

Изучение влияния NaCl на межвидовые гибриды *Populus L.* в условиях *in vitro*

© 2025. Т. В. Терещенко, О. О. Жолобова, И. В. Могилевская ✉

ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», г. Волгоград, Российская Федерация

В условиях аридизации климата и опустынивания территорий, приводящих к вторичному засолению почв, все больше земель подвергается преждевременной деградации и дальнейшему выводу их из сельскохозяйственного использования. Моделирование стресс-факторов в культуре *in vitro* для отбора толерантных линий солеустойчивых генотипов древесных видов способствует ускорению селекционного процесса. В исследовании изучено влияние NaCl на морфогенез растений-регенерантов межвидовых гибридов F1 тополя (*Populus L.*) и проведен отбор потенциально солеустойчивых генотипов в условиях *in vitro*. После проведения контролируемого скрещивания отобранных родительских линий с хозяйственно полезными признаками (*Populus deltoides* × *P. alba*; *P. nigra f. pyramidalis* × *P. alba*; *P. deltoides* × *P. bolleana f. pyramidalis*) методом изолированных зародышей получены и размножены асептические экспланты межвидовых гибридов в культуре *in vitro*. На селективных средах с NaCl в концентрациях 0,2; 0,5; 1,0 % протестировано 16 генотипов по 10 клонов в трех повторностях. Определены доля выживших и регенерирующих эксплантов, частота ризогенеза и процент хлороза среди исследуемых образцов, количество и длина побегов, количество узлов, коэффициент размножения. Ингибирующее действие солевого стресса проявлялось в торможении морфогенеза – отсутствие процессов ризогенеза, хлороза, частичная деформация и некротизация листовых пластин. Доза 0,5 % NaCl была определена сублетальной, 1 % – летальной. Среди 16 исследуемых генотипов 4 имели высокий процент выживших эксплантов (96,2–96,7 %), два из которых сохраняли высокую регенерацию (82,6–96,6 %) на сублетальной концентрации селективного агента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что тестирование в условиях *in vitro* на устойчивость к NaCl является перспективным инструментом для ускорения селекционного процесса и отбора потенциально толерантных к абиотическому стресс-фактору генотипов для дальнейших полевых испытаний.

Ключевые слова: солеустойчивость, селекция, культура тканей, тополь, сублетальная концентрация, регенеранты

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (тема № FNFE-2025-0010, рег. № 125021402244-3).

Авторы благодарят сотрудников лаборатории селекции, семеноводства и питомниководства ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» за исходный селекционный материал.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Терещенко Т. В., Жолобова О. О., Могилевская И. В. Изучение влияния NaCl на межвидовые гибриды *Populus L.* в условиях *in vitro*. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(2):295–305.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.295-305>

Поступила: 17.01.2025

Принята к публикации: 20.03.2025

Опубликована онлайн: 29.04.2025

In vitro study of the effect of NaCl on interspecific *Populus L.* hybrids

© 2025. Tatyana V. Tereshchenko, Olga O. Zholobova, Irina V. Mogilevskaya ✉

Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russian Federation

In conditions of climate aridisation and desertification of territories leading to secondary soil salinisation, more and more lands are subjected to premature degradation and their further withdrawal from agricultural use. *In vitro* modelling of stress factors for selection of tolerant lines of salt-tolerant genotypes of tree species helps to accelerate the breeding process. In the study, the effect of NaCl on morphogenesis of regenerant plants of poplar F1 interspecific hybrids (*Populus L.*) was investigated, and *in vitro* selection of potentially co-tolerant genotypes was carried out. After controlled crossing of selected parental lines with economically useful traits (*Populus deltoides* × *P. alba*; *P. nigra f. pyramidalis* × *P. alba*; *P. deltoides* × *P. bolleana f. pyramidalis*) by the method of isolated embryos, aseptic explants of interspecific hybrids were obtained and micropropagated. Sixteen genotypes of 10 clones each were tested on selective media with NaCl at concentrations of 0.2; 0.5; 1.0 % in three replicates. The ratio of surviving and regenerating explants, the frequency of rhizogenesis and the percentage of chlorosis among the tested accessions, as well as shoot length and number, multiplication factor and number of nodes were determined. The inhibitory effect of salt stress was manifested in the inhibition of morphogenesis, including the absence of rhizogenesis processes, chlorosis, partial deformation and necrosis of leaf plates. A dose of 0.5 % NaCl was determined to be sublethal and 1 % was lethal. Among the sixteen genotypes tested, 4 genotypes had high % of surviving explants (96.2–96.7 %), two of which maintained high % regeneration (82.6–96.6 %) at sublethal concentration of selective agent. These results suggest that *in vitro*

testing for NaCl tolerance is a promising tool for accelerating the breeding process and selecting potentially tolerant genotypes to the abiotic stress factor for further field trials.

Keywords: salt resistance, breeding, tissue culture, poplar, sublethal concentration, regenerants

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences (theme No. FNFE-2025-0010, no. 125021402244-3).

The authors thank the staff of the Laboratory of Breeding, Seed Production and Nursery of the Federal Scientific Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation) for the initial breeding material.

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

Conflict of interest: the authors declared that there was no conflict of interest.

For citation: Tereshchenko T. V., Zholobova O. O., Mogilevskaya I. V. *In vitro* study of the effect of NaCl on interspecific *Populus* L. hybrids. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(2):295–305. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.295-305>

Received: 17.01.2025

Accepted for publication: 20.03.2025

Published online: 29.04.2025

В условиях глобального изменения климата абиотические стресс-факторы засуха и засоление являются наиболее распространенными, оказывающими негативное влияние на развитие и продуктивность лесных древесных культур [1, 2]. В настоящее время в мире более 20 % территорий сельскохозяйственного назначения считаются засоленными и щелочными [3, 4]. Воздействие солевого стресса приводит к осмотическому стрессу растений, негативно влияя на их физиологические и биохимические процессы, нарушая поглощение жизненно необходимых макро- и микроэлементов (азот, фосфор, калий, кальций и др.), что приводит к изменению роста и развития растений [3, 5]. Засоление почвы является одной из причин снижения урожайности и значительных ежегодных экономических потерь [6]. Поэтому одной из актуальных задач современной селекции остается поиск и создание форм и сортов экономически важных растений, устойчивых к абиотическим стресс-факторам окружающей среды.

