

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ ЦЕОЛИТА НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО СТРЕССА У РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ КАДМИЯ

*Балахнина Т.И., кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
ИФПБ РАН, Пущино, Московская обл., Россия,
e-mail:tbalakhnina@rambler.ru*

Ключевые слова: цеолит, кадмий, биомасса, окислительный стресс, ячмень

*Добавление кремнием обогащенного минерала цеолита в субстрат для выращивания растений ячменя *Hordeum vulgare L.*, сорт. Bartom приводило к накоплению моно- и поликремниевой кислоты в листьях, стимулировало метаболические процессы и повышало устойчивость растений к воздействию кадмия на ранних стадиях развития стресса через сдвиг в динамическом равновесии между интенсивностью окислительных процессов и активностью антиоксидантных ферментов, в пользу последних.*

Введение. Важная роль кремния (Si) в улучшении роста, развития и повышении устойчивости растений к биотическим и абиотическим стрессам для многих видов растений уже показана авторами [1,2,3,4]. Стимулирование антиоксидантной системы растений и формирование комплексов, между ионами токсичных металлов и кремниевыми соединениями являются наиболее важными механизмами, которые могут объяснить положительное влияние активного Si на растения при действии тяжелых металлов [5,6,4]. Внесение активных форм кремния в почву снижало интенсивность деструктивных процессов в растениях при почвенном затоплении [7].

Целью данной работы было показать позитивное влияние обогащенного кремнием минерала цеолита на рост и развитие растений ячменя *Hordeum vulgare L.*, сорт. Bartom, а также на их устойчивость в условиях развития окислительного стресса, индуцированного кадмием.

Материалы и методы исследований. Часть хорошо пророщенных семян ячменя (*Hordeum vulgare L.*) сорт. Bartom высевали в горшки, заполненные кокосовой стружкой и цеолитом 50:50 (v:v). Другая группа семян была посеяна в горшки с кокосовой стружкой, сбалансированной

по составу и концентрации минеральных веществ, но без цеолита. Цеолит представляет собой плотные гранулы светло-серого цвета, содержащие: SiO_2 - 69,0 - 74,0%, TiO_2 - 0,08 - 0,16%, Al_2O_3 - 11,4 - 14,0%, Fe_2O_3 - 0,60 - 1,8%, MnO - 0,02 - 0,05, CaO - 1,7 - 3,3%, MgO - 0,4 - 1,7%, K_2O - 0,5 - 5%, Na_2O - 0,4 - 0,9%, P_2O_5 - 0,4, рН 6,5. Поскольку основным компонентом цеолита является кремний (до 74%), растения, выращенные на субстрате, содержащем цеолит, мы назвали (+Si), без цеолита – (-Si).

Через 2 недели роста в листьях (+Si) и (-Si)-растений определяли содержание растворимого Si. Для оценки реакции растений на действие кадмия 2-х недельные (+Si) и (-Si)-проростки, помещали в 500-мл сосуды с дистиллированной водой (Cd 0 мкмоль) или водными растворами (450 или 1000 мкмоль) $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, рН 6,5.

Физиологические состояние растений оценивали по интенсивности ростовых процессов, накоплению биомассы, содержанию пластидных пигментов и скорости фотосинтеза. Адаптационный потенциал растений – по интенсивности окислительных процессов, тестируемых по содержанию продуктов, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБКРп), и по активности антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы (СОД), аскорбатпероксидазы (АсП), глутатионредуктазы (ГР) и гваякол пероксидазы (ГПХ) в листьях через 2 и 24 ч экспозиции 2-х недельные проростков в водных растворах $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$.

Результаты и обсуждение. Анализ состава элементов цитоплазмы растительной ткани показал, что концентрация Si была значительно увеличена в листьях растений, выращенных на субстрате с цеолитом.

Через 2 недели роста растений, концентрации моно- и поликремниевой кислоты у (+ Si)-растений были на 30% и 41% выше, чем у (-Si)-растений, соответственно. Добавление цеолита к субстрату стимулировало рост проростков. Биомасса побегов и корней (+Si)-растений достигала 143% и 136%, а высота побегов и длина корней возрастали до 158% и 168%, соответственно, относительно тех же параметров у (-Si)-растений.

Концентрация хлорофилла ($\text{Хл}(a+b)$) в листьях двухнедельных (-Si) – и (+Si)-растений существенно не отличалась и составляла 2,62 и 2,54 мг г^{-1} сыр. м., соответственно. Через 24ч кадмиевого стресса, концентрация пигментов в листьях (+Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений снизилась на 27%, а в листьях (-Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений – на 35%. В случае воздействия 450 мкмоль Cd, уменьшение концентрации $\text{Хл}(a+b)$ в листьях было менее выраженным.

