



Научная статья
УДК 631.53.01
doi: 10.55186/25876740_2024_67_6_687

ЭФФЕКТЫ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ У ИНТАКТНЫХ СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДИСТАНЦИОННО СТРЕССИРОВАННЫМИ СЕМЕНАМИ

В.И. Левин, А.С. Ступин, Р.Н. Ушаков, Л.А. Антипкина

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

Аннотация. Исследования проводили с целью выявления и теоретического обоснования последействия у интактных (целостных, неповрежденных) воздушно-сухих семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья и ячменя (*Hordeum distichum* L.) сорта Владимир, индуцированного дистанционным экспонированием стрессированными семенами. В опыте использовали 3 партии семян, отвечающие требованиям ГОСТ Р 52325-2005. Состояние стресса у семян достигали гамма-облучением в дозе 400 Гр и механическими ударными воздействиями с образованием у 10-15 % зерновок микро- и макроповреждений. Опыт выполняли в специализированной лаборатории физиологии университета в 2 этапа. На первом этапе, в соответствии со схемой опыта: 1. Контроль — интактные (целостные, неповрежденные) семена, не подвергавшиеся экспонированию (не подвергшиеся дистанционному воздействию стрессированными семенами). 2. Экспонированные интактные семена яровой пшеницы механически травмированными семенами — (ЭИСП+МТ). 3. Экспонированные интактные семена яровой пшеницы облученными семенами — (ЭИСП+О). 4. Экспонированные интактные семена ячменя механически травмированными семенами — (ЭИСЯ+МТ). 5. Экспонированные интактные семена ячменя облученными семенами — (ЭИСЯ+О), интактные семена, дистанционно на расстоянии 3-10 см экспонировали стрессированными семенами 6-9 мес. На втором этапе экспонированные семена делили на 2 части — одну хранили в пакетах из ткани (свободный воздухообмен), другую в колбах (ограниченный воздухообмен). Эффект последействия оценивали по интенсивности прорастания семян, морфометрическим показателям 3-суточных проростков, энергии прорастания и лабораторной всхожести семян, концентрации этилена в межзерновой воздушной среде на хроматографе «Кристалл-2000М». Хранение 24 мес. при свободном воздухообмене снижало интенсивность прорастания экспонированных семян яровой пшеницы на 22,9-37,4 %, ячменя — на 12,6-14,9 %. Длина ростка и первичного корешка (наибольшего) у 3-суточных проростков яровой пшеницы при хранении 12 мес. от уровня контроля составляли в вариантах ЭИСП+О и ЭИСП+МТ к контролю: 49,2; 67,4 % и 66,5; 80,0 %. Подавление роста проростка усилилось при хранении 24 мес., к контролю длина ростка и первичного корешка были: 35,1; 45,4 % и 42,3; 61,0 %, их масса — 53,4 и 60,5 %. Ингибирование роста у проростков ячменя отмечалось в условиях свободного воздухообмена семян только к 24 мес. у ЭИСЯ+О, размеры ростка, корешка и масса проростков снижались до 75,9; 81,4 и 87,4 % от уровня контроля. Энергия прорастания и всхожесть экспонированных семян ЭИСП+О и ЭИСП+МТ, хранившихся 24 мес., уменьшились на 24,1; 10,7 % и 13,8; 5,3 %, у ячменя только у ЭИСЯ+О — на 8,5; 10,6 %. Ключевую роль ингибирования начальных процессов прорастания и роста проростков экспонированных семян в последействии обуславливал этилен. Ограниченный воздухообмен блокировал развитие стресса и пролонгировал кондиционные качества семян.

Ключевые слова: интактные и экспонированные семена, стресс, последействие, посевные качества, прорастание и рост, воздухообмен, этилен

Original article

EFFECTS OF AFTEREFFECT IN INTACT GRAIN SEEDS INDUCED BY REMOTELY STRESSED SEEDS

V.I. Levin, A.S. Stupin, R.N. Ushakov, L.A. Antipkina

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

Abstract. The research was carried out in order to identify and theoretically substantiate the aftereffect of intact (integral, intact) air-dried seeds of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) of the Daria variety and barley (*Hordeum distichum* L.) of the Vladimir variety induced by remote exposure with stressed seeds. Three batches of seeds meeting the requirements of GOST R 52325-2005 were used in the experiment. The stress state of the seeds was achieved by gamma irradiation at a dose of 400 Gy and mechanical shock with the formation of micro and macro damage in 10-15 % of the grains. The experiment was carried out in a specialized laboratory of phytophysiology of the university in 2 stages. At first, according to the scheme of experience: 1. Control — intact (integral, intact) seeds that have not been exposed exposure (remotely exposed to stress). 2. Exposed intact spring wheat seeds with mechanically injured seeds — (EISP+MT). 3. Exposed intact seeds of spring wheat with irradiated seeds — (EISP+O). 4. Exposed intact barley seeds with mechanically injured seeds — (EISYA+MT). 5. Exposed intact barley seeds with irradiated seeds — (EISYA+O), intact seeds, remotely at a distance of 3-10 cm were exposed stressed for 6-9 months. At the second stage, the exposed seeds were divided into 2 parts — one was stored in cloth bags (free air exchange), the other in flasks (limited air exchange). The aftereffect effect was assessed by the intensity of seed germination, morphometric parameters of 3-day-old seedlings, germination energy and laboratory germination of seeds, ethylene concentration in the intergranular air medium on the "Kristall-2000M" chromatograph. Storage for 24 months. with free air exchange, it reduced the germination rate of exposed spring wheat seeds by 22.9-37.4 %, barley by 12.6-14.9 %. The length of the sprout and the primary root (the largest) in 3-day-old seedlings of spring wheat during storage for 12 months depending on the level of control, they were in the EISP+O and EISP+MT to control: 49.2; 67.4 % and 66.5; 80.0 %. The suppression of the growth of the seedling increased during storage for 24 months, the control length of the sprout and primary root were: 35.1; 45.4 % and 42.3; 61.0 %, their weight 53.4 and 60.5 %. Inhibition of growth in barley seedlings was noted in conditions of free air exchange of seeds only by 24 months, in ESIA+O, the size of the sprout, root and weight of seedlings decreased to 75.9; 81.4 and 87.4 % of the control level. Germination energy and germination of exposed EISP+O and EISP+MT stored for 24 months decreased by 24.1; 10.7 % and 13.8; 5.3 %, in barley only in EISYA+O — 8.5; 10.6 %. Ethylene played a key role in inhibiting the initial processes of germination and growth of seedlings of exposed seeds in the aftereffect. Limited air exchange blocked the development of stress and prolonged the conditioned qualities of the seeds.

