



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 2. С. 195–204

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 195–204

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-195-204>, EDN: VFHSFH

Научная статья

УДК 581.1+ 633.111.1+631.524.85



Влияние солевого стресса на рост и развитие корневой системы проростков интровергессивных линий яровой мягкой пшеницы

В. В. Коробко¹, Ю. В. Даштоян²✉, А. В. Калинина², Ю. А. Костикова¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока», Россия, 4100107, г. Саратов, ул. Тулаикова, д. 7

Коробко Валерия Валерьевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и физиологии растений, v.v.korobko@mail.ru, <https://orchid.org/0000-0002-0444-8238>

Даштоян Юлия Васильевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории генетики и цитологии, dashto@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4481-2417>

Калинина Алла Владимировна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории генетики и цитологии, kalininaal@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6608-708X>

Костикова Юлия Алексеевна, студент кафедры микробиологии и физиологии растений, costikovaj@yandex.ru, <https://orchid.org/0009-0002-4905-4395>

Аннотация. Изучение устойчивости растений, полученных в результате интровергессивной селекции, к действию различных факторов, в том числе к засолению, является важным этапом селекционной работы. Проведено исследование влияния солевого стресса на рост и развитие корневой системы проростков интровергессивных линий яровой мягкой пшеницы. Объектами исследования являлись проростки интровергессивных линий яровой мягкой пшеницы, полученные с участием *Triticum dicoccum* Shuebl, *Aegilops speltoides* Tausch, *Agropyron elongatum* (Host) Beauv. Проростки сорта Саратовская 76 использованы в качестве стандарта. Объекты культивировали в лабораторных условиях. В качестве субстрата использованы изоосмотические растворы NaCl , Na_2SO_4 , их смесь в соотношении 1:1 и H_2O (контроль). Влияние засоления на рост оценивали по следующим критериям: количеству корней, их длине, значениям корневого индекса и показателя корнеобеспеченности. Проростки изученных линий в контрольном варианте опыта уступали сорту-стандарту по длине корней и показателю корнеобеспеченности. Установлено, что в наименьшей степени ингибирующее действие хлоридного и сульфатного засоления субстрата на рост корней в длину проявлялось у проростков линии L657: длина главного корня и корней нижнего и верхнего ярусов превышали аналогичные показатели проростков сорта-стандarta. Засоление оказывало негативное действие на корневой индекс проростков и сорта-стандarta, и изученных линий мягкой пшеницы, при этом проростки линий L657 и L664 по значению корневого индекса достоверно превосходили сорт-стандарт при всех вариантах засоления. По количеству корней у проростков статистически значимых отличий у линий, содержащих чужеродный генетический материал, и сорта-стандarta не обнаружено.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., интровергессивные линии мягкой пшеницы, хлоридное засоление, сульфатное засоление, морфогенез проростков

Для цитирования: Коробко В. В., Даштоян Ю. В., Калинина А. В., Костикова Ю. А. Влияние солевого стресса на рост и развитие корневой системы проростков интровергессивных линий яровой мягкой пшеницы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 2. С. 195–204. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-195-204>, EDN: VFHSFH

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

The effect of salt stress on the growth and development of the root system of seedlings of introgressive lines of spring bread wheat

В. В. Коробко¹, И. В. Даштоян²✉, А. В. Калинина², И. А. Костикова¹

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Federal State Budgetary Scientific Organization "Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region", 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia

Valeria V. Korobko, v.v.korobko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0444-8238>

Iuliia V. Dashtoian, dashto@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4481-2417>

Alla V. Kalinina, kalininaal@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6608-708X>

Iuliia A. Kostikova, costikovaj@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4905-4395>

Abstract. The study of the resistance of plants obtained as a result of introgressive breeding to the action of various factors, including salinization, is an important stage of breeding work. The effect of salt stress on the growth and development of the root system of seedlings of introgressive lines of spring soft wheat has been studied. The objects of the study are seedlings of introgressive lines of spring soft wheat obtained with the participation of *Triticum dicoccum* Shuebl, *Aegilops speltoides* Tausch, *Agropyron elongatum* (Host) Beauv. Seedlings of the Saratov 76 variety are used as a standard. The objects were cultivated under laboratory conditions. As a substrate, isoosmotic solutions of NaCl, Na₂SO₄, their mixture in a ratio of 1:1 and H₂O (control) were used. The effect of salinization on growth was assessed according to the following criteria: the number of roots, their length, the values of the root index and the root-to-shoot ratio. The seedlings of the studied lines in the control version of the experiment are inferior to the standard variety in terms of root length and root availability. It was found that the least inhibitory effect of chloride and sulfate salinization of the substrate on root growth in length is manifested in seedlings of the L657 line: the length of the main root and the roots of the lower and upper tiers exceed similar indicators of seedlings of the standard variety. Salinization has a negative effect on the root index of seedlings of both the standard variety and the studied lines of soft wheat, while seedlings of lines L657 and L664 in terms of the root index are significantly superior to the standard variety in all salinization variants. According to the number of roots in seedlings, there are no statistically significant differences between lines containing foreign genetic material and the standard variety.

