

Влияние салициловой кислоты на продуктивные признаки регенерантных линий ячменя в условиях почвенных стрессов

© 2025. О. Н. Шуплецова^{1✉}, И. Н. Щенникова¹, С. Н. Шевченко²

¹ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация,

²ФГБУН Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Самарская область, Российская Федерация

Для создания генотипов зерновых культур, устойчивых к эдафическим стрессорам, активно применяется клеточная селекция. Необходима оценка отобранных *in vitro* генотипов в условиях *in vivo* для подтверждения генетической стабильности целевого признака. Для повышения урожайности регенерантных генотипов возможно использование регуляторов роста с адаптогенным и протекторным действием. В условиях вегетационного опыта проводили сравнительный анализ продуктивных признаков ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Боярин и его регенерантных линий R1-поколения на почвенных фонах с засухой ($pH_{KCl} - 6,5$; искусственно созданный водный дефицит), токсичностью алюминия ($pH_{KCl} - 4,8$; $Al - 13$ мг/кг) и кадмия ($pH_{KCl} - 4,7$; $Cd - 6,4$ мг/кг), а также без стрессора (контроль). Оценивали эффективность обработки ячменя салициловой кислотой (СК) (2 мМ/дм³) в качестве стресс-протектора в неблагоприятных почвенных условиях. Определен вклад факторов в формировании урожайности ячменя: почвенный фон – 30,4 %; генотипические особенности – 8,1 %; обработка салициловой кислотой – 0,7 %. Без обработки СК наибольшую урожайность (130 г/м²) в стрессовых (засушливых) условиях имели регенеранты, полученные на селективных средах *in vitro* с водным дефицитом – RA-ПЭГ. Стресспротекторное действие СК выявлено у регенерантов RA-Cd и RA-ПЭГ на фоне с кадмием – превышение по урожайности над исходным сортом составило 59 и 47 г/м² (более чем в два раза) и у регенерантов RA-Al и RA-ПЭГ при отсутствии стрессовых факторов – 29 и 24 г/м² соответственно. Регенерантная линия RA-ПЭГ рекомендована для использования в селекционных программах по созданию засухоустойчивых генотипов.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., исходный сорт, регенерант, почвенный фон, алюмокислотность, токсичность кадмия, засуха, стресспротектор, продуктивность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (темы № FNWE-2025-0008, 2022-0007).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н., Шевченко С. Н. Влияние салициловой кислоты на продуктивные признаки регенерантных линий ячменя в условиях почвенных стрессов. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(5):1007–1014. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.5.1007-1014>

Поступила: 20.05.2025

Принята к публикации: 19.09.2025

Опубликована онлайн: 31.10.2025

Effect of salicylic acid on productive traits of regenerated barley lines under soil stress

© 2025. Olga N. Shupletsova^{1✉}, Irina N. Shchennikova¹, Sergey N. Shevchenko²

¹Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation,

²Samara Federal Research Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Samara region, Russian Federation

Cell selection is actively used to create genotypes of grain crops resistant to edaphic stressors. It is necessary to evaluate the genotypes selected *in vitro* under *in vivo* conditions to confirm the genetic stability of the target trait. To increase the yield of regenerated genotypes, it is possible to use growth regulators with adaptogenic and protective effects. In the conditions of a vegetation experiment, a comparative analysis of the productive traits of 'Boyarin' barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivar and its regenerated R1-generation lines was carried out on soil backgrounds with drought ($pH_{KCl} - 6.5$; artificially created water deficit), aluminum toxicity ($pH_{KCl} - 4.8$; $Al - 13$ mg/kg) and cadmium ($pH_{KCl} - 4.7$; $Cd - 6.4$ mg/kg), also without stress (control). The efficiency of barley treatment with salicylic acid (SA) (2 mM/dm³) as a stress protector under unfavorable soil conditions was assessed. The contribution of factors to the formation of barley yield was determined: soil background – 30.4 %, genotypic features – 8.1 %, treatment with salicylic acid – 0.7 %. Without SA treatment, the highest yield (130 g/m²) under stressful (drought) conditions was shown by regenerants obtained on selective media *in vitro* with water deficiency – RA-PEG. The stress-protective effect of SA was revealed against the background of cadmium in the regenerants RA-Cd and RA-PEG, the yield excess was more than twice over the original cultivar, amounting to 59 and 47 g/m², and in the absence of stress factors – in the regenerants RA-Al and RA-PEG by 29 and 24 g/m², respectively. The regenerated line RA-PEG is recommended for use in breeding programs to create drought-resistant genotypes.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., original cultivar, regenerant, soil background, aluminum acidity, cadmium toxicity, drought, stress protector, productivity

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2025-0008, 2022-0007).