Согласно классификации, род *Populus* L. (сем. *Salicaceae* Mirb.) разделен на 6 секций и насчитывает 29 видов быстрорастущих листопадных древесных растений. Ареал распространения – разные климатические зоны северного полушария и тропические районы Африки [7]. Представители *Populus* являются экономически важными и хозяйственно ценными древесными культурами. Эти растения служат исходным материалом в производстве древесины, бумаги и волокна, используются в медицинских целях, благодаря высокому содержанию фенольных соединений. Глубокая корневая система позволяет использовать тополя для противоэрозийных мероприятий и в качестве мелиоранта при создании защитных лесополос, эти виды способствуют улучшению микро-

климата [7]. Селекция представителей рода *Populus*, а также разработка и оптимизация эффективных протоколов оценки устойчивости растений к негативным факторам среды (засуха, засоление) актуальны сегодня и интересны для исследований.

Экспресс-оценка устойчивости растений к различным абиотическим стресс-факторам с помощью биотехнологических методов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными, и сегодня все чаще применяется в процессе селекции [8, 9, 10]. Использование культуры *in vitro* дает возможность в 2-3 раза ускорить создание новых форм и сортов хозяйственно ценных растений с экономией материальных затрат и занимаемых площадей, а также сохранить и воспроизводить посадочный материал [11, 12, 13].

Среди исследований по устойчивости к стресс-факторам часто встречаются результаты по видам и сортам злаковых и овощных культур. Но в последние годы все больше внимания ученые стали уделять селекции некоторых древесных видов в культуре *in vitro*, в том числе видов и сортов *Populus* [14, 15]. В работах А. А. Эрст с соавторами было изучено влияние NaCl в диапазоне концентраций от 0,29 до 1,4 % на регенеранты и каллусные культуры межвидового гибрида (*P. alba* × *P. Bolleana*) × *P. tremula*. Устойчивость зависела как от исследуемой культуры, каллусные ткани которой были более восприимчивы к стресс-фактору, чем регенеранты, так и от генотипических различий [8, 9]. Культура изолированных органов и тканей *in vitro* все чаще применяется как тестовая система для оценки воздействия негативных абиотических стрессов.

Цель исследования – изучить влияние солевого стресса, вызванного хлоридом натрия

(NaCl), на морфогенез микропобегов гибридов F_1 тополя (*Populus* L.) в условиях *in vitro* и отобрать потенциально устойчивые генотипы к изучаемому стресс-фактору.

Научная новизна – впервые проведены исследования по изучению влияния NaCl в культуре *in vitro* на полученном исходном селекционном материале межвидовых гибридов *Populus*, выделены устойчивые к моделируемым условиям засоления генотипы.

Материалы и методы. В качестве объектов служили межвидовые гибриды *Populus* F_1 ,

полученные в лаборатории селекции и семеноводства ФНЦ агроэкологии РАН методом опыления на срезанных ветвях [8]. В результате трех комбинаций контролируемого скрещивания отобранных родительских пар [16] (*P. deltoides* × *P. alba* (F₁-3), *P. nigra* f. *pyramidalis* × *P. alba* (F₁-5), *P. deltoides* × *P. bolleana* f. *pyramidalis* (F₁-7)) были получены незрелые семена *Populus* F_1 . Далее методом изолирования незрелых зародышей [10] получили и размножили стерильную культуру генотипов *Populus* F_1 в условиях *in vitro* (рис. 1).



Рис. 1. Введение в культуру *in vitro* межвидовых гибридов *Populus* F_1 : А – незрелые коробочки, полученные после проведения контролируемого скрещивания; Б – изолированный зародыш; В – регенеранты тополей на 30-е сутки /

Fig. 1. Introduction of interspecific hybrids *Populus* F_1 into *in vitro* culture: А – immature capsules obtained after controlled crossing; В – isolated embryo; С – poplar regenerants on the 30th

Для сохранения исходного селекционного материала всем регенерантам, полученным из зародышей, был присвоен номер генотипа (g1, g2...), после микроклонального размножения отдельных генотипов отобрали 16 (8 генотипов F_1 -3, 7 генотипов F_1 -5 и 1 генотип F_1 -7, единственный полученный регенерант из зародыша в этой комбинации скрещивания) с высоким регенерационным потенциалом для тестирования на экспериментальных средах. В качестве селективного агента в состав питательной среды по прописи Мурасиге и Скуга (MS) [17] добавляли хлорид натрия (NaCl) в концентрациях 0,2; 0,5 и 1,0 %. Далее в пробирки с 15–20 мл селективной питательной среды помещали микропобеги *Populus* F_1 размером 1,8–2,5 см (по 10 клонов каждого генотипа в 3-кратной повторности). В качестве контроля использовали питательную среду MS без добавления NaCl.

Для определения летальной и сублетальной концентрации, а также отбора генотипов *Populus* F_1 , устойчивых к моделируемым условиям солевого стресса, после 8 недель культивирования отмечали следующие параметры: процент выживших образцов; процент регенерирующих образцов

с хлорозом, частоту спонтанного ризогенеза; длину побега; число узлов; коэффициент размножения. Культивирование осуществляли на фитостеллажах STELLAR FITO Line («АВТех», Россия) при 16-часовом фотопериоде, освещенности 70 мкмоль/м²с⁻¹ и температуре 23±2 °С.

Обработку полученных экспериментальных данных осуществляли методом однофакторного дисперсионного анализа с использованием НСР-теста Фишера / Fisher (LSD-test ANOVA OneWay).

Результаты и их обсуждение. При исследовании 16 генотипов *Populus* F_1 действие солевого стресса (NaCl 0,2; 0,5; 1,0 %) сказывалось в ингибировании процессов морфогенеза, проявлении хлороза и некротизации листовых пластинок. На гистограммах (рис. 2, 3) представлены средние значения анализируемых параметров у генотипов *Populus* F_1 , культивируемых на средах с селективным агентом в разных концентрациях.

У всех исследуемых генотипов в контроле были отмечены высокие показатели процессов морфогенеза, процент укорененных микропобегов на безгормональной среде без дополнительного введения ауксинов составил 70,1 %.