Keywords: *Triticum aestivum* L., introgressive lines of bread wheat, chloride salinity, sulfate salinity, seedling morphogenesis

For citation: Korobko V. V., Dashtoian I. V., Kalinina A. V., Kostikova I. A. The effect of salt stress on the growth and development of the root system of seedlings of introgressive lines of spring bread wheat. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 195–204 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-195-204>, EDN: VFHSFH

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Зерновые культуры являются важной частью продовольственных ресурсов человека и животных. Ежегодно в России их выращивают на площади около 45 млн гектаров [1], при этом значительная доля среди зерновых культур принадлежит мягкой пшенице. Площади, занятые пшеницей, располагаются в регионах России, существенно отличающихся по агроклиматическим условиям, в том числе по факторам, ограничивающим реализацию потенциала культуры. Одним из таких факторов выступает засоление почв [2].

Доля засоленных земель, в пределах сельскохозяйственных угодий России, по разным источникам, составляет 18,1–21,4% от общей площади [3]. Рассоление почв, заключающееся в выполнении комплекса сложных мелиоративных мероприятий, не всегда возможно. В связи с этим внимание к повышению толерантности сельскохозяйственных культур к действию этого фактора остается актуальным.

Мягкая пшеница характеризуется как культура, обладающая механизмами устойчивого развития в слабосоленой среде [4–6]. Селекция, связанная с внесением в геном мягкой пшеницы генетического материала других родственных видов, направленная на усиление некоторых хозяйствственно-ценных признаков или приобретения новых, может привести к ухудшению

способности растения переживать неблагоприятные условия [7]. Поэтому изучение устойчивости растений, полученных в результате интродуктивной селекции, к действию различных факторов, в том числе к засолению, является важным этапом селекционной работы [8].

Цель настоящей работы – изучить влияние засоления на рост и развитие проростков интродуктивных линий яровой мягкой пшеницы.

Материалы и методы

Исследования выполнены в 2024 г. в лаборатории цитологии и генетики ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока». Объектом исследования служили проростки яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Саратовская 76 и интродуктивных линий яровой мягкой пшеницы селекции Федерального аграрного научного центра Юго-Востока (L657, L664), полученные с участием *Triticum dicoccum* Shuebl, *Aegilops speltoides* Tausch, *Agropyron elongatum* (Host) Beauv. Источник и состояние чужеродного генетического материала в реконструированном геноме мягкой пшеницы подтверждены в результате цитогенетического анализа с помощью методов флуоресцентной (FISH) и геномной (GISH) гибридизации *in situ* [9] (табл. 1). Сорт яровой мягкой пшеницы Саратовская 76 использован в связи с его рекомендацией госсорткомиссией в качестве стандарта.

Таблица 1 / Table 1

Генетическая характеристика изученных интровергессивных линий *T. aestivum* L.
Genetic characteristics of the studied introgressive lines of *T. aestivum* L.

Линия / Lines	Родословная / Pedigree of lines	Источник чужеродного генетического материала / Source of alien genetic material	Характеристика чужеродного генетического материала / Characteristics of alien genetic material
L657	Л505*2//Л503/3/Л528//АДТ.dic/ Ae.spelt*5C29/4/Th Lr28	<i>Tr.dicoccum</i> , <i>Ae.speltoides</i>	6A ^{dic} (6D)
L664	С55//Добр/Л164//Агр139/ Л528*2//АДТ.dic/Ae.spelt*5C29// Добр	<i>T.dicoccum</i> , <i>Ae.speltoides</i> , <i>Ag.elongatum</i> (источник – сорт Добриня – носитель транс- локации 7DS.7DL-7Ae#1L)	2A ^{dic} (2A) или T2AS.2A ^{dic} L; 2S(2D); T7DS.7DL-7Ae#1L

Исследование проводили в лабораторных условиях. Использовали неповрежденные, выровненные по размеру семена одного года репродукции от растений, выращенных в пределах одного опытного участка. Зерновки проращивали в чашках Петри в растворах 0,98% NaCl, 1,94% Na₂SO₄, смеси этих растворов в соотношении 1:1. Концентрации растворов соответствовали осмотическому давлению 0,7 МПа [10].

В качестве контроля служили семена, прощенные на дистиллированной воде. Культивирование осуществляли в климатокамере при температуре 19±1°C; фотопериод 16/8 ч света/темноты.

Количественный учет проводили в трех повторностях на семидневных проростках по следующим критериям: определяли количество корней, измеряли их длину и суммарную длину корней каждого растения, абсолютно сухую массу побега и корневой системы ($n = 20$). Используя полученные морфометрические данные, рассчитывали корневой индекс (RI) [8, 11].