The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Shupletsova O. N., Shchennikova I. N., Shevchenko S. N. Effect of salicylic acid on productive traits of regenerated barley lines under soil stress. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(5):1007–1014. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.5.1007-1014>

Received: 20.05.2025

Accepted for publication: 19.09.2025

Published online: 31.10.2025

Сельскохозяйственные культуры на протяжении всего вегетационного периода испытывают биотические и абиотические стрессы [1], негативное воздействие которых усиливается со смещением климатических поясов в условиях изменения климата [2]. Стрессоры приводят к разнообразным повреждениям (механическим, физиологическим и др.) растительной ткани, тем самым нарушают нормальное развитие растений [3]: изменяют морфологические признаки, в т. ч. темп роста корней [4, 5]; размер листьев [6]; биохимические показатели, в т. ч. содержание хлорофиллов и каротиноидов [7, 8]. В случае зерновых культур стрессовые факторы непосредственно воздействуют на формирование признаков продуктивности агроценоза, сопряжённых с урожайностью сортов [9].

Необходимо совершенствование методов селекции, направленных на создание сортов, устойчивых к неблагоприятным условиям вегетации. В современной селекции зерновых культур сохраняют свою актуальность традиционные методы, такие как гибридизация и отбор [10]. В то же время их эффективность значительно повышается за счет интеграции биотехнологических подходов, которые способствуют сокращению временных затрат на селекционный процесс, обеспечивая более быстрое достижение желаемых генотипических и фенотипических характеристик [11].

Для получения стрессоустойчивых генотипов ячменя активно используют культуру каллусных клеток с последующей регенерацией растений на селективных средах *in vitro* [12]. Клеточная селекция обеспечивает низкую частоту встречаемости в половых потомствах летальных и вредных мутаций, снижающих жизнеспособность растений; получение в процессе регенерации ценных форм с высоким уровнем адаптации и неспецифической устойчивостью к повреждающим факторам среды [13, 14]. Однако известно, что механизмы клеточной устойчивости и устойчивости растений

в полевых условиях могут не совпадать¹. Кроме того, наследование приобретенных продуктивных и биохимических признаков в потомстве регенерантных растений в большинстве случаев имеет нестабильный характер. При проведении клеточной селекции также необходимо учитывать характер формирования устойчивости растений (полигенный/моногенный) к стрессору. Продуктивность относится к числу признаков, по которым не существует определенного ответа *in vitro*. Для подтверждения генетической стабильности целевого признака нужна оценка отобранных *in vitro* генотипов в полевых испытаниях [15]. Таким образом, для разработки адекватных схем клеточной селекции требуется оценка влияния условий отбора *in vitro*, в т. ч. и на продуктивность.

Комбинация генетически детерминированной устойчивости регенерантных линий к стрессовым факторам с влиянием адаптогенного и протекторного действия новых регуляторов роста может значительно повысить урожайность подобных генотипов. Однако применение данных соединений в целях повышения стрессоустойчивости растений недостаточно изучено. Известны исследования, указывающие на посредническую роль салициловой кислоты (СК) в защите от токсичности кадмия бобовых и зерновых культур [16, 17]. В этом случае экзогенное применение СК оказывало защитное действие на целостность мембран, снижая токсическое воздействие кадмия. Наблюдали снижение содержания пероксида водорода и активности антиоксидантных ферментов в апопластах корней, что могло указывать на снижение стрессированности растений. Однако, несмотря на положительный эффект использования СК в качестве протектора в почвенных условиях с избыточным кадмием, не существует единого мнения относительно ее оптимальной концентрации, также эффективности применения на почве со стрессорами другой природы.

¹Бутенко Р. Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнологии на их основе: учебное пособие. М.: ФБК – Пресс, 1999. 160 с. URL: <https://djvu.online/file/Ow9Rc1NxmQVqq>

Цель исследования – определить отзывчивость регенерантных линий ячменя на обработку салициловой кислотой в условиях эдафических стрессов.

