

УДК: 581.1:633.16

ВЛИЯНИЕ ХЛОРИДНОГО ЗАСОЛЕНИЯ НА ПРОРОСТКИ ЯЧМЕНЯ¹© 2023 г. К. Б. Таскина^{1,*}, Н. М. Казнина¹, А. Ф. Титов¹¹Институт биологии Карельского научного центра РАН
185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Россия*E-mail: tasamayaksenia@gmail.com

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.

После доработки 15.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

В условиях контролируемой среды изучали влияние умеренного и сильного хлоридного засоления на проростки ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Нур. Воздействие на проростки умеренной (100 мМ) и высокой (200 мМ) концентраций NaCl в течение 7 сут приводило к замедлению роста их корней и побегов. В то же время в варианте с использованием NaCl в умеренной концентрации в листьях увеличивалось содержание пигментов (хлорофиллов и каротиноидов на 25 и 22% соответственно по отношению к контролю) при одновременном уменьшении скорости фотосинтеза (на 25%). В отличие от этого, под воздействием высокой концентрации NaCl содержание пигментов, а также устьичная проводимость заметно снижались, что сопровождалось почти двукратным замедлением скорости фотосинтеза. При этом тормозилась транспирация и уменьшалась оводненность тканей. Сделан вывод о том, что об устойчивости ячменя к NaCl можно судить уже на ранних фазах развития растений. Наиболее чувствительными к присутствию хлорида натрия в корнеобитаемой среде являются такие легко регистрируемые морфо-физиологические показатели, как линейный размер побега и его сырая биомасса.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., засоление, рост, водный обмен, фотосинтез, устьичная проводимость, транспирация.

DOI: 10.31857/S0002188123040129, **EDN:** DJLDRP

ВВЕДЕНИЕ

Засоление почв является одним из наиболее распространенных природных явлений, наблюдаемых во многих регионах нашей планеты. По имеющимся в литературе данным более 950 млн га почв в мире ($\approx 25\%$ поверхности суши) имеют повышенный уровень засоления (>0.1 – 0.3% легкорастворимых солей от общей сухой массы почвы), 6% из которых находится в России [1]. Причем площадь территорий, испытывающих засоление, постоянно увеличивается. Повышение концентрации солей в почве отрицательно сказывается на жизнедеятельности растений и приводит к значительным потерям урожая сельскохозяйственных культур. При этом наиболее сильное негативное воздействие на растения оказывает натрий-хлоридное засоление [2]. Показано, что увеличение концентрации ионов натрия и хлора в корнеобитаемой среде и в растениях приводит к повышению осмотического давления клеток, к

накоплению токсических ионов и, как следствие, нарушению водного баланса и минерального питания [3]. Также под влиянием NaCl тормозится скорость фотосинтеза и транспирации, замедляется рост и развитие растений, снижается их продуктивность [4–6].

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) является одной из наиболее важных злаковых культур в мире. Несмотря на то, что этот вид относится к гликофитам, он довольно устойчив к засолению [7, 8], что позволяет предполагать возможность его культивирования на слабо и умеренно засоленных почвах. Это находит подтверждение и в ряде работ, опубликованных ранее [9–11]. Однако следует отметить, что ответная реакция растений ячменя на засоление на уровне физиологических процессов, включая фотосинтез и фотосинтетический аппарат (ФСА), изучена лишь фрагментарно, хотя именно от активности ФСА в стрессовых условиях во многом зависит конечная продуктивность злаков. Добавим к этому, что в целом растения наиболее чувствительны к засолению именно на ранних фазах развития [12, 13], поэтому оценка их солеустойчивости, проведенная в фазе про-

¹ Финансовое обеспечение исследования осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (№ FMEN-2022-0004).

ростков, представляет наибольший интерес, в частности, в плане диагностики устойчивости к засолению разных видов (сортов, генотипов) и осуществляемой в селекционно-генетических исследованиях [14, 15].

