±0,7	72,8±3,8	93,2±2,2	96,1±1,1	73,4±3,2	96,0±1,1	96,9±0,9
СД + ССИ	72,8±3,3	95,1±1,8	96,5±1,2	75,2±2,7	94,8±1,7	95,8±1,2	70,3±3,5	92,6±2,3	95,0±1,3	68,8±3,5	93,7±2,2	95,1±1,2
СД + СТИ	75,9±2,9	94,7±1,9	95,3±1,7	73,1±3,1	94,2±1,8	95,5±1,3	69,2±3,0	92,1±1,9	94,0±2,3	62,7±3,9*	90,4±2,8*	92,5±1,8
СД + СПИ	77,8±2,6*	94,8±2,1	95,4±1,8	72,9±3,2	93,6±2,2	94,1±2,1	64,8±4,1*	80,1±3,2*	88,3±3,1*	55,2±4,8*	73,8±3,9*	82,3±3,1*
<i>Активная аэрация</i>												
Контроль	72,5±2,9	95,3±1,2	97,2±0,6	78,4±2,4	96,4±1,1	97,1±0,8	73,6±3,2	95,4±1,2	96,3±1,1	76,4±3,3	96,5±1,1	97,08±0,7
СД + ССИ	74,8±2,7	94,7±1,3	95,9±1,1	75,8±2,6	96,3±1,1	97,5±0,6	72,6±3,3	95,3±1,3	96,1±1,1	73,2±3,5	96,3±1,2	96,9±0,8
СД + СТИ	73,6±2,5	95,4±1,1	96,3±0,9	79,0±1,9	97,1±0,8	97,6±0,5	75,2±2,9	95,5±1,3	96,8±1,2	70,4±2,4*	94,9±1,7	96,3±1,2
СД + СПИ	75,0±2,6	95,8±1,1	97,1±0,7	75,3±2,5	94,6±1,2	97,0±0,9	74,1±3,1	95,3±1,2	96,1±1,1	67,6±4,5*	94,8±1,6	95,9±1,3
<i>Контейнерное хранение в общем объеме воздушной среды</i>												
Контроль	80,6±2,3	96,3±0,7	97,4±0,5	77,1±3,3	95,5±1,3	96,9±1,2	81,6±2,1	95,4±1,7	96,2±1,1	82,7±2,9	97,3±0,6	97,8±0,5
СД + ССИ	79,8±2,4	96,2±0,8	97,1±0,7	80,3±2,1	96,4±0,8	98,1±0,5	82,5±1,9	97,1±0,7	97,9±0,4	78,6±3,2	95,8±1,5	96,7±1,1
СД + СТИ	82,3±1,9	97,6±0,5	98,3±0,4	76,4±3,7	95,7±1,1	97,2±0,6	81,7±2,2	97,0±0,8	97,8±0,5	79,2±3,1	97,5±0,8	98,1±0,4
СД + СПИ	81,8±2,1	96,7±0,6	97,2±0,5	80,9±2,4	97,3±0,6	98,1±0,4	78,4±3,4	96,6±1,2	96,5±1,3	80,7±2,5	96,9±1,1	97,4±0,6
<i>Контейнерное изолированное хранение</i>												
Контроль	83,7±1,9	95,7±1,3	96,8±1,1	80,5±2,2	96,1±1,4	96,3±1,4	82,9±2,1	96,8±1,1	97,3±0,6	79,4±3,1	96,8±1,4	97,1±0,7
СД + ССИ	82,5±1,7	97,1±0,7	97,7±0,6	81,7±2,0	96,8±1,5	97,2±0,8	80,6±2,3	96,5±1,2	96,8±1,1	79,3±3,3	96,9±1,2	97,4±0,6
СД + СТИ	80,7±2,1	96,7±1,4	97,1±0,7	83,2±1,8	97,3±0,6	97,5±0,6	81,4±1,9	96,8±1,1	97,1±0,5	82,0±2,1	97,6±0,8	98,0±0,4
СД + СПИ	77,9±3,6	95,9±1,5	97,2±0,4	79,1±2,1	95,8±1,3	97,1±0,8	82,4±1,7	97,3±0,7	98,0±0,4	79,6±2,7	96,5±1,5	97,7±0,5

Примечание: * статистически значимые различия с контролем при $p \leq 0,05$.

