

Таким образом, показано, что в ионной форме медь и железо демонстрируют больший ингибирующий эффект на ростовые процессы у арабидопсиса по сравнению с наноформой данных металлов. Более того, низкие уровни НЧ оксидов металлов (10 мг/л для CuO-НЧ и 100-300 мг/л для Fe₃O₄-НЧ) оказывают стимулирующее действие на рост и архитектуру корня, что может иметь практическое значение для разработки нанодобавок (корнестимулирующих препаратов).

Работа выполнена в рамках задания ГПНИ (№ ГР 20211705).

Влияние засоления на интенсивность окислительных процессов и активность компонентов антиоксидантной системы в листьях пшеницы

Таскина К. Б.^{А*}, Игнатенко А. А.^А, Нилова И. А.^А, Казнина Н. М.^А

^А *Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”, Петрозаводск, Россия.*

**E-mail: tasamayaksenia@gmail.com*

Натрий-хлоридное засоление во многих регионах является основным фактором, лимитирующим рост и продуктивность сельскохозяйственных растений. Высокие концентрации соли в почве препятствуют поступлению воды и питательных веществ в растения, что приводит к водному дефициту и дисбалансу макро- и микроэлементов, и, как следствие, к осмотическому и ионному стрессу. Помимо этого, при засолении в клетках из-за резкого повышения уровня активных форм кислорода (АФК) развивается окислительный стресс, приводя к нарушению структуры и функций клеточных мембран. В защите клеток от избыточного количества АФК участвует антиоксидантная система (АОС), включающая антиоксидантные ферменты и неферментные соединения. Известно, что в условиях засоления активизируются компоненты АОС, что во многом зависит от концентрации соли в среде роста. Однако экспериментальных данных, подтверждающих это, относительно немного. Вследствие этого целью данной работы явилось сравнительное изучение влияния умеренного и сильного натрий-хлоридного засоления на интенсивность окислительных процессов и активность компонентов АОС в листьях пшеницы.

Исследования проводились в контролируемых условиях на проростках пшеницы (*Triticum aestivum* L.) ярового сорта Злата при температуре 22–25°C, влажности 60–70%, освещенности ФАР 100 мкмоль/(м² с) и 14-ти часовом фотопериоде. Контрольные растения выращивали на питательном растворе Хогланда-Арнона, в опытных вариантах к питательному

раствору добавляли NaCl в умеренной (100 мМ) и высокой концентрации (150 мМ). О реакции 7- суточных проростков на разные уровни засоления судили по изменению (по отношению к контролю) проницаемости мембран, интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ), активности основных антиоксидантных ферментов – супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ) и гваяколспецифической пероксидазы (ГвПО), содержанию пролина и каротиноидов. Все измерения проводили на первом листе. Выход электролитов измеряли с использованием кондуктометра ("HANNA", Италия) (Гришенкова, Лукаткин, 2005). Уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценивали по содержанию малонового диальдегида (МДА) (Stewart, Bewley, 1980). Активность СОД, КАТ, ГвПО определяли спектрофотометрически. Содержание белка анализировали методом Бредфорда (Bradford, 1976). Содержание свободного пролина определяли с помощью нингидринового реактива (Bates et al., 1973). Концентрацию каротиноидов определяли с использованием спектрофотометра СФ-2000 ("Спектр", Россия), экстрагируя 80%-м ацетоном (Шлык, 1971).

Проведенные исследования показали, что оба уровня засоления увеличивают проницаемость мембран клеток листа у проростков пшеницы. Так, при использовании NaCl в умеренной концентрации (100 мМ) проницаемость мембран возрастала на 38% по сравнению с контролем, а при высокой концентрации (150 мМ) – на 64% (рис. 1а). При этом наблюдалось заметное усиление интенсивности ПОЛ, о чем можно судить на основании повышения содержания МДА (почти в 2 раза по отношению к контрольным растениям при обеих изученных концентрациях) (рис. 1б). Полученные данные свидетельствуют о развитии окислительного стресса у проростков пшеницы в этих условиях.

Поскольку заметную роль в защите клеток от окислительного стресса играют антиоксидантные ферменты, нами была изучена активность СОД, КАТ и ГвПО в листьях пшеницы при разных уровнях засоления (табл. 1). Обнаружено, что при умеренном засолении общая активность СОД оказалась в 1.3 раза меньше, чем в контроле. При высокой концентрации соли активность этого фермента снизилась в еще большей степени (в 1.6 раз по отношению к контролю). При концентрациях NaCl 100 и 150 мМ наблюдалось также уменьшение (в 1.5 раза) активности ГвПО, тогда как активность КАТ в обоих вариантах опыта возрастала в 2 и 2.5 раза по отношению к контролю, соответственно.