Исходя из вышеизложенного, цель работы – изучение физиологических реакций проростков ячменя на умеренное и сильное хлоридное засоление.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служили проростки ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Нур. Семена предварительно замачивали в дистиллированной воде в чашках Петри. Проклюнувшиеся семена переносили в сосуды с питательным раствором Хогланда–Арнона (рН 6.2–6.4) объемом 1 л. В контрольном варианте питательный раствор был без хлорида натрия, в опытных вариантах в раствор добавляли соль NaCl (х.ч.) в концентрации 100 мМ (0.6%, 4.5 атм) или 200 мМ (1.2%, 9 атм). Эти концентрации (первая как умеренная, а вторая как высокая) были выбраны на основании предварительных опытов (в которых использовали концентрации NaCl от 20 до 200 мМ) и с учетом литературных данных. Растения выращивали в климатической камере при постоянных условиях: температуре воздуха 22–25°C, его относительной влажности 60–70%, ФАР 100 мкмоль/(м² с) и 14-часовом фотопериоде. Спустя 7 сут оценивали влияние хлоридного засоления на физиологические процессы и морфометрические показатели растений. О росте проростков судили по изменению (по отношению к контролю) длины наиболее развитого корня, высоты главного побега, сырой и сухой биомассы подземных и надземных органов. О состоянии ФСА судили по изменению (по отношению к контролю) площади листовой пластинки 1-го полностью закончившего рост листа, содержанию в нем хлорофиллов и каротиноидов, соотношению хлорофиллов (*a/b*) и их доли в светособирающих комплексах (ССК). Помимо этого, измеряли фотохимическую активность фотосистемы II (ФС II), устьичную проводимость и скорость фотосинтеза. О водном обмене растений судили по интенсивности транспирации и оводненности тканей корня и побега.

Площадь листовой пластинки рассчитывали по формуле $S = 2/3ld$, где *l* – длина, *d* – ширина листовой пластинки [16]. Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) определяли в 80%-ной ацетоновой вытяжке с помощью спектрофотометра (СФ-2000, Россия). Расчет доли хлорофиллов в ССК прово-

дили с учетом того, что весь хлорофилл *b* находится в ССК, а отношение хлорофиллов *a/b* в ССК равно 1.2 [17]. Максимальный квантовый выход фотохимической активности ФС II (F_v/F_m) измеряли с помощью флуориметра MINI-PAM (Walz, Германия) на адаптированных к темноте листьях. Интенсивность фотосинтеза и транспирации, а также устьичную проводимость измеряли с помощью установки для исследования CO₂-газообмена и водяных паров НСМ-1000 (Walz, Германия). Оводненность тканей (ОТ) рассчитывали по формуле: $ОТ = (сырая\ биомасса - сухая\ биомасса) / сырая\ биомасса \cdot 100\%$.

Биологическая повторность в пределах каждого варианта опыта составляла для разных показателей от 4-х до 12-ти растений, аналитическая повторность двух–пятикратная. Весь опыт повторяли дважды. Достоверность различий между контролем и опытом оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости $P < 0.05$.

Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали, что линейный рост корня и побега у 7-суточных проростков ячменя под влиянием засоления тормозился и тем сильнее, чем была больше концентрация соли в корнеобитаемой среде. При использовании NaCl в концентрации 100 мМ длина корня оказалась на 20% меньше, чем в контроле, высота побега – на 25%. При этом сырая и сухая биомасса подземных органов, а также сухая биомасса побега сохранялись на уровне контроля, тогда как сырая биомасса побега снижалась (на 30% по сравнению с контролем). Повышение концентрации соли до 200 мМ приводило к более значительному уменьшению длины корня и высоты побега (на 60% по отношению к контролю) и их сырой и сухой биомассы подземных (на 40 и 20% соответственно) и надземных (на 70 и 50% соответственно) органов (табл. 1). Важно отметить, что в условиях засоления у проростков увеличивалось (на 65 и 60% по сравнению с контролем) отношение сырой биомассы корня к сырой биомассе побега за счет более сильного ингибирования процесса накопления биомассы побега. Однако соотношение сухих биомасс оставалось при этом на уровне контроля.