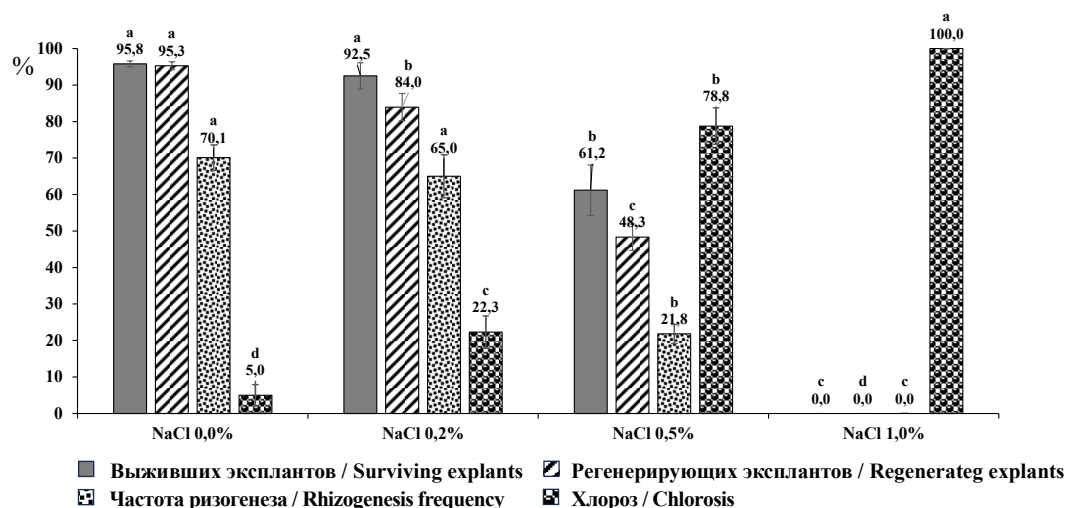


Рис. 2. Влияние хлоридного засоления на выживаемость, регенерацию и частоту ризогенеза эксплантов *Populus* F₁. Разные буквы в столбцах одного параметра показывают статистически значимые различия согласно НСР-тесту Фишера при $p < 0,05$ /

Fig. 2. Effect of chloride salinity on survival, regeneration and rhizogenesis rate of *Populus* F₁ explants. Different letters in the columns of one parameter indicate statistically significant differences according to the Fisher LSD-test at $p < 0.05$

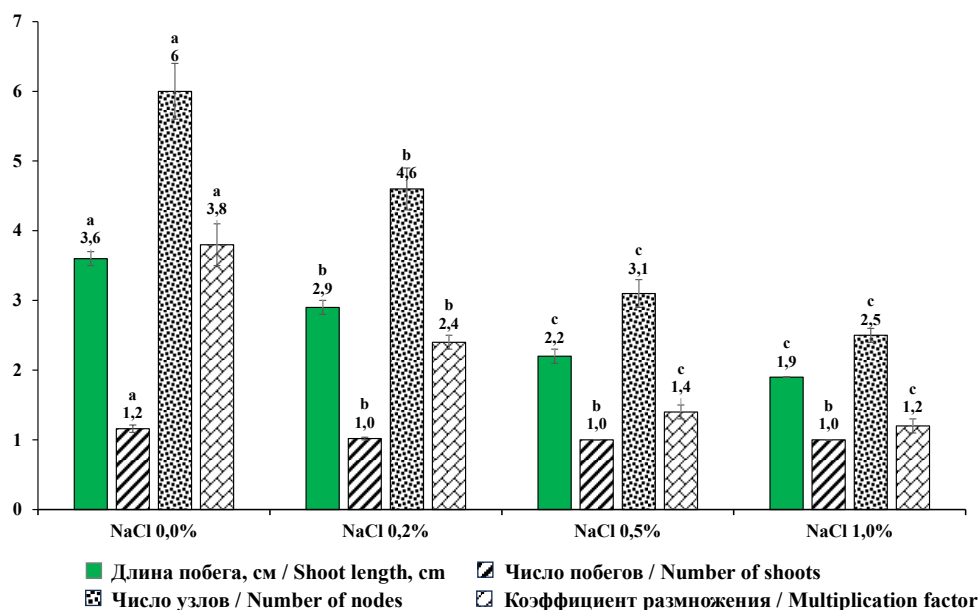


Рис. 3. Влияние хлоридного засоления на морфометрические показатели генотипов *Populus* F₁. Разные буквы в столбцах одного параметра показывают статистически значимые различия согласно НСР-тесту Фишера при $p < 0,05$ /

Fig. 3. Effect of chloride salinity on morphometric traits of *Populus* F₁ genotypes. Different letters in the columns of one parameter indicate statistically significant differences according to the Fisher LSD-test, at $p < 0.05$

Хлороз выявили у 5 % образцов в листьях основания побега, вызванный скорее перекрытием листовых пластин и отсутствием света, а не ограничением питательных элементов, вновь образованные верхушечные листья имели нормальную морфологию.

Добавление в селективную среду NaCl в концентрации 0,2 % постепенно снижало все показатели, процент выживших эксплантов находился на уровне контрольной группы,

в отличие от процессов регенерации, которые сократились на 11,3 % и проявились в снижении длины побега и количества узлов в 1,2 и 1,3 раза, в уменьшении количества укорененных микропобегов. Реакция на стресс-фактор проявилась бледно-зеленой, желтоватой окраской верхушечных листьев, у неукорененных эксплантов процент хлороза вырос в 4 раза (22,3 %) (рис. 2, 3, 4).

Внесение 1,0 % NaCl оказалось губительным для всех исследуемых генотипов. Процессы морфогенеза отсутствовали, морфометрические показатели оставались на уровне первичного экспланта, развитие хлороза у 100 % образцов привело к полной гибели эксплантов (рис. 4). Несмотря на отсутствие статистически значимых

различий по морфометрическим показателям образцов при культивировании на средах с 0,5 и 1,0 % NaCl (рис. 3), процент выживших и регенерирующих эксплантов, а также наличие процессов ризогенеза (21,8 %) на среде с 0,5 % NaCl оставались сравнительно высокие – 61,2 и 48,3 % соответственно (рис. 2).