Научная новизна – сравнительный анализ отзывчивости регенерантных и исходных генотипов ячменя на применение регулятора роста с протекторными свойствами в условиях вегетационного опыта со стрессорами различной природы.

Материал и методы. Исследования проводили в вегетационных опытах в условиях, близких к полевым. Вегетационные ёмкости, размером 1,5×1,3×0,3 м ($V = 0,6 \text{ м}^3$), установленные на открытой площадке над поверхностью почвы, заполняли дерново-подзолистой

почвой. Высевали по 35 зерен. После всходов в эксперименте оставляли по 30 растений каждого генотипа с площадью питания растений 4×15 см². В период вегетации осуществляли полив растений водопроводной водой (исключение засушливый фон в сроки моделирования засухи), поддерживая влажность почвы на уровне 60 % от полной влагоемкости².

Объектом исследования служили сорт ячменя ярового Боярин (*Hordeum vulgare* L.) и его регенерантные линии F1-поколения (RA), полученные в каллусной культуре на селективных средах с H^+ , Cd^{2+} , Al^{3+} и полиэтиленгликолем (ПЭГ) в качестве осмотического агента для обеспечения дефицита влаги (табл. 1).

Таблица 1 – Происхождение регенерантных форм ярового ячменя сорта Боярин /
Table 1 – Origin of regenerated forms of spring barley of the ‘Boyarin’ cultivar

Генотип / Genotype	Селективная среда / Selective medium
Боярин (исходный сорт) / ‘Boyarin’ (original cultivar)	Контроль / Control
RA-Cd	$\text{Cd}^{2+} - 15 \text{ мг/дм}^3$ (в сульфате) / $\text{Cd}^{2+} - 15 \text{ mg/dm}^3$ (in sulfate)
RA-Al	$\text{Al}^{3+} - 40 \text{ мг/дм}^3$ (в сульфате) / $\text{Al}^{3+} - 40 \text{ mg/dm}^3$ (in sulfate)
RA-ПЭГ	Полиэтиленгликоль (ПЭГ) – 15 % / Polyethylene glycol (PEG) – 15 %

Схема опыта предусматривала посев ячменя на четырех почвенных фонах:

- 1) контроль ($\text{pH}_{\text{КСЛ}} - 6,5$; отсутствие стрессора);
- 2) с токсичностью кадмия ($\text{pH}_{\text{КСЛ}} - 4,7$; $\text{Cd} - 6,4 \text{ мг/кг}$);
- 3) алюмокислый ($\text{pH}_{\text{КСЛ}} - 4,8$; $\text{Al} 13 \text{ мг/кг}$);
- 4) засуха, водный дефицит ($\text{pH}_{\text{КСЛ}} - 6,5$), искусственно созданная засуха (пленочное укрытие) в межфазный период «выход в трубку – колошение».

Варианты: 1. Без обработки СК.

2. Обработка СК.

Обработку растений СК проводили в фазу «кущение» (03.06.2024) и «выход в трубку» (17.06.2024). Растения равномерно опрыскивали 1%-м водно-спиртовым раствором СК с концентрацией 2 мг/дм³. Расход раствора при первой обработке составлял 50 мл/м², второй – 100 мл/м². В варианте без обработки растения опрыскивали эквивалентным количеством 1%-го водно-спиртового раствора.

Проводили сравнительный анализ элементов структуры продуктивности и урожайность регенерантов и исходного сорта на различных почвенных фонах. Оценивали отзывчивость исследуемых генотипов на эффектив-

ность применения СК в качестве стресспротектора/стимулятора роста как разность между показателями элементов структуры продуктивности в контрольном варианте (без обработки СК) и варианте с обработкой СК.

Для статистической обработки экспериментальных данных использовали пакет селекционно-ориентированных и биометрико-генетических программ AGROS, версия 2.07; пакеты прикладных программ Microsoft Excel из стандартного набора Microsoft Office 2013.

Результаты и их обсуждение. Первоначально оценивали реакцию генотипов на почвенные стрессоры по продуктивности (масса зерна с растения) без обработки СК. В контрольном варианте (на почве без стрессоров) продуктивностью на уровне исходного сорта отличился RA-Cd, тогда как у регенерантов RA-Al и RA-ПЭГ этот показатель был значительно ниже – на 0,34 и 0,26 г соответственно (табл. 2). На почвенных фонах с токсичностью алюминия и кадмия отсутствовали статистически значимые различия между регенерантами и исходным сортом. В засушливых условиях RA-ПЭГ превышал остальные регенерантные генотипы на 0,23 г и исходный сорт – на 0,17 г.