Keywords: intact and exposed seeds, stress, aftereffect, sowing qualities, germination and growth, air exchange, ethylene

Введение. В число приоритетных направлений формирования высокопродуктивных посевов сельскохозяйственных культур, устойчивых к экстремальным погодным факторам, входит использование физиологически полноценных семян с высокими посевными качествами [1], зависящими от условий формирования, уборки урожая и режима послеуборочного хране-

ния [2]. Существенное влияние на изменение активности метаболических процессов [3], всхожести, жизнеспособности и долговечности семян [4, 5] оказывали условия их хранения [6, 7].

Разработка инновационных технологий хранения свидетельствует о том, что семена растений, до настоящего времени следует рассматривать как сложную саморегулирующую

биосистему, во многом далеко еще не с познанными биологическими особенностями [8, 9, 10]. Данное предположение согласуется с серией научных публикаций последних двух десятилетий, где сообщалось о способности воздушно-сухих семян сельскохозяйственных растений, подвергнутых воздействию стресс-фактора (ионизирующих излучений), дистанционно индуцировать

физиологические модификации у интактных (неповрежденных, целостных) семян [11, 12, 13]. При сходстве морфометрических и физиологических изменений, выявленных у интактных семян на воздействие стрессированных семян, разными авторами дается принципиально различное теоретическое обоснование механизма коммуникации между семенами.

Предполагали, что влияние облученных семян на необлученные происходит за счет выделения первыми летучих физиологически активных веществ [11]. Электромагнитное взаимодействие и эффект дальней связи у прорастающих семян кукурузы возникал под действием стрессированных семян в результате квантовой сцепленности (перепутанности) физиологических процессов в двух и более разобщенных растительных организмах [12]. Другие исследователи исходили из представления о ведущей роли выделяемых облученными семенами — «мишенями» летучих метаболитов, воздействующих на интактные семена — «свидетели» [13, 14], то есть механизм взаимодействия семян обуславливало явление «эффект свидетеля» [15]. Еще ранее обсуждалось возможное воздействие облученных семян ячменя и редиса на необлученные, за счет генерируемого облученными семенами вторичного когерентного излучения с длинами волн, лежащими в ультрафиолетовой области спектра [16]. В последующих опытах на семенах зерновых культур, подвергавшихся не только ионизирующим излучениям, а также ударным воздействиям и повышенным температурам, при которых исходилась эмиссия электромагнитных излучений, в качестве агента взаимодействия между семенами рассматривался фитогормон этилен (рабочая гипотеза). Позже, экспериментально этилен был идентифицирован в межзерновой воздушной среде [7, 17]. Следовательно, воздушно-сухие семена, независимо от природы стресс-фактора, на повреждающие воздействия отвечают неспецифической адаптационной реакцией, сопровождающейся выделением микродоз стрессового этилена, модифицирующего интенсивность начальных процессов прорастания, рост проростков и посевные качества интактных семян.

Детальное исследование механизма коммуникации между стрессированными и интактными семенами выявило у последних ранее неизвестный феномен отдаленного последствие. Изучение ранее неизвестных физиологических процессов, происходящих в интактных семенах после завершения их совместного хранения со стрессированными, позволяет дополнить существующую парадигму физиологии семян новыми знаниями и приблизиться к пониманию и оценке роли последствие фитогормонального этиленового сигнала [18] на прорастание и посевные качества семян. Кроме того, полученные результаты могут быть значимым научно-практическим вкладом, положенным в основу разработки и совершенствования инновационных технологий долговременного послеуборочного хранения партий семян с высокими посевными качествами, которые ранее дистанционно подвергались влиянию поврежденных (механизированной уборкой, сортировкой, сушкой и др.) семян других партий.

Целью работы являлось исследование ответной реакции у интактных семян зерновых культур на отдаленное последствие экспонирования стрессированными семенами, в задачу входило изучение модифицирующей роли продолжительности и условий хранения на прорастание, рост проростков и посевные качества экспонированных семян, содержание этилена в межзерновой воздушной среде.

Методика исследований. Эксперименты выполнены в специализированной лаборатории физиологии университета на трех партиях семян в 2019-2023 гг. на репродукционных семенах сельскохозяйственных растений первого поколения (P1), отвечающих требованиям ГОСТ Р 52325-2005, яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья и ячменя (*Hordeum distichum* L.) сорта Владимир. В роли биообъекта, находящегося в состоянии стресса и оказывающего дистанционное воздействие на интактные семена, были использованы кондиционные воздушно-сухие семена яровой пшеницы, состояние стресса у которых индуцировали гамма-излучением в дозе 400 Гр при мощности дозы 27 Гр/мин. и механическими ударными воздействиями с образованием микро- и макроповреждений (трещин, вмятин с нарушением целостности оболочек эндосперма и зародыша) у 10-15% от всей совокупности зерновок, используемых в эксперименте.

Исследования проводили в 2 этапа.

Первый этап включал следующие варианты опыта:

1. Контроль — интактные (целостные, неповрежденные) семена (яровой пшеницы и ячменя) тех же партий, не подвергавшиеся экспонированию (не подвергшиеся дистанционному воздействию стрессированными семенами).
2. Экспонированные интактные семена яровой пшеницы механически травмированными семенами — (ЭИСП+МТ).
3. Экспонированные интактные семена яровой пшеницы облученными семенами — (ЭИСП+О).
4. Экспонированные интактные семена ячменя механически травмированными семенами — (ЭИСЯ+МТ)
5. Экспонированные интактные семена ячменя облученными семенами — (ЭИСЯ+О).