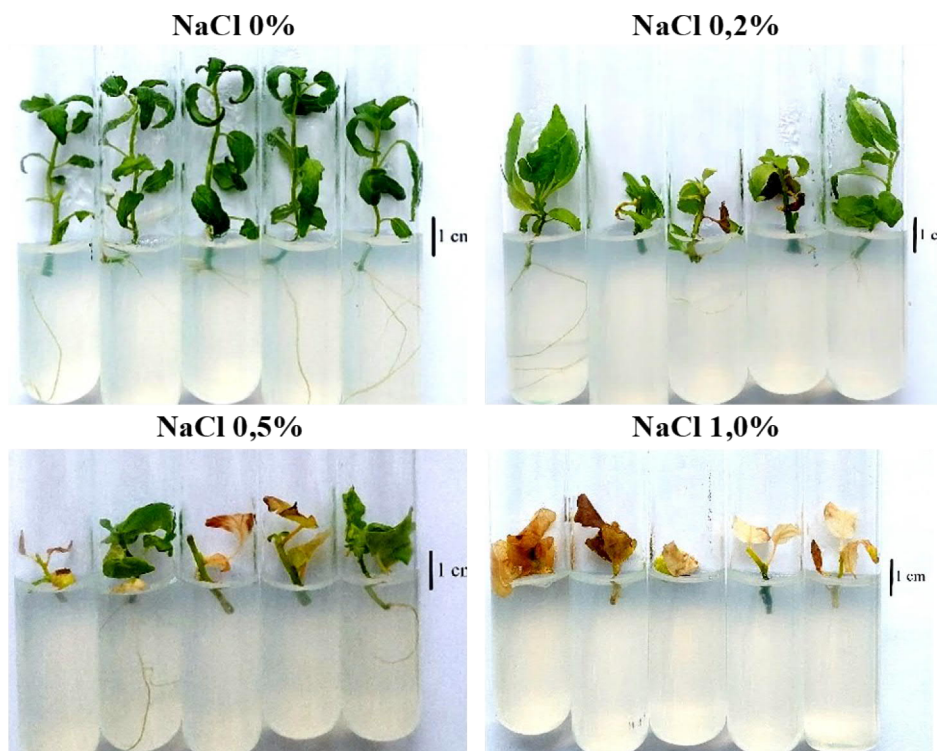


Рис. 4. Образцы *Populus* F₁ после 8 недель культивирования *in vitro* на экспериментальных питательных средах с разным содержанием NaCl (Масштаб: 1 см) /

Fig. 4. *Populus* F₁ samples after grown during 8 weeks on experimental nutrient media with different NaCl contents (The scale corresponds to 1 cm)

Таким образом, доза NaCl в концентрации 1,0 % оказалась летальной, а 0,5 % NaCl была определена как сублетальная и эффективная для дальнейшего отбора солеустойчивых генотипов *Populus*.

На рисунке 5 представлено сравнение средних значений процентов выживших, регенерирующих и укорененных микропобегов на сублетальной концентрации NaCl между генотипами в каждой комбинации скрещивания: средние значения между 8 генотипами F₁-3 (*P. deltoides* × *P. alba*), 7 генотипами F₁-5 (*P. nigra* f. *pyramidalis* × *P. alba*) и 1 генотипом F₁-7 (*P. deltoides* × *P. bolleana* f. *pyramidalis*). Статистически значимые различия по средним значениям анализируемых показателей между скрещиваниями F₁-3 и F₁-5 отсутствовали

(рис. 5), что объясняется наличием в каждой группе как потенциально устойчивых, так и чувствительных к селективному фактору генотипов. Для генотипа F₁-7 концентрация 0,5 % NaCl являлась губительной, процент выживших составил 3,33 %. Это можно объяснить либо реакцией конкретного генотипа, либо тем, что выбранные родительские пары более чувствительны к засолению. Для F₁-3 и F₁-5 в качестве отцовской линии выбрали *P. alba*, который, по литературным данным, более устойчивый к воздействию абиотических факторов [9].

Генотипические различия по количеству выживших и способных к регенерации эксплантов, длине побега и проценту укорененных регенерантов межвидовых гибридов *Populus* представлены в таблицах 1, 2 и на рисунке 6.

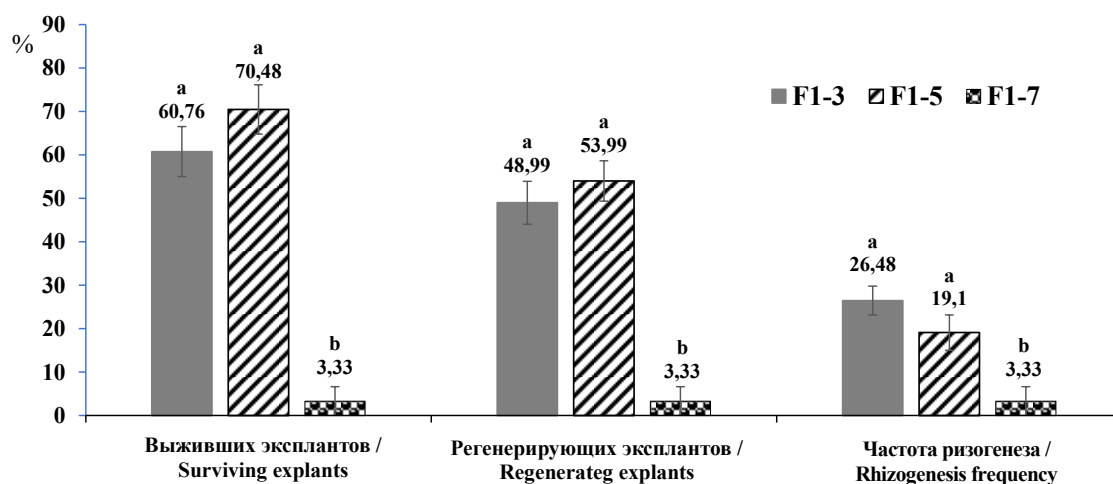


Рис. 5. Устойчивость эксплантов к сублетальной концентрации NaCl (0,5 %) в зависимости от комбинации скрещивания *Populus* (F₁-3, F₁-5, F₁-7). Разные буквы в столбцах одного параметра показывают статистически значимые различия согласно НСР-тесту Фишера при p<0,05 /