²Родина Н. А. Селекция ячменя на Северо-Востоке Нечерноземья: монография. Киров: Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2006. 488 с.

Таблица 2 – Влияние обработки СК на продуктивность регенерантов и их исходного сорта /
 Table 2 – Effect of salicylic acid treatment on the productivity of regenerants and their original cultivar

Генотип / Genotype	Масса зерна с растения, г / Grain weight per plant, g				± к варианту с обработкой СК / ± to the SA treatment variant
	без обработки СК / without SA treatment		с обработкой СК / with SA treatment		
	г / g	± к исходному сорту / to the original cultivar	г / g	± к исходному сорту / to the original cultivar	
Без почвенных стрессоров (контроль) / No soil stressors (control)					
Исходный сорт / Original cultivar	0,80±0,08	-	0,57±0,05	-	-0,23**
RA-Cd	0,92±0,10	+0,12	0,57±0,10	0	-0,35**
RA-Al	0,46±0,04	-0,34*	0,71±0,05	+0,14*	+0,25**
RA-ПЭГ	0,54±0,05	-0,26*	0,92±0,10	+0,35*	+0,38**
Токсичность кадмия / Cadmium toxicity					
Исходный сорт / Original cultivar	0,87±0,16		0,90±0,15	-	+0,03
RA-Cd	0,83±0,06	-0,04	1,11±0,12	+0,21	+0,28
RA-Al	0,75±0,10	-0,12	0,81±0,16	-0,09	+0,06
RA-ПЭГ	0,94±0,07	+0,07	1,08±0,12	+0,18	+0,14
Алюмотоксичность / Aluminum toxicity					
Исходный сорт / Original cultivar	1,18±0,09	-	1,35±0,10	-	+0,17
RA-Cd	0,95±0,08	-0,23	1,27±0,09	-0,08	+0,32**
RA-Al	0,96±0,16	-0,22	0,81±0,11	-0,54*	-0,15
RA-ПЭГ	1,25±0,13	+0,07	1,06±0,08	-0,29*	-0,19
Засуха / Drought					
Исходный сорт / Original cultivar	0,67±0,04	-	0,85±0,12	-	+0,18
RA-Cd	0,61±0,03	-0,06	0,62±0,06	-0,23	+0,01
RA-Al	0,61±0,03	-0,06	0,59±0,05	-0,26	-0,02
RA-ПЭГ	0,84±0,07	+0,17*	0,81±0,10	-0,04	-0,04

* Достоверные различия от исходного сорта при $p \leq 0,05$ /

* Differs significantly from the original cultivar at $p \leq 0.05$;

** Достоверные различия от варианта без обработки СК при $p \leq 0,05$ /

** Differs significantly from the variant without SA treatment at $p \leq 0.05$

Обработка СК изменила продуктивность ячменя в контрольных почвенных условиях. Регенеранты RA-Al и RA-ПЭГ увеличили массу зерна с растения относительно варианта без обработки СК на 0,25 и 0,38 г соответственно. Эти же регенерантные генотипы показали значимые прибавки по отношению к исходному сорту на 0,14 и 0,35 г соответственно. Тогда как в отсутствие регулятора роста имели показатели существенно ниже исходной формы. Однако в тех же контрольных условиях обработка СК негативно влияла на регенерант RA-Cd и исходный сорт, имеющих относительно высокую продуктивность в варианте без обработки. В этом случае масса зерна с растения снизилась на 0,35 и 0,23 г соответственно.

На стрессовых фонах в большинстве случаев исследуемые генотипы не проявили

реакцию на применение СК, за исключением RA-Cd, который на алюмотоксичном фоне увеличил продуктивность на 0,32 г.

Что касается урожайности – в отсутствие СК исходный сорт (99 г/м²) имел преимущество перед регенерантами, однако достоверно снижал показатели на почве с кадмием на 20 г/м² и засухой на 44 г/м². Урожайность регенерантов RA-Cd и RA-Al на всех стрессовых фонах статистически значимо не отличалась от исходного сорта. Исключение составил RA-ПЭГ, который достоверно увеличил урожайность относительно контроля ($HCp_{05} = 7$ г/м²) и исходного сорта на алюмоокислом фоне (на 75 и 11 г/м² соответственно) и при засухе (на 38 и 42 г/м²).