формирование условий, близких к гипоксии, способствуя повышению устойчивости семян-детекторов на воздействие семян-индукторов. За 24 мес. хранения ни в одном из опытных вариантов не выявлено значимого снижения интенсивности прорастания семян к контролю.

Согласно рабочей гипотезе, ингибирующее влияние семян-индукторов на семена-детекторы оказывали летучие физиологически активные метаболиты, содержащие этилен, который выделяли травмированные и поврежденные зерновки в ответ на стресс-факторы. Гипоксия в межзерновой воздушной среде подавляла образование кислородозависимого этилена, концентрация которого была предположительно ниже порога чувствительности семян-детекторов.

Изолированное контейнерное хранение полностью исключало влияние семян-индукторов на изменение интенсивности прорастания семян-детекторов.

Интенсивность роста проростков семян на этапе гетеротрофного питания коррелирует с активностью метаболических процессов, а также регуляторных ферментативных и гормональных систем, что лежит в основе оценки физиологического состояния семян.

При пассивном воздухообмене между семенами-детекторами и семенами-индукторами к 3 мес. хранения все морфофизиологические показатели проростков семян-детекторов, хранившихся с травмированными и поврежденными

семенами-индукторами, превышали контроль по массе, длине ростка, наибольшего первичного корешка, соответственно, на 13,5%; 13,7%; 9,3% и 18,3%; 15,8%; 10,3% (табл. 2).

К 6 месяцам хранения различия с контролем в этих вариантах нивелировались. С увеличением продолжительности хранения до 12 мес. стимуляция роста проростков сменялась их угнетением с последующим его нарастанием к 24 мес. хранения (во всех вариантах опыта). Наиболее сильное угнетение наблюдалось у проростков семян-детекторов, хранившихся с поврежденными семенами-индукторами, от уровня контроля и составляло, соответственно, 62,1%, 56,0%, 57,7%.

Менее выраженное угнетение морфофизиологических показателей было у семян в варианте семена-детекторы, совместно хранившихся с семенами-индукторами (стандарт), и составило, соответственно, 83,7%, 77,8%, 87,9% по отношению к контролю. Степень подавления роста проростков в варианте семена-детекторы, совместно хранившихся с травмированными семенами-индукторами, была средней между опытными вариантами.

При активной аэрации между семенами-индукторами и семенами-детекторами значимое ингибирование морфофизиологических показателей проростков было установлено только в вариантах семена-детекторы, совместно хранившихся с травмированными и поврежденными

Таблица 2. Влияние семян-индукторов на морфологические показатели 3-суточных проростков семян-детекторов в зависимости от продолжительности и условий их хранения

Table 2. The effect of inductor seeds on the morphological parameters of 3-day-old detector seed seedlings, depending on the duration and conditions of their storage