Экспонированные и интактные семена с влажностью не выше 14% помещали в тканевые пакеты и хранили в прямоугольных оцинкованных контейнерах объемом 5 л на расстоянии друг от друга 3-10 см. Продолжительность экспонирования семян составляла 6-9 мес. Соотношение по массе экспонированных и интактных семян составляло 1:1-1:3 по абсолютной величине образца 500 г. В процессе хранения обеспечивался температурный режим 18-22°C с относительной влажностью воздуха 55-65%. Другие физические факторы (свет, уровень радиации) соответствовали состоянию естественной нормы.

На втором этапе схему вариантов опыта не изменяли, а только удаляли из контейнеров

стрессированные семена, то есть завершали экспонирование интактных семян. В последующем экспонированные семена делили на 2 равные части по массе, одну из которых продолжали хранить в этих же контейнерах, другую помещали в стеклянные колбы объемом 500 мл, максимально заполняя весь их объем семенами, и закрывали притертыми резиновыми пробками. Режим хранения данных семян был таким же, как и на первом этапе эксперимента.

Эффекты отдаленного последствие у экспонированных семян после разобщения их со стрессированными оценивали в динамике, через 12, 18 и 24 мес. по следующим критериям: интенсивность прорастания семян в течении трех суток проращивания, по «наклеву» — прорастанию оболочки зерновок первичным корешком; морфометрическим показателям 3-суточных проростков (длина и масса ростков и первичного корешка), проращивали семена в рулонах из фильтровальной бумаги, используя по 50 шт. проростков в 4-кратной повторности; энергию прорастания и лабораторную всхожесть определяли по ГОСТ 12038-84. Содержание этилена в летучих физиологически активных соединениях, выделяемых экспонированными семенами, определяли с помощью хроматографа «Кристалл-2000М». Для этого в резиновых пробках, которыми закрывали горловину стеклянных колб объемом 1 л, на 1/3 заполненных семенами, делали проколы цельностеклянным шприцем и отбирали пробы для анализа и воздухообмена с периодичностью до 3 раз в год. Значимость различий в морфометрических и других исследуемых показателях оценивали по критерию Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при $P < 0,05$. Результаты представлены в виде среднего значения и стандартной ошибки среднего.

Результаты исследований. Одним из ведущих показателей оценки функционального состояния семян растений и их ответной реакции на повреждающие воздействия является коррелирующая с активностью метаболических процессов интенсивность прорастания семян, то есть образование «наклева» — визуально регистрируемого прорастания оболочки зерновки растущим первичным корешком.

Исследованиями установлено значимое подавление интенсивности прорастания семян при хранении 24 мес., после завершения их экспонирования стрессированными семенами, наиболее выраженное у яровой пшеницы (табл. 1). Ограничение воздухообмена обеспечивало достоверное увеличение интенсивности прорастания семян яровой пшеницы в течение

Таблица 1. Последствие экспонирования на интенсивность прорастания семян
Table 1. The aftereffect of exposure on the intensity of seed germination

Семена	Условия хранения	Варианты	Интенсивность прорастания семян, %-сутки		
			1-е	2-е	3-и
Яровая пшеница	Свободный воздухообмен семян	Контроль-интактные	50,1±2,8	81,3±1,4	95,0±1,3
		***Опыт	12,7±4,4**	50,4±3,5**	72,1±3,2**
	Ограниченный воздухообмен семян	Контроль-интактные	52,4±2,7	80,9±1,9	95,1±1,2
		***Опыт	48,6±3,1**	78,3±2,7**	93,6±1,5**
Ячмень	Свободный воздухообмен семян	Контроль-интактные	30,5±3,6	68,4±2,9	91,5±1,7
		***Опыт	16,8±4,2*	58,6±3,2*	87,6±2,4
	Ограниченный воздухообмен семян	Контроль-интактные	33,7±3,4	70,4±2,1	93,4±1,6
		***Опыт	29,4±3,8**	73,5±2,0**	92,1±2,1

*Статистически значимые различия с контролем при $P \leq 0,05$;

**Статистически значимые различия между опытными вариантами у семян одного вида при разных условиях хранения при $P \leq 0,05$;

***Средний показатель опытных вариантов: яровой пшеницы — (ЭИСП+О) + (ЭИСП+МТ); ячменя — (ЭИСЯ+О) + (ЭИСЯ+МТ).



трех суток проращивания по сравнению со свободным воздухообменом на 22,9-37,4%, у семян ячменя только в течение двух первых суток на 12,6-14,9%. На третьи сутки различия в интенсивности прорастания у последних были не существенными.

Интенсивность прорастания семян яровой пшеницы после экспонирования и хранения в условиях свободного воздухообмена на первые, вторые и третьи сутки проращивания составляла 12,7; 50,4 и 72,1% или ниже контроля на 37,4; 30,9 и 22,9%, у ячменя только в первые и вторые сутки этот показатель был меньше контроля на 13,7 и 9,8%. Хранение экспонированных семян в условиях ограниченного воздухообмена не выявило существенного снижения активности прорастания. Данный режим хранения в сравнении со свободным воздухообменом обеспечивал повышение их устойчивости к последствию экспонирования. Сводный воздухообмен наиболее сильно модифицировал интенсивность прорастания семян яровой пшеницы, чем ячменя.

Снижение интенсивности прорастания у экспонированных семян при свободном воздухообмене сопровождалось угнетением одного из наиболее чувствительных на воздействие биотических и абиотических факторов, физиологического процесса — роста растений на ранних этапах онтогенеза. Так, непосредственно после завершения дистанционного экспонирования семян яровой пшеницы и их последующего хранения в условиях свободного воздухообмена, значимое ингибирование длины ростка и первичного корешка и их массы отмечалось у 3-суточных проростков яровой пшеницы в варианте ЭИСП+О, при этом в варианте ЭИСП+МТ у проростков достоверно угнетался только рост ростка (табл. 2).