Также оценивали влияние регулятора роста на урожайность ячменя. Значимое поло-

жительное влияние СК на урожайность регенерантов по сравнению с исходным сортом (60 г/м²) было отмечено на контрольном фоне у регенерантов RA-Al (89 г/м²) и RA-ПЭГ – (84 г/м²), на фоне с ионной токсичностью кадмия превышение над исходным сортом (51 г/м²) было более чем в два раза у регенерантов RA-Cd (110 г/м²) и RA-ПЭГ (120 г/м²). В засушливых и алюмокислых условиях при использовании СК статистически значимых изменений на урожайность ячменя не выявлено.

Следует отметить, что в наших исследованиях отличие регенерантных линий от исходного сорта в стрессовых условиях не всегда носило позитивный характер. Подобные результаты показаны в исследованиях О. А. Рожанской [13], по мнению которой в случае использования в процессе клеточной селекции в качестве

исходного высокоурожайного сорта наблюдается высокая частота «негативных» вариаций, ухудшающих селекционные качества нового генотипа; низкая частота «улучшающих» вариаций, несмотря на высокую частоту варьирования признаков продуктивности растений в результате соматической изменчивости каллусной ткани на селективных средах *in vitro*.

Для более подробного изучения воздействия регулятора роста на исследуемые генотипы также проводили сравнительный анализ отдельных элементов структуры продуктивности ячменя в вариантах с обработкой/без обработки СК. Установлено, что СК оказывала влияние на эти показатели, однако степень этого влияния варьировала, как и в целом по продуктивности/урожайности в зависимости от генотипа и условий среды выращивания (табл. 3).

Таблица 3 – Влияние обработки растений СК на элементы продуктивности ячменя сорта Боярин и его регенерантных линий на различных почвенных фонах /

Table 3 – The effect of plant treatment with salicylic acid on the productivity elements of ‘Boyarín’ barley cultivar and its regenerated lines on different soil backgrounds

Генотип / Genotype	Высота растений, см / Height of plants, cm	Кустистость, шт/раст. / Bushiness, pieces/plant		Длина колоса, см / Ear length, cm	Количество в колосе, шт. / Quantity per ear, pcs	
		общая / total	продуктивная / productive		колосков / ears	зерен / grains
Без почвенных стрессоров (контроль) / No soil stressors (control)						
Исходный сорт / Original cultivar	-8*	+0,1	0	+0,4	-0,2	-2,4*
RA-Cd	+1	-0,2	+0,1	+0,3	-0,8	-3,7*
RA-Al	-2	+0,7*	+0,6*	+0,7*	+0,9	+0,8
RA-ПЭГ	-3	+0,3	+0,4*	+1,0*	+3,1*	+3,6*
Токсичность кадмия / Cadmium toxicity						
Исходный сорт / Original cultivar	-4	-0,4	+0,1	-0,2	-0,6	+0,3
RA-Cd	-1	+0,6*	+0,6*	+0,1	-0,6	-0,7
RA-Al	-8*	+0,4	+0,3	-0,8	-2,7*	-3,5*
RA-ПЭГ	-1	+0,3	+0,3	0	-0,6	-0,9
Алюмотоксичность / Aluminum toxicity						
Исходный сорт / Original cultivar	-1	+0,1	+0,1	+0,6*	+1,2*	+1,6*
RA-Cd	+3*	+0,7*	+0,3	+0,6*	+1,2*	+1,8*
RA-Al	-4*	-0,5*	-0,4	-0,5*	-2,2*	-1,7*
RA-ПЭГ	0	0	-0,1	0	-0,4	-1,8*
Засуха / Drought						
Исходный сорт / Original cultivar	+3	+0,8*	-0,1	-0,5	-0,8	+3,8*
RA-Cd	-6*	+0,7*	0	-0,5*	-1,5*	-1,0
RA-Al	-1	-0,1	0	-0,2	-0,5	-0,4
RA-ПЭГ	-4*	+0,1	0	+0,2	+0,8	+0,2

* Достоверные различия от варианта без обработки СК при $p \leq 0,05$ /

*Differs significantly from the variant without salicylic acid treatment at $p \leq 0.05$

В отдельных случаях под действием СК значительно изменялись показатели – кустистость растений, длина и озерненность колоса. Стимулирующее действие СК в большой степени проявилось у регенеранта RA-Cd, который повышал общую кустистость на 0,6-0,7 шт/раст. (на всех стрессовых фонах), продуктивную – на 0,6 шт/раст. (контроль, фон с кадмием). Кроме того, значимое увеличение всех изучаемых параметров колоса было отмечено у регенерантов RA-Cd на алюмоокислом фоне, у RA-ПЭГ – на контрольном, у исходного сорта – в алюмоокислых и засушливых условиях.