Fig. 5. Resistance of explants to sublethal concentration of NaCl (0.5 %) depending on the combination of *Populus* crossing (F₁-3, F₁-5, F₁-7). Different letters in columns of one parameter indicate statistically significant differences according to Fisher LSD-test at p<0.05

Таблица 1 – Влияние сублетальной концентрации NaCl (0,5 %) в составе питательной среды на долю выживших и регенерировавших эксплантов генотипов *Populus* F₁, % /

Table 1 – Effect of sublethal concentration of NaCl (0.5%) in the nutrient medium on the ratio of surviving and regenerated explants of *Populus* F₁ genotypes, %

Параметр / Parameter	Выжившие экспланты / Survived explants		Регенерировавшие экспланты / Regenerated explants	
	NaCl, 0 %	NaCl, 0,5 %	NaCl, 0 %	NaCl, 0,5 %
Генотип / Genotype				
F ₁ -3 g2	96,7±3,3a	96,7±3,3a	90,0±5,8a	33,3±3,3d
F ₁ -3 g4	89,6±5,8a	18,3±4,4e	96,3±3,7a	14,2±3,0ef
F ₁ -3 g6	93,0±3,5a	83,3±3,3b	93,0±3,5a	40,2±5,8d
F ₁ -3 g8	100,0±0,0a	44,8±2,9d	100,0±0,0a	41,5±1,5d
F ₁ -3 g11	93,3±6,7a	45,2±5,2d	93,3±6,7a	45,2±5,2d
F ₁ -3 g12	96,7±3,3a	63,3±3,3c	96,7±3,3a	63,3±3,3c
F ₁ -3 g15	94,4±5,6a	37,8±2,2d	88,9±5,6a	37,8±3,8d
F ₁ -3 g16	100,0±0,0a	96,7±3,3a	100,0±0,0a	96,7±3,3a
F ₁ -5 g3	93,3±6,7a	58,9±4,8c	93,3±6,7a	44,8±8,7d
F ₁ -5 g4	96,7±3,3a	63,3±3,3c	96,7±3,3a	43,3±8,8d
F ₁ -5 g5	93,0±3,5a	96,7±3,3a	89,3±6,4a	18,3±4,4e
F ₁ -5 g6	100,0±0,0a	92,6±7,4ab	100,0±0,0a	82,6±3,8b
F ₁ -5 g7	100,0±0,0a	58,5±1,5c	100,0±0,0a	58,9±4,8c
F ₁ -5 g12	93,3±6,7a	63,3±3,3c	96,7±3,3a	63,3±3,3c
F ₁ -5 g15	100,0±0,0a	60,0±5,8c	100,0±0,0a	66,7±3,3c
F ₁ -7 g2	93,3±6,7a	3,3±3,3f	90,0±5,8a	3,3±3,3f

Примечание: разные буквы в каждом столбце показывают статистически значимые различия согласно НСР-тесту Фишера при p<0,05 /

Note: different letters in each column indicate statistically significant differences according to the Fisher LSD-test at p<0.05

Таблица 2 – Влияние сублетальной концентрации NaCl (0,5 %) в составе питательной среды на длину побега и спонтанный ризогенез эксплантов генотипов Populus F₁ / Table 2 – Effect of sublethal concentration of NaCl (0.5 %) in the nutrient medium on shoot length and spontaneous rhizogenesis of explants of Populus F₁ genotypes

Параметр / Parameter	Длина побега, см / Shoot length, cm		Спонтанный ризогенез, % / Spontaneous rhizogenesis, %	
	NaCl, 0 %	NaCl, 0,5 %	NaCl, 0 %	NaCl, 0,5 %
Генотип / Genotype				
F ₁ -3 g2	2,3±0,1c	2,0±0,1b-d	13,7±8,8e	7,0±3,5de
F ₁ -3 g4	5,1±0,2a	1,4±0,2d	96,7±3,3a	30,0±5,8bc
F ₁ -3 g6	3,9±0,6a-c	2,6±0,2a-c	56,7±3,3d	3,3±3,3e
F ₁ -3 g8	2,8±0,5c	2,2±0,2a-d	46,7±3,3d	36,7±3,3b
F ₁ -3 g11	4,2±0,6a-c	2,0±0,1b-d	90,0±5,8ab	36,7±3,3b
F ₁ -3 g12	3,1±0,4bc	2,2±0,3a-d	53,3±6,7d	43,3±8,8ab
F ₁ -3 g15	3,0±0,2bc	2,1±0,2b-d	84,4±2,9a-c	16,7±3,3c-e
F ₁ -3 g16	3,4±0,5a-c	2,9±0,6a	93,3±6,7a	38,1±4,3b
F ₁ -5 g3	3,8±0,6a-c	2,7±0,4ab	56,7±3,3d	16,7±3,3c-e
F ₁ -5 g4	3,9±0,9a-c	2,0±0,3b-d	53,3±12,0d	6,7±6,7de
F ₁ -5 g5	3,7±0,4a-c	2,0±0,0b-d	73,3±3,3c	3,7±3,7e
F ₁ -5 g6	4,0±0,2a-c	2,4±0,3a-c	93,3±3,3a	13,3±6,7de
F ₁ -5 g7	4,5±0,8ab	2,0±0,2b-d	83,3±3,3a-c	20,0±5,8cd
F ₁ -5 g12	3,8±0,7a-c	2,1±0,3b-d	76,7±3,3bc	16,7±3,3c-e
F ₁ -5 g15	3,1±0,8bc	2,3±0,3a-c	96,7±3,3a	56,7±8,8a
F ₁ -7 g2	2,9±0,4bc	1,9±0,3cd	53,3±6,7d	3,3±3,3e

Примечание: разные буквы в каждом столбце показывают статистически значимые различия согласно НСР-тесту Фишера при $p < 0,05$ /

Note: different letters in each column indicate statistically significant differences according to the Fisher LSD-test at $p < 0.05$

В таблицах 1 и 2 представлены средние значения измеряемых параметров по каждому генотипу, полученные в результате роста на контрольной среде и среде с сублетальной концентрацией NaCl. Максимальное количество выживших эксплантов на селективной среде отмечено у четырех генотипов *Populus F₁*: F₁-3 g2, F₁-3 g16, F₁-5 g5, F₁-5 g6 (рис. 6). Они статистически отличались по своей регенерационной способности в условиях засоления: у образца F₁-3 g16 зафиксировано максимальное количество регенерирующих эксплантов – 96,7 %, у F₁-5 g6 – 82,6 %. У генотипов F₁-3 g2 и F₁-5 g5 данный показатель составил всего 33,3 и 18,3 % соответственно (табл. 1).