Были определены значения сухой массы корней и побега семидневных проростков и определен показатель корнеобеспеченности проростка (the root-to-shoot ratio, обозначенный нами R^{r/s}) [8, 12, 13]. Расчет R^{r/s} проведен при помощи скрипта, разработанного на языке программирования Python и используемого для вычисления значений R^{r/s} в отн.ед. и % от контрольных значений [14]. Статистическая обработка данных проведена в табличном процессоре Excel пакета MS Office 2010.

Результаты и их обсуждение

Изучено влияние различных типов засоления на количество корней проростков (табл. 2). В контрольном варианте опыта в среднем их число составляло от 4,9 до 5,3 (мода=5); при этом у проростков линии L657 варьирование данного показателя оценивается как среднее, а у проростков линии L664 и сорта-стандарта – незначительное.

Таблица 2 / Table 2

Влияние засоления на количество корней проростков интровергессивных линий *T. aestivum* L.
Influence of salinity on the number of roots seedlings of introgressive lines of *T. aestivum* L.

Объект / The object	Контроль / The control (H ₂ O)			Типы засоления / Type of salinization								
				NaCl			Na ₂ SO ₄			NaCl + Na ₂ SO ₄		
	Σ, шт.	M	Cv	Σ, шт.	M	Cv	Σ, шт.	M	Cv	Σ, шт.	M	Cv
Саратовская 76 / Saratovskaya 76	4,9±0,4	5	7	5,0±0,0	5	0	5,6±0,7	5	12	5,5±0,7	6	13
L657	5,3±0,5	5	10	5,3±0,4	5	8	5,3±0,9	6	18	5,5±0,5	5	9
L664	5,0±0,0	5	0	4,9±0,3	5	6	5,0±0,0	5	0	5,2±0,7	5	13

Примечание. M – мода, Cv – коэффициент варьирования, %, Σ – среднее арифметическое.

Note. M – mode, Cv – coefficient of variation, %, Σ – arithmetic mean.



При культивировании проростков в условиях хлоридного засоления количество корней варьировало от $4,9 \pm 0,6$ (линия L664) до $5,3 \pm 0,4$ (линия L657) шт.; мода равна 5. Различия анализируемого показателя интровергессивных линий и сорта-стандарта не являлись достоверными. В условиях сульфатного засоления наибольшее количество корней наблюдалось у проростков сорта Саратовская 76 – $5,6 \pm 0,7$ шт., однако достоверных различий между показателями сорта-стандарта и изученными линиями не обнаружено; значение моды у проростков линии L657 составило 6 шт., тогда как у сорта-стандарта и других линий – 5 шт. Коэффициент варьирования значения количества корней у проростков сорта-стандарта, линии L657 составил 12 и 18% (среднее варьирование признака), у линии L664 – 0.

Смешанное засоление не оказало значимого влияния на количество корней проростков.

Варьирование данного показателя оценивается как среднее у проростков Саратовская 76 и линии L664 и незначительное у линии L657.

Таким образом, сравнительный анализ данных по количеству корней у проростков сорта-стандарта и изученных интровергессивных линий не выявил статистически значимых отличий анализируемого показателя развития корневой системы проростков линий, содержащих чужеродный генетический материал, и сорта-стандарта.

Проведен морфометрический анализ роста и развития корневой системы семидневных проростков. Установлено, что все изученные линии в контролльном варианте опыта уступали сорту Саратовская 76 по длине главного корня и корней верхнего и нижнего ярусов. Наименьшими значениями длины корней характеризовались проростки линии L664 (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

**Влияние типов засоления на рост корней проростков *T. aestivum* L.
The influence of salinization types on the growth of the roots of *T. aestivum* L.**

Вариант опыта / Experience option	Объект / The object	Длина главного корня, мм / The length of the main root, mm	Длина корней нижнего яруса, мм / The length of the roots of the lower tier, mm	Длина корней верхнего яруса, мм / The length of the roots of the upper tier, mm
Контроль / The control (H_2O)	Саратовская 76 / Saratovskaya 76	132±20	255±36	161±35
	L657	69±14*	132±18*	133±26
	L664	42±23*	51±27*	21±12*
NaCl	Саратовская 76 / Saratovskaya 76	29±6	49±8	35±9
	L657	49±9*	85±9*	79±10*
	L664	29±10	65±24	43±22
Na_2SO_4	Саратовская 76 / Saratovskaya 76	6±2	16±3	17±4
	L657	13±3*	28±6*	28±10
	L664	7±3	13±2	10±2
$NaCl + Na_2SO_4$	Саратовская 76 / Saratovskaya 76	13±3	21±3	33±11
	L657	14±3	27±6	30±10
	L664	10±4	22±8	31±14

Примечание. * – различия между сортом Саратовская 76 и линией достоверны при $p < 0,05$.

Note. * – differences between the Saratovskaya 76 variety and the line are significant at $p < 0,05$.