Наряду со стимулирующим действием СК наблюдали и негативное воздействие на элементы продуктивности ячменя. Обработка СК снижала высоту растений и озерненность колоса исходного сорта (в контроле), RA-Al (фон с кадмием и алюмотоксичностью) и RA-Cd (засуха).

Результаты трехфакторного дисперсионного анализа показали, что в целом по опыту наибольший вклад в формирование урожайности оказал почвенный фон (фактор В) – 30,4 %, вклад биологических особенностей изучаемых образцов/генотип (фактор А) составил 8,1 %, обработки салициловой кислотой (фактор С) – всего 0,7 %. В наших исследованиях применение СК не показало стабильного стимулирующего эффекта. В большинстве случаев на обработку СК регенеранты (и в большей степени RA-Cd) были более отзывчивы по сравнению с исходным сортом. Отмечено уменьшение различий по продуктивности / урожайности между обработанными и необработанными растениями в контрольных условиях и на фоне с кадмием, что указывало как на стимулирующее (в контроле), так и на смягчающее/протекторное действие препарата (стресс по кадмию). Известно, что СК способна облегчать стрессовые реакции, вызванные кадмием, путем ингибирования индуцированной кадмием опосредованной ауксином продукции активных форм кислорода

в кончиках корней ячменя [18]. Отсутствие положительных результатов на алюмоокислом (исключение для RA-Cd) и засушливом фонах возможно объясняется следующими факторами: необходимостью корректировки применяемой дозы (2 мМ/дм³) регулятора роста, отсутствием у СК протекторных механизмов, действенных при стрессорах отличными от кадмия, а также жестким давлением этих стрессоров в почвенных условиях.

Заключение. Проведенные исследования выявили различную реакцию исходного сорта Боярин и его регенерантных линий на почвенные стрессоры. В благоприятных условиях выращивания исходный сорт и регенерантная линия RA-Cd превышали по продуктивности RA-Al и RA-ПЭГ. На стрессовых фонах регенерантные генотипы RA-Cd и RA-Al не имели статистически значимых различий по продуктивности от исходного сорта, что в этом случае указывало на необходимость корректировки схем клеточной селекции. Тогда как RA-ПЭГ, индуцированный на селективных средах *in vitro* с водным дефицитом, имел преимущество по продуктивности/урожаю перед исходным сортом в засушливых почвенных условиях, что соответствовало направленности отбора *in vitro* для этого генотипа. В настоящее время регенерантная линия RA-ПЭГ рекомендована для использования в селекционных программах по созданию засухоустойчивых генотипов.

Выявлена эффективность использования СК в качестве протектанта для ячменя в почвенных условиях в отсутствие стрессоров и на фоне с токсичностью кадмия, но в большей степени для генотипов, имеющих низкие продуктивные показатели в этих условиях. Наибольшую отзывчивость на применение СК проявил регенерантный генотип RA-Cd, в результате повышающий продуктивные показатели на всех стрессовых фонах.

Список литературы

1. Ступин А. С., Левин В. И. Комплексная антистрессовая защита зерновых культур при контрастных погодных условиях. Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2024;(6):55–60.
DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500208224060135> EDN: WTLIPE
2. Грабовец А. И., Фоменко М. А. Изменение климата и особенности селекции озимой мягкой пшеницы на продуктивность и адаптивность к нему. Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2023;(1):20–25.
DOI: <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/1/20-25> EDN: OIFLKO
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)):28–38.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42880940> EDN: XVAKQB
4. Ma Y., Li C., Ryan P. R., Shabala S., You J., Liu J. et al. A new allele for aluminium tolerance gene in barley (*Hordeum vulgare* L.). BMC Genomics. 2016;17:186.
URL: <https://bmcgenomics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12864-016-2551-3>