Влияние засоления на ФСА растений также зависело от концентрации соли в корнеобитаемой среде. В частности, при использовании NaCl в концентрации 100 мМ листовая пластинка

Таблица 1. Влияние хлорида натрия на морфометрические показатели растений ячменя сорта Нур

Показатель	Варианты		
	контроль	100 мМ NaCl	200 мМ NaCl
Длина корня, см	12.4 ± 0.8	9.98 ± 0.52*	4.60 ± 0.08*
Высота побега, см	18.1 ± 0.6	13.9 ± 0.5*	6.96 ± 0.14*
Сырая биомасса корня, мг	89.4 ± 10.9	100 ± 6	56.4 ± 5.2*
Сухая биомасса корня, мг	9.40 ± 0.77	9.89 ± 0.48	7.41 ± 0.68*
Сырая биомасса побега, мг	279 ± 23	196 ± 8*	87.9 ± 4.3*
Сухая биомасса побега, мг	24.8 ± 2.2	20.2 ± 1.0	13.5 ± 0.7*
Отношение сырой биомассы корня и побега	0.311 ± 0.059	0.509 ± 0.057*	0.49 ± 0.22*
Отношение сухой биомассы корня и побега	0.421 ± 0.219	0.492 ± 0.039	0.54 ± 0.12

Примечание. Представлены средние величины и их ошибки.

*Отмечены отличия от контроля достоверные при $P < 0.05$. То же в табл. 2.

Таблица 2. Влияние хлорида натрия на состояние фотосинтетического аппарата растений ячменя сорта Нур

Показатель	Варианты		
	контроль	100 мМ NaCl	200 мМ NaCl
Площадь листа, см ²	8.64 ± 0.55	6.18 ± 0.27*	—
Содержание хлорофилла <i>a</i>	0.983 ± 0.009	1.236 ± 0.027*	0.862 ± 0.009*
Содержание хлорофилла <i>b</i>	0.415 ± 0.005	0.523 ± 0.015*	0.310 ± 0.006*
Содержание каротиноидов	0.237 ± 0.003	0.290 ± 0.001*	0.225 ± 0.002*
Отношение хлорофиллов <i>a/b</i>	2.369 ± 0.048	2.366 ± 0.021	2.783 ± 0.062*
Доля хлорофиллов в ССК, %	65.4	65.4	58.1*
<i>Fv/Fm</i>	0.792 ± 0.005	0.801 ± 0.002	0.783 ± 0.007

Примечание. Содержание хлорофиллов и каротиноидов дано в мг/г сырой массы, прочерк — лист полностью не развернулся.

1-го листа хотя и оказалась полностью развернутой, была заметно меньше (на 30%), чем в контроле (табл. 2). В варианте с концентрацией соли 200 мМ листовая пластинка не разворачивалась, свидетельствуя о явном отставании в развитии растений.

Известно, что в неблагоприятных условиях среды поддержание необходимого уровня фотосинтеза растений во многом зависит от содержания в листьях фотосинтетических пигментов. В наших опытах при воздействии хлорида натрия в концентрации 100 мМ содержание зеленых и желтых пигментов заметно повышалось (на 25 и 22% по сравнению с контролем соответственно). При этом отношение хлорофиллов, а также их содержание в ССК поддерживалось на уровне контроля. Увеличение концентрации NaCl в питательном растворе до 200 мМ приводило к снижению содержания в листьях хлорофиллов *a* и *b* (на 10 и 25% по сравнению с контролем соответственно), а также доли хлорофиллов в ССК (на 11%).

При этом соотношение хлорофиллов *a/b* увеличивалось (на 17% по отношению к контролю) за счет более сильного снижения содержания хлорофилла *b*. Содержание каротиноидов в листьях в этом варианте опыта незначительно, но достоверно также уменьшалось (на 5% по сравнению с контролем). Отрицательного влияния засоления на квантовую эффективность ФС II у ячменя обнаружено не было, величина показателя *Fv/Fm* у растений опытных вариантов даже при наибольшей концентрации NaCl практически не отличалась от контрольного варианта.

В ходе исследования было также установлено, что при обеих использованных в опытах концентрациях хлорида натрия значительно снижались устьичная проводимость (на 20 и 80% по сравнению с контролем соответственно) и скорость фотосинтеза (на 25 и 35% соответственно) (рис. 1).

