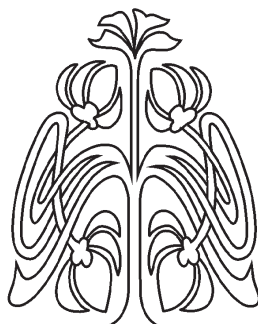
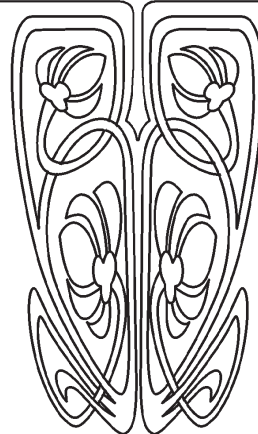




БИОЛОГИЯ



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 308–317
Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 308–317
<https://ichbe.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-308-317>
EDN: FVXSFT

Научная статья
УДК 633.111.1+581.1+631.524.85

Влияние засоления на морфогенез проростков интрогрессивных линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *Aegilops columnaris*

Ю. В. Даштоян¹✉, А. В. Калинина¹, В. В. Коробко²

¹Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Россия, 410010, г. Саратов, ул. Тулайкова, д. 7

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

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>

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

Аннотация. Внесение генетического материала дикорастущих видов в геном культурных растений позволяет существенно расширить возможности селекции. Для эффективного использования интрогрессивных растений необходимо изучение их хозяйственно-ценных признаков и адаптационных возможностей. Проведено исследование влияния генетического материала от *Aegilops columnaris* Zhuk. на морфометрические параметры проростков интрогрессивных линий мягкой яровой пшеницы в условиях солевого стресса. Объекты исследования – проростки мягкой яровой пшеницы сорта Добрыня и проростки интрогрессивных линий мягкой яровой пшеницы, содержащие генетический материал *Aegilops columnaris* Zhuk. Культивирование проростков осуществлялось на растворах хлорида и сульфата натрия. Влияние засоления на рост оценивали по следующим показателям: корневому индексу, показателю корнеобеспеченности проростка, длине первого листа, количеству корней семидневных проростков. Среди изученных интрогрессивных линий мягкой яровой пшеницы наибольшая устойчивость к действию хлорида натрия была характерна для проростков линий L1946/1 (6A(6U); T4BS/T4BL-1D; 3AL with terminal C-band), L1882/2 (monosomic addition 2/4/7X), L2021/4 (5D(5X)6D(6X); terminal transl. 3DL) и L2021/2 (5D(5X)6A(6X)). Проростки линий L1882/2 (monosomic addition 2/4/7X) и L2028/3 (5D(5X)) проявили устойчивость в условиях сульфатного засоления. Полученные результаты позволяют сделать вывод о положительном влиянии или отсутствии отрицательного влияния указанных изменений генома на солеустойчивость мягкой пшеницы. Выявленное негативное влияние хлоридного и сульфатного засоления на исследуемые морфометрические показатели выявлено у растений линии L1721/2 (6A(6U^{del}); T4BS/T4BL-1D), что указывает на отрицательное влияние такого изменения генома на солеустойчивость мягкой пшеницы.
Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., интрогрессивные линии мягкой пшеницы, хлоридное засоление, сульфатное засоление, морфогенез проростков



Для цитирования: Даштоян Ю. В., Калинина А. В., Коробко В. В. Влияние засоления на морфогенез проростков интрогрессивных 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

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

Article

Effect of salinity on the morphogenesis of seedlings of introgressive lines of spring bread wheat with genetic material *Aegilops columnaris*

I. V. Dashtoyan¹ ✉, A. V. Kalinina¹, V. V. Korobko²

¹Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikov St., Saratov 410010, Russia

²Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

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

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

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

Abstract. The introduction of the genetic material of wild-growing species into the genome of cultivated plants can significantly expand the diversity of breeding material. For the effective use of introgressive plants, it is necessary to study their economically valuable traits and adaptive capabilities. The objective of the work is to study the effect of two types of salinity on the morphogenesis of seedlings of introgressive lines of spring bread wheat containing the genetic material of *Aegilops columnaris* Zhuk. The objects of study are seedlings of spring bread wheat of the Dobrynya variety and seedlings of introgressive lines of spring bread wheat, created in the laboratory of genetics and cytology of the Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region on the basis of the Dobrynya variety and *Aegilops columnaris* Zhuk. Cultivation of plants was carried out on solutions of sodium chloride and sulfate; the concentrations of the solutions corresponded to an osmotic pressure of 7 atm. The effect of salinity on growth was assessed by the following indicators: root index value, root-to-shoot ratio of seedlings, length of the first leaf, and number of roots of seven-day-old seedlings. Among the studied introgressive lines of spring bread wheat, the highest resistance to the action of sodium chloride is characteristic of seedlings of lines L1946/1 (6A(6U); T4BS/T4BL-1D; 3AL with terminal C-band), L1882/2 (monosomic addition 2/4/ 7X), L2021/4 (5D(5X)6D(6X); terminal transl. 3DL) and L2021/2 (5D(5X)6A(6X)). Seedlings of lines L1882/2 (monosomic addition 2/4/7X) and L2028/3 (5D(5X)) showed resistance to sulfate salinity. Seedlings of line L2028/3 (5D(5X)) are slightly inferior to seedlings of the Dobrynya variety in the length of the first leaf under conditions of chloride salinization, and line L2021/4 is inferior in terms of root supply under conditions of sulfate salinity (5D(5X)6D(6X); terminal transl. 3DL). The results obtained allow us to conclude that the indicated changes in the genome have a positive or no negative effect on the salt tolerance of common wheat. The pronounced negative effect of chloride and sulfate salinity on the studied morphometric parameters was found in plants of the line L1721/2 (6A(6Udel); T4BS/T4BL-1D), which suggests that such a change in the genome negatively affects the salt tolerance of bread wheat.