Максимальную длину побега на селективной среде сформировали регенеранты F₁-3 g16 – 2,9 см и F₁-5 g6 – 2,4 см. Частота спонтанного ризогенеза в контроле и селективной среде у всех 16 генотипов проявлялась в разной степени. Среди отобранных 4 генотипов макси-

мальный процент укоренившихся образцов на селективной среде получили у F₁-3 g16 – 38,1 % (табл. 2). Коэффициент размножения в контроле варьировал от 1,6 до 5,6 в зависимости от генотипа, а на среде с 0,5 % NaCl почти не отличался – 1,0–1,8 (рис. 7).

Результаты, полученные в ходе нашего исследования, согласуются с работами ряда авторов, изучающих влияние хлоридного засоления на морфогенез растений *in vitro*. Например, В. Вуксанович с соавт. (V. Vuksanović et al.) [15] провели оценку толерантности пяти сортов *Populus alba* к осмотическому и солевому стрессам в культуре *in vitro*, в результате которой выявлено значимое влияние генотипа, причем, как и в наших исследованиях, концентрация NaCl 100 мМ (0,58 %) была выбрана оптимальной для проведения отбора, а 150 мМ (0,87 %) – признана летальной.

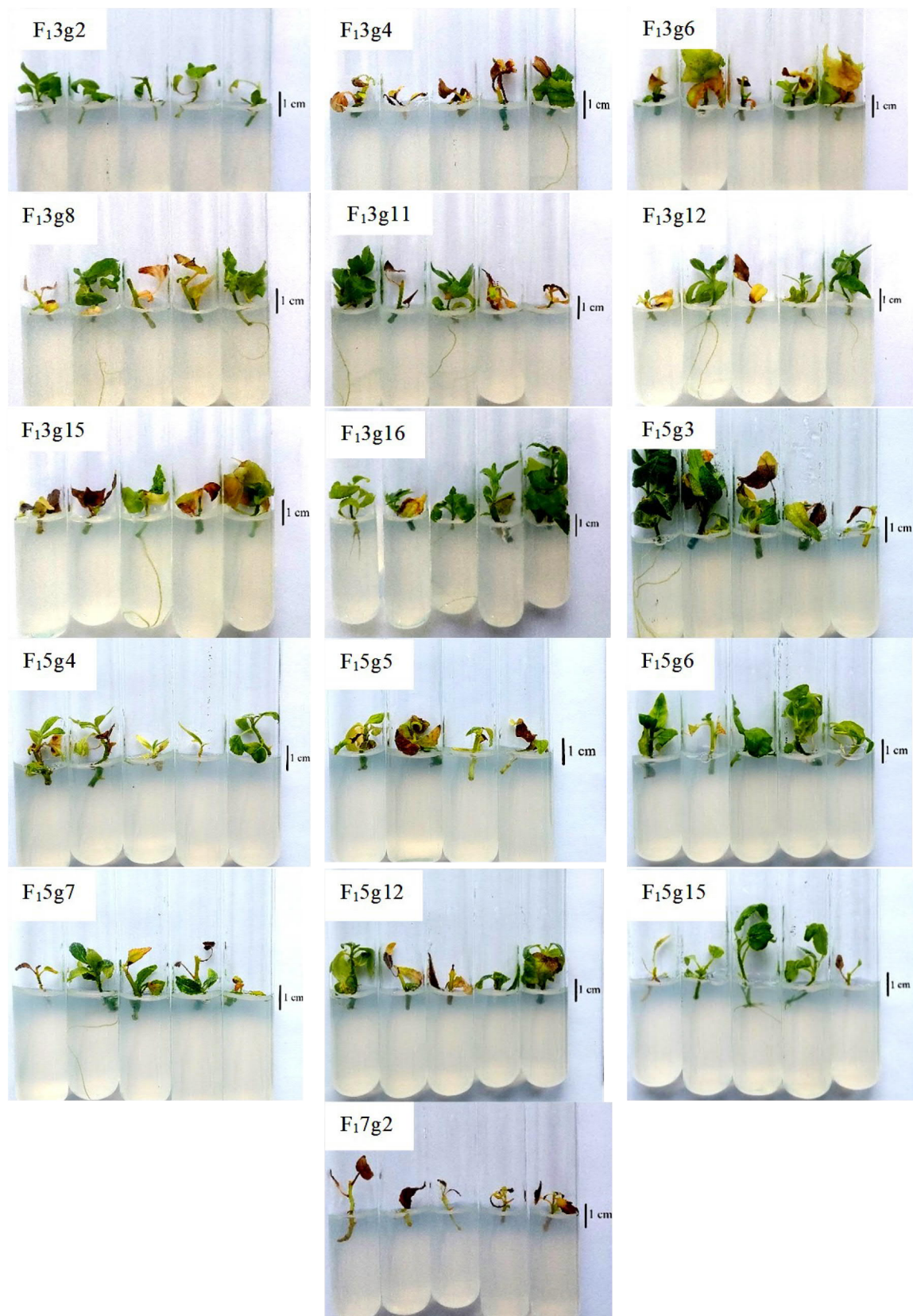


Рис. 6. Исследуемые генотипы *Populus* F₁ после 8 недель культивирования *in vitro* на среде MS с содержанием 0,5 % NaCl /

Fig. 6. *Populus* F₁ genotypes after 8 weeks of *in vitro* cultivation on a medium MS supplemented 0.5 % NaCl

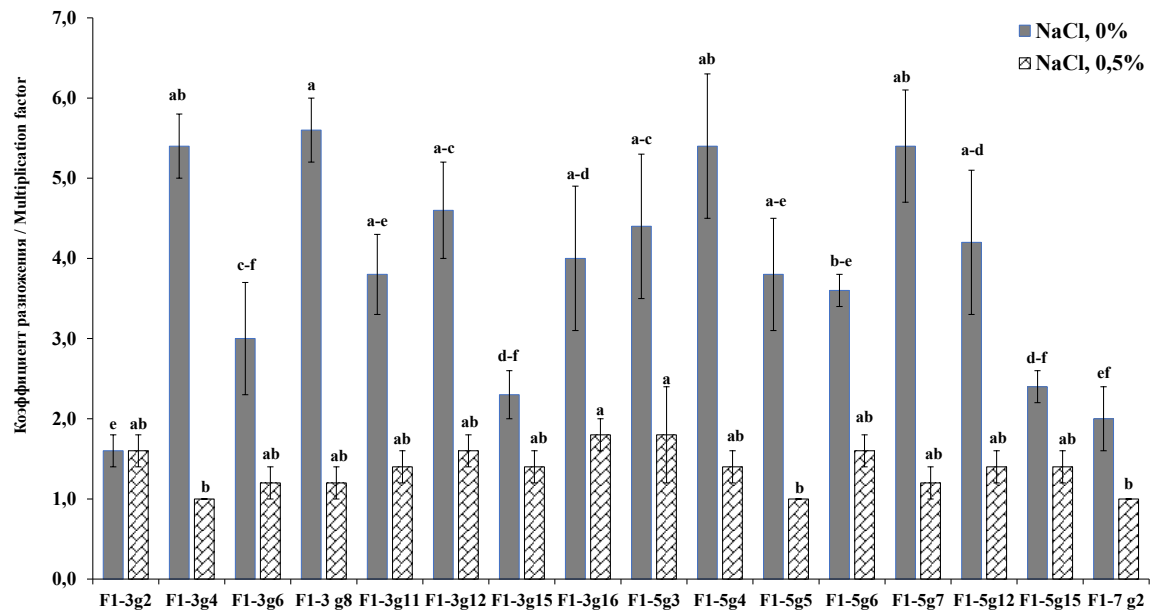


Рис. 7. Коэффициент размножения генотипов *Populus* F1 после 8 недель культивирования *in vitro* на питательной среде MS в контроле (NaCl, 0 %) и при сублетальной концентрации NaCl (0,5 %). Разные буквы в столбцах одного параметра показывают статистически значимые различия согласно НСР-тесту Фишера при $p < 0,05$ /

Fig. 7. Multiplication factor of *Populus* F1 genotypes on MS nutrient medium in the control (NaCl, 0 %) and at sublethal concentration of NaCl (0.5 %). Different letters in columns of one parameter indicate statistically significant differences according to Fisher LSD-test at $p < 0.05$

В работе А. А. Эрст с соавт. (A. A. Erst et al.) [9] при оценке устойчивости к засолению *P. alba* × *P. bolleana* и *P. tremula* все исследуемые образцы сохраняли жизнеспособность при 50 мМ NaCl (0,29 %), что подтверждается полученными результатами в нашей работе, где выживших и регенерирующих эксплантов при концентрации NaCl 0,2 % насчитывалось 92,5 и 84,0 % соответственно. Повышение концентрации NaCl до 150 мМ (0,87 %), в наших исследованиях до 0,5 % и выше, также угнетало морфогенез микропобегов и приводило к частичной гибели эксплантов. Однако в работе [9] 11 % гибридов *Populus* сохраняли способность к регенерации на среде с 250 мМ NaCl (1,4 %), а для всех исследуемых генотипов межвидовых гибридов в нашем исследовании 1,0 % NaCl являлся летальной концентрацией. В исследовании Л. Жуве с соавт. (L. Jouve et al.) [18] NaCl в концентрации до 150 мМ (0,87 %) существенно не влияла на морфогенез *P. tremula*. Концентрация 86 мМ NaCl (0,5 %) у *P. robusta*, *P. berolinensis* и *P. popularia* вызывала гибель [19].

Заключение. В результате исследования было изучено влияние моделируемых условий засоления на морфогенез генотипов *Populus* F1

в культуре *in vitro*. Стресс, созданный путем добавления в состав питательной среды 0,5 и 1,0 % NaCl, вызвал значительное снижение всех изучаемых параметров морфогенеза эксплантов *Populus* F1. Выявлены статистически значимые различия средних значений исследуемых параметров между разными концентрациями NaCl, а также среди генотипов. Доза 0,5 % NaCl определена как сублетальная в данном исследовании, а 1,0 % – летальная. Среди 16 исследуемых генотипов 4 имели высокий процент выживших эксплантов (96,2–96,7 %). Кроме того, два из них F1-3 g16 и F1-5 g6 сохранили высокую регенерацию (82,6–96,6 %) на сублетальной концентрации селективного агента.

Таким образом, результаты, полученные в ходе проведенного исследования, свидетельствуют о том, что методы биотехнологии растений являются эффективными для оценки воздействия абиотического стресса, дают возможность оптимизировать селекционные процессы и сузить поиск устойчивых генотипов. Отобранные генотипы можно считать перспективными для тестирования в полевых условиях на почвах с засолением.