Во всех вариантах опыта с засолением у проростков сорта Саратовская 76 наблюдалось подавление роста корней в длину. В наименьшей степени этот эффект проявился в условиях

хлоридного засоления (длина корневой системы составила 21% от контрольного значения), в наибольшей степени – при сульфатном засолении (7% от контрольного значения) (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Влияние типа засоления на общую длину корневой системы проростков
The effect of the type of salinization on the total length of the root system of seedlings

Объект / The object	Контроль / The control, мм	Типы засоления / Type of salinization					
		NaCl		Na ₂ SO ₄		NaCl+Na ₂ SO ₄	
		мм	%	мм	%	мм	%
Саратовская 76 / Saratovskaya 76	548±65	113±18	21	39±6	7	67±16	12
L657	334±51*	213±23* ^o	64	69±15* ^o	21	70±16 ^o	21
L664	114±51*	137±44	120	30±4 ^o	26	63±7	55

Примечание. % – значение длины относительно контроля (H₂O), * – различия между сортом Саратовская 76 и линией достоверны при $p < 0,05$.

Note. % – the length value relative to the control (H₂O), * – differences between the Saratovskaya 76 variety and the line are significant at $p < 0,05$.

При культивировании объектов исследования на растворе хлорида натрия проростки линии L657 характеризовались максимальными среди объектов исследования значениями длины главного корня (49±9 мм) и корней нижнего (85±9 мм) и верхнего (79±10 мм) ярусов; различия с аналогичными показателями сорта-стандарта статистически достоверны. Длина главного корня проростков линии L664 составила 29±10 мм и не отличалась от аналогичного значения у проростков сорта Саратовская 76, тогда как длина корней нижнего и верхнего ярусов превышали значения сорта-стандарта, но статистически достоверными эти отличия не являются (см. табл. 3).

В условиях сульфатного засоления длина главного корня, корней нижнего яруса, а также общая длина корневой системы проростков линии L657 достоверно превышали аналогичные показатели сорта-стандарта (см. табл. 3). Тогда как на рост корневой системы в длину у проростков линии L664 данный тип засоления не оказал статистически значимого эффекта. Отметим, что общая длина корневой системы проростков, сформировавшаяся при культивировании на растворе сульфата натрия, составила у проростков интровергессивных линий 21% (линия L657) и 26% (линия L664) от контрольных значений, тогда как у сорта Саратовская 76 – всего 7% от контроля.

При культивировании объектов исследования в условиях смешанного засоления (NaCl+Na₂SO₄; 1:1) общая длина корневой системы проростков составила 63–70 мм. Сравнительный анализ данного критерия в рассматриваемом варианте опыта и в контроле позволяет заключить, что ингибирующий эффект на рост корневой системы в длину в наименьшей степени выражен у проростков линии L664: длина корневой системы при смешанном засолении составила 55% от контрольного значения; а у сорта-стандарта Саратовская 76 – в наибольшей: длина корневой системы в данном варианте опыта составила 21% от контроля. При этом статистически значимых различий по длине главного корня, корней нижнего и верхнего ярусов, а также по суммарной длине корневой системы между объектами исследования не выявлено.

Таким образом, на основании проведенного исследования установлено, что в наименьшей степени ингибирующее действие хлоридного и сульфатного засоления субстрата на рост корней в длину проявлялось у проростков линии L657.

Корневой индекс (RI), рассчитываемый как отношение средних значений длины самого длинного корня опытных проростков к аналогичному значению контрольных экземпляров, позволяет оценить потенциальную физиологическую активность корневой систе-

мы. Засоление субстрата оказывало негативное действие на значение RI проростков сорта-стандарта: в условиях хлоридного засоления он составил 0,21 отн.ед., в условиях сульфатного –

0,06 отн.ед. и смешанного – 0,11 отн.ед. (табл. 5). Проростки линий L657 и L664 по этому показателю достоверно превосходили сорт-стандарт во всех вариантах опыта.

Таблица 5 / Table 5

**Влияние засоления на значение корневого индекса проростков, отн. ед.
The effect of salinization on the root index value of seedlings of seedlings, rel. unit**

Объект / The object	Типы засоления / Type of salinization		
	NaCl	Na ₂ SO ₄	NaCl+Na ₂ SO ₄
Саратовская 76 / Saratovskaya 76	0,21±0,01	0,06±0,01	0,11±0,01
L657	0,73±0,04*	0,22±0,01*	0,20±0,01*
L664	1,00±0,05*	0,20±0,01*	0,38±0,02*

Примечание. * – различия между сортом Саратовская 76 и линией достоверны при $p < 0,05$.

Note. * – differences between the Saratovskaya 76 variety and the line are significant at $p < 0,05$.

Из всех вариантов эксперимента наибольшие значения RI проростков отмечены в условиях хлоридного засоления; при этом значения анализируемого показателя у интроверсивных линий в 3,5–5 раз выше, чем у проростков сорта-стандарта. В условиях сульфатного и смешанного засоления данный показатель варьировал от 0,20 отн.ед. (L664, Na₂SO₄; L657, NaCl+Na₂SO₄) до 0,38 отн.ед. (L664, NaCl+Na₂SO₄).

Таким образом, засоление оказывает негативное действие на RI проростков сорта Саратовская 76 и изученных линий мягкой пшеницы; исключение составили проростки линии L664 в условиях хлоридного засоления (RI = 1).