Известно, что в условиях засоления необходимым условием успешного роста и развития растений является поддержание у них определенного

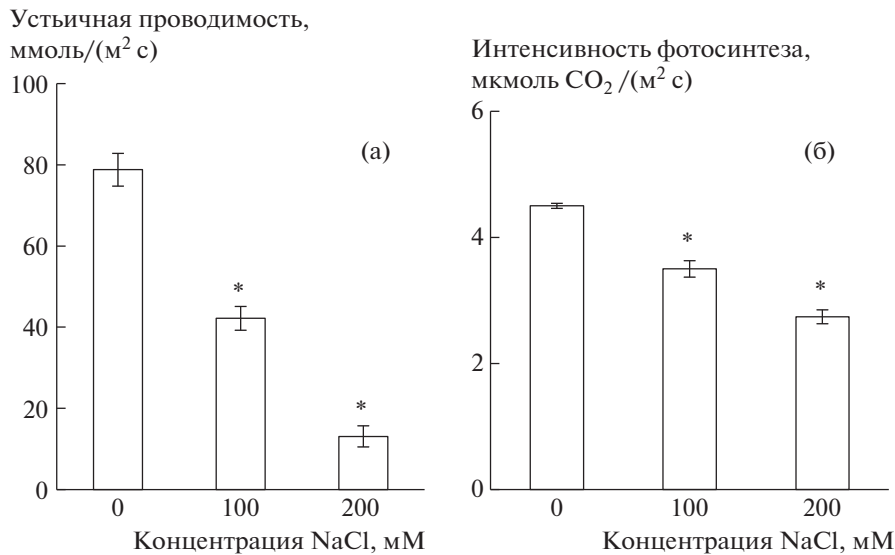


Рис. 1. Влияние хлорида натрия на устьичную проводимость (а) и скорость фотосинтеза (б) растений ячменя сорта Нур.

*Различия достоверны при $P < 0.05$. То же на рис. 2.

водного баланса [18]. В наших опытах при засолении у ячменя уменьшалась интенсивность транспирации. У опытных растений в присутствии NaCl в концентрации 100 мМ она была почти в 2 раза меньше, чем у растений контрольного варианта (рис. 2). При этом оводненность тканей корня и побега в этих условиях сохранялась на уровне контроля (табл. 3). При использовании соли в концентрации 200 мМ скорость транспирации снижалась еще сильнее (более, чем в 4 раза) (рис. 3).

При этом значимо уменьшалась оводненность тканей корня и особенно побега.

Известно, что при высоком содержании солей в корнеобитаемой среде у растений тормозятся процессы роста и развития, замедляются фотосинтез и транспирация, снижается продуктивность, а в некоторых случаях даже может наступить гибель растений [19, 20]. Во многом это связано с нарушением водного баланса и ионного гомеостаза. В частности, обнаружено, что в присутствии ионов Na^+ и Cl^- в высоких концентрациях снижается водный потенциал почвенного раствора, вызывая дегидратацию клеток растений [3] и нарушение водного обмена [7, 21]. Помимо этого, чрезмерное засоление субстрата вызывает у растений различные токсические эффекты, связанные с повышением концентрации ионов Na^+ и Cl^- в клетках. Среди них отмечено подавление активности ферментов, возрастание количества активных форм кислорода и развитие окислительного стресса, изменение структуры органелл и дезинтеграция клеточных мембран [22, 23]. Имеются также данные о нарушении при повышенном уровне соли гормонального баланса растений, выражающееся в снижении уровня цитокининов [24] и увеличении содержания абсцизовой кислоты (АБК) [4], гибберелинов [25] и этилена [26, 27]. В условиях засоления изменяется и элементный состав растений. В частности, резко снижается содержание калия вследствие его утечки из-за деполяризации мембраны и нарушения пассивного транспорта ионов K^+ внутрь

