

корреляции активностей ПОД и ПФО, при этом, показывает возрастание субстратной нагрузки на АФК. Впервые отмечено, что возрастание содержания супероксидного радикала под контролем транскрипционного фактора *UPBEAT1* лежит в основе снижения дифференциации структурных элементов на фоне высокой пролиферации и образовании слабо дифференцированных паренхимных клеток у узорчатой карельской березы, а возрастание содержания перекиси водорода – в основе более интенсивных процессов дифференциации у безузорчатых растений.

Такая метаболическая картина подтверждает смещение у карельской березы ксилогенеза в сторону процессов пролиферации, которые сопровождаются с двух сторон потоком АФК и фенольных соединений, вовлекая в интенсивную работу ферменты АОС и вторичного метаболизма, и, соответственно, формируя диагностическое содержание изучаемого спектра метаболитов, которое может характеризовать тот или иной путь ксилогенеза. Отметим, что описанные метаболические схемы впервые рассмотрены в комплексе на древесном растении, карельской березе – уникальном модельном объекте – при отклонениях в развитии латеральных меристем.

Работа выполнена за счет средств федерального бюджета по государственному заданию Института леса Карельского научного центра Российской академии наук и гранта РНФ 22-74-00133. Исследования выполнены на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Влияние конъюгатов хитозана и оксикоричных кислот на активность антиоксидантных ферментов в проростках ячменя в оптимальных условиях развития и при кратковременном воздействии натрий-хлоридного засоления

**Овчинников И. А.^{А*}, Калацкая Ж. Н.^А, Герасимович К. М.^А,
Рыбинская Е. И.^А, Николайчук В. В.^Б, Гилевская К. С.^Б**

^А Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси г. Минск, Беларусь.

*E-mail: igor-1606@mail.ru

^Б Институт химии новых материалов НАН Беларуси г. Минск, Беларусь

Дефицит влаги, засоленность почв негативно влияют на рост и урожайность растений, вызывая молекулярные, биохимические, физиологические и морфологические изменения, нарушающие рост и развитие растений [1, 2]. Большая часть повреждений в условиях разных стрессовых воздействий чаще всего обусловлена усиленной продукцией активных

фирм кислорода (АФК). АФК образуются и в процессе нормального клеточного метаболизма, но соотношение между продукцией АФК и их элиминацией в стрессовых условиях нарушается. Избыток АФК приводит к быстрой инактивации ферментов в клетках растений, вызывает перекисное окисление липидов, ингибирует синтез ДНК и белков, повреждает нуклеиновые кислоты, разрушает мембраны и в конечном итоге приводит к гибели клеток [3].

Целью данной работы является изучение роста и развития проростков ячменя при обработке семян ячменя конъюгированными формами хитозана с оксикоричными кислотами в условиях солевого стресса.

Семена обрабатывали путем механического перемешивания в растворах конъюгатов хитозана с оксикоричными кислотами в объеме 400 мкл на 20 г семян до равномерного распределения раствора по поверхности. Контролем служили необработанные семена. Растения выращивали рулонным способом до 10-дневного возраста. Для создания солевого стресса рулоны с 5-дневными проростками помещали в 4 %-ный раствор хлорида натрия на 24 ч, а затем переносили в воду. В благоприятных условиях (оптимальные условия) растения весь период выращивали на дистиллированной воде. Биометрические и биохимические параметры оценивали на 6-е сутки (стрессовые условия) и на 10-е сутки (постстрессовый период). Конъюгаты хитозана с феруловой и кофейной кислотой (Х30-ФРК и Х30-КФК) получали карбодиимидным методом с предварительной активацией карбоксильных групп. Активность супероксиддисмутазы определяли методом [4], активность пероксидазы определяли по методу [5], содержание перекиси водорода оценивали по методу [6], содержание малонового диальдегида определяли методом [7], количественное определение белка определяли согласно методике [8]. Статистическую обработку результатов осуществляли с применением общепринятых методик [9].

Отмечено замедление роста у 6-ти дневных проростков ячменя в варианте обработки Х30-КФК в оптимальных условиях развития. Рост и развитие проростков ячменя в варианте обработки Х30-ФРК в оптимальных условиях развития не отличался от контроля. Действие 4%-ного раствора NaCl в течение 24 часов приводило к замедлению роста и развития корней, однако рост листьев сохранялся на уровне контрольного варианта. Не отмечено существенных различий между вариантом Х30-ФРК и контролем, в то время как рост проростков из варианта Х30-КФК ингибировался относительно стрессового контроля в среднем на 10%. В постстрессовый период отмечалось увеличение длины и массы корней у 10-ти дневных проростков в варианте обработки Х30-КФК. Морфометрические показатели в варианте Х30-ФРК были на уровне постстрессового контроля.