Варианты опыта, семена	Продолжительность хранения, мес.											
	3			6			12			24		
	Масса 100 шт. проростков, г	Длина, мм		Масса 100 шт. проростков, г	Длина, мм		Масса 100 шт. проростков, г	Длина, мм		Масса 100 шт. проростков, г	Длина, мм	
ростка		первичного наибольшего корешка	ростка		первичного наибольшего корешка	ростка		первичного наибольшего корешка	ростка		первичного наибольшего корешка	
<i>Пассивный воздухообмен</i>												
Контроль	1,04±0,6	23,4±1,3	30,1±1,4	1,01±0,07	20,9±1,2	25,6±1,3	1,16±0,07	25,4±1,1	31,7±1,3	1,11±0,06	23,9±0,9	28,1±1,2
СД+ССИ	1,09±0,05	24,7±1,2	31,6±1,5	1,02±0,05	21,2±1,1	27,0±1,4	1,08±0,06	22,7*±0,9	30,2±1,3	0,93*±0,07	18,6*±0,9	24,7*±1,2
СД+СТИ	1,18*±0,08	26,6*±1,4	32,9*±1,3	1,04±0,07	21,1±1,2	26,6±1,5	0,98*±0,05	20,5*±0,8	27,6*±1,2	0,82*±0,07	15,9*±0,6	18,0*±0,9
СД+СПИ	1,23*±0,09	27,1*±1,4	33,2*±1,5	1,01±0,06	20,4±1,1	25,3±1,3	0,79*±0,05	18,7*±0,8	21,9*±1,0	0,69*±0,05	13,4*±0,5	16,2*±0,8
<i>Активная аэрация</i>												
Контроль	1,15±0,8	25,6±1,4	31,6±1,5	1,14±0,06	22,8±1,2	27,6±1,4	1,09±0,05	22,4±1,1	25,7±1,3	1,13±0,07	23,7±0,9	29,4±1,1
СД+ССИ	1,12±0,7	24,9±1,3	30,7±1,4	1,17±0,05	23,1±1,3	29,4±1,6	1,06±0,05	20,7±1,0	24,8±1,4	1,02±0,05	20,2*±1,1	23,0*±1,2
СД+СТИ	1,14±0,9	25,7±1,2	31,5±1,6	1,16±0,06	22,5±1,1	28,0±1,5	1,06±0,07	21,4±0,9	25,1±1,1	0,96*±0,7	19,8*±0,9	21,5*±1,1
СД+СПИ	1,15±0,6	26,1±1,3	32,4±1,3	1,16±0,07	23,3±1,2	29,1±1,5	1,07±0,06	21,2±1,2	24,9±1,3	0,91*±0,04	19,5*±1,1	20,7*±1,2
<i>Контейнерное хранение в общей воздушной среде</i>												
Контроль	1,16±0,07	27,1±1,1	31,4±1,5	1,17±0,09	27,8±1,2	32,3±1,6	1,19±0,1	28,3±1,3	33,5±1,4	1,19±0,08	27,6±1,5	32,4±1,6
СД+ССИ	1,15±0,06	26,8±1,2	30,7±1,3	1,17±0,07	26,5±1,1	31,8±1,4	1,2±0,11	29,1±1,4	32,9±1,4	1,18±0,07	26,9±1,3	31,7±1,5
СД+СТИ	1,16±0,09	27,5±1,3	31,5±1,4	1,18±0,09	28,1±1,3	33,2±1,6	1,18±0,09	26,9±1,2	32,7±1,3	1,2±0,09	28,1±1,6	33,9±1,7
СД+СПИ	1,15±0,08	26,7±1,1	30,9±1,3	1,17±0,08	27,3±1,2	31,7±1,5	1,18±0,11	27,9±1,3	33,1±1,5	1,18±0,07	28,0±1,5	33,4±1,8
<i>Контейнерное изолированное хранение</i>												
Контроль	1,12±0,08	29,3±1,5	32,3±1,8	1,09±0,06	24,0±1,1	31,4±1,6	1,06±0,8	23,5±1,2	28,3±1,5	1,14±0,07	28,0±1,4	33,7±1,7
СД+ССИ	1,11±0,07	28,7±1,4	32,1±1,7	1,1±0,07	25±1,5	31,9±1,6	1,07±0,9	24,1±1,3	29,1±1,6	1,13±0,06	27,5±1,3	31,9±1,5
СД+СТИ	1,12±0,08	30,1±1,6	33,8±1,7	1,08±0,05	24,7±1	30,8±0,6	1,08±0,07	25,2±1,3	30,5±1,7	1,15±0,09	30,1±1,6	34,1±1,7
СД+СПИ	1,09±0,06	27,9±1,4	30,9±1,6	1,09±0,08	25,6±1	32,5±0,08	1,07±0,07	23,9±1,4	28,2±1,5	1,13±0,05	27,6±1,5	32,3±1,5

Примечание: * статистически значимые различия с контролем при $p \leq 0,05$.