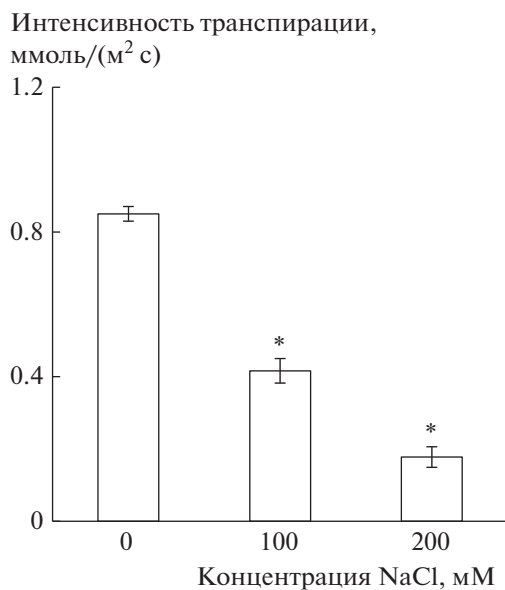


Рис. 2. Влияние хлорида натрия на интенсивность транспирации растений ячменя сорта Нур.

клетки [28]. Наконец, высокие концентрации соли могут отрицательно влиять на деление, дифференцировку и растяжение клеток [29].

Указанные изменения физиологических процессов и показателей, вызванные хлоридом натрия, приводят к существенному торможению роста растений, что обнаружено у целого ряда видов, в том числе и у злаков. Например, NaCl в концентрации 50 мМ заметно тормозил рост риса (*Oryza sativa* L.) сорта Павловский [30], кукурузы гибрида Пионер [31], проса лозного (*Panicum virgatum* L.) [32]. При использовании высокой концентрации соли 200 мМ отмечено снижение более чем в 2 раза сухой биомассы побега сорго двуцветного (*Sorghum bicolor* L.) [33] и райграса многолетнего (*Lolium perenne* L.) [34]. В наших опытах у 7-суточных проростков ячменя хлорид натрия в умеренной и высокой концентрациях (100 и 200 мМ соответственно) также тормозил рост корней и побегов и вызывал снижение сырой биомассы подземных и надземных органов. В то же время сухая биомасса корней и побегов значимо снижалась только при воздействии соли в концентрации 200 мМ, хотя их соотношение оставалось на уровне контрольных растений. Это важно, особенно в стрессовых условиях, поскольку нарушение соотношения подземной и надземной биомассы негативно отражается на минеральном питании и водном обмене растений и, как следствие, отрицательно сказывается на урожае зеленой массы и семян [35]. Способность ячменя накапливать сухую биомассу в условиях воздействия умеренной концентрации NaCl (100 мМ) на уровне контрольных растений, отмеченная в наших опытах, во многом объясняется поддержанием в данном случае относительно высокой скорости фотосинтеза. Это оказалось возможным благодаря увеличению содержания хлорофиллов и каротиноидов при уменьшении площади листа, а также сохранению на уровне контроля соотношения хлорофиллов (a/b) и их содержания в ССК, что обеспечивало необходимый уровень светопоглощения. Отсутствие изменений величины показателя F_v/F_m также свидетельствовало о поддержании эффективности работы ФС II в этих условиях. При использовании высокой концентрации соли 200 мМ сырая и сухая биомасса корней и побегов значительно снижались (по отношению к контролю). При этом уменьшалось содержание пигментов и количество хлорофиллов в ССК, что не могло не отразиться негативно на светопоглощении, в результате значительно тормозилась скорость фотосинтеза. Об ингибирующем действии высоких концентраций хлорида натрия на ФСА растений уже указывали ранее.

Таблица 3. Влияние хлорида натрия на оводненность тканей корня и побега растений ячменя сорта Нур

Показатель	Варианты		
	контроль	100 мМ NaCl	200 мМ NaCl
Оводненность тканей корня, %	88.8	90.0	86.8*
Оводненность тканей побега, %	90.6	89.7	84.5*

*Различия достоверны при $P < 0.05$.

Например, при концентрации соли 200 мМ уменьшалось содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях гибрида *Pennisetum* [36], в растениях мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) [37] и кукурузы (*Zea mays* L.) [38].