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

For citation: Dashtoyan 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

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

Введение

Интрогрессивная селекция в современном растениеводстве позволяет получать растения, способные с большей эффективностью переносить влияние неблагоприятных факторов среды. Благодаря внесению генетического материала дикорастущих видов в геном культурных растений можно существенно расширить разнообразие селекционного материала. Чужеродные гены встраиваются в геном реципиента, как правило, большими фрагментами и, наряду с полезными признаками, могут приводить к проявлению у гибридов нежелательных свойств [1]. Дальнейшее использование в селекции растений, полученных таким методом, возможно после изучения их хозяйственно-ценных признаков и адаптационных возможностей.

Одним из факторов среды, способным негативно влиять на рост и развитие растений, является засоление почв. В земельном фонде России засоленные почвы занимают 38,4 млн га, при этом площади засоленных территорий постоянно увеличиваются, а их полное рассоление с использованием мелиоративных мер практически невозможно.

С точки зрения агрономии важным критерием солеустойчивости является урожайность растений на засоленной почве, при этом отбор солеустойчивых форм в полевых условиях осложняется из-за неравномерности распределения засоленных участков. Поэтому на практике широко применяются лабораторные методы диагностики солеустойчивости, как прямые, так и косвенные [2].



Цель настоящей работы – выявление влияния генетического материала от *Aegilops columnaris* Zhuk. на морфометрические параметры проростков интрогрессивных линий мягкой яровой пшеницы в условиях солевого стресса.

Материалы и методы

Исследования проводились в лаборатории цитологии и генетики ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока». Объектами исследования служили проростки мягкой яровой пшеницы сорта Добрыня и проростки интрогрессивных линий мягкой яровой пшеницы, созданных в лаборатории

генетики и цитологии ФАНЦ Юго-Востока на основе сорта Добрыня и *Aegilops columnaris* Zhuk. k1193. Характеристика объектов исследования представлена в табл. 1.

Цитогенетическое изучение интрогрессивных линий, состояние чужеродной генетической изменчивости, ее количество и включение в реконструированный геном мягкой пшеницы, а именно в виде дополненных или замещённых хромосом, транслокаций, было проведено в лаборатории генетических основ идентификации растений Института общей генетики им. Н. И. Вавилова (г. Москва) [3].

Таблица 1 / Table 1

Генетическая характеристика изученных интрогрессивных линий мягкой яровой пшеницы
Genetic characteristics of the studied introgressive lines of soft spring wheat

Линия / Lines	Родословная линии / Pedigree of lines
L1949	Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*3//Dobrynya 2A(2U)
L1777/4	Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*3//Dobrynya 6D(6U); T4BS/T4BL-1D; 1BL with terminal deletion
L1946/1	Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*3//Dobrynya 6A(6U); T4BS/T4BL-1D; 3AL with terminal C-band
L2308/5	Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*3//Dobrynya 6A(6U); T4BS/T4BL-1D
L1721/2	Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*3//Dobrynya 6A(6U ^{del}); T4BS/T4BL-1D
L1869/3-16	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*4//Dobrynya monosomic subst. 1A/1X
L1882/2	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)//Dobrynya/3/Dobrynya monosomic addition 2/4/7X
L1837/1	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)/Dobrynya 3B(3X); T5DS.5DL
L1881/1	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*3//Dobrynya 5D(5X)
L2028/3	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)//Dobrynya/3/Dobrynya 5D(5X)
L1808/1	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)//Dobrynya/3/Dobrynya 6D(6X)
L2021/4	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)//Dobrynya/3/Dobrynya 5D(5X) 6D(6X); terminal transl. 3DL
L2021/2	AD Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)//Dobrynya/3/Dobrynya 5D(5X)6A(6X)
L1777/1	Dobrynya/ <i>Ae.columnaris</i> (k1193)*3//Dobrynya 5D(5X)6A(6X); 1BL with terminal deletion

Для определения эффекта, оказываемого на растительный организм факторами окружающей среды, рекомендуется использовать различные тест-функции, к числу которых относят всхожесть, параметры развития корневой системы и побега [4, 5]. При проведении исследования мы посчитали целесообразным использовать комплекс морфометрических показателей, сопоставление которых позволит выявить различные аспекты роста и развития проростка.