семенами, к 24 мес. хранения. Морфологические параметры у первых и вторых варьировали от 73,1–84,9% и 70,4–82,2% относительно уровня контроля.

У проростков семян-детекторов, совместно хранившихся с семенами-индукторами (стандарт), подавление длины роста и первичного корешка было менее выраженным, что обусловлено отсутствием в данном варианте зерновок с макроповреждениями, и, соответственно, выделение этилена зерновками было близким к уровню контроля.

Ослабление депрессивного воздействия семян индукторов на рост проростков семян-детекторов предположительно объясняется снижением концентрации в ЛФАМ этилена за счет активного воздухообмена. Но с увеличением продолжительности хранения семян хроническое суммирующее воздействие даже следовых значений ЛФАМ ведет к изменению функциональной активности семян-детекторов.

Совместное контейнерное хранение семян-индукторов и семян-детекторов при отсутствии воздухообмена не оказало значимого влияния на изменение интенсивности линейного роста органов проростка и их массы.

Воздействие СИ на СД в режиме пассивного воздухообмена не ограничивается только угнетением активности прорастания семян и роста проростков, но сопровождалось ухудшением их посевных качеств (табл. 3).

Значимое снижение энергии прорастания семян происходило в варианте семена-детекторы,

совместно хранившихся с поврежденными семенами-индукторами, уже через 6 мес. хранения к 12 мес. существенно уменьшилась лабораторная всхожесть, через 24 мес. эти показатели были ниже контроля, соответственно, на 25,7% и 12,7%.

Угнетение семян в варианте семена-детекторы, совместно хранившихся с травмированными семенами-индукторами, отмечалось к 18 мес. хранения, где энергия прорастания ниже контроля на 4,7%. После 24 мес. энергия прорастания и лабораторная всхожесть уменьшились, соответственно, на 7,1% и 4,2%. Между тем непродолжительное хранение семян в течение 1–3 мес. в варианте семена-детекторы, совместно хранившихся с поврежденными семенами-индукторами, сопровождалось повышением энергии прорастания, что обусловлено кратковременной экспозицией семян в ЛФАМ.

С увеличением продолжительности хранения слабая стимуляция сменялась снижением посевных качеств семян. Во всех других режимах хранения семян яровой пшеницы не установлено статистически значимого влияния СИ на изменение посевных качеств СД.

Хроматографическим анализом выявлено увеличение содержания этилена в межзерновой воздушной среде при пассивном воздухообмене между семенами вариантов семена-детекторы, совместно хранившимися с поврежденными и травмированными семенами-индукторами, в 3,5 и 5,7 раза по сравнению с контролем, где

Таблица 3. Динамика посевных качеств интактных семян (детекторов) при экспонировании травмированными и поврежденными семенами (индукторами) в зависимости от условий и продолжительности их совместного хранения
Table 3. Dynamics of sowing qualities of intact seeds (detectors) when exposed to injured and damaged seeds (inductors), depending on the conditions and duration of their joint storage