Морфометрические показатели первичных корешков в обоих вариантах изменялись не существенно. С увеличением продолжительности хранения экспонированных семян от 12 до 24 мес. у проростков происходило динамичное нарастание подавления активности линейного роста. При хранении 12 мес. длина ростка и первичного корешка в вариантах ЭИСП+О и ЭИСП+МТ составляли к контролю 49,2; 67,4% и 66,5; 80,0%, их масса — 78,1; 81,3% и 86,8; 93,1% соответственно.

При хранении 24 мес. в опытных вариантах линейные параметры проростков от уровня контроля составляли 35,1; 45,4% и 42,3; 61,0%, по массе — 45,0; 52,7% и 53,4; 60,5%. Рост ростков в большей степени угнетался, чем рост первичных корешков. Их число у проростков семян опытных вариантов изменялось незначительно. Наиболее выраженное ингибирование роста проростков яровой пшеницы было выявлено в варианте ЭИСП+О, то есть семян, которые на первом этапе экспонировали облученными семенами.

Семена ячменя были более резистентны в сравнении с семенами яровой пшеницы на последствие экспонирования. Существенное подавление роста проростков ячменя происходило только через 18 мес. хранения семян в варианте ЭИСП+О и сопровождалось слабой динамикой нарастания угнетения роста ростка и первичного корешка с увеличением продолжительности хранения. При хранении экспонированных семян 18 мес. данные показатели к уровню контроля составляли, соответственно, 78,6 и 84,9%, к 24 мес. — 75,9 и 81,4%. Масса проростков ячменя существенно снизилась к уровню контроля при хранении семян 24 мес.

Таблица 2. Эффект последствия у экспонированных семян (свободный воздухообмен)
Table 2. Aftereffect effect of exposed seeds (free air exchange)

Варианты опыта	Продолжительность хранения экспонированных семян, мес.	Росток		Первичные корни		
		длина, мм	масса 100 шт. проростков, г	длина, мм	масса 100 шт. проростков, г	число, шт.
Яровая пшеница						
Контроль-интактные	Сразу после завершения экспонирования	20,2±0,8	3,36±0,21	27,4±1,1	3,37±0,24	3,1±0,1
ЭИСП+МТ		16,3 ±1,6*	2,95±0,30	25,5±1,1	3,05±0,28	3,1±0,2
ЭИСП+О		15,9±1,7*	2,81±0,17*	25,3±1,3*	3,00±0,17	3,0±0,1
Контроль-интактные	12	18,5±0,4	2,97±0,14	25,5±1,9	3,04±0,19	3,1±0,1
ЭИСП+МТ		12,3±0,9*	2,58±0,23*	20,4±2,1*	2,83±0,12	3,1±0,1
ЭИСП+О		9,1±1,1*	2,32±0,37*	17,2±2,4*	2,47±0,11*	3,0±0,1
Контроль-интактные	18	20,2±0,9	3,31±0,18	28,5±1,2	3,51±0,18	3,2±0,1
ЭИСП+МТ		10,5±1,1*	2,20±0,23*	20,6±1,4*	2,80±0,29*	3,1±0,1
ЭИСП+О		9,5±1,4*	1,93±0,30*	16,7±0,9*	2,46±0,17*	3,0±0,1
Контроль-интактные	24	19,4±1,3	3,24±0,15	24,9±0,3	3,45 ±0,26	3,0±0,1
ЭИСП+МТ		8,2±1,4*	1,73±0,31*	15,2±1,1*	2,09±0,14*	2,9±0,1
ЭИСП+О		6,8±1,2*	1,46±0,24*	11,3±1,7*	1,82±0,23*	2,9±0,1
Ячмень						
Контроль-интактные	Сразу после завершения экспонирования	23,8±0,8	3,39±0,12	30,8±1,6	5,24±0,18	4,1±0,2
ЭИСП+МТ		22,3±1,2	3,34±0,15	27,4±1,1	5,19±0,31	4,0±0,10
ЭИСП+О		22,6±1,3	3,47±0,11	30,5±1,2	5,15±0,23	4,1±0,2
Контроль-интактные	12	18,7±1,4	3,21±0,14	25,7±1,3	4,87±0,23	3,8±0,1
ЭИСП+МТ		18,1±0,8	3,09±0,12	23,4±1,1	4,69±0,31	3,7±0,2
ЭИСП+О		16,6 ±1,5	3,07±0,25	22,8±1,9	4,73±0,26	3,7±0,2
Контроль-интактные	18	17,5±1,1	2,86±0,25	23,9±1,7	4,06±0,30	3,7±0,1
ЭИСП+МТ		15,2±0,9	2,76±0,12	21,5±1,3	3,91±0,27	3,6±0,2
ЭИСП+О		13,4 ±0,8*	2,67±0,19	20,3±1,4*	3,74±0,18	3,5±0,2
Контроль-интактные	24	22,4±2,1	3,93±0,16	24,8±1,3	5,09±0,35	3,9±0,1
ЭИСП+МТ		19,5±1,3	3,66±0,13	22,7±1,5	4,61 ±0,27	3,8 ±0,2
ЭИСП+О		17,6±1,2*	3,50±0,19*	20,2±1,6*	4,45±0,32	3,8±0,2

*Статистически значимые различия с контролем при P≤0,05.

