

УДК 581.1

## ОБРАБОТКА СЕМЯН САЛИЦИЛОВОЙ КИСЛОТОЙ УСИЛИВАЕТ ЭКСПРЕССИЮ ГЕНОВ И АКТИВНОСТЬ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ ПРИ ДЕФИЦИТЕ ЦИНКА ИЛИ МЕДИ

© 2024 г. Н. М. Казнина\*, Н. С. Репкина, Ю. В. Батова, А. А. Игнатенко, член-корреспондент РАН А. Ф. Титов

Поступило 15.12.2023 г.

После доработки 30.12.2023 г.

Принято к публикации 02.01.2024 г.

Изучали влияние обработки салициловой кислотой (СК) семян пшеницы на уровень экспрессии генов *TaCu/ZnSOD*, *TaFeSOD* и *TaCAT2* и активность антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы (КАТ)) в листьях при оптимальном содержании цинка (2 мкМ) и меди (0.3 мкМ) в корнеобитаемой среде или их недостатке. Впервые показано, что обработка СК семян приводит к повышению по сравнению с необработанными растениями количества транскриптов изученных генов, причем как в оптимальных условиях минерального питания, так и при дефиците цинка или меди. При этом также возрастает активность ферментов, особенно каталазы. Судя по содержанию МДА, это позволяет избежать усиления интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) и, соответственно, развития окислительного стресса. Сделан вывод, что обнаруженный положительный эффект обработки семян СК на активность основных ферментов антиоксидантной защиты может лежать в основе стимулирующего действия данного фитогормона на физиологические процессы у растений, испытывающих дефицит микроэлементов.

*Ключевые слова:* *Triticum aestivum* L., фитогормоны, цинк, медь, супероксиддисмутаза, каталаза, экспрессия генов, активность ферментов.

DOI: 10.31857/S2686738924020154, EDN: WEMONE

Микроэлементы, несмотря на их очень небольшое содержание в растительных клетках, крайне необходимы для нормальной жизнедеятельности растений и успешного протекания физиолого-биохимических процессов. Цинк и медь являются одними из наиболее важных среди них. Так, цинк входит в состав или служит кофактором более 300 ферментов, таких как Cu/Zn-супероксиддисмутаза, карбоангидраза, алкогольдегидрогеназа, РНК-полимераза; участвует в белок-белковом взаимодействии; является необходимым элементом домена «цинковый палец», входящего в состав многих факторов транскрипции, необходим для синтеза ауксина [1, 2]. Важная роль меди в жизнедеятельности растений обусловлена ее участием в окислительно-восстановительных реакциях клетки, в том числе в

нейтрализации активных форм кислорода [3]. Кроме того, выявлено ее участие в работе более чем 100 ферментов, включая Cu/Zn-супероксиддисмутаза, оксидоредуктазу, цитохром- и полифенолоксидазу, в транспорте белков, метаболизме клеточной стенки, переносе электронов в дыхательной и фотосинтетической электрон-транспортных цепях и передаче гормонального сигнала [4, 5]. Важную роль этот микроэлемент играет также в углеводном и белковом обмене, энергетическом и азотном метаболизме [6].

Вследствие большого числа функций, которые цинк и медь выполняют в растениях, их дефицит вызывает многочисленные негативные изменения в физиологических процессах, среди которых — нарушение проницаемости клеточных мембран, транспорта воды и элементов минерального питания, замедление фотосинтеза и дыхания, торможение деления и растяжения клеток и др. [5, 7].

Известно, что с целью увеличения стрессоустойчивости растений и повышения их продуктивности

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

\*E-mail: kaznina@krc.karelia.ru

в неблагоприятных условиях внешней среды используют обработку растений или семян различными регуляторами роста, в том числе фитогормонами. Салициловая кислота (СК, 2-гидроксibenзойная кислота) – фенольное соединение, сочетающее в себе свойства фитогормона и сигнальной молекулы [8]. Подобно другим фитогормонам, она регулирует многие физиологические процессы, такие, например, как рост, развитие, цветение, закрытие устьиц, фотосинтез, транспирация, транспорт ионов и др. [9]. Как сигнальная молекула СК индуцирует активность антиоксидантных ферментов, участвует в путях передачи сигналов, регулирующих физиологические процессы [10]. Кроме того, обнаружена важная роль СК в адаптации растений к ряду абиотических стресс-факторов, включая засоление, низкие и высокие температуры, высокие концентрации тяжелых металлов, УФ-излучение [11, 12]. Что касается возможности использования СК в качестве адаптогена для повышения устойчивости растений к дефициту микроэлементов, то таких данных практически нет.