R^{r/s} служит индикатором стресса растений, вызванного химическими или физическими воздействиями, что обусловлено способностью растений регулировать соотношение корень/ побег в неблагоприятных условиях за счет перераспределения пластических веществ между надземными и подземными органами проростка [11, 13, 15, 16]. Показатель корнеобеспеченности проростков сорта-стандарта Саратовская 76 в контролльном варианте опыта составил 0,79 отн.ед. (табл. 6). Меньшее значение этого показателя было отмечено у проростков при культивировании на растворе хлорида натрия (0,65 отн.ед). В растворах сульфата натрия и смеси солей R^{r/s} сорта Саратовская 76 не отличался от его значения в контроле.

Таблица 6 / Table 6

**Влияние типа засоления на показатель корнеобеспеченности проростков, отн. ед.
The effect of the type of salinity on the root-to-shoot ratio of seedlings, rel. unit**

Объект / The object	Контроль / The control (H ₂ O)	Типы засоления / Type of salinization		
		NaCl	Na ₂ SO ₄	NaCl+Na ₂ SO ₄
Саратовская 76 / Saratovskaya 76	0,79±0,04	0,65±0,03°	0,76±0,04	0,79±0,04
L657	0,53±0,03*	0,93±0,05*°	1,10±0,06*°	0,54±0,03*
L664	0,55±0,03*	0,86±0,04*°	0,32±0,02*°	0,79±0,04°

Примечание. * – различия между сортом Саратовская 76 и линиями достоверны при $p \leq 0,05$;
° – различия между контролем и вариантом опыта (типов засоления) достоверны при $p \leq 0,05$.

Note. * – differences between the Saratovskaya 76 variety and the line are significant at $p < 0,05$;
° – the differences between the control and the experiment variant (type of salinity) are significant $p \leq 0,05$.



В контролльном варианте эксперимента проростки линий L657 и L664 имели меньшие по сравнению с проростками сорта-стандарты значения анализируемого критерия – 0,53 и 0,55 отн.ед. соответственно, тогда как культивирование в растворе NaCl способствовало статистически достоверному повышению $R^{r/s}$ у проростков линий L657 и L664 и по сравнению с контрольными значениями, и по сравнению с данными сорта-стандарта.

В присутствии сульфата натрия высокое значение показателя корнеобеспеченности – $1,10 \pm 0,06$ отн.ед. – было выявлено у проростков линии L657, оно достоверно превышало аналогичное значение сорта-стандарта и контроля для этой линии. Сульфатное засоление оказалось негативное влияние на корнеобеспеченность проростков линии L664: в этих условиях показатель $R^{r/s}$ ниже и данных сорта-стандарта, и контрольных значений для этой линии.

Максимальными значениями относительного массового соотношения корней и побега в условиях смешанного засоления – $0,79 \pm 0,04$ отн. ед. – характеризовались проростки сорта Саратовская 76 и линии L664, тогда как показатель $R^{r/s}$ линии L667 достоверно ниже этого значения – $0,54 \pm 0,03$ отн.ед., но при этом от контрольного показателя не отличается.

Солевой стресс оказал негативное влияние на все изученные нами параметры проростков, кроме количества зародышевых корней. В исследованиях других авторов также отмечается ингибирующее действие засоления субстрата культивирования на рост и развитие растений пшеницы. Устойчивость к этому фактору, по данным ряда исследователей, достигается посредством механизмов противодействия осмотическому стрессу и изменению ионного баланса в тканях растения [2, 8, 17–21]. Кроме того, выявлено 220 QTN (Quantitative Trait Nucleotides), связанных с признаками солеустойчивости [22]. Установлено, присутствие QTN и QTL (Quantitative Trait Loci) в 2A и 6A хромосомах [22, 23]. Объекты нашего исследования содержат интрагрессии в этих участках генома. Такие изменения могут оказать негативный эффект на устойчивость растения к присутствию соли. Однако есть данные, что определенного рода интрагрессии в этих областях не приводят к снижению устойчивости и, в некоторых случаях, повышают толерант-

ность пшеницы к солевому стрессу [24]. В результате исследования нами не обнаружено негативного влияния изменения генома на устойчивость проростков интрагрессивных линий к солевому стрессу.

Заключение

Проведен морфометрический анализ проростков сорта Саратовская 76, использованного нами в качестве сорта-стандарта, и интрагрессивных линий яровой мягкой пшеницы, полученных с участием *Triticum dicoccum* Shuebl, *Aegilops speltoides* Tausch, *Agropyron elongatum* (Host) Beauv.

Установлено, что проростки изученных линий в контролльном варианте опыта – при культивировании на воде – достоверно уступают сорту Саратовская 76 по длине главного корня, корней верхнего и нижнего ярусов, показателю корнеобеспеченности.