Таблица 3. Эффект последствия у экспонированных семян (ограничения семян от воздухообмена)
Table 3. Aftereffect effect of exposed seeds (restrictions of seeds from air exchange)

Варианты опыта	Продолжительность хранения экспонированных семян, мес.	Росток		Первичные корни		
		длина, мм	масса 100 шт. проростков, г	длина, мм	масса 100 шт. проростков, г	число, шт.
Яровая пшеница						
Контроль-интактные	Сразу после завершения экспонирования	20,2±0,8	3,36±0,21	27,4±1,1	3,37±0,24	3,1±0,1
ЭИСП+МТ		16,3 ±1,6*	2,95±0,30	25,5±1,1	3,05±0,28	3,1±0,2
ЭИСП+О		15,9±1,7*	2,81±0,17*	25,3±1,3*	3,00±0,17	3,0±0,1
Контроль-интактные	12	20,3±1,2	3,25±0,16	28,3±1,1	3,24±0,30	3,2±0,1
ЭИСП+МТ		18,3±1,4	2,96±0,21	25,4±1,5	2,95±0,19	3,1±0,1
ЭИСП+О		17,8±1,1	3,04±0,27	24,9±2,2	3,07±0,23	3,0±0,10
Контроль-интактные	18	21,2±1,3	3,34±0,25	31,5±2,6	3,07±0,19	3,2±0,1
ЭИСП+МТ		20,5±1,5	3,21±0,19	29,0±1,8	2,85±0,33	3,2±0,1
ЭИСП+О		18,9±1,3	2,98±0,32	28,7±2,2	2,88±0,35	3,1±0,2
Контроль-интактные	24	18,4±1,1	2,98±0,31	25,6±1,3	3,19 ±0,17	3,2±0,1
ЭИСП+МТ		16,7±1,3	2,76±0,27	23,0±1,4	2,94±0,12	3,1±0,2
ЭИСП+О		17,0±0,9	2,80±0,19	23,3±1,9	3,01±0,21	3,1±0,1
Ячмень						
Контроль-интактные	Сразу после завершения экспонирования	23,8±0,9	3,39±0,12	30,8±1,6	5,24±0,18	3,8±0,2
ЭИСП+МТ		22,3±1,6	3,34±0,15	27,4±1,1	5,19±0,31	3,7±0,2
ЭИСП+О		22,6±1,3	3,47±0,11	30,5±1,2	5,15±0,23	3,7±0,2
Контроль-интактные	12	18,2±1,6	2,89±0,12	23,9±1,5	4,64±0,29	3,6±0,1
ЭИСП+МТ		17,1±1,2	2,76±0,15	23,6±1,7	4,57±0,14	3,6±0,2
ЭИСП+О		16,9 ±1,4	2,82±0,23	22,7±1,4	4,77±0,16	3,5±0,2
Контроль-интактные	18	21,5±2,1	3,08±0,31	35,7±3,0	4,24±0,27	3,6±0,1
ЭИСП+МТ		19,8±1,5	2,87±0,24	32,6±2,4	3,97±0,19	3,6±0,1
ЭИСП+О		20,7 ±1,4	3,03±0,25	33,0±2,7	4,15±0,31	3,5±0,2
Контроль-интактные	24	24,7±1,5	2,76±0,30	28,8±1,1	4,11±0,19	3,5±0,1
ЭИСП+МТ		18,9±1,1	2,63±0,17	27,4±1,6	3,93 ±0,21	3,4 ±0,2
ЭИСП+О		18,0±1,2	2,60±0,21	26,9±1,7	4,08±0,32	3,4±0,2

*Статистически значимые различия с контролем при P≤0,05.



Проростки ячменя варианта ЭИСЯ+МТ существенно не отличались от контроля по морфометрическим показателям в течение всего времени хранения семян. Число первичных корешков у 3-суточных проростков во всех опытных вариантах изменялось незначительно.

Общезвестно, что послеуборочное хранение, обеспечивающее изоляцию семян от воздухообмена с окружающей средой, позволяет сохранять стабильность межзерновой газовой среды, ее влажность, интенсивность обменных процессов, пролонгирует биологическую и хозяйственную долговечность семян. Это согласуется с результатами проведенных опытов, из которых следует, что хранение экспонированных семян яровой пшеницы и ячменя, в условиях ограниченного воздухообмена в течение 24 мес., не оказало значимого модифицирующего влияния на интенсивность роста проростков (табл. 3).

Наблюдаемая вариабельность абсолютных размеров морфометрических показателей проростков семян опытных вариантов в зависимости от продолжительности хранения обусловлена естественными биоритмами растительных организмов во времени, эти колебания не были статистически значимыми по отношению к контролю. Важная роль в оценке качества и физиологического состояния семян принадлежит энергии прорастания и лабораторной всхожести, которые характеризуют активность метаболических процессов, интенсивность роста на ранних этапах онтогенеза.

Экспонирование интактных семян яровой пшеницы и ячменя стрессированными семенами оказало существенное влияние на изменение их посевных качеств, в большей степени первых (табл. 4).

При свободном воздухообмене и хранении в течение 12 мес. энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян яровой пшеницы в варианте ЭИСП+О были ниже контроля на 12,4 и 5,4%. Последующее увеличение продолжительности хранения сопровождалось выраженным снижением данных показателей, различия с контролем к 24 мес. достигали 24,1 и 10,7%, в результате семена были некондиционными по лабораторной всхожести.

У семян варианта ЭИСП+МТ при хранении в условиях свободного воздухообмена до 12-18 мес. наблюдалось значимое уменьшение только энергии прорастания на 6,3-9,5%, через 24 мес. лабораторной всхожести — на 5,3%. При ограничении воздухообмена у семян яровой пшеницы не выявлено ингибирующего последствие экспонирования на посевные качества семян варианта ЭИСП+МТ. Однако у семян варианта ЭИСП+О происходило заметное снижение энергии прорастания на 6,2-7,1% при хранении 18-24 мес., что указывает на более сильное последствие экспонирования облученными семенами, чем травмированными. Посевные качества экспонированных семян ячменя, хранившиеся 12-18 мес. в условиях свободного воздухообмена, не претерпевали существенного изменения. Увеличение продолжительности хранения до 24 мес. привело к снижению энергии прорастания в опытных вариантах до 68,0-70,1% или на 8,5-10,6% ниже контроля. Ограничение воздухообмена семян ячменя блокировало отрицательное последствие экспонирования. Во всех опытных вариантах при хранении 24 мес. энергия прорастания и лабораторная всхожесть не значительно отличались от контроля. Семена ячменя, подвергнутые дистанционному экспонированию стрессированными семенами и последующему хранению в условиях ограниченного воздухообмена, имели посевные качества, отвечающие требованиям посевного стандарта.