References

1. Mashkina O. S., Tabatskaya T. M., Korchagin O. M. *In vitro* selection of birch for tolerance to salinity stress. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;875(1):012082. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012082>
2. Kulczyk-Skrzeszewska M., Kieliszewska-Rokicka B. Influence of drought and salt stress on the growth of young *Populus nigra* 'Italica' plants and associated mycorrhizal fungi and non-mycorrhizal fungal endophytes. New Forests. 2022;53(4):679–694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09879-6>
3. Chen Y., Yuan B., Wei Z., Chen X., Chen Y., Qiu N. The ion homeostasis and ROS scavenging responses in 'NL895' poplar plantlet organs under *in vitro* salinity stress. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant. 2018;54:318–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11627-018-9896-z>
4. Galović V., Kebert M., Popovic B., Kovacevic B., Vasić V., Joseph M., Orlović S., Szabados L. Biochemical and gene expression analyses in different poplar clones: The selection tools for afforestation of halomorphic environments. Forests. 2021;12(5):636. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050636>
5. Liu Y., Su M., Han Z. Effects of NaCl stress on the growth, physiological characteristics and anatomical structures of *Populus talassica* × *Populus euphratica* seedlings. Plants. 2022;11(22):3025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11223025>
6. Singh D., Kumar A. In vitro screening and characterization of selected elite clones of *Eucalyptus tereticornis* Sm. for salt stress. Journal of Plant Growth Regulation. 2021;40:694–706. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10138-9>
7. Guleria I., Kumari A., Lacaille-Dubois M-A., Nishant, Kumar V., Saini A. K., Dhatwalia J., Lal S. A review on the genus *Populus*: A potential source of biologically active compounds. Phytochemistry Review. 2022;21:987–1046. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09772-2>
8. Эрст А. А., Шишкин С. В., Воронкова М. С. Получение межвидовых гибридов (*Populus alba* × *P. bolleana*) × *P. canescens* с использованием культуры *in vitro*. Сибирский лесной журнал. 2019;(2):45–52. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20190204> EDN: JVBNIIF
9. Erst A. A., Shishkin S. V., Voronkova M. S. The generation of interspecific hybrids in (*Populus alba* × *P. bolleana*) × *P. canescens* by *in vitro* culture. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science. 2019;(2):45–52. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20190204>
10. Erst A. A., Shishkin S. V., Voronkova M. S. Evaluation of salinity and osmotic stress resistance of the genus *Populus* species and hybrids in culture *in vitro*. Plant cell biotechnology and molecular biology. 2019;20(11-12):451–458. URL: https://www.researchgate.net/publication/334811183_EVALUATION_OF_SALINITY_AND_OSMOTIC_STRESS_RESISTANCE_OF_THE_GENUS_Populus_SPECIES_AND_HYBRIDS_IN_CULTURE_In_vitro
10. Спивак В. В., Бурменко Ю. В., Капитова И. А. Эмбриокультура в селекции косточковых: особенности и успехи применения. Садоводство и виноградарство. 2023;(5):27–34. DOI: <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-27-34> EDN: AKXAZG
11. Spivak V. V., Burmenko Yu. V., Kapitova I. A. Embryo rescue in stone fruit breeding: specifics and application success. *Sadovodstvo i vinogradarstvo* = Horticulture and viticulture. 2023;(5):27–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2023-5-27-34>
11. Tabatskaya T. M., Mashkina O. S., Korchagin O. M. *In vitro* modelling of salinity stress for the selection of stress-tolerant birch lines. E3S Web of Conferences. 2020;224:04013. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022404013>
12. Zholobova O. O., Mogilevskaya I. V., Melnik S. V. Screening Smoke Tree (*Cotinus coggygia* Scop.) on Osmotic Stress using Polyethylene Glycol 6000 *in vitro*. Indian Journal of Agricultural Research. 2024;58(1):36–42. DOI: <https://doi.org/10.18805/IJArE.AF-781>
13. Маркова М. Г., Сомова Е. Н. Оптимизация клонального микроразмножения косточковых культур. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(2):189–197. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.189-197> EDN: QPFWKX
14. Markova M. G., Somova E. N. Optimization of clonal micropropagation of stone fruit crops. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(2):189–197. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.189-197>
14. Vuksanovic V., Kovacevic B., Orlović S., Kebert M., Kovač M. The influence of drought on growth and development of white poplar shoots *in vitro*. Topola. Poplar. 2019;203:13–18. URL: https://ilfe.org/sites/default/files/04Vuksanovic_et_al.pdf
15. Vuksanović V., Kovacevic B., Kebert M., Katanic M., Kesic L., Karaklic V., Orlović S. *In vitro* modulation of antioxidant and physiological properties of white poplar induced by salinity. Glasnik Sumarskog fakulteta. 2019;120:179–196. DOI: <https://doi.org/10.2298/GSF1920179V>

16. Крючков С. Н., Соломенцева А. С., Романенко А. К. Внутривидовые скрещивания выделенных биотипов родов вяз и тополь для получения гетерозисных селекционных форм. Аграрный вестник Урала. 2023;23(6):23–34. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-235-06-23-34> EDN: WLAIAZ

Kryuchkov S. N., Solomentseva A. S., Romanenko A. K. Intraspecific crosses of selected biotypes of the *Ulmus* and *Populus* genera to obtain heterotic breeding forms. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2023;23(6):23–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-235-06-23-34>

17. Phillips G. C., Garda M. Plant tissue culture media and practices: an overview. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*. 2019;55:242–257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11627-019-09983-5>

18. Jouve L., Hoffmann L., Hausman J. F. Polymine, carbohydrate, and proline content changes during salt stress exposure of aspen (*Populus tremula* L.): involvement of oxidation and osmoregulation metabolism. *Plant Biology*. 2004;6(1):74–80. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2003-44687>

19. Fung L. E., Wang S. S., Altman A., Hütterman A. Effect of NaCl on growth, photosynthesis, ion and water relations of four poplar genotypes. *Forest Ecology and management*. 1998;107(1-3):135–146. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00328-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00328-9)

Сведения об авторах

Терещенко Татьяна Васильевна, младший научный сотрудник лаборатории биотехнологий, ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт Университетский, 97, г. Волгоград, Российская Федерация, 400062, e-mail: info@vfanc.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9116-6062>

Жолобова Ольга Олеговна, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией биотехнологий, ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт Университетский, 97, г. Волгоград, Российская Федерация, 400062, e-mail: info@vfanc.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1594-4181>

✉ **Могилевская Ирина Владимировна**, кандидат биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биотехнологий, ФБГНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук», пр-кт Университетский, 97, г. Волгоград, Российская Федерация, 400062, e-mail: info@vfanc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8421-4767>, e-mail: mogilevskaya-i@vfanc.ru

Information about the authors

Tatyana V. Tereshchenko, junior researcher, the Laboratory of Biotechnologies, Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Universitetsky Avenue, 97, Volgograd, Russian Federation, 400062, e-mail: info@vfanc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9116-6062>

Olga O. Zholobova, PhD in Biology, leading researcher, Head of the Laboratory of Biotechnologies, Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Universitetsky Avenue, 97, Volgograd, Russian Federation, 400062, e-mail: info@vfanc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1594-4181>

✉ **Irina V. Mogilevskaya**, PhD in Biology, associate professor, leading researcher, the Laboratory of Biotechnologies, Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Universitetsky Avenue, 97, Volgograd, Russian Federation, 400062, e-mail: info@vfanc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8421-4767>, e-mail: mogilevskaya-i@vfanc.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author