Помимо уменьшения содержания пигментов, замедление скорости фотосинтеза может являться следствием снижения доступности CO_2 в результате уменьшения устьичной проводимости, что ранее в условиях засоления отмечено, например, у некоторых генотипов кукурузы [38], ячменя [39], сортов пшеницы [40]. В нашем исследовании устьичная проводимость снижалась при обеих изученных концентрациях соли, однако если при применении концентрации 100 мМ это снижение составило 20% по отношению к контролю, то при использовании концентрации 200 мМ – 80%. Поскольку практически в равной степени у растений снижалась и интенсивность транспирации, можно предположить, что в этом варианте опыта происходило почти полное закрытие устьичной апертуры. Закрытие устьиц в условиях засоления является хорошо известным фактом. Причиной этого считается потеря воды замыкающими клетками устьиц, оттока из них ионов K^+ , а также повышение уровня АБК [21, 29, 41]. Вместе с тем частичное закрытие устьиц в условиях засоления может рассматриваться в качестве защитно-приспособительной реакции, направленной на сохранение оводненности тканей [6, 37], что, вероятно, и наблюдали в нашем опыте у ячменя в варианте с использованием концентрации соли 100 мМ. В отличие от этого в варианте с концентрацией 200 мМ оводненность тканей корня и побега значимо снижалась, что, очевидно, явилось одной из причин значительного уменьшения сырой биомассы корня и побега у проростков. Ранее снижение оводненности тканей под воздействием высоких концентраций соли в корнеобитаемой среде отмечали и другие авторы, проводившие исследования на растениях различных сортов ярового ячменя и пшеницы [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование показало, что на ранней фазе развития растения ячменя способны успешно адаптироваться к хлориду натрия в умеренной концентрации (100 мМ). Увеличение содержания хлорофиллов и каротиноидов при некотором снижении устьичной проводимости позволили поддерживать скорость фотосинтеза на уровне 75% от оптимальных условий. Уменьшение интенсивности транспирации позволило сохранить необходимый уровень оводненности тканей и обеспечили в этом случае растениям возможность накопления биомассы корней и побегов на уровне контроля. В отличие от этого высокая концентрация соли (200 мМ) приводила к уменьшению содержания пигментов, почти полному закрытию устьиц и резкому снижению устьичной проводимости, что сопровождалось явно выраженным замедлением скорости фотосинтеза. При этом нарушался водный обмен растений и уменьшалась оводненность тканей корня и побега.