Пробы воздуха из межзерновой воздушной среды специальных колб, в которых хранили экспонированные семена, показали увеличение концентрации этилена более чем на порядок по отношению к контролю, где концентрация варьировала в пределах 0,0016-0,0029 мг/м³. Тогда как его содержание в опытных вариантах ЭИСП+МТ и ЭИСП+О с увеличением продолжительности хранения повышалось — 0,0092-0,0341 и 0,0173-0,0560 мг/м³; в опытных вариантах ЭИСЯ+МТ и ЭИСЯ+О — 0,0038-0,0137 и 0,0045-0,0204 мг/м³, что указывает на хроническое состояние стресса у экспонированных семян в последствии.

Таким образом, проведенными исследованиями в очередной раз подтверждена способность стрессированных воздушно-сухих семян

зерновых культур дистанционно оказывать влияние на интактные. Ключевую роль в коммуникации между семенами выполнял синтезируемый при свободном воздухообмене стрессовый этилен.

После завершения экспонирования на первом этапе в образце экспонированных семян, представляющих гетерогенную совокупность разнокачественных организмов, у отдельной части семян, менее устойчивых к повреждающим воздействиям, было индуцировано состояние стресса. Эффект последствие у данных семян при свободном воздухообмене выражался в динамичном снижении интенсивности роста проростков, энергии прорастания, лабораторной всхожести по мере увеличения продолжительности хранения. Тогда как последствие у экспонированных семян, хранившихся в емкости, изолирующей их от воздухообмена, характеризовалось незначительными колебаниями во времени интенсивности роста проростков. Стабильность данных показателей в последствии у семян, хранившихся в условиях ограниченного воздухообмена, объясняется тем, что синтез этилена имеет кислородозависимый характер, и интенсивность его выделения зависит от присутствия свободного кислорода атмосферного воздуха в межзерновой воздушной среде. Кроме того, этилен обладает свойством автоиндуктора, то есть экзогенный этилен, как стресс-фактор, вызывает синтез эндогенного. Интактные семена ячменя были более устойчивыми, чем яровой пшеницы, как на экспонирование стрессированных, так в последствие.

Видовые различия предположительно обусловлены разной степенью воздухопроницаемости семенных и плодовых оболочек зерновок. Пленчатые семена ячменя, в отличие от голозерных семян яровой пшеницы, более изолированы от воздухообмена за счет сросшихся с зерновкой пленчатых цветочных чешуй. Следовательно, блокировать или, по крайней мере, минимизировать отрицательное влияние поврежденных (стрессированных) семян на семена высокого качества, а также последствие, при послеуборочном хранении страховых, переходящих фондов, селекционных коллекций, позволяет воздухоизоляция между разнокачественными семенами. Купировать эффект последствие позволило хранение семян в воздухо- и этилен непроницаемых емкостях, максимально заполненных семенным материалом. Из результатов опытов следует необходимость дополнить сложившиеся традиционные теоретические представления о долговременном хранении семян сельскохозяйственных растений новыми ранее малоизвестными знаниями о физиологии семян. И на основании новых знаний разработать эффективные элементы антистрессовой технологии послеуборочного хранения поврежденных механизированной уборкой, очисткой, сортировкой и сушкой партии семян.

Выводы. Адаптационная реакция последствие у интактных семян яровой пшеницы, подвергнутых экспонированию стрессированными семенами, при последующем хранении 24 мес. в условиях свободного воздухообмена сопровождалась угнетением прорастания, роста проростков, снижением посевных качеств семян, увеличением концентрации этилена в межзерновой воздушной среде, менее выражено эти процессы протекали у пленчатых семян ячменя. Использование для хранения емкостей, ограничивающих воздухообмен экспонированных семян, существенно уменьшало отрицательный эффект последствие и пролонгировало

Таблица 4. Влияние последствие экспонирования стрессированных семян на посевные качества интактных семян в процессе хранения, %

Table 4. The effect of the aftereffect of exposure of stressed seeds on the sowing qualities of intact seeds during storage, %

Семена	Свободный воздухообмен			Ограниченный воздухообмен		
	Продолжительность хранения, мес.					
	12	18	24	12	18	24
Яровая пшеница						
Контроль-интактные	89,3±2,1 95,6±1,0	91,1±1,6 94,8±1,3	89,5±1,8 94,3±1,2	89,7±1,5 95,9±0,9	92,0±1,6 96,3±0,8	91,4±1,3 95,0±0,7
ЭИСП+МТ	83,0±2,7* 93,4±2,1	81,6±2,6* 91,9±1,5	75,7±3,7* 89,0±2,3**	88,4±2,6 95,0±1,1	87,6±2,2 94,4±1,2	87,8±1,3 94,0±0,8
ЭИСП+О	76,9±4,3* 90,2±1,6**	72,8±3,7* 87,1±1,9**	65,4±4,2* 83,6±2,5**	87,6±3,2 92,7±1,6	85,8±2,5* 92,5±1,3	84,3±3,1* 93,2±1,9
Ячмень						
Контроль-интактные	77,5±2,4 93,4±1,5	79,1±2,1 93,8±1,4	78,6±3,0 92,4±1,3	79,3±2,9 93,5±1,6	78,8±2,5 95,1±0,9	83,5±2,4 94,2±1,7
ЭИСЯ+МТ	76,3±3,1 92,7±1,4	77,5±3,5 92,0±1,6	70,1±3,8* 90,3±2,0	78,4±2,1 93,2±1,5	81,2±2,4 93,7±1,1	79,7±2,7 93,4±1,2
ЭИСЯ+О	75,2±2,9 91,5±1,6	74,9±3,3 90,4±2,0	68,0±4,3* 89,0±2,7	76,9±3,2 92,6±1,3	75,6±3,5 93,1±2,0	80,4±2,6 92,7±1,8

*Статистически значимые различия с контролем по энергии прорастания;

**Статистически значимые различия с контролем по лабораторной всхожести; Энергия прорастания — числитель, Лабораторная всхожесть — знаменатель.



кондиционные посевные качества семян. Ключевую роль в формировании ингибирующих эффектов последствия обуславливал выделяемый экспонированными семенами этилен, синтез которого имеет кислородозависимый характер. Не исключено, что ограниченный воздухообмен снижал уровень активных форм кислорода в жизненно важных структурах зерновок, ослабляя развитие окислительного стресса у семян.

При послеуборочном хранении семенного материала, страховых и переходящих фондов должно быть исключено размещение в одном зернохранилище партий семян с резко контрастными посевными качествами, если их объединяет общая воздушная среда.

Список источников

1. Новахатин В.В. Научное обоснование первичного и элитного семеноводства зерновых культур // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 9. С.40-47.
2. Фризен Ю.В. Влияние метеорологических факторов на посевные качества семян яровой твердой пшеницы // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. № 3 (23). С. 18-23.
3. Левин В.И., Дудин Н.Н., Антипкина Л.А., Ушаков Р.Н. Состояние стресса у семян хлебных злаков и методика его диагностики // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 5 (187). С. 28-38.
4. Stegner, M., Wagner, J., Roach, T. (2022). Antioxidant depletion during seed storage under ambient conditions. *Seed Science Research*, vol. 32, no. 3, pp. 150-156.
5. Cheyed, S.H. (2020). Effect of storage method and period on vitality and vigour of wheat seed. *Indian Journal of Ecology*, vol. 47, no. 4, pp. 27-31.
6. Левин В.И., Антипкина Л.А., Ступин А.С. Последствие стресс-факторов на прорастание и посевные качества семян зерновых культур // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 4 (48). С. 3-10.
7. Levin, V.I., Antipkina, L.A., Stupin, A.S., Dudin, N. (2021). Modifying the effect of stressed spring wheat seeds on intact ones. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Yekaterinburg, IOP Publishing Ltd, p. 012015.
8. Stupin, A.S., Levin, V.I., Antipkina, L.A. (2023). Response of stressed seeds of grain crops to changing conditions and duration of their storage. *International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-II-2023)*. Ufa, Russia, vol. 71. Les Ulis Cedex, France: EDP SCIENCES, p. 1055.
9. Chandel, A., Mann, R., Kaur, J. et al. (2021). Implications of Seed Vault Storage Strategies for Conservation of Seed Bacterial Microbiomes. *Frontiers in Microbiology*, vol. 12, no. FEB, p. 784796.
10. Pirredda, M., Elena González-Benito, M., Martín, C., Mira, S. (2020). Genetic and epigenetic stability in rye seeds under different storage conditions: Ageing and oxygen effect. *Plants*, vol. 9, no. 3, p. 393.
11. Есъяков Е.К., Левин В.И. Специфичность дистанционного воздействия Y-облученных семян растений на необлученные // Радиационная биология. Радиоэкология. 2002. Т. 42. № 3. С. 302-307.

12. Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Третьяков Н.Н. Эффект зеркальной симметризации ценотической пары проростков и электромагнитное взаимодействие прорастающих семян // Доклады Российской академии наук. 2004. № 3. С. 396-398.
13. Харламов В.А., Суринов Б.П. Модификация радиационных нарушений у животных и растений естественными летучими выделениями // Радиация и риск. 2013. Т. 22. № 1. С.62-69.
14. Харламов В.А., Суринов Б.П. Эффекты опосредованного влияния гамма-облученных семян пшеницы на интактные при совместном хранении // Техногенные системы и экологический риск: материалы докладов VII Региональной научной конференции. Обнинск, 2010. Ч. 2. С. 86-91.
15. Nagasawa, H., Little, J.B. (1992). Induction of sister chromatid exchanges by extremely low doses of alpha-particles. *Cancer Res.*, no. 52, pp. 6394-6396.
16. Кузин А.М., Суркенов Г.Н., Ревин А.Ф. О значении дистанционного фактора в радиационном гормезисе // Радиационная биология. Радиоэкология. 1994. Т. 34. № 6. С. 832-837.
17. Макарова С.А., Левин В.И. Межвидовое дистанционное воздействие стрессированных семян растений на интактные // Проблемы агрохимии и экологии. 2014. № 2. С. 38-42.
18. Землянская Е.В., Омелянчук Н.А., Ермаков А.А., Миронова В.В. Механизмы регуляции передачи этиленового сигнала у растений // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016. № 20 (3). С. 386-395.

References

1. Novakhatin, V.V. (2018). Nauchnoe obosnovanie pervichnogo i elitnogo semenovodstva zemnykh kultur [Scientific substantiation of primary and elite seed production of grain crops]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology of the AIC], vol. 32, no. 9, pp. 40-47.
2. Frizen, Yu.V. (2016). Vliyaniye meteorologicheskikh faktorov na posevnyye kachestva semyan yarovoi tvrdoi pshenitsy [The influence of meteorological factors on the sowing qualities of spring durum wheat seeds]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Omsk State Agrarian University], no. 3 (23), pp. 18-23.
3. Levin, V.I., Dudin, N.N., Antipkina, L.A., Ushakov, R.N. (2020). Sostoyaniye stressa u semyan khlebykh zlakov i metodika ego diagnostiki [The state of stress in grain seeds and methods of its diagnosis]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], no. 5 (187), pp. 28-38.
4. Stegner, M., Wagner, J., Roach, T. (2022). Antioxidant depletion during seed storage under ambient conditions. *Seed Science Research*, vol. 32, no. 3, pp. 150-156.
5. Cheyed, S.H. (2020). Effect of storage method and period on vitality and vigour of wheat seed. *Indian Journal of Ecology*, vol. 47, no. 4, pp. 27-31.
6. Levin, V.I., Antipkina, L.A., Stupin, A.S. (2023). Posledistvie stress-faktorov na prorastaniye i posevnyye kachestva semyan zemnykh kultur [The aftereffect of stress factors on germination and sowing qualities of grain seeds]. *Vestnik Kurganskoi GSKHA* [Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy], no. 4 (48), pp. 3-10.
7. Levin, V.I., Antipkina, L.A., Stupin, A.S., Dudin, N. (2021). Modifying the effect of stressed spring wheat seeds

on intact ones. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Yekaterinburg, IOP Publishing Ltd, p. 012015.