Вариант опыты	Продолжительность хранения, мес.					
	1	3	6	12	18	24
<i>Пассивный воздухообмен</i>						
Контроль	$87,5 \pm 2,0$ $97,1 \pm 0,6$	$87,6 \pm 2,3$ $96,8 \pm 0,7$	$88,1 \pm 2,4$ $97,3 \pm 0,5$	$88,5 \pm 2,3$ $96,5 \pm 0,9$	$86,9 \pm 2,2$ $96,9 \pm 0,4$	$87,2 \pm 2,6$ $97,2 \pm 0,5$
СД + ССИ	$88,6 \pm 2,6$ $96,4 \pm 0,9$	$89,4 \pm 2,1$ $97,3 \pm 0,5$	$88,5 \pm 2,5$ $96,4 \pm 0,8$	$87,1 \pm 2,3$ $95,7 \pm 1,1$	$85,6 \pm 2,4$ $95,4 \pm 1,2$	$84,7 \pm 3,1$ $96,1 \pm 0,8$
СД + СТИ	$88,9 \pm 2,3$ $97,3 \pm 0,5$	$91,9 \pm 1,7^*$ $97,8 \pm 0,3$	$87,6 \pm 3,1$ $96,5 \pm 0,6$	$86,4 \pm 3,0$ $95,8 \pm 1,2$	$82,2 \pm 2,3^*$ $94,6 \pm 1,5$	$80,1 \pm 3,4^*$ $93,0 \pm 2,1^*$
СД + СПИ	$91,7 \pm 2,1^{**}$ $97,6 \pm 0,4$	$89,7 \pm 1,6$ $96,4 \pm 0,6$	$82,2 \pm 3,3^*$ $94,7 \pm 0,8$	$77,0 \pm 3,4^*$ $89,3 \pm 2,7$	$70,8 \pm 3,5^*$ $86,1 \pm 3,8^*$	$61,5 \pm 4,7^*$ $84,5 \pm 4,2^*$
<i>Активная аэрация</i>						
Контроль	$88,2 \pm 2,1$ $98,1 \pm 0,5$	$87,9 \pm 2,1$ $97,6 \pm 0,4$	$89,1 \pm 2,0$ $97,5 \pm 0,3$	$88,4 \pm 1,9$ $96,8 \pm 0,6$	$89,5 \pm 2,2$ $97,3 \pm 0,4$	$88,6 \pm 2,3$ $97,9 \pm 0,3$
СД + ССИ	$87,9 \pm 2,2$ $97,7 \pm 0,4$	$88,1 \pm 2,0$ $96,9 \pm 0,5$	$88,3 \pm 1,8$ $98,1 \pm 0,3$	$87,6 \pm 2,2$ $96,4 \pm 0,5$	$87,8 \pm 2,3$ $97,6 \pm 0,4$	$88,1 \pm 2,4$ $97,1 \pm 0,6$
СД + СТИ	$88,5 \pm 1,9$ $96,8 \pm 0,5$	$88,1 \pm 2,3$ $97,3 \pm 0,4$	$87,6 \pm 2,1$ $98,1 \pm 0,3$	$88,3 \pm 2,3$ $97,2 \pm 0,5$	$88,5 \pm 2,4$ $98,0 \pm 0,3$	$87,4 \pm 1,8$ $97,5 \pm 0,5$
СД + СПИ	$87,3 \pm 2,3$ $97,3 \pm 0,5$	$88,5 \pm 2,4$ $98,1 \pm 0,4$	$89,1 \pm 1,8$ $97,5 \pm 0,6$	$87,6 \pm 1,9$ $96,4 \pm 0,4$	$88,3 \pm 2,3$ $97,8 \pm 0,7$	$87,5 \pm 2,5$ $96,6 \pm 0,7$
<i>Контейнерное хранение в общем объеме воздушной среды</i>						
Контроль	$89,3 \pm 1,9$ $97,7 \pm 0,5$	$87,5 \pm 2,2$ $98,3 \pm 0,4$	$88,0 \pm 2,5$ $97,1 \pm 0,5$	$86,6 \pm 2,3$ $96,9 \pm 0,6$	$87,2 \pm 2,1$ $97,5 \pm 0,6$	$88,8 \pm 1,9$ $98,1 \pm 0,4$
СД + ССИ	$88,4 \pm 2,2$ $96,6 \pm 0,6$	$89,6 \pm 1,9$ $97,4 \pm 0,5$	$88,1 \pm 2,1$ $98,3 \pm 0,4$	$87,4 \pm 2,3$ $98,5 \pm 0,3$	$88,7 \pm 2,3$ $98,3 \pm 0,5$	$89,5 \pm 2,1$ $97,2 \pm 0,6$
СД + СТИ	$86,5 \pm 2,1$ $97,3 \pm 0,5$	$90,2 \pm 0,7$ $98,8 \pm 0,2$	$89,4 \pm 1,8$ $97,5 \pm 0,6$	$89,6 \pm 1,7$ $98,2 \pm 0,3$	$90,4 \pm 0,8$ $99,3 \pm 0,3$	$90,1 \pm 0,8$ $98,6 \pm 0,4$
СД + СПИ	$89,3 \pm 1,9$ $98,1 \pm 0,6$	$87,4 \pm 2,1$ $97,7 \pm 0,5$	$88,1 \pm 2,1$ $98,4 \pm 0,7$	$87,4 \pm 2,3$ $97,8 \pm 0,8$	$89,0 \pm 1,7$ $98,6 \pm 0,5$	$88,1 \pm 1,9$ $97,9 \pm 0,7$
<i>Контейнерное изолированное хранение</i>						
Контроль	$89,3 \pm 2,3$ $98,1 \pm 0,3$	$88,7 \pm 1,9$ $97,2 \pm 0,5$	$87,9 \pm 2,2$ $96,8 \pm 0,6$	$86,9 \pm 1,8$ $97,9 \pm 0,4$	$87,4 \pm 2,0$ $98,3 \pm 0,3$	$88,1 \pm 2,2$ $97,4 \pm 0,5$
СД + ССИ	$88,5 \pm 1,9$ $97,6 \pm 0,6$	$89,6 \pm 2,1$ $98,4 \pm 0,4$	$87,7 \pm 2,2$ $98,1 \pm 0,3$	$88,5 \pm 2,3$ $97,5 \pm 0,5$	$88,1 \pm 1,9$ $98,3 \pm 0,7$	$89,2 \pm 2,1$ $97,9 \pm 0,6$
СД + СТИ	$87,6 \pm 2,4$ $98,3 \pm 0,5$	$88,1 \pm 2,3$ $98,1 \pm 0,6$	$88,4 \pm 2,4$ $98,2 \pm 0,4$	$87,3 \pm 1,9$ $97,4 \pm 0,6$	$89,2 \pm 2,1$ $97,7 \pm 0,5$	$88,5 \pm 1,9$ $98,3 \pm 0,4$
СД + СПИ	$87,8 \pm 2,5$ $96,7 \pm 0,7$	$89,2 \pm 2,4$ $98,1 \pm 0,5$	$86,3 \pm 2,6$ $97,5 \pm 0,6$	$87,7 \pm 2,1$ $98,3 \pm 0,4$	$88,4 \pm 2,2$ $97,4 \pm 0,6$	$87,6 \pm 2,3$ $98,4 \pm 0,5$