Вместе с тем ранее нами было обнаружено, что у растений ячменя и пшеницы после обработки их семян СК в условиях недостатка цинка или меди в субстрате сохраняется высокий уровень фотосинтеза и водного обмена, что положительно сказывалось на накоплении ими биомассы [13]. Поскольку устойчивость растений к стресс-факторам во многом зависит от способности клеток поддерживать на определенном уровне окислительно-восстановительный баланс, можно предположить участие СК в регуляции работы компонентов антиоксидантной системы, обеспечивающих защиту клеток растений от окислительного стресса и при дефиците микроэлементов.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы было изучение влияния обработки СК семян пшеницы на экспрессию генов и активность ключевых антиоксидантных ферментов в листьях растений, испытывающих дефицит цинка или меди.

Исследования проводили на растениях пшеницы (*Triticum aestivum L.*) сорта Злата. Семена были предоставлены ФГБНУ “Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”. Часть семян проращивали в течение 3 сут на дистиллированной воде (вариант СК0), другую часть – в течение первых суток выдерживали на растворе СК (10 мкМ), затем отмывали и продолжали проращивать на дистиллированной воде (вариант СК). Концентрация СК и продолжительность обработки были выбраны на основании предварительных опытов. Спустя 3 сут проростки обоих вариантов высаживали в контейнеры (объемом 0.86 л) с предварительно отмытым от примесей и прокаленным песком. Полив растений осуществляли питательным раствором Хогланда – Арнона с оптимальным содержанием цинка (2 мкМ) и меди (0.3 мкМ) (вариант Zn+,Cu+), недостатком цинка (вариант Zn–) или недостатком меди (вариант Cu–). Растения выращивали в камере искусственного климата при температуре 22 °С, относительной влажности воздуха 60–70%, ФАР 180 мкмоль/(м<sup>2</sup>с) и 14-часовом фотопериоде в течение 30 сут. После чего в их листьях определяли количество транскриптов генов *TaCu/ZnSOD2*, *TaFeSOD* и *TaCAT*, общую активность супероксиддисмутазы (СОД) и активность каталазы (КАТ), а также интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ).

Накопление транскриптов генов анализировали методом полимеразной цепной реакции в режиме реального времени (ПЦР-РВ) на амплификаторе CFX96 Real-Time System (“Био-Рад”, США). Листья растирали в жидком азоте. Тотальную РНК выделяли с помощью набора ExtractRNA “Евроген” (Россия). Количество и качество тотальной РНК проверяли спектрофотометрически с использованием прибора NanoPhotometer IMPLN (Германия) по соотношению длин волн 260/280 и с помощью электрофореза в 1%-ном агарозном геле. Для удаления остатков ДНК препарат РНК обрабатывали ДНКазой “Евроген” (Россия), кДНК синтезировали, используя набор для обратной транскрипции

**Таблица 1.** Праймеры для проведения ПЦР-РВ

Ген	Прямой (F) и обратный (R) праймер	Нуклеотидная последовательность праймера 5'...3'	Номер в базе данных NCBI
<i>Actin</i>	F R	GGG ACC TCACGGATAATCTAATG AACCTCCACTGAGAACAACATTAC	AB181991
<i>Cu/ZnSOD2</i>	F R	CACGGCTTCCACATCCAC TGTCGTTTCATCATCCATCGG	KP322572
<i>FeSOD</i>	F R	GGGTCTGGTTGGGTTTG TCGCCTGTTCATCCTTGTAATC	JX398977
<i>CAT</i>	F R	TGATACCCAAAGGCACCG GCAGCCAGATAGAACACC	X94352

с M-MLV обратной транскриптазой и случайными (random) гексапраймерами “Евроген” (Россия). В качестве референсного гена использовали актин. Количество и качество синтезированной кДНК проверяли спектрофотометрически на приборе NanoPhotometer IMPLN (Германия). Специфичность продуктов амплификации проверяли плавлением ПЦР фрагментов. Эффективность ПЦР, оцениваемая по стандартной кривой, достигала 98%. Содержание транскриптов гена высчитали по формуле  $2^{-\Delta\Delta Ct}$  и выражали в относительных единицах [14]. Праймеры, использованные для проведения ПЦР в режиме реального времени, представлены ниже (табл. 1).