8. Stupin, A.S., Levin, V.I., Antipkina, L.A. (2023). Response of stressed seeds of grain crops to changing conditions and duration of their storage. *International Conference on Current Issues of Breeding, Technology and Processing of Agricultural Crops, and Environment (CIBTA-II-2023)*. Ufa, Russia, vol. 71. Les Ulis Cedex, France: EDP SCIENCES, p. 1055.
9. Chandel, A., Mann, R., Kaur, J. et al. (2021). Implications of Seed Vault Storage Strategies for Conservation of Seed Bacterial Microbiomes. *Frontiers in Microbiology*, vol. 12, no. FEB, p. 784796.
10. Pirredda, M., Elena González-Benito, M., Martín, C., Mira, S. (2020). Genetic and epigenetic stability in rye seeds under different storage conditions: Ageing and oxygen effect. *Plants*, vol. 9, no. 3, p. 393.
11. Es'kov, E.K., Levin, V.I. (2002). Spetsifichnost' distantsionnogo vozdeystviya Y-obluchennykh semyan rasteniy na neobluchennyye [Specificity of remote exposure of Y-irradiated plant seeds to non-irradiated ones]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], vol. 42, no. 3, pp. 302-307.
12. Maslobrod, S.N., Shabala, S.N., Tret'yakov, N.N. (2004). Effekt zerkal'noi simmetrizatsii tsenoticheskoi pary prorostkov i ehlektromagnitnoye vzaimodeystviye prorstayushchikh semyan [The effect of mirror symmetrization of a cenotic pair of seedlings and the electromagnetic interaction of germinating seeds]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk* [Reports of the Russian Academy of Sciences], no. 3, pp. 396-398.
13. Kharlamov, V.A., Surinov, B.P. (2013). Modifikatsiya radiatsionnykh narusheniy u zhivotnykh i rasteniy estestvennymi letuchimi vydeleniyami [Modification of radiation disorders in animals and plants by natural volatile secretions]. *Radiatsiya i risk* [Radiation and risk], vol. 22, no. 1, pp. 62-69.
14. Kharlamov, V.A., Surinov, B.P. (2010). Effekty oposredovannogo vliyaniya gamma-obluchennykh semyan pshenitsy na intaktnyye pri sovmestnom khraneni [Effects of the indirect effect of gamma-irradiated wheat seeds on intact ones during joint storage]. *Tekhnogennyye sistemy i ehkologicheskii risk: materialy dokladov VII Regional'noi nauchnoi konferentsii* [Man-made systems and environmental risk: materials of the reports of the VII Regional scientific conference]. Obninsk, part 2, pp. 86-91.
15. Nagasawa, H., Little, J.B. (1992). Induction of sister chromatid exchanges by extremely low doses of alpha-particles. *Cancer Res.*, no. 52, pp. 6394-6396.
16. Kuzin, A.M., Surkenov, G.N., Revyn, A.F. (1994). O znachenii distantsionnogo faktora v radiatsionnom gormezise [On the importance of the remote factor in radiation hormesis]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], vol. 34, no. 6, pp. 832-837.
17. Makarova, S.A., Levin, V.I. (2014). Mezhdidovoe distantsionnoye vozdeystviye stressirovannykh semyan rasteniy na intaktnyye [Interspecific remote effect of stressed plant seeds on intact ones]. *Problemy agrokhimii i ehkologii* [Agrochemistry and ecology problems], no. 2, pp. 38-42.
18. Zemlyanskaya, E.V., Omel'yanchuk, N.A., Ermakov, A.A., Mironova, V.V. (2016). Mekhanizmy regulyatsii peredachi etilenovogo signala u rasteniy [Mechanisms of regulation of ethylene signal transmission in plants]. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii* [Vavilov journal of genetics and breeding], no. 20 (3), pp. 386-395.

Информация об авторах:

Левин Виктор Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры селекции и семеноводства, лесного дела и садоводства, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9587-0556>, Scopus ID: 57222725006, SPIN-код: 6626-5560, levin-49@bk.ru

Ступин Александр Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры агрономии, агрохимии и защиты растений, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0548-6313>, Scopus ID: 57221955958, SPIN-код: 2893-0106, stupin32@yandex.ru

Ушаков Роман Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры агрономии, агрохимии и защиты растений, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9406-8537>, Scopus ID: 56021193500, Researcher ID: B-1401-2014, SPIN-код: 5421-9050, r.ushakov1971@mail.ru

Антипкина Людмила Анатольевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры селекции и семеноводства, лесного дела и садоводства, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6933-8833>, Scopus ID: 57222726549, SPIN-код: 1463-9048, latalanova@ya.ru

Information about the authors:

Viktor I. Levin, doctor of agricultural sciences, professor, professor of the department of breeding and seed production, forestry and horticulture, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9587-0556>, Scopus ID: 57222725006, SPIN-code: 6626-5560, levin-49@bk.ru

Alexander S. Stupin, candidate of agricultural sciences, associate professor, associate professor of the department of agronomy, agrochemistry and plant protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0548-6313>, Scopus ID: 57221955958, SPIN-code: 2893-0106, stupin32@yandex.ru

Roman N. Ushakov, doctor of agricultural sciences, professor, professor of the department of agronomy, agrochemistry and plant protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9406-8537>, Scopus ID: 56021193500, Researcher ID: B-1401-2014, SPIN-code: 5421-9050, r.ushakov1971@mail.ru

Lyudmila A. Antipkina, candidate of agricultural sciences, associate professor, associate professor of the department of breeding and seed production, forestry and horticulture, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6933-8833>, Scopus ID: 57222726549, SPIN-code: 1463-9048, latalanova@ya.ru