Интенсивность фотосинтеза в листьях (+Si) – и (-Si)-растений была без достоверной разницы. Cd подавлял фотосинтез. В частности, в ли-

стях (-Si;+Cd 450 мкмоль) и (-Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений скорость фотосинтеза снизилась на 30% и 43% через 2 часа и на 35% и 55% через 24 ч эксперимента, соответственно. Снижение фотосинтеза у (+Si;+Cd 450 мкмоль) – и (+Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений было менее выраженным, и составляло около 17% и 34% через 2 часа и 27% и 42% через 24 ч Cd стресса, соответственно, по сравнению с (+Si)-вариантами.

Интенсивности процессов окислительной деструкции в листьях двухнедельных (+Si) – и (-Si)-растений была без достоверной разницы (Табл. 1) Через 2 часа Cd стресса содержание ТБКРп у (-Si;+Cd 450мкмоль)- и (-Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений возросло на 6% и 23%, соответственно, по сравнению с (-Si)-растениями. Через 24 часа Cd стресса, содержание ТБКРп в листьях этих растений увеличилась еще на 12% и 36%, соответственно (данные не показаны). При этом у (+Si;+Cd 450мкмоль)- и (+Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений через 2 часа Cd стресса содержание ТБКРп было ниже, чем у (+ Si)-растений на 21% и 19%, соответственно (Табл. 1), и оставались на том же уровне через 24 часа стресса.

Активность супероксиддисмутазы (СОД) в листьях (-Si)-растений была значительно ниже, чем у (+Si)-растений (Табл.1). Через 2 ч воздействия Cd (NO_3)₂, активность фермента в листьях (-Si;+Cd 450 мкмоль) – и (-Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений возросла до 167% и 200%, соответственно, по отношению к (-Si)-вариантам (Табл.1). Через 24 ч эксперимента активность СОД у этих растений несколько снизилась и составила только 117% и 172%, соответственно (данные не показаны). Следует заметить, активность СОД у (+Si)-растений, будучи первоначально выше, чем у (-Si)-варианта (Табл.1), в ответ на развитие кадмием индуцированного стресса возросла меньше.

Активность АСП в листьях двухнедельных (+Si)-растений составляла около 8.6 мкмоль г⁻¹ сыр.м. мин⁻¹ и была на 25% выше, чем у (-Si)-растений (Табл.1). Под влиянием Cd, активность АСП увеличилась, и природ активности фермента зависел от дозы стрессора (Табл.1).

ГР активность в листьях двухнедельных (-Si) – и (+Si)-растений была примерно одинаковой и составляла 0.79 и 0.77 мкмоль/ г⁻¹сыр. м./мин⁻¹, соответственно (Табл.1). У (-Si;+Cd 450 мкмоль) – и (-Si;+Cd 1000 мкмоль)-растений через 2 ч стресса развития Cd индуцированного стресса активность ГР увеличилась на 22% и 30%, соответственно (Табл.1).

Активность ГПХ (+Si)-варианта оказалась на 44% выше, чем у (-Si)-растений (Табл.1). Через 2 ч стресса у (-Si+Cd 450 мкмоль) – и (- Si;+Cd

Таблица 1 — Влияние цеолита на содержание продуктов, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБКРп), активность супероксиддисмутазы (СОД), аскорбатпероксидазы (АсП), глутатионредуктазы (ГР) и гваяколпероксидазы (ГПХ) в листьях проростков ячменя, подвергнутых воздействию 450 мкМ и 1000 мкМ водного раствора $Cd(NO_3)_2$ в течение 2 часов (n = 3).

Вариант	ТБКРп нмоль/г с. м (%)	СОД, ед/г сыр м (%)	АсП, мкмоль/г сыр м/мин (%)	ГР, мкмол /г сыр м/ мин (%)	ГПХ, мкмоль/г сыр м/мин (%)
(-Si)	625 ±35.2 (100)	75 ±3.9 (100)	6.9 ±0.4 (100)	0.79 ±0.05 (100)	18.0±0.9 (100)
(-Si)+Cd 450 мкмоль	663.5±33.1 (106)	125 ±7.3 (167)	8.6 ±0.5 (125)	0.96 ±0.06 (122)	20.0±0.8 (110)
(-Si)+Cd 1000 мкмоль	769.5±34.5 (123)	150 ±9.3 (200)	15.0±0.7 (218)	1.03±0.06 (130)	22.0±1.2 (120)
(+Si)	556.6±23.1 (100)	120 ±7.4 (100)	8.6±0.4 (100)	0.77 ±0.04 (100)	26.0±1.3 (100)
(+Si)+Cd 450 мкмоль	437.8±28.8 (79)	127 ±3.6 (106)	11.2±0.6 (130)	0.93 ±0.05 (121)	27.0±1.5 (104)
(+Si)+Cd 1000 мкмоль	450.3±20.1 (81)	160 ±10.4 (133)	12.0±0.58 (140)	0.93±0.05 (121)	26.0±1.4 (100)

1000 мкмоль)-растений наблюдали возрастание активности фермента на 10 и 20%, соответственно. Увеличение активности ГПХ у образцов (+Si)+Cd 450 мкмоль) – и (+Si)+Cd 1000 мкмоль)-растений, относительно контроля, было выражено в меньшей степени (Табл.1).

Для того чтобы рассмотреть развитие стресс реализующей системы у (-Si+Cd)- и (+Si+Cd)-растений, мы рассчитали коэффициенты соотношений между концентрацией ТБКРп и активностью СОД, АсП и ГП. Установлено, что соотношение между содержанием ТБКРп и активностью каждой из тестируемых антиоксидантных ферментов были ниже у (+Si)-растений по сравнению с (-Si)-растениями. При развитии Cd индуцированного стресса эти значения увеличивались с увеличением дозы действующего стрессора, особенно у (-Si)-растений. Другими словами, (+Si)-растения обладают более высоким адаптационным потенциалом.

Заключение. Таким образом, добавление цеолита в субстрат для выращивания растений ячменя (+Si) привело к накоплению моно- и поликремниевой кислоты в листьях, активации роста проростков и накоплению биомассы, снижению содержания ТБКРп, и повышению активности антиоксидантных ферментов СОД, АсП и ГП. Последствия негативного воздействия Cd^{2+} , которые были отражены в снижении концентрации хлорофилла и скорости фотосинтеза, а также в повышении концентрации ТБКРп у (-Si)-растений были выражены в большей степени, чем у (+Si)-растений. Активность СОД, АсП и ГП увеличивалась в листьях ячменя (-Si) – и (+Si)-растений с увеличением концентрации Cd^{2+} в действующем растворе. В то же время значения соотношений между концентрациями ТБКРп и активностью СОД, АсП и ГП у (-Si)-растений были выше, чем у (+Si)-растений, как в оптимальных условиях произрастания, так и при Cd стрессе

Сделан вывод, что использование кремнием обогащенного минерала цеолита для выращивания растений ячменя стимулирует процесс роста и повышает устойчивость растений к кадмию на ранних стадиях развития стресса через сдвиг в динамическом равновесии между интенсивностью окислительных процессов и активностью антиоксидантных ферментов, в пользу последних.

Библиографический список:

1. Epstein E. Silicon // Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 1999. № 50. P. 641–664.
2. Ma J.F., Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier, Amsterdam, 2002. P. 275
3. Ma J.F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses // Soil Sci Plant Nutr. 2004. № 50. P. 11–18.
4. Balakhnina T., Borkowska A. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review // Int Agrophys. 2013. № 27. P. 225–232.
5. Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron / A. Gunes, A. Inal, E. Bagci, S. Coban, O. Sahin // Biol Plant. 2007. № 51. P. 571–574.
6. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages / H.J. Gong, K.M. Chen, Z.G. Zhao, G.C. Chen, W.J. Zhou // Biol Plant. 2008. № 52. P. 592–596.
7. Effects of silicon on growth processes and adaptive potential of barley plants under optimal soil watering and flooding / T.I. Balakhnina, V.V. Ma-

tichenkov, T. Włodarczyk, A. Borkowska, M. Nosalewicz, I.R. Fomina // Plant Growth Regul. 2012. № 67. P. 35–43.

INFLUENCE OF ZEOLITE ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF OXIDATIVE STRESS IN BARLEY PLANTS UNDER THE ACTION OF CADMIUM

Balakhnina T.I.

Key words: Zeolite, cadmium, biomass, oxidative stress, barley

*Adding of silicon enriched mineral zeolite to the substrate for growing plants of barley *Hordeum vulgare* L., cv. Bartom led to the accumulation of mono- and polysilicic acid in the leaves, stimulated metabolic processes and increased plant resistance to the effects of cadmium in the early stages of stress development through a shift in the dynamic balance between the intensity of oxidative processes and the activity of antioxidant enzymes, in favor of the latter.*