В целом полученные результаты свидетельствовали о том, что об устойчивости ячменя к разному уровню засоления можно судить уже на ранних фазах развития растений. При этом наиболее чувствительными к повышению концентрации хлорида натрия в корнеобитаемой среде оказались морфометрические показатели, в частности, линейный размер побега и его сырая биомасса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников А.С., Пронько Н.А., Фалькович А.С., Бородычев В.В. Причины вторичного засоления орошаемых почв Нижнего Поволжья и его прогнозирование на основе математического моделирования влагопереноса // Изв. НВ АУК. 2018. № 2 (50). С. 9–17.
2. FAO (Food and Agriculture organization of the United Nations). Global network on integrated soil management for sustainable use of salt-affected soils. 2008. Web site <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>
3. Балнокин Ю.В. Ионный гомеостаз и солеустойчивость растений. М.: Наука, 2012. 99 с.
4. Таланова В.В., Таланов А.В., Титов А.Ф. Динамика фотосинтеза и транспирации проростков огурца в начальный период хлоридного засоления и при действии фитогормонов // Докл. РАСХН. 2006. № 2. С. 10–13.
5. Munns R., James R.A., Lauchli A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals // J. Exp. Bot. 2006. V. 57. P. 1025–1043.
6. Веселов Д.С., Шарипова Г.В., Кудоярова Г.Р. Влияние NaCl засоления на реакции сортов ячменя, различающихся по засухоустойчивости // Агрохимия. 2008. № 10. С. 18–26.
7. Шарипова Г.В. Особенности роста и водного обмена растений пшеницы и ячменя с различной солеустойчивостью при натрий-хлоридном засолении: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2007. 22 с.
8. Зайцева Р.И., Желнакова Л.И., Никитина Н.С. Характеристика солеустойчивости кормовых культур в начальной фазе вегетации при засолении чернозема хлоридом натрия // Бюл. Почв. ин-та. 2009. № 63. С. 25–40.
9. Веселов Д.С., Шарипова Г.В., Кудоярова Г.Р. Сравнительное изучение реакции растений ячменя (*Hordeum vulgare*) и пшеницы (*Triticum durum*) на кратковременное и длительное действие натрий-хлоридного засоления // Агрохимия. 2007. № 7. С. 41–48.
10. Kanbar A., Drussi I. Effect of salinity stress on germination and seedling growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties // Adv. Environ. Biol. 2014. V. 8. P. 244–247.
11. Лубянова А.Р., Безрукова М.В., Шакирова Ф.М. Влияние засоления на рост и гормональный статус корней проростков ячменя и риса // Агрохимия. 2019. № 8. С. 52–59.
12. Sabah N. The effect of salinity on germination, growth characters, and emergence of barley *Hordeum vulgare* L. in different soil textures // J. Thi-Qar Univer. 2008. V. 4. № 1. P. 17–26.
13. Шарипова Г.В., Веселов Д.С. Ростовая реакция на засоление растений разных сортов ячменя и ее связь с водным обменом // Физиол. и биохим. культ. раст. 2011. Т. 43. № 2. С. 129–135.
14. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: Метод. рук-во / Под ред. Удовенко Г.В. Л.: ВИР, 1988. 226 с.
15. Niknam V., Bagherzadeh M., Ebrahimzadeh H., Sokhansanj A. Effect of NaCl on biomass and contents of sugars, proline and proteins in seedlings and leaf explants of *Nicotiana tabacum* grown *in vitro* // Biol. Plantarum. 2004. V. 48. P. 613–615.
16. Аникиев В.В., Кутузов Ф.Ф. Новый способ определения площади листовой поверхности у злаков // Физиология растений. 1961. Т. 8. № 3. С. 375–377.
17. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids pigments of photosynthetic biomembranes // Method. Enzymol. 1987. V. 148. P. 350–382.
18. Jones H.G. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops // Hort Sci. 1990. V. 25. P. 19–26.
19. Nawaz K., Hussain K., Majeed A., Khan F., Afghan S., Ali K. Fatality of salt stress to plants: morphological, physiological and biochemical aspects // Afric. J. Biotechol. 2010. V. 9. № 34. P. 5475–5480.
20. Torabi M., Halim R.A., Mokhtarzadeh A., Miri Y. Physiological and biochemical responses of plants in saline environment // Crop biology and agriculture in harsh environments / Ed. Roychowdhury R. Lap Lambert Academic Publishing, 2013. № 9. P. 47–81.
21. Rajendran K., Tester M., Roy S.J. Quantifying the three main components of salinity tolerance in cereals // Plant Cell Environ. 2009. V. 32. № 3. P. 237–249.
22. Roychowdhury A., Paul S., Basu S. Cross-talk between abscisic acid-dependent and abscisic acid-independent pathways during abiotic stress // Plant Cell Rep. 2013. V. 32. № 7. P. 985–1006.

23. *Semida W.M., Rady M.M.* Pre-soaking in 24-epibrassinolide or salicylic acid improves seed germination, seedling growth, and anti-oxidant capacity in *Phaseolus vulgaris* L. grown under NaCl stress // *J. Horticult. Sci. Biotechnol.* 2014. V. 89. № 3. P. 338–344.
24. *Веселов Д.С., Кудоярова Г.Р., Кудрякова Н.В., Кузнецов В.В.* Роль цитокининов в стресс-устойчивости растений // *Физиология растений.* 2017. Т. 64. № 1. С. 19–32.
25. *Битюцкий Н.П.* Минеральное питание растений: учебник. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2020. 548 с.
26. *Munns R.* Plant adaptations to salt and water stress differences and commonalities // *Adv. Botanic. Res.* 2011. V. 57. P. 1–32.
27. *Parihar P., Singh S., Singh R., Singh V., Prasad S.M.* Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2025. V. 22. № 6. P. 4056–4075.
28. *Zhu J.K.* Genetic analysis of plant salt tolerance using *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* V. 124. № 3. 2000. P. 941–948.
29. *Алехина Н.Д., Балнокин Ю.В., Гавриленко В.Ф.* Физиология растений / Под ред. И.П. Ермакова. М.: Изд. центр “Академия”, 2005. 640 с.
30. *Гишева Н.Г.* Солеустойчивость сортов риса: Дис. ... канд. биол. наук. Краснодар, 1999. 130 с.
31. *Будаговская Н.В.* Функциональные и морфологические изменения у растений в условиях засоления и блокирования кальциевых каналов // *Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды (Иркутск, 10–15 июля 2018 г.).* Иркутск, 2018. С. 154–158.
32. *Carson M.A., Morris A.N.* Germination of *Panicum virgatum* cultivars in a NaCl gradient // *BIOS.* 2012. V. 83. № 3. P. 90–96.
33. *Bavi V., Shiran B., Arzani A.* Evaluation of salinity tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using ion accumulation, proline and peroxidase criteria // *Plant Growth Regul.* 2011. V. 64. P. 275–285.
34. *Friell J., Watkins E.* Review of cool-season turfgrasses for salt-affected roadsides in cold climates // *Crop Sci.* 2021. V. 61. P. 2893–2915.
35. *Кудоярова Г.Р., Дедов А.В., Фархутдинов Р.Г., Веселова С.В.* Передача сигналов и быстрая стрессовая реакция растений // *Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. Сер. Биол. Мат-лы выездной сессии ОФР РАН по проблемам биоэлектротрогенеза и адаптации у растений,* 11–12 окт. 2000 г. С. 83–85.
36. *Li P., Zhu Y., Song X., Song F.* Negative effects of long-term moderate salinity and short-term drought stress on the photosynthetic performance of Hybrid *Pennisetum* // *Plant Physiol. Biochem.* 2020. V. 155. P. 93–104.
37. *Белова Т.А., Кравченко А.С.* Физиологические основы адаптации растений к воздействию солевого стресса // *Auditorium.* 2018. № 1 (17). С. 42–48.
38. *Noreen Z., Zulfiqar Ali R., Saqib M.* Effect of salinity stress on various growth and physiological attributes of two contrasting *Maize* genotypes // *Brazil. Arch. Biol. Technol.* [online]. 2020. V. 63.
39. *Liu X., Fan Y., Mak M., Babla M., Holford P., Wang F., Chen G., Grace S., Gang W., Shabala S., Zhou M., Chen Z.* QTLs for stomatal and photosynthetic traits related to salinity tolerance in barley // *BMC Genomics.* 2017. V. 18. P. 9.
40. *Hassan I.* Interactive effects of salinity and ozone pollution on photosynthesis, stomatal conductance, growth, and assimilate partitioning of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Photosynthetica.* 2004. V. 42. P. 111–116.
41. *Таланова В.В., Минаева С.В., Солдатов С.Е., Титов А.Ф.* Раздельное и комбинированное действие засоления и закалывающих температур на растения // *Физиология растений.* 1993. Т. 40. № 4. С. 584–588.

Effect of Chloride Salinization on Barley Seedlings

K. B. Taskina^{a, #}, N. M. Kaznina^a, and A. F. Titov^a

^a*Institute of Biology of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
Pushkinskaya ul. 11, Petrozavodsk 185910, Russia*

[#]*E-mail: tasamayaksenia@gmail.com*

The influence of moderate and strong chloride salinity on seedlings of barley (*Hordeum vulgare* L.) Nur variety was studied under controlled environment conditions. Exposure of seedlings to both moderate (100 mM) and high concentrations (200 mM) of NaCl for 7 days led to a slowdown in the growth of their roots and shoots. At the same time, in the variant using NaCl in moderate concentration, an increase in the content of pigments was noted in the leaves of seedlings (chlorophylls and carotenoids by 25 and 22%, respectively). Also the photosynthesis rate decreased by 25% (relative to the control). In contrast, under the influence of a high concentration of NaCl, the content of pigments, as well as stomatal conductance, decreased markedly, which was accompanied by an almost twofold slowdown in the rate of photosynthesis. At the same time, transpiration was inhibited and tissue hydration decreased. It was concluded that the resistance of barley to NaCl can be judged already in the early phases of plant development. It is also noted that the most sensitive to the presence of NaCl in the root environment are easily recorded morpho-physiological indicators – the linear size of the shoot and its raw biomass.

Key words: barley (*Hordeum vulgare* L.), salinity, growth, water exchange, photosynthesis, stomatal conductivity, transpiration.