5. Ofoe R., Thomas R. H., Asiedu S. K., Wang-Pruski G., Fofana B., Abbey L. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*. 2022;(13):1085998. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085998>
6. Batalova G. A., Lisitsyn E. M. Correlation analysis of the parameters of oats assimilation apparatus and productivity elements. *Nexo Revista Cientifica*. 2021;34(01):379–389. DOI: <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i01.11315>
7. Амунова О. А., Лисицын Е. М. Пигментный комплекс листьев сортов мягкой яровой пшеницы разных групп спелости в различных условиях увлажнения. *Самарский научный вестник*. 2019;8(3(28)):19–25. DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-13102> EDN: FXEVT
8. Каляга Т. Г., Козел Н. В. Влияние почвенной засухи на содержание фотосинтетических пигментов в растениях ячменя сорта Бровар. *Экспериментальная биология и биотехнология*. 2020;(3):46–53. DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-3-46-53> EDN: EQOSTS
9. Гречишкина О. С., Хутамбирдина Р. Д., Мординцев М. П. Величина и структура урожая зерна сортов яровой мягкой пшеницы в условиях засухи разного типа. *Животноводство и кормопроизводство*. 2021;104(4):217–232. DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-217> EDN: HICWSI
10. Бессараб Н. С. Селекционные достижения как объекты интеллектуальной собственности: история и современность. *Образование и право*. 2024;(1):213–221. DOI: <https://doi.org/10.24412/2076-1503-2024-1-213-221> EDN: QGHWM
11. Shchennikova I. N., Shupletsova O. N., Kokina L. P. Biotechnology in the Creation of Spring Barley Varieties. *Russian Agricultural Sciences*. 2022;48(4):264–269. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367422040139>
12. Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н. Результаты использования клеточных технологий в создании новых сортов ячменя, устойчивых к токсичности алюминия и засухе. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(5):623–628. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ16.183> EDN: WYCWFI
13. Рожанская О. А. О соматической изменчивости растений как источнике биоразнообразия для селекции. *Селекция растений: прошлое, настоящее и будущее: сб. мат-лов I Всеросс. научно-практ. конф. с междунар. участием*. Белгород: Издательский дом «Белгород», 2016. С. 152–156. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30559170> EDN: ZSSWSX
14. Kapazoglou A., Tsaftaris A. Epigenetic chromatin regulators as mediators of abiotic stress responses in cereals. *Abiotic stress in plants – mechanisms and adaptations*. InTech, 2011. pp. 395–414. DOI: <https://doi.org/10.5772/36025>
15. Pérez-Clemente R., Gómez-Cadenas A. In vitro tissue culture, a tool for the study and breeding of plants subjected to abiotic stress conditions. *Recent advances in plant in vitro culture*. InTech, 2012. pp. 91–108. DOI: <https://doi.org/10.5772/50671>
16. Hediji H., Kharbech O., Massoud M. B., Boukari N., Debez A., Chaibi W. et al. Salicylic acid mitigates cadmium toxicity in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings by modulating cellular redox status. *Environmental and Experimental Botany*. 2021;186:104432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104432>
17. Metwally A., Finkemeier I., Georgi M., Dietz K. J. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant physiology*. 2003;132(1):272–281. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.102.018457>

References

1. Stupin A. S., Levin V. I. Comprehensive anti-stress protection of grain crops under contrasting weather conditions. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian agricultural science. 2024;(6):55–60. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500208224060135>
2. Grabovets A. I., Fomenko M. A. Climate change and selection features of winter soft wheat on productivity and adaptability to it. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian agricultural science. 2023;(1):20–25. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/1/20-25>
3. Levin V. I., Dudin N. N., Antipkina L. A., Ushakov R. N. The state of stress in cereal seeds and methods for its diagnosis. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2020;(5(187)):28–38. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42880940>
4. Ma Y., Li C., Ryan P. R., Shabala S., You J., Liu J. et al. A new allele for aluminium tolerance gene in barley (*Hordeum vulgare* L.). *BMC Genomics*. 2016;17:186. URL: <https://bmcbgenomics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12864-016-2551-3>
5. Ofoe R., Thomas R. H., Asiedu S. K., Wang-Pruski G., Fofana B., Abbey L. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*. 2022;(13):1085998. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085998>
6. Batalova G. A., Lisitsyn E. M. Correlation analysis of the parameters of oats assimilation apparatus and productivity elements. *Nexo Revista Cientifica*. 2021;34(01):379–389. DOI: <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i01.11315>
7. Amunova O. A., Lisitsyn E. M. Leaf pigment complex of spring soft wheat cultivars of different maturity groups under different moisture regimes. *Samarskiy nauchnyy vestnik* = Samara Journal of Science. 2019;8(3(28)):19–25. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-13102>
8. Kaliha T. G., Kozel N. V. The effect of soil drought on the content of photosynthetic pigments in barley plants of the Brovar variety. *Ekspperimental'naya biologiya i biotekhnologiya* = Experimental Biology and Biotechnology. 2020;(3):46–53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-3-46-53>
9. Grechishkina O. S., Khutambirdina R. D., Mordvinsev M. P. Amount and structure of grain yield of spring soft wheat varieties in various types of drought conditions. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* = Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(4):217–232. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-217>