Активность СОД и ПО в листьях проростков ячменя при обработках конъюгатами снижалась в среднем на 35% и 30% соответственно относительно контроля на 6-е сутки в оптимальных условиях выращивания, а в корнях, напротив, значительно возрастала, особенно при действии Х30-КФК. Содержание перекиси водорода в листьях и корнях значительно не изменялось при обработке конъюгатами, снизилось содержание МДА на 25% в листьях при обработке Х30-КФК и в корнях на 25% при обработке Х30-ФРК.

Воздействие хлорида натрия привело к снижению активности СОД на 28% относительно бесстрессового контроля в листьях, а ПО оставался на уровне бесстрессового контроля в листьях, наблюдали тенденцию к уменьшению содержания перекиси водорода и МДА. Активность антиоксидантных ферментов значительно повысилась в корнях, а также отмечено снижение содержания перекиси водорода и МДА. В опытных вариантах в условиях стресса не наблюдалось достоверно значимых изменений активности СОД в листьях и разнонаправленное действие ПО – увеличение при обработке Х30-ФРК и снижение вследствие применения Х30-КФК. Содержание МДА в листьях снижалось при обработке Х30-КФК. Однако ферментативная активность ПО и СОД существенно возросла в корнях проростков, при этом не выявлено существенных изменений в содержании перекиси водорода, содержание МДА снизилось в опытном варианте Х30-ФРК.

На 10-е сутки наблюдалось снижение активности СОД, активность ПО не изменялась в листьях проростков из контрольного варианта, не зарегистрировано статистически значимых отличий в содержании перекиси водорода и продуктов ПОЛ в оптимальных условиях выращивания. Однако выявлены существенное увеличение активности ферментов и снижение H_2O_2 и продуктов ПОЛ в корнях растений в оптимальных условиях выращивания.

На 10-е сутки не отмечено влияния обработок на активность антиоксидантных ферментов, зарегистрировано снижение содержания МДА в случае применения Х30-ФРК в листьях растений. В корнях выявлено существенное снижение ПО, другие измеряемые показатели не отличались от контроля. В постстрессовый период в листьях 10-дневных контрольных проростков снижалась активность ПО, а в корнях активность ферментов была существенно выше, чем в условиях стресса. Содержание перекиси и МДА в листьях не отличалось от контроля, а в корнях отмечено снижение значений данных показателей. При этом обработка Х30-КФК повышала активность ПО в листьях, содержание перекиси водорода и продуктов ПОЛ в листьях не изменялись по сравнению с соответствующим контро-

лем. В корнях в постстрессовый период под воздействием конъюгатов активность СОД и ПО значительно ингибировалась, здесь же отмечено и уменьшение содержания перекиси водорода.

На основании полученных данных можно полагать, что увеличение активности антиоксидантных ферментов в корнях под воздействием конъюгатов оксикоричных кислот способствует последующей эффективной адаптации проростков ячменя в период кратковременного солевого воздействия. У проростков ячменя из вариантов с обработкой ХЗ0-ФРК или ХЗ0-КФК при кратковременном действии засоления окислительный стресс развивается слабее, что обеспечивается интенсивным предотвращением избыточной генерации АФК и как следствие в постстрессовый период низкими уровнями содержания перекиси водорода и активности антиоксидантных ферментов в корнях проростков.

Библиографические ссылки

1. Wang W., Vinocur B., Altman A. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*. 218, 1–14.
2. Mohanpuria P., Rana N.K., Yadav S.K. 2007. Cadmium induced oxidative stress influence on glutathione metabolic genes of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Environ. Toxicol.* 22, 368–374.
3. Sharma P., Jha A.B., Dubey R.S., Pessarakli M. 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *J. Botany*. 2012, 1–26.
4. Полесская, О. Г. Определение активности супероксиддисмутазы / О. Г. Полесская // Методы определения редокс-статуса культивируемых клеток растений / Г. В. Сигбатулина [и др.]. – под ред. Н. И. Румянцев – Казань, 2011. – С. 15–17.
5. Бояркин, А. Н. Определение активности пероксидазы / А. Н. Бояркин // Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермиков [и др.]. – Ленинград, 1987. – 3-е изд. – С. 41–43.
6. Bellincampi, D. Extracellular H₂O₂ induced by oligogalacturonides is not involved in the inhibition of the auxin-regulated rolB gene expression in tobacco leaf explants / D. Bellincampi [et al.] // *Plant Physiology*. – 2000. – Vol. 122. – P. 1379–1385.
7. Kumar, G. N. M. Changes in lipid peroxidation and lipolytic and free radical scavenging enzyme activities during aging and sprouting of potato (*Solanum tuberosum*) seed-tubers / G. N. M. Kumar, N. R. Knowles // *Plant. Physiol.* – 1993. – V. 102. – P. 115–124.
8. Bradford, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein–dye binding / M. M. Bradford // *Analytical Biochemistry* – 1976. – V. 72, № 1–2. – P. 248–254.
9. Grantz S.A. *Primer of Biostatistics* / S.A. Grantz. – New York: McGraw-Hill, 2011. – 320 p.