Во всех вариантах опыта с засолением у проростков сорта-стандарта наблюдается давление роста корней в длину: в меньшей степени этот эффект проявляется в условиях хлоридного засоления, в большей – при сульфатном засолении. На основании проведенного морфометрического исследования установлено, что в наименьшей степени ингибирующее действие хлоридного и сульфатного засоления субстрата на рост корней в длину проявляется у проростков линии L657: длина главного корня и корней нижнего и верхнего ярусов превышают аналогичные показатели проростков сорта-стандарта. Засоление оказывает негативное действие на корневой индекс проростков и сорта-стандарта, и изученных линий мягкой пшеницы. Исключение составили проростки линии L664, значение корневого индекса которых в условиях хлоридного засоления равно 1 отн.ед. При этом проростки линий L657 и L664 по значению корневого индекса достоверно превосходят сорт-стандарт при всех вариантах засоления.

Сравнительный анализ данных по количеству корней у проростков не выявил статистически значимых отличий анализируемого показателя развития корневой системы проростков линий, содержащих чужеродный генетический материал, и сорта-стандарта.

Таким образом, нами выявлена линия L657, проростки которой в условиях солевого стресса

превышают сорт-стандарт по ряду морфометрических критериев, а именно длине главного корня и корней верхнего и нижнего ярусов, показателю корнеобеспеченности и корневому индексу.

Список литературы

1. Бюллетень «Посевные площади Российской Федерации в 2024 году (весеннего учета)», Федеральная служба государственной статистики, Бюллетени о состоянии сельского хозяйства (электронные версии) [сайт]. <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (дата обращения: 28.08.2024).
2. *Bilkis A., Islam M. R., Hafiz M. H. R., Hasan M. A.* Effect of NaCl induced salinity on some physiological and agronomic traits of wheat // *Pakistan Journal of Botany*. 2016. Vol. 48, № 2. P. 455–460.
3. *Панкова Е. И., Горохова И. Н.* Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2020. Вып. 103. С. 5–33. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>
4. *Maas E. V., Hoffman G. J.* Crop salt tolerance-current assessment // *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1977. Vol. 103, № 2. P. 115–134. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137>
5. *Shabala S., Munns R.* Salinity stress: Physiological constraints and adaptive mechanisms // *Plant Stress Physiology* / ed. S. Shabala. 2nd ed. Wallingford : CABI, 2017. P. 24–63. <https://doi.org/10.1079/9781780647296.0024>
6. *Liqing Ma, Erfeng Zhou, Naxing Huo, Ronghua Zhou, Guoying Wang, Jizeng Jia.* Genetic analysis of salt tolerance in a recombinant inbred population of wheat (*Triticum aestivum L.*) // *Euphytica*. 2007. Vol. 153, № 1. P. 109–117. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9247-8>
7. *Адонина И. Г., Тимонова Е. М., Салина Е. А.* Интровергессивная гибридизация мягкой пшеницы: результаты и перспективы // Генетика. 2021. Т. 57, № 4. С. 384–402. <https://doi.org/10.31857/S0016675821030024>
8. *Даштоян Ю. В., Калинина А. В., Коробко В. В.* Влияние засоления на морфогенез проростков интровергессивных линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *Aegilops columnaris* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 308–317. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-308-317>, EDN: FVXSFT
9. *Baranova O. A., Adonina L. G., Sibikeev S. N.* Molecular cytogenetic characteristics of new spring bread wheat introgressive lines resistant to stem rust // *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024. Vol. 28, № 4. P. 377–386. <https://doi.org/10.18699/vjgb-24-43>
10. *Michel B. E., Kaufmann M. R.* The osmotic potential of polyethylene glycol 6000 // *Plant Physiology*. 1973. Vol. 51, № 5. P. 914–916. <https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914>
11. *Шевлягина О. Ф., Коробко В. В.* Особенности реализации донорно-акцепторных отношений при нарушении целостности зародышевой корневой системы проростка *Triticum aestivum L.* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 219–225. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-2-219-225>
12. *Голуб Н. А.* Параметры первичной корневой системы озимой пшеницы и возможности их использования в оценке сортов // *Физиология продуктивности и устойчивости зерновых культур* : сб. науч. тр. Краснодар : КНИИСХ, 1988. С. 42–47.
13. *Ledo A., Burslem D. F. R. P., Paul K. I., Battaglia M., England J. R., Pinkard E., Roxburgh S., Ewel J. J., Barton C., Brooksbank K., Carter J., Eid T. H., Fitzgerald A., Jonson J., Mencuccini M., Montagu K. D., Montero G., Ruizpeinado R., Mugasha W. A., Ryan C. M., Sochacki S., Specht A., Wildy D., Wirth C., Zerihun A., Chave J.* Tree size and climatic water deficit control root to shoot ratio in individual trees globally // *New Phytologist*. 2018. Vol. 217, № 1. P. 8–11. <https://doi.org/10.1111/nph.14863>
14. *Коробко М. А., Коробко В. В.* Использование Python для обработки и визуализации данных при фитотестировании // *Биоразнообразие и антропогенная трансформация природных экосистем* : материалы XII Всероссийской научно-практической конференции (Балашов, 24–25 мая 2024 г.). Саратов : Саратовский источник, 2024. С. 67–72.
15. *Лисицын Е. М.* Показатели развития корневых систем в эдафической селекции ячменя // *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2018. № 2 (26). С. 66–71. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2018-10019>
16. *Agathokleous E., Kitao M., Koike T., Calabrese E. J.* Does the root to shoot ratio show a hormetic response to stress? An ecological and environmental perspective // *Journal of Forestry Research*. 2019. Vol. 30, № 5. P. 1569–1580. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0863-7>
17. *Удовенко Г. В., Семухина Л. А.* Продуктивность, накопление солей и водно-осмотические свойства растений при чистом и смешанном засолении почвы // *Агрохимия*. 1970. № 11. С. 90–101.
18. *Удовенко Г. В., Семухина Л. А., Сааков В. С., Галкин В. И., Кошкин В. А., Кинченко Т. А.* Влияние засоления на состояние и активность фотосинтезирующего аппарата растений // *Физиология растений*. 1974. Т. 21, вып. 3. С. 623–629.
19. *Турулев В. В.* Влияние солевого, пищевого и водного режимов на урожай озимой пшеницы // *Мелиорация антропогенных ландшафтов* : сб. науч. тр. НГМА. Новочеркасск : НГМА, 2000. С. 19–22.
20. *Abdel-Ghani A. H.* Response of wheat varieties from semi-arid regions of Jordan to salt stress // *J. Agronomy & Crop Science*. 2009. Vol. 195. P. 55–65. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00319.x>

21. Chaurasia S. Identification of salt-tolerant wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) through physiological and ionic studies under salinity stress // *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 2024. Vol. 27. P. 273–285. <https://doi.org/10.1007/s12892-023-00229-w>
22. Chaurasia S., Singh A. K., Songachan L. S., Sharma A. D., Bhardwaj R., Singh K. Multi-locus genome-wide association studies reveal novel genomic regions associated with vegetative stage salt tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Genomics*. 2020. Vol. 112, iss. 6. P. 4608–4621. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2020.08.006>.
23. Genc Y., Oldach K., Verbyla A. P., Lott G., Hassan M., Tester M., Wallwork H., McDonald G. K. Sodium exclusion QTL associated with improved seedling growth in bread wheat under salinity stress // *Theor. Appl. Genet.* 2010. Vol. 121, № 5. P. 877–894. <https://doi.org/10.1007/s00122-010-1357-y>
24. Юдина Р. С., Леонова И. Н., Салина Е. А., Хлесткина Е. К. Изменение солеустойчивости мягкой пшеницы в результате интродукции генетического материала *Aegilops speltoides* и *Triticum timopheevii* // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015. Вып. 19, ч. 2. С. 171– 175. <https://doi.org/10.18699/VJ15.021>

References

1. *Bulletin “Acreage of the Russian Federation in 2024 (winter accounting)”, Federal State Statistics Service, Bulletin on the state of agriculture (electronic versions) (website)*. Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277> (accessed August 28, 2024) (in Russian).
2. Bilkis A., Islam M. R., Hafiz M. H. R., Hasan M. A. Effect of NaCl induced salinity on some physiological and agronomic traits of wheat. *Pakistan Journal of Botany*, 2016, vol. 48, no. 2, pp. 455–460.
3. Pankova E. I., Gorokhova I. N. Analysis of information about the alkaline soil areas in Russia at the end of the XX and beginning of the XXI centuries. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2020, iss. 103, pp. 5–33 (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-103-5-33>
4. Maas E. V., Hoffman G. J. Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1977, vol. 103, no. 2, pp. 115–134. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137>
5. Shabala S., Munns R. Salinity stress: Physiological constraints and adaptive mechanisms. In: Shabala S., ed. *Plant Stress Physiology*. Wallingford, CABI, 2017, pp. 24–63. <https://doi.org/10.1079/9781780647296.0024>
6. Liqing Ma, Erfeng Zhou, Naxing Huo, Ronghua Zhou, Guoying Wang, Jizeng Jia. Genetic analysis of salt tolerance in a recombinant inbred population of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 2007, vol. 153, no. 1, pp. 109–117. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9247-8>
7. Adonina I. G., Timonova E. M., Salina E. A. Wheat-alien introgression breeding: Current status and prospects. *Russian Journal of Genetics*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 384–402 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0016675821030024>
8. Dashtoian I. V., Kalinina A. V., Korobko V. V. Effect of salinity on the morphogenesis of seedlings of introgressive lines of spring bread wheat with genetic material *Aegilops columnaris*. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 308–317 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-308-317>, EDN: FVXSFT
9. Baranova O. A., Adonina L. G., Sibikeev S. N. Molecular cytogenetic characteristics of new spring bread wheat introgressive lines resistant to stem rust. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 377–386. <https://doi.org/10.18699/vjgb-24-43>
10. Michel B. E., Kaufmann M. R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 1973, vol. 51, no. 5, pp. 914–916. <https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914>
11. Shevlyagina O. F., Korobko V. V. Some features of implementation of source-sink relations in violation of the integrity of the root system of seedlings of *Triticum aestivum* L. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 219–225 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-2-219-225>
12. Golub N. A. Parameters of the primary root system of winter wheat and the possibility of their use in the evaluation of varieties. In: *Fiziologiya produktivnosti i ustoychivosti zernovykh kul'tur: sb. nauch. tr.* [Physiology of Productivity and Stability of Grain Crops: Collection of proceedings]. Krasnodar, Krasnodar Research Institute of Agriculture Publ., 1988, pp. 42–47 (in Russian).
13. Ledo A., Burslem D. F. R. P., Paul K. I., Battaglia M., England J. R., Pinkard E., Roxburgh S., Ewel J. J., Barton C., Brooksbank K., Carter J., Eid T. H., Fitzgerald A., Jonson J., Mencuccini M., Montagu K. D., Montero G., Ruizpeinado R., Mugasha W. A., Ryan C. M., Sochacki S., Specht A., Wildy D., Wirth C., Zerihun A., Chave J. Tree size and climatic water deficit control root to shoot ratio in individual trees globally. *New Phytologist*, 2018, vol. 217, no. 1, pp. 8–11. <https://doi.org/10.1111/nph.14863>
14. Korobko M. A., Korobko B. B. Usage of Python for analysis and visualization phytotest data. *Bioraznoobrazie i antropogennaya transformatsiya prirodnykh ekosistem: materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoi konferentsii (Balashov, 24–25 maya 2024 g.)*. [Biodiversity and anthropogenic transformation of natural ecosystems: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference (Balashov, May 24–25, 2024)]. Saratov, Saratovskiy istochnik, 2024, pp. 67–72 (in Russian).
15. Lisitsyn E. M. Indexes of root system development for barley edaphic breeding. *Legumes and*

- Groat Crops*, 2018, no. 2 (26), pp. 66–71. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2018-10019>
16. Agathokleous E., Kitao M., Koike T., Calabrese E. J. Does the root to shoot ratio show a hormetic response to stress? An ecological and environmental perspective. *Journal of Forestry Research*, 2019, vol. 30, no. 5, pp. 1569–1580. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0863-7>
17. Udovenko G. V., Semushina L. A. Productivity, salt accumulation and water-osmotic properties of plants under pure and mixed soil salinization. *Agrochemistry*, 1970, no. 11, pp. 90–101 (in Russian).
18. Udovenko G. V., Semukhina L. A., Saakov V. S., Galkin V. I., Koshkin V. A., Kinchenko T. A. The influence of salinity on the state and activity of the photosynthetic apparatus of plants. *Plant Physiology*, 1974, vol. 21, no. 3, pp. 623–629 (in Russian).
19. Turulev V. V. Study of salt, food and water regimes in the winter wheat harvest. In: *Melioratsiya antropogennykh landshaftov: sb. nauch. tr. NGMA* [Melioration of Anthropogenic Landscapes: Collection of scientific works of the Novosibirsk State Medical Academy]. Novosibirsk, Novosibirsk State Medical Academy Publ., 2000, pp. 19–22 (in Russian).
20. Abdel-Ghani A. H. Response of wheat varieties from semi-arid regions of Jordan to salt stress. *J. Agronomy* & *Crop Science*, 2009, vol. 195, pp. 55–65. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00319.x>
21. Chaurasia S. Identification of salt-tolerant wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) through physiological and ionic studies under salinity stress. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2024, vol. 27, pp. 273–285. <https://doi.org/10.1007/s12892-023-00229-w>
22. Chaurasia S., Singh A. K., Songachan L. S., Sharma A. D., Bhardwaj R., Singh K. Multi-locus genome-wide association studies reveal novel genomic regions associated with vegetative stage salt tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Genomics*, 2020, vol. 112, iss. 6, pp. 4608–4621. <https://doi.org/10.1016/j.genome.2020.08.006>
23. Genc Y., Oldach K., Verbyla A. P., Lott G., Hassan M., Tester M., Wallwork H., McDonald G. K. Sodium exclusion QTL associated with improved seedling growth in bread wheat under salinity stress. *Theor. Appl. Genet.*, 2010, vol. 121, no. 5, pp. 877–894. <https://doi.org/10.1007/s00122-010-1357-y>
24. Yudina R. S., Leonova I. N., Salina E. A., Khlestkina E. K. Change of salt tolerance in common wheat after introgression of genetic material from *Aegilops speltoides* and *Triticum timopheevii*. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektii – Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2015, iss. 19, part 2, pp. 171–175 (in Russian). <https://doi.org/10.18699/VJ15.021>

Поступила в редакцию 25.10.2024; одобрена после рецензирования 17.03.2025;

принята к публикации 01.04.2025; опубликована 30.06.2025

The article was submitted 25.10.2024; approved after reviewing 17.03.2025;

accepted for publication 01.04.2025; published 30.06.2025