*Примечание:** статистически значимые различия с контролем при $p \leq 0,05$; числитель — энергия прорастания, %; знаменатель — лабораторная всхожесть, %.

его концентрация варьировала от 0,0027 до 0,0033 мг/м³.

В условиях активной аэрации между семенами концентрация этилена во всех опытных вариантах была на уровне контроля, что обусловлено активным элиминированием (вымыванием) летучих соединений.

Выводы/Conclusions

При хранении травмированные и поврежденные семена выделяли следовые концентрации этилена с последующей его диффузией как газообразного соединения в межзерновую воздушную среду всей совокупности объема интактных семян.

С нарастанием продолжительности хранения и концентрации эндогенного этилена, выделяемого поврежденными зерновками, он воздействовал как экзогенный регулятор роста в диапазоне от слабовыраженной стимуляции,

сменяющийся сильно выраженным угнетением интактных семян.

Активная аэрация вызывала элиминирование образующихся летучих физиологически активных соединений и снижала концентрацию этилена в межзерновой воздушной среде, минимизируя развитие ингибиторных процессов у интактных семян.

Совместное контейнерное хранение семян в общем объеме воздушной среды при отсутствии воздухообмена и дефицита кислорода не вызвало угнетения интактных семян, что предположительно обусловлено протекторной способностью гипоксии подавлять стрессовые реакции у травмированных и поврежденных семян.

Общим ответом всех семян-индукторов, находившихся в состоянии стресса, являлось нарастание их угнетающего воздействия на семена-детекторы с увеличением продолжительности их совместного

хранения, силы стресса и свободного воздухообмена между ними.