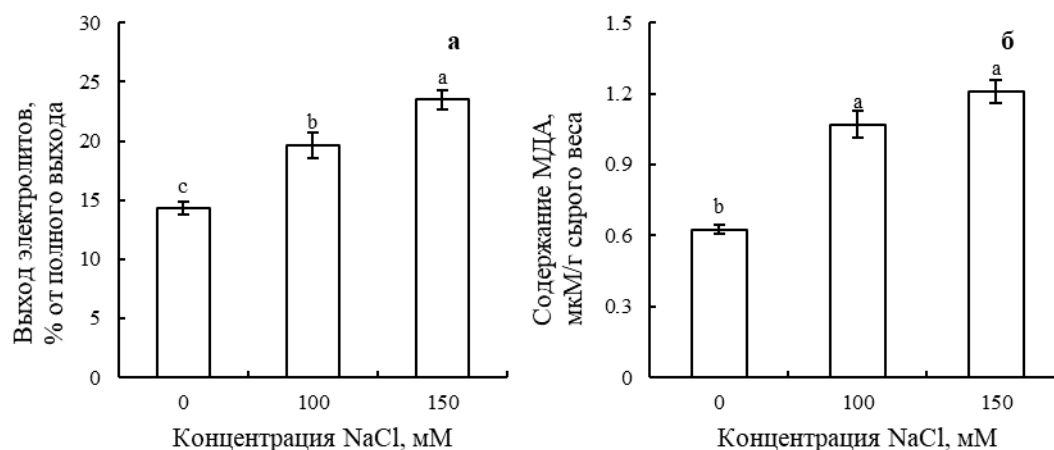


Рис. 1. Влияние засоления на выход электролитов (а) и содержание МДА (б) в листьях пшеницы сорта Злата. Разные латинские буквы означают достоверные различия показателя с контролем при $p < 0.05$

Неферментные компоненты АОС, в том числе пролин и каротиноиды, также вносят большой вклад в сохранение окислительно-восстановительного баланса клеток в стрессовых условиях. В наших опытах в условиях засоления наблюдалось значительное повышение содержания пролина, что во многом зависело от концентрации соли в среде роста. Так, при воздействии хлорида натрия в умеренной концентрации содержание пролина оказалось выше, чем в контроле в 3 раза, а при высокой концентрации соли – в 7 раз. Возрастало также содержание каротиноидов в 1.3 раза по сравнению с контролем в условиях умеренного засоления и в 1.5 раза – в условиях сильного засоления.

Таблица 1

Влияние засоления на активность антиоксидантных ферментов в листьях пшеницы с. Злата

Показатели	Варианты опыта				
	контроль	100 mM NaCl	% к контр	150 mM NaCl	% к конт.
Активность СОД, у.е. активности/ мг белка	0.359±0.039 ^a	0.276±0.023 ^a	23	0.223±0.020 ^b	38
Активность КАТ, мкмоль Н ₂ О ₂ /(мг белка·мин)	178.8±7.75 ^c	380.5±13.5 ^b	213	440.5±18.5 ^a	246
Активность ГвПО, мкмоль тетраГв/ (мг белка·мин)	0.146±0.011 ^a	0.098±0.003 ^b	67	0.101±0.006 ^b	68

Примечание. Здесь и в табл. 2 разные латинские буквы означают достоверные различия показателя с контролем при $p < 0.05$.

Таблица 2

Влияние засоления на содержание пролина и каротиноидов в листьях пшеницы с. Злата

Показатели	Варианты опыта				
	контроль	100 мМ NaCl	% к контролю	150 мМ NaCl	% к контролю
Содержание свободного пролина, мкМ/г сырого веса	1.50±0.24 ^c	4.56±0.74 ^b	304	10.83±0.58 ^a	720
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы	0.236±0.022 ^c	0.319±0.005 ^b	136	0.360±0.010 ^a	153

Таким образом, проведенные исследования показали, что хлорид натрия в умеренной (100 мМ) и высокой (150 мМ) концентрациях приводит к усилению интенсивности ПОЛ и повышению проницаемости мембран в листьях пшеницы. Защиту клеток от окислительного стресса в этих условиях обеспечивают неферментные соединения, такие как пролин и каротиноиды, содержание которых резко возрастало при засолении, причем в соответствии с концентрационной зависимостью. Увеличения активности СОД и ГвПО не происходило, однако повышалась активность КАТ, что указывает на ее участие в поддержании окислительно-восстановительного баланса клеток в условиях засоления.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0004).

Библиографические ссылки

1. Гришенкова Н. Н., Лукаткин А. С. Определение устойчивости растительных тканей к абиотическим стрессам с использованием кондуктометрического метода // Поволжский экологический журнал. 2005. № 1. С. 3–11.
2. Stewart R. R. C., Bewley J. D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes // Plant Physiol. 1980. Vol. 65. P. 245–248.
3. Bradford M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Anal. Biochem. 1976. Vol. 72. P. 248–254.
4. Bates L. S., Waldren R. P., Teare I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies // Plant and Soil. 1973. Vol. 39, no. 1. P. 205–207.
5. Шлык А. А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биологические методы в физиологии растений. М.: Наука, 1971. С. 154–170.