10. Bessarab N. S. Breeding achievements as objects of intellectual property: history and modernity. *Obrazovanie i parvo* = Education and Law. 2024;(1):213–221. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2076-1503-2024-1-213-221>
11. Shchennikova I. N., Shupletsova O. N., Kokina L. P. Biotechnology in the Creation of Spring Barley Varieties. *Russian Agricultural Sciences*. 2022;48(4):264–269. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367422040139>
12. Shupletsova O. N., Shchennikova I. N. Results of using cell technologies for creation of new barley varieties resistant against aluminum toxicity and drought. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2016;20(5):623–628. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ16.183>
13. Rozhanskaya O. A. On the somaclonal variability of plants as a source of biodiversity for breeding. Plant breeding: past, present and future: collection of materials of the First All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Belgorod: *Izdatel'skiy dom «Belgorod»*, 2016. pp. 152–156. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30559170>
14. Kapazoglou A., Tsiftaris A. Epigenetic chromatin regulators as mediators of abiotic stress responses in cereals. Abiotic stress in plants – mechanisms and adaptations. InTech, 2011. pp. 395–414. DOI: <https://doi.org/10.5772/36025>
15. Pérez-Clemente R., Gómez-Cadenas A. In vitro tissue culture, a tool for the study and breeding of plants subjected to abiotic stress conditions. Recent advances in plant in vitro culture. InTech, 2012. pp. 91–108. DOI: <https://doi.org/10.5772/50671>
16. Hediji H., Kharbech O., Massoud M. B., Boukari N., Debez A., Chaibi W. et al. Salicylic acid mitigates cadmium toxicity in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings by modulating cellular redox status. *Environmental and Experimental Botany*. 2021;186:104432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104432>
17. Metwally A., Finkemeier I., Georgi M., Dietz K. J. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant physiology*. 2003;132(1):272–281. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.102.018457>

Сведения об авторах

✉ **Шуплецова Ольга Наумовна**, доктор биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биотехнологических методов селекции сельскохозяйственных растений, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, 166 а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4679-0717>, e-mail: olga.shuplecova@mail.ru

Щенникова Ирина Николаевна, доктор с.-х. наук, член-корреспондент РАН, заведующая лабораторией селекции и первичного семеноводства ячменя ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, 166 а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5143-9246>

Шевченко Сергей Николаевич, доктор с.-х. наук, академик РАН, заведующий отделом селекции, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н. М. Тулайкова – филиал ФГБУН Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, ул. Карла Маркса, 41, пгт. Безенчук, Самарская область, Российская Федерация, 446254, e-mail: samniish@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7605-9864>

Information about the authors

✉ **Olga N. Shupletsova**, DSc in Biological Science, associate professor, leading researcher, the Laboratory of Biotechnological Methods of Agricultural Plant Breeding, Federal Agricultural Research Center of the North -East named N. V. Rudnitsky, Lenin Str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4679-0717>, e-mail: olga.shuplecova@mail.ru

Irina N. Shchennikova, DSc in Agriculture, corresponding member of the RAS, Head of the Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Barley, Federal Agricultural Research Center of the North -East named N. V. Rudnitsky, Lenin Str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5143-9246>

Sergey N. Shevchenko, DSc in Agriculture, academician of the RAS, Head of the Breeding Department, Samara Scientific Research Agriculture Institute named after N. M. Tulaykov – Branch of the Samara Federal Research Scientific Center of Russian Academy of Sciences, 41, Karl Marx St., village Bezenchuk, Samara region, Russian Federation, 446254, e-mail: samniish@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7605-9864>

✉ – Для контактов / Corresponding author