Для определения активности СОД (КФ 1.15.1.1.) и КАТ (КФ 1.11.1.6.) листья гомогенизировали в 0.1 М фосфатном буфере (рН 7.8). Гомогенат центрифугировали при 14 000 g в течение 20 мин при 4°C, полученный супернатант использовали для определения содержания белка и активности ферментов спектрофотометрическим методом. Активность СОД определяли по способности ингибировать фотохимическое восстановление нитросинего тетразолия. Оптическую плотность раствора измеряли при 560 нм. За единицу активности принимали количество фермента, вызывающее 50%-ное ингибирование реакции. Для определения активности каталазы использовали спектрофотометрический метод. Скорость разложения  $H_2O_2$  определяли, регистрируя изменение оптической плотности

раствора при длине волны 240 нм в течение 1 мин. Реакционная среда содержала 40 мМ раствор  $H_2O_2$  в 0.1М К/Na- фосфатном буфере (рН 7.0). Реакцию запускали добавлением 60 мкл супернатанта. Активность ферментов рассчитывали на 1 мг белка. Общее содержание белка определяли по методу Бредфорда, используя в качестве стандарта бычий сывороточный альбумин.

Об интенсивности ПОЛ судили по содержанию малонового диальдегида (МДА), которое определяли с использованием реакционной среды, содержащей 0.25%-ный раствор тиобарбитуровой кислоты в 10%-ной трихлоруксусной кислоте на спектрофотометре СФ-2000 («Спектр», Россия) при 532 и 600 нм. Для расчета содержания МДА использовали коэффициент экстинкции, равный  $155 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ .

Биологическая повторность составляла 3–5 растений в зависимости от показателя, аналитическая повторность – 3-кратная. Весь опыт повторяли дважды. На рисунках и в таблицах приведены средние значения и их стандартные ошибки. Статистическую обработку данных осуществляли с помощью программ Microsoft Excel 2007 и PAST 4.0. Статистически значимо различающиеся величины каждого изученного показателя (при  $p < 0.05$ ) обозначены разными латинскими буквами.

В ходе исследований установлено, что у растений пшеницы, чьи семена не были обработаны СК (вариант СК0), недостаток цинка (Zn-) и меди