Для исследования использовали неповрежденные, выровненные по размеру семени 2022 г. репродукции, с хорошей всхожестью ($\geq 90\%$). Проращивание зерновок осуществляли в чашках Петри, с использованием в качестве субстрата изотонических растворов хлорида и сульфата натрия (концентрации растворов

соответствовали осмотическому давлению 7 атм). Контролем служили растения, культивированные на дистиллированной воде. Опытные и контрольные проростки культивировали в темноте при температуре $+20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$. На седьмые сутки проводили количественный учет роста: определяли абсолютно сухую массу надземной части побега и корневой системы, длину главного и боковых зародышевых корней, длину первого листа, количество корней ($n = 30$). На основании полученных данных рассчитывали показатель корнеобеспеченности, как отношение абсолютно сухой массы корневой системы к абсолютно сухой массе побега. Корневой индекс определяли как среднее значение длины самых длинных корней, отнесенное к аналогичному в контроле.



Результаты исследований подвергались статистической обработке в табличном процессоре Excel пакета MS Office 2010.

Результаты и их обсуждение

При изучении влияния хлоридного и сульфатного засоления на процесс роста и развития корневой системы проростков было обнаружено, что количество корней, развивающихся у проростков ряда интрогрессивных линий в присутствии солей, отличалось от количества корней проростков, выращенных на дистиллированной воде. Учет количества корней семидневных проростков сорта Добрыня показал, что среднеарифметическое значение в контрольном варианте опыта составило 4,2 шт., при этом мода (M_o) равна 5, а коэффициент варьирования (C_v) 21%. В условиях хлоридного засоления существенного отличия данного показателя от контроля выявлено не было: среднеарифметическое значение равно 4,4 шт., $M_o = 5$, C_v на 5% ниже, чем в контроле, тогда как в условиях сульфатного наблюдалось существенное – на 1,5 шт. – увеличение среднеарифметического значения количества корней и моды ($M_o = 6$), снижение показателя варьирования признака ($C_v = 8\%$).

Среди исследованных линий наименьшее количество корней в контрольном варианте опыта было отмечено у проростков линии L2308/5 (среднее значение 3,7 шт.) и линии L1869/3-16 (среднее значение 3,8 шт.). Отметим, что проростки всех линий, содержащих замещения 5D(5X), культивированных на дистиллированной воде, имели большее по сравнению с сортом Добрыня количество корней, при этом значение моды и у проростков сорта Добрыня, и у проростков этих линий было одинаково и равно 5.

Статистический анализ данных по количеству корней проростков, культивированных в условиях хлоридного засоления, показал, что мода имела минимальное значение ($M_o = 3$) у проростков линий L1949, L1882/2 и L1881/1 (для них же было характерно наименьшее среднеарифметическое значение 3,0–3,1 шт.), а также линий L1837/1, L2028/3, L2021/4, L2308/5. Средние арифметические значения исследуемого показателя развития корневой системы проростков линий L1808/1 и L1777/1 превышали аналогичное значение проростков сорта Добрыня, при этом различия статистически не достоверны (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Влияние разнокачественного засоления на количество корней семидневного проростка интрогрессивных линий *T. aestivum* L.

Influence of different-quality salinity on the number of roots seven-day-old seedling of introgressive lines of *T. aestivum* L.

Объект / The object	Контроль / The control			Хлоридное засоление / Chloride salination			Сульфатное засоление / Sulfate salination		
	Σ , шт.	M_o	C_v , %	Σ , шт.	M_o	C_v , %	Σ , шт.	M_o	C_v , %
Добрыня / Dobrynya	4,2 ± 0,5	5	20,8	4,4 ± 0,5	5	15,4	5,7* ± 0,3	6	7,9
L1949	4,7 ± 0,4	5	13,6	3,0** ± 0	3	0	4,7 ± 0,6	5	16,0
L1777/4	4,1 ± 0,6	5	22,5	4,1 ± 0,5	4	17,9	5,1* ± 0,3	5	6,8
L1946/1	4,4 ± 0,5	5	15,4	3,9 ± 0,6	4	24,2	4,3** ± 0,3	4	10,5
L2308/5	3,7 ± 0,5	3	21,1	3,3 ± 0,4	3	20,0	5,1* ± 0,4	5	11,1
L1721/2	4,7 ± 0,4	5	13,6	4,4 ± 0,5	5	15,9	5,4 ± 0,3	5	9,1
L1869/3-16	3,8 ± 0,5	3	19,7	3,7 ± 0,4	4	18,2	5,1* ± 0,3	5	6,8
L1882/2	4,3 ± 0,7	5	22,8	3,0** ± 0	3	0	4,0** ± 0	4	0
L1837/1	5,0** ± 0	5	0	3,7* ± 0,5	3	21,1	5,0** ± 0	5	0
L1881/1	4,8 ± 0,5	5	15,6	3,1** ± 0,2	3	10,6	5,0** ± 0	5	0
L2028/3	4,3 ± 0,5	5	18,2	3,4 ± 0,5	3	19,9	5,8* ± 0,3	6	6,4
L1808/1	5,2** ± 0,3	5	7,7	4,5 ± 0,5	5	17,9	5,2 ± 0,4	5	12,0
L2021/4	5,0** ± 0	5	0	3,8* ± 0,5	3	22,9	5,2 ± 0,4	5	12,0
L2021/2	4,8 ± 0,3	5	8,3	4,4 ± 0,5	5	18,2	5,0** ± 0	5	0
L1777/1	4,8 ± 0,3	5	8,3	4,8 ± 0,3	5	8,3	5,0** ± 0	5	0

Примечание. M_o – мода, C_v – коэффициент варьирования, Σ – среднее арифметическое, * – различия между контролем и опытом достоверны при $p \leq 0,05$, ** – различия между сортом Добрыня и линией достоверны при $p \leq 0,05$.

Note. M_o – mode, C_v – coefficient of variation, Σ – arithmetic mean, * – differences between control and experiment are significant at $p \leq 0,05$, ** – differences between the Dobrynya variety and the line are significant at $p \leq 0,05$.



В условиях хлоридного засоления степень варьирования количества корней у семидневных проростков может быть охарактеризована как незначительная у линий L1949, L1882/2, L1777/1; существенная – у линий L1946/1, L1837/1, L2021/4; средняя – у проростков сорта Добрыня и остальных исследуемых линий.

Выявлено стимулирующее действие сульфатного засоления на образование корней у проростков некоторых линий: среднее арифметическое значение данного признака достоверно превышало контрольное значение у линий L1777/4, L2308/5, L1869/3-16, L2028/3. Проростки других линий в условиях сульфатного засоления статистически значимых отличий от контроля по количеству корней не имели.

Проростки интрогрессивных линий при культивировании на сульфате натрия по количеству корней уступали проросткам сорта Добрыня. Исключение составили проростки линии L2028/3, среднее арифметическое количество корней у этих проростков было 5,8 шт., т.е. незначительно превышало показатель сорта Добрыня (5,7 шт.), при этом значение моды у проростков сорта Добрыня и линии L2028/3 было максимальным среди всех исследуемых объектов в условиях сульфатного засоления ($M_0 = 6$).

Для большинства исследованных линий и сорта Добрыня характерно незначительное варьирование в выборке по количеству корней семидневных проростков, тогда как у проростков линий L1949, L1946/1, L2308/5, L1808/1 и L2021/4 варьирование анализируемого показателя оценивается как среднее.

Таким образом, несмотря на статистически незначимые различия значений количества корней у проростков большинства изученных нами линий по сравнению с проростками сорта Добрыня в контрольном варианте опыта, при действии различных типов засоления проявляется генетическая специфика, выражающаяся в изменении средних значений и в различной степени варьирования анализируемого показателя.

Были определены показатель корнеобеспеченности и корневой индекс контрольных растений и выращенных в условиях хлоридного и сульфатного засоления. Показатель корнеобеспеченности семидневных проростков сорта Добрыня в контрольном варианте опыта составил 0,8 отн.ед., тогда как значение данного показателя проростков, изученных интрогрессивных линий мягкой пшеницы в контроле, варьировало от 0,5 отн.ед. (L1882/2) до 0,9 отн.ед. (L1869/3-16).

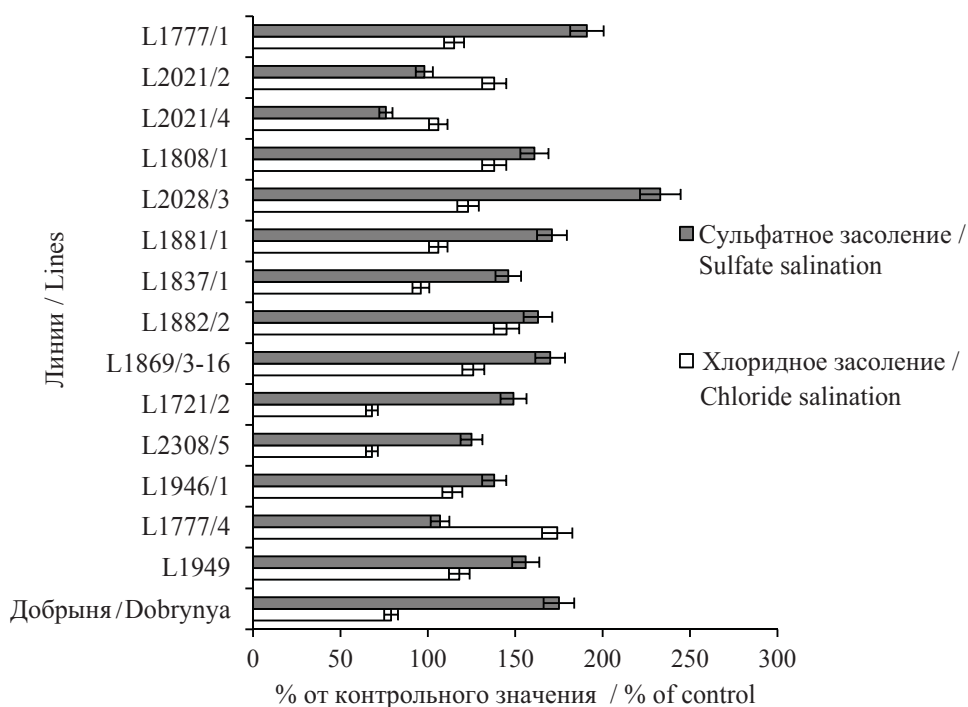


Рис. 1. Показатель корнеобеспеченности проростков сорта Добрыня и интрогрессивных линий *T. aestivum* L.

Fig. 1. The root-to-shoot ratio of seedlings of the variety Dobrynya and introgressive lines *T. aestivum* L.



Исследование влияния качества засоления на корнеобеспеченность проростков показало, что у всех объектов исследования, за исключением линий L1777/4, L2021/4 и L2021/2, показатель корнеобеспеченности, выраженный в % от контрольного значения, в условиях сульфатного засоления оказался выше, чем в условиях хлоридного (рис. 1).

В присутствии сульфата натрия относительное массовое соотношение корней и побега проростков линий L1777/1 и L2028/3, содержащих замещения 5D(5X), существенно (в 1,9–2,3 раза) превышало анализируемый показатель у проростков сорта Добрыня. Корнеобеспеченность проростков других интрогрессивных линий мягкой пшеницы уступала анализируемому показателю проростков родительской формы; при этом у растений линии L1881/1, содержащих замещение 5D(5X), значение корнеобеспеченности было незначительно ниже, чем у сорта Добрыня – на 4%, а у растений линии L1808/1 с замещением 6D(6X) – на 14%. У проростков линий L2021/4 и L2021/2, имеющих двойные замещения 5D(5X)6D(6X) и 5D(5X)6A(6X), выявлено существенное – на 99 и 77% соответственно – снижение анализируемого показателя относительно сорта-реципиента. Связано ли высокое значение показателя корнеобеспеченности в условиях сульфатного засоления у проростков линии L1777/1 с делецией 1BL не известно.

В условиях хлоридного засоления показатель корнеобеспеченности проростков линий L2308/5, L1721/2 был на 11% ниже, чем у проростков сорта-реципиента, у проростков линии L1837/1 на 17% его превышал. Проростки остальных изученных интрогрессивных линий имели более высокие показатели корнеобеспеченности, чем проростки сорта Добрыня.

Таким образом, среди исследуемых интрогрессивных линий мягкой пшеницы выявлены линии, для которых, как и для проростков сорта Добрыня, характерно значительное снижение показателя корнеобеспеченности в условиях хлоридного засоления – это линии L2308/5 (6A(6U); T4BS/T4BL-1D) и L1721/2 (6A(6U^{del}); T4BS/T4BL-1D). В условиях сульфатного засоления наблюдается существенное увеличение показателя корнеобеспеченности проростков относительно контроля у всех исследуемых линий, за исключением L2021/2 (5D(5X)6A(6X)) и L2021/4 (5D(5X)6D(6X); terminal transl. 3DL). Следует отметить, что пока-

затель корнеобеспеченности, представляющий собой относительное массовое соотношение корней и побега, используется для оценки стратегии адаптации растений к окружающей среде [4], демонстрирует способность растений регулировать соотношение корень/побег в стрессовых условиях за счет перераспределения пластических веществ между надземными и подземными органами.

Определено влияние разнокачественного засоления на корневой индекс проростков линий. У всех проростков опытных растений наибольшей длины достигал главный корень, его длина у контрольных растений интрогрессивных линий мягкой пшеницы варьирует от 82 (L1946/1) до 182 мм (L1837/1), тогда как у сорта Добрыня длина главного зародышевого корня составила 143 мм.

На основании полученных данных установлено, что оба типа засоления оказывают негативное влияние на показатель корневого индекса, при этом данный эффект в большей степени проявляется в условиях сульфатного засоления (табл. 3). Так, в условиях хлоридного засоления корневой индекс проростков сорта Добрыня составил 0,36 отн. ед., у проростков интрогрессивных линий – от 0,17 до 0,51 отн. ед.; тогда как при культивировании на сульфате натрия значение анализируемого показателя у растений сорта Добрыня составило 0,07 отн. ед., а у растений интрогрессивных линий – 0,02–0,09 отн. ед. В условиях хлоридного засоления существенных отличий значения корневого индекса проростков линий L2028/3, L1882/2, L2021/4, а также линий L2308/5, L2021/2 и L1777/1 от значения корневого индекса проростков сорта Добрыня обнаружено не было. Повышение корневого индекса по сравнению с аналогичным показателем роста корня родительского сорта было характерно для проростков линий L1949 (2A(2U)), и L1946/1 (6A(6U); T4BS/T4BL-1D; 3AL with terminal C-band).

В условиях сульфатного засоления у растений двух линий – L1777/4 (6D(6U); T4BS/T4BL-1D; 1BL with terminal deletion) и L1946/1 (6A(6U); T4BS/T4BL-1D; 3AL with terminal C-band) наблюдается увеличение корневого индекса по сравнению со значением данного показателя у проростков сорта Добрыня. Корневой индекс проростков линий L1949, L1882/2, L2028/3, L2021/4 не имеет статистически значимых отличий от его значения для сорта Добрыня. У остальных изученных линий этот критерий меньше, чем у проростков сорта Добрыня.



Таблица 3 / Table 3

**Значение корневого индекса проростков сорта Добрыня
и интрогрессивных линий *T.aestivum* L.****Root index value of seedlings of the variety Dobrynya and introgressive lines *T.aestivum* L.**

Объект / The object	Хлоридное засоление, отн. ед. / Chloride salination, a.u.	Сульфатное засоление, отн. ед. / Sulfate salination, a.u.
Добрыня / Dobrynya	0,36	0,07
L1949	0,44	0,06*
L1777/4	0,29	0,09
L1946/1	0,51	0,09
L2308/5	0,34*	0,04
L1721/2	0,24	0,05
L1869/3-16	0,33	0,02
L1882/2	0,35*	0,08*
L1837/1	0,22	0,04
L1881/1	0,17	0,05
L2028/3	0,36*	0,07*
L1808/1	0,31	0,05
L2021/4	0,35	0,06*
L2021/2	0,34*	0,05
L1777/1	0,34*	0,05
HCP _{0,95}	0,02	0,01

Примечание. * – различия между сортом Добрыня и линией не достоверны при $p \leq 0,05$.

Note. * – differences between the Dobrynya variety and the line are not significant at $p \leq 0,05$.

Таким образом, корневой индекс проростков линии L1946/1 (6A(6U); T4BS/T4BL-1D; 3AL with terminal C-band) в условиях обоих типов засоления превышает значение корневого индекса сорта Добрыня; проростков линии L1949 (2A(2U)) в условиях хлоридного засоления – превышает показатель сорта Добрыня, а в условиях сульфатного уступает ему лишь на 0,01 отн.ед. Следует отметить, что растения линии L1949 содержат замещение 2A(2U). По литературным данным, 2A хромосома несет QTL солевого стресса [6]. Положительное влияние на солеустойчивость было отмечено Р. С. Юдиной с соавторами для линии мягкой пшеницы, несущей интрогрессию от *T. timopheevii* Zhuk. в хромосоме 2A [7]. Также есть данные, свидетельствующие о наличии гена *Nax1*, регулирующего транспорт натрия в клетке (НКТ7) [8]. Полученные нами результаты позволяют предположить, что отсутствие замещённого генетического материала мягкой пшеницы, связанного с солеустойчивостью, у интрогрессивных линий, было компенсировано генетическим материалом *Ae. columnaris*. Для

ряда линий – L1721/2, L1837/1, L1881/1, L1808/1, L1869/3-16, L1777/1 – характерно снижение анализируемого показателя роста корневой системы относительно сорта Добрыня, а корневой индекс проростков линий L1882/2, L2028/3, L2021/4 соответствует или не имеет существенных отличий от аналогичного показателя сорта Добрыня.

На основании полученных данных установлено, что для этих линий характерно снижение корневого индекса в условиях хлоридного засоления, при этом показатель корнеобеспеченности превышал аналогичные значения, установленные для родительской формы. Этот факт позволяет сделать вывод, что хлорид натрия, оказывая ингибирующее действие на линейный рост растений, не приводит к существенным отклонениям относительного массового соотношения корней и побега проростков.

У проростков линий L1949, L2028/3 и L1882/2 в условиях хлоридного засоления ингибирование роста первого листа было значительнее, чем у сорта Добрыня (рис. 2). По двум другим анализируемым показателям растения

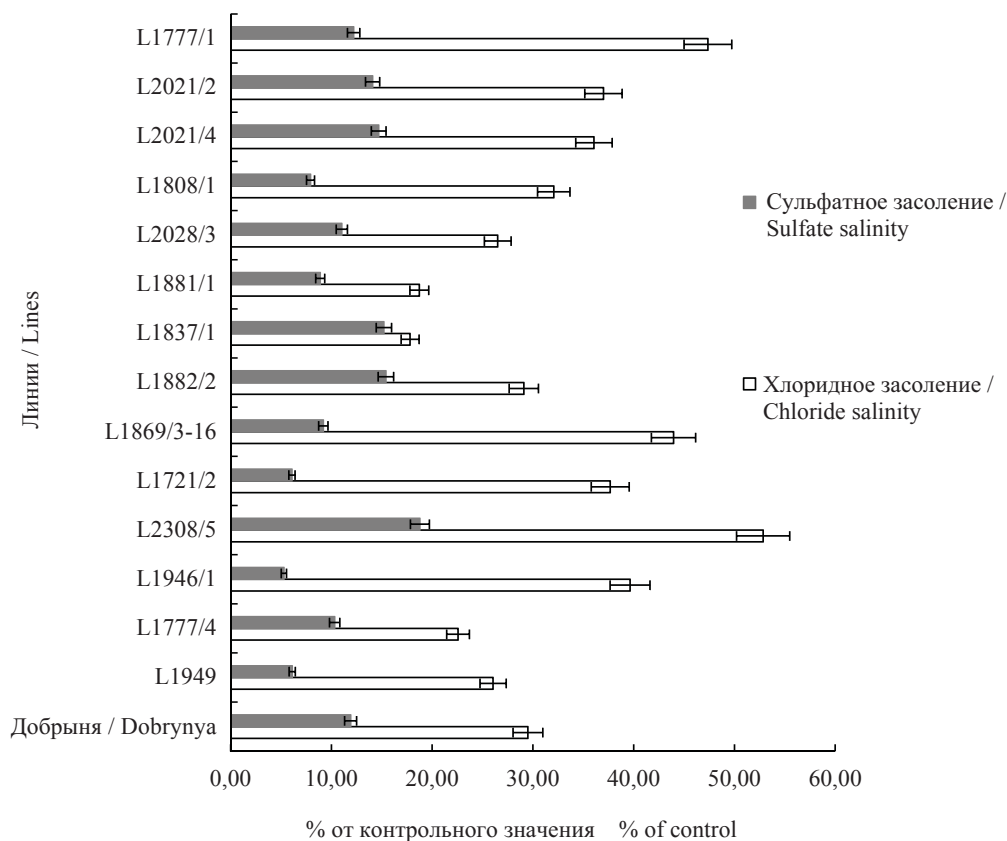


Рис. 2. Длина первого листа проростков сорта Добрыня и интрогрессивных линий *T. aestivum* L.
Fig. 2. The first leaf length of seedlings of the variety Dobrynya and introgressive lines *T. aestivum* L.

этих линий имели результаты, превосходящие родительскую форму. Следовательно, изменения в геномах этих интрогрессивных линий не приводят к снижению уровня толерантности к хлоридному засолению, характерного родительскому сорту. Наименьшее влияние хлоридного засоления на рост первого листа было отмечено у растений линий L2308/5 (53% от контроля) и L1777/1 (47% от контроля); и, хотя по значению корневого индекса представители этих линий существенных отклонений от сорта-реципиента не обнаружили, по показателю корнеобеспеченности линия L2308/5 существенно ему уступает. Следует отметить, что аналогичная реакция на засоление, а именно снижение показателя корнеобеспеченности, уменьшение корневого индекса и меньшая степень ингибирования роста первого листа по сравнению с родительской формой, была получена при изучении линии L1721/2, содержащей, как и линия L2308/5, транслокацию T4BS/T4BL-1D. При этом у линии L1946/1, содержащей такую же транслокацию, но имеющей также изменения в 3A хромосоме, значения всех рассмотренных показателей в условиях хлоридного засоления были выше, чем у сорта Добрыня.

Длина первого листа проростков сорта Добрыня при воздействии раствора сульфата натрия составила 12% от контрольного значения. В большей степени негативный эффект данного типа засоления на рост первого листа обнаружен у семидневных проростков линий L1949, L1946/1, L1721/2, L1869/3-16, L1881/1 и L1808/1, длина первого листа проростков которых составила 5 – 9% от контрольных значений. Отметим, что растения этих линий в условиях сульфатного засоления имели также более низкие показатели корнеобеспеченности и меньший корневой индекс по сравнению с сортом Добрыня. Исключения: линия L1949, у проростков которой значение корневого индекса соответствовало значению сорта-реципиента и линия L1946/1, корневой индекс проростков которой превышал значение аналогичного показателя родительской формы.

Менее выраженное ингибирующее влияние сульфатного засоления на рост первых листьев было отмечено у проростков линий L1882/2, L1837/1, L2021/4 и L2021/2, длина первого листа которых составила 14–15% от контрольных значений. Минимальное ингибирующее воз-



действие оба типа засоления оказали на рост первого листа проростков линии L2308/5 (19% от контроля). Отметим, что по корнеобеспеченности и корневому индексу растения этих линий уступали родительскому сорту или имели значение корневого индекса близкое к нему (L1882/2 и L2021/4).

Проростки линии L2028/3, содержащей замещение 5D(5X), превосходили Добрыню по значениям корневого индекса и корнеобеспеченности, а также и по устойчивости к негативному влиянию сульфата натрия на рост первого листа имели близкие результаты к родительскому сорту.

В условиях сульфатного и хлоридного засоления наименьшее негативное воздействие на рост первого листа характерно проросткам линий L2308/5, L1882/2, L2021/4, L2021/2 и L1777/1, тогда как наибольшее негативное влияние солей на рост первого листа выявлено у проростков линии L1881/1.

Заключение

Таким образом, анализируя все полученные в ходе эксперимента данные, можно заключить, что наибольший негативный эффект засоления был отмечен у растений линии L1721/2 (6A(6U^{del}); T4BS/T4BL-1D). Возможно, изменения генома такого характера снижает степень солеустойчивости мягкой пшеницы.

Среди изученных интрогрессивных линий мягкой пшеницы наибольшую устойчивость к действию хлорида натрия проявили растения линий L1946/1 (6A(6U); T4BS/T4BL-1D; 3AL with terminal C-band), L1882/2 (monosomic addition 2/4/7X), L2021/4 (5D(5X)6D(6X); terminal transl. 3DL) и L2021/2 (5D(5X)6A(6X)).

Устойчивость в условиях сульфатного засоления показали растения линий L1882/2 (monosomic addition 2/4/7X) и L2028/3 (5D(5X)). При этом линия L2028/3 (5D(5X)) незначительно уступала сорту Добрыня по росту первого листа в условиях хлоридного засоления, а линия L2021/4 – по показателю корнеобеспеченности в условиях сульфатного (5D(5X)6D(6X); terminal transl. 3DL). Такие результаты позволяют сделать вывод о положительном влиянии или отсутствии отрицательного влияния указанных изменений генома на солеустойчивость мягкой пшеницы. Следовательно, линии L1946/1, L1882/2, L2021/4, L2021/2, L2028/3 являются перспективными для дальнейшей работы и выведения новых сортов мягкой яровой пшеницы, обладающих высокой солеустойчивостью.

Список литературы

1. Дружин А. Е., Сибикеев С. Н., Гульмяева Е. И., Баранова О. А., Андреева Л. В., Голубева Т. Д., Калинин Т. В. Изучение хозяйственно ценных и адаптивных признаков у линий яровой мягкой пшеницы, созданных с участием синтетических форм пшеницы // Аграрный вестник Юго-Востока. 2019. № 3. С. 7–10.
2. Коробко В. В., Волков Д. П. Устойчивость некоторых сортов зернового сорго к разнокачественному засолению // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13, вып. 2. С. 107–111.
3. Badaeva E. D., Ruban A. S., Shishkina A. A., Sibikееv S. N., Druzhin A. E., Surzhikov S. A., Dragovich A. Yu. Genetic classification of *Aegilops columnaris* Zhuk. (2n = 4x = 28, UcUcXcXc) chromosomes based on FISH analysis and substitution patterns in common wheat × *Ae. columnaris* introgressive lines // Genome. 2018. Vol. 61, № 2. P. 131–143. <https://doi.org/10.1139/gen-2017-0186>
4. 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>
5. Шапошников А. И., Моргунов А. И., Акин Б., Макарова Н. М., Белимов А. А., Тихонович И. А. Сравнительные характеристики корневых систем и корневой экссудации у синтетического, примитивного и современного сортов пшеницы // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51, № 1. С. 68–78. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2016.1.68rus>
6. Pal N., Saini D. K., Kumar S. Meta-QTLs, ortho-MQTLs and candidate genes for the traits contributing to salinity stress tolerance in common wheat (*Triticum aestivum* L.) // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2021. Vol. 27, № 12. P. 2767–2786. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01112-0>
7. Юдина Р. С., Леонова И. Н., Салина Е. А., Хлесткина Е. К. Изменение солеустойчивости мягкой пшеницы в результате интрогрессии генетического материала *Aegilops speltoides* и *Triticum timopheevii* // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015. Т. 19, № 2. С. 171–175. <https://doi.org/10.18699/VJ15.021>
8. Huang S., Spielmeyer W., Lagudah E. S., James R. A., Platten J. D., Dennis E. S., Munns R. A sodium transporter (NKT7) is a candidate for Nax1, a gene for salt tolerance in durum wheat // Plant Physiology. 2006. Vol. 142, № 4. P. 1718–1727. <https://doi.org/10.1104/pp.106.088864>



References

1. Druzhin A. E., Sibikeev S. N., Gulyaeva E. I., Baranova O. A., Andreeva L. B., Golubeva T. D., Kalintseva T. V. Study of agronomic valuable and adaptive traits in spring bread wheat lines produced with the participation of synthetic forms of wheat. *Agrarian Reporter of South-East*, 2019, no. 3, pp. 7–10 (in Russian).
2. Korobko V. V., Volkov D. P. Resistance of some varieties of grain sorghum to salinity of different quality. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2013, vol. 13, iss. 2, pp. 107–111 (in Russian).
3. Badaeva E. D., Ruban A. S., Shishkina A. A., Sibikeev S. N., Druzhin A. E., Surzhikov S. A., Dragovich A. Yu. Genetic classification of *Aegilops columnaris* Zhuk. ($2n=4x=28$, UcUcXcXc) chromosomes based on FISH analysis and substitution patterns in common wheat \times *Ae. columnaris* introgressive lines. *Genome*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 131–143. <https://doi.org/10.1139/gen.2017.0186>
4. 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>
5. Shaposhnikov A. I., Morgunov A. I., Akin B., Makarova N. M., Belimov A. A., Tikhonovich I. A. Comparative characteristics of root systems and root exudation in synthetic, primitive and modern wheat varieties. *Agricultural Biology*, 2016, vol. 51, no. 1, pp. 68–78 (in Russian). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.1.68rus>
6. Pal N., Saini D.K., Kumar S. Meta-QTLs, ortho-MQTLs and candidate genes for the traits contributing to salinity stress tolerance in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2021, vol. 27, no. 12, pp. 2767–2786. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01112-0>
7. 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*. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 171–175 (in Russian). <https://doi.org/10.18699/VJ15.021>
8. Huang S., Spielmeier W., Lagudah E. S., James R. A., Platten J. D., Dennis E. S., Munns R. A sodium transporter (HKT7) is a candidate for Nax1, a gene for salt tolerance in durum wheat. *Plant Physiology*, 2006, vol. 142, no. 4, pp. 1718–1727. <https://doi.org/1104/pp.106.088864>

Поступила в редакцию 18.02.2023; одобрена после рецензирования 04.05.2023; принята к публикации 13.05.2023
The article was submitted 18.02.2023; approved after reviewing 04.05.2023; accepted for publication 13.05.2023