Эффект стрессозащиты и пролонгации кондидионной всхожести у интактных семян яровой пшеницы при хранении до 24 мес. достигался за

счет максимального заполнения объема воздухопроницаемого контейнера семенным материалом и формированием в межзерновой воздушной среде гипоксии, блокирующей выделение этилена.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Новохатин В.В. Научное обоснование первичного и элитного семеноводства зерновых культур. *Достижения науки и техники АПК*. 2018; 32(9): 40–47. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10910>
- Ряднов А.И., Арылов Ю.Н. Повышение урожайности яровой пшеницы за счет использования семян с низким уровнем травмирования. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2022; (4): 45–52. <https://elibrary.ru/pjjqlm>
- Строна И.Г. Травмирование семян зерновых культур и урожай. М.В. Кузьменко и др. (ред.). *Биология и технология семян*. Харьков: ВАСХНИЛ, Южное отделение. 1974; 122–129.
- Ионова Е.В., Скворцова Ю.Г., Филенко Г.А., Фирсова Т.И. Травмирование семян озимой мягкой пшеницы как показатель снижения ее посевных качеств. *Зерновое хозяйство России*. 2019; (6): 68–71. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-66-6-68-71>
- Нуруллин Э.Г., Файзуллин Р.А. Экспериментальное исследование травмирования семян в сельскохозяйственных машинах. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2022; 17(2): 99–105. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-99-105>
- Скворцова Ю.Г., Калинина Н.В., Фирсова Т.И., Филенко Г.А. Влияние травмирования на посевные качества семян сортов озимой мягкой пшеницы при уборке и послеуборочной доработке. *Зерновое хозяйство России*. 2023; (5): 56–62. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2023-88-5-56-62>
- Троценко В.В., Забудский А.И. Лабораторная всхожесть микроповрежденных семян ячменя. *Вестник КрасГАУ*. 2018; (5): 70–76. <https://elibrary.ru/yqnuqx>
- Суханова М.В. Концептуальное обоснование использования ударопоглощающих рабочих органов сельскохозяйственных машин для снижения травмирования семян. *Вестник аграрной науки Дона*. 2022; (1): 51–64. https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_1_51-64
- Шарафутдинов М.Х., Нижегородцева Л.С., Сафин Р.И. Приемы профилактики травмированности семян яровой пшеницы. *Зерновое хозяйство России*. 2017; (2): 69–72. <https://elibrary.ru/ynugjh>
- Jian F. A general model to predict germination and safe storage time of crop seeds. *Journal of Stored Products Research*. 2022; 99: 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.102041>
- Оробинский В.И., Ворохобин А.В., Корнев А.С., Головин А.Д., Бачурин И.Г., Пожидяев И.А. Влияние фракционного состава зернового вороха на уровень травмирования и посевные качества семян. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021; 14(3): 12–17. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_12
- Komyshov E. et al. Analysis of the size and color characteristics of wheat grains and their relationship to storage time and germination. *Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022). Abstracts the Thirteenth International Multiconference*. Novosibirsk. 2022; 615. <https://doi.org/10.18699/SBB-2022-349>
- Byshov N.V. et al. Prospects and method of seed grain storage in a container with gas-regulating medium. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 624: 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012118>