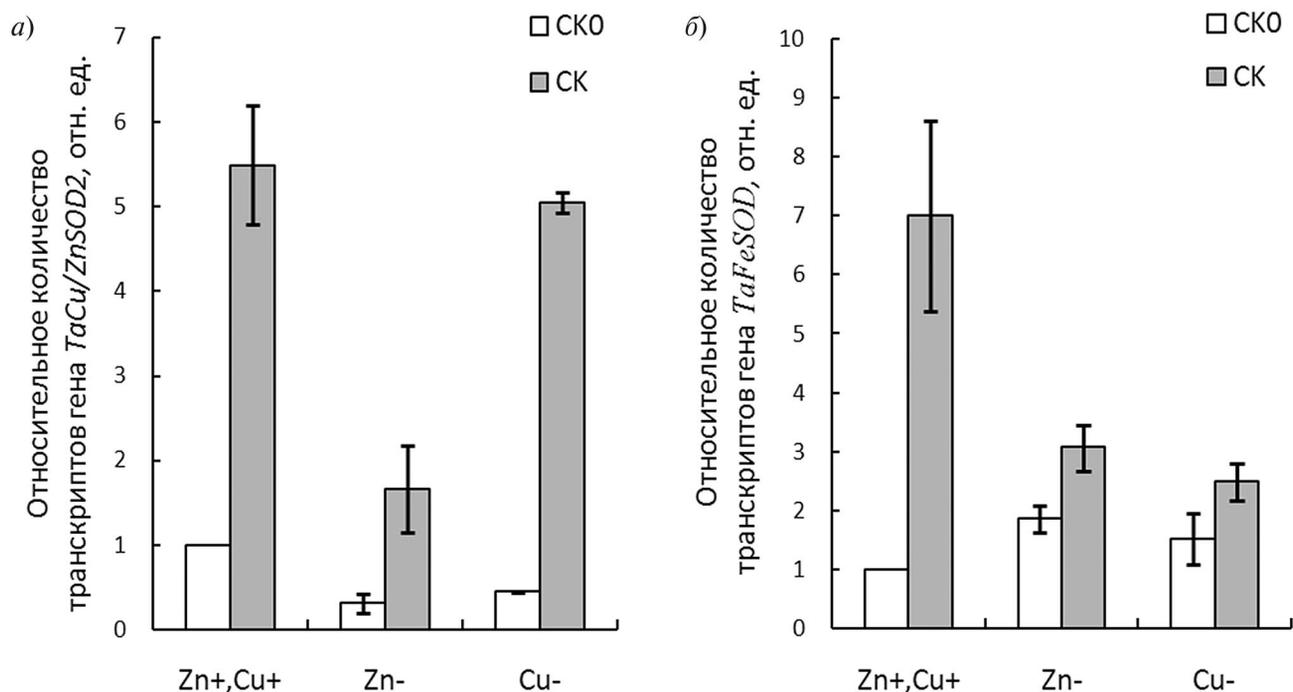
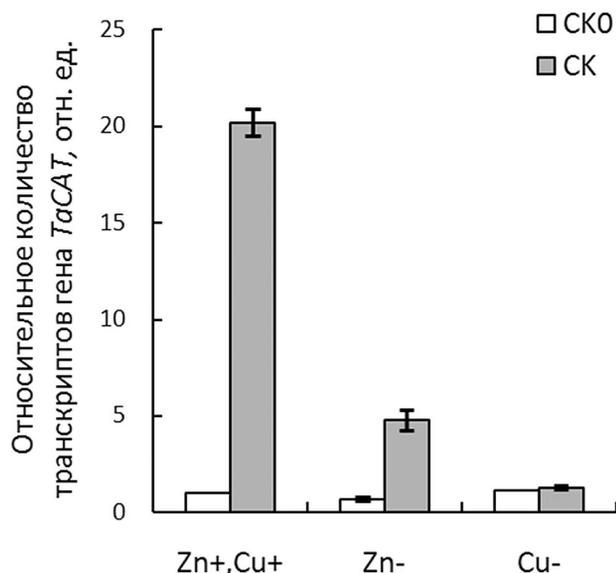


Рис. 1. Влияние предобработки семян СК на относительное количество транскриптов генов *TaCu/ZnSOD2* и *TaFeSOD* в листьях пшеницы при недостатке цинка или меди в субстрате.



**Рис. 2.** Влияние предобработки семян СК на относительное количество транскриптов гена *TaCAT* в листьях пшеницы при недостатке цинка или меди в субстрате.

**Таблица 2.** Влияние предобработки семян СК на общую активность СОД, активность КАТ и содержание МДА в листьях пшеницы при недостатке цинка или меди в субстрате

Вариант	Общая активность СОД, усл. ед. активности/мг белка	Активность КАТ, мкмоль Н <sub>2</sub> О <sub>2</sub> /мг белка·мин	Содержание МДА, мкмоль/г сырого веса
Без обработки СК			
Zn+, Cu+	3.93 ± 0.26a	6.07 ± 0.68ab	12.81 ± 0.36ab
Zn-	3.56 ± 0.16a	4.97 ± 0.23c	11.80 ± 0.34b
Cu-	2.58 ± 0.30b	4.64 ± 0.11c	12.26 ± 1.20ab
Обработка семян СК			
Zn+, Cu+	4.26 ± 0.26a	6.11 ± 0.29b	15.80 ± 1.37a
Zn-	4.13 ± 0.22a	8.09 ± 0.51a	12.02 ± 0.50b
Cu-	3.29 ± 0.25a	7.81 ± 0.47a	16.88 ± 0.49a

(Cu-) в корнеобитаемой среде вызывал заметное снижение количества транскриптов гена *TaCu/ZnSOD2* в 4 и 2 раза, соответственно, по сравнению с их оптимальным содержанием (рис. 1а), при этом уровень мРНК гена *TaFeSOD*, наоборот, возрастал почти в 2 раза (рис. 1б).