REFERENCES

- Novokhatin V.V. Scientific substantiation of primary and elite seed-growing of cereals. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2018; 32(9): 40–47 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10910>
- Ryadnov A.I., Arylov Yu.N. Increasing the yield of spring wheat due to use of seeds with a low level of injury. *Proceedings of Nizhnevolzskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education*. 2022; (4): 45–52 (in Russian). <https://elibrary.ru/pjjqlm>
- Strona I.G. Injury of grain seeds and harvest. Kuz'menko M.V. et al. (eds.). *Biology and technology of seeds*. Kharkiv: South branch of Lenin All-Union Academy of Agricultural Sciences. 1974; 122–129 (in Russian).
- Ionova E.V., Skvortsova Yu.G., Filenko G.A., Firsova T.I. Injury of winter soft wheat seeds as an indicator of reducing its sowing traits. *Grain Economy of Russia*. 2019; (6): 68–71 (in Russian). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-66-6-68-71>
- Nurullin E.G., Fayzullin R.A. Experimental research of seed injury in agricultural machines. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2022; 17(2): 99–105 (in Russian). <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-99-105>
- Skvortsova Yu.G., Kalinina N.V., Firsova T.I., Filenko G.A. The effect of injury on the sowing seed qualities of winter bread wheat varieties during harvesting and post-harvest processing. *Grain Economy of Russia*. 2023; (5): 56–62 (in Russian). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2023-88-5-56-62>
- Trotsenko V.V., Zabudsky A.I. Laboratory incineration of microwave seeds of barley. *Bulletin of KrasGAU*. 2018; (5): 70–76 (in Russian). <https://elibrary.ru/yqnuqx>
- Sukhanova M.V. Conceptual rationale for the use of impact-absorbing elements of agricultural machines to reduce seed damage. *Don agrarian science bulletin*. 2022; (1): 51–64 (in Russian). https://doi.org/10.55618/20756704_2022_15_1_51-64
- Sharafutdinov M.Kh., Nizhegorodtseva L.S., Safin R.I. Preventive methods of injury of spring wheat seeds. *Grain Economy of Russia*. 2017; (2): 69–72 (in Russian). <https://elibrary.ru/ynugjh>
- Jian F. A general model to predict germination and safe storage time of crop seeds. *Journal of Stored Products Research*. 2022; 99: 102041. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.102041>
- Orobinsky V.I., Vorokhobin A.V., Kornev A.S., Golovin A.D., Bachurin I.G., Pozhidayev I.A. Fraction composition of the grain heap and its influence on the level of grain damage and sowing qualities of seeds. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021; 14(3): 12–17 (in Russian). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_12
- Komyshov E. et al. Analysis of the size and color characteristics of wheat grains and their relationship to storage time and germination. *Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022). Abstracts the Thirteenth International Multiconference*. Novosibirsk. 2022; 615. <https://doi.org/10.18699/SBB-2022-349>
- Byshov N.V. et al. Prospects and method of seed grain storage in a container with gas-regulating medium. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 624: 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/624/1/012118>

14. Pirredda M., González-Benito M.E., Martín C., Mira S. Genetic and Epigenetic Stability in Rye Seeds under Different Storage Conditions: Ageing and Oxygen Effect. *Plants*. 2020; 9(3): 393. <https://doi.org/10.3390/plants9030393>

15. Stupin A.S., Levin V.I. Prospects for the use of prolonged stress protection in the spring wheat cultivation. *BIO Web of Conferences*. 2024; 108: 22001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410822001>

ОБ АВТОРАХ

Виктор Иванович Левин

доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры селекции, семеноводства и агрохимии
levin-49@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9587-0556>

Александр Сергеевич Ступин

кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент кафедры селекции,
семеноводства и агрохимии
stupin32@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0548-6313>

Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева,
ул. Костычева, 1, Рязань, 390044, Россия

14. Pirredda M., González-Benito M.E., Martín C., Mira S. Genetic and Epigenetic Stability in Rye Seeds under Different Storage Conditions: Ageing and Oxygen Effect. *Plants*. 2020; 9(3): 393. <https://doi.org/10.3390/plants9030393>

15. Stupin A.S., Levin V.I. Prospects for the use of prolonged stress protection in the spring wheat cultivation. *BIO Web of Conferences*. 2024; 108: 22001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410822001>

ABOUT THE AUTHORS

Viktor Ivanovich Levin

Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Breeding, Seed Production and Agrochemistry
levin-49@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9587-0556>

Alexander Sergeevich Stupin

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Breeding, Seed Production and Agrochemistry
stupin32@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0548-6313>

Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev,
1 Kostychev Str., Ryazan, 390044, Russia