Предобработка семян СК (вариант СК) приводила к заметному усилению по сравнению с не-

обработанными растениями (СК0) экспрессии генов обеих изоформ СОД (рис. 1а и б), что более отчетливо проявилось при оптимальном содержании микроэлементов. Отметим также, что при недостатке цинка и меди обработка СК в большей степени влияла на количество транскриптов гена *TaCu/ZnSOD2*, которое возрастало (по сравнению с необработанными растениями) в 6 и 10 раз, соответственно (рис. 1а), тогда как количество мРНК гена *TaFeSOD* повышалось лишь в 1.6 и 1.4 раза, соответственно (рис. 1б).

В литературе имеются противоречивые сведения об изменении уровня экспрессии генов, кодирующих Cu/Zn-содержащую изоформу СОД, у растений при недостатке цинка и меди. Так, у сои при дефиците цинка [7] и у арабидопсиса при дефиците меди [15] наблюдалось снижение уровня экспрессии генов, кодирующих *Cu/ZnSOD*. В отличие от этого, у сорго [16] и у Zn-эффективного сорта пшеницы [17] при дефиците цинка, а также в работе других авторов у арабидопсиса при дефиците меди [3] отмечено увеличение накопления мРНК генов этой изоформы СОД. Что касается генов *FeSOD*, то в большинстве случаев их экспрессия в условиях недостатка цинка или меди в корнеобитаемой среде усиливается, что, как полагают, является компенсаторной реакцией в ситуации с уменьшением экспрессии генов *Cu/ZnSOD*. Подобный эффект был, к примеру, отмечен в листьях кукурузы при дефиците цинка [18] и у арабидопсиса при дефиците меди [15].

О влиянии предобработки семян СК на экспрессию генов, кодирующих синтез разных изоформ СОД, в условиях недостатка микроэлементов в корнеобитаемой среде данных нет. Результаты нашего исследования показали, что обработка семян СК способствовала увеличению в листьях пшеницы экспрессии генов синтеза и Cu/Zn-содержащей (*TaCu/ZnSOD2*), и железосодержащей (*TaFeSOD*) изоформ СОД, причем не только в оптимальных условиях минерального питания, но и при дефиците цинка или меди в корнеобитаемой среде (рис. 1а и б).

Наряду с СОД важную роль в поддержании окислительно-восстановительного баланса клетки играет каталаза – один из наиболее эффективных антиоксидантных ферментов, нейтрализующих пероксид водорода. В отношении ее участия в антиоксидантном ответе клетки на низкий уровень микроэлементов сведений крайне мало. Хотя показано, что при низком содержании цинка в листьях ячменя [19] уровень экспрессии гена *Cat* был более высоким, чем при его оптимальном содержании. Нами же было обнаружено, что у пшеницы в варианте без обработки СК количество транскриптов гена *TaCAT* в листьях было относительно невысо-

ким и при дефиците цинка или меди практически не менялось (рис. 2). В отличие от этого после обработки семян СК уровень экспрессии этого гена резко возрастал как при оптимальном содержании цинка и меди (почти в 20 раз по сравнению с вариантом СК0), так и при недостатке цинка (в 5 раз) в корнеобитаемой среде. Но при недостатке меди подобный эффект отсутствовал.

Важно, что активность изученных ферментов (СОД и КАТ) в определенной степени коррелировала с уровнем экспрессии генов, контролирующих их синтез (табл. 2). Так, у проростков, чьи семена были обработаны СК, при оптимальном содержании цинка и меди, а также при их дефиците общая активность СОД была несколько выше, чем у не обработанных СК растений, хотя статистически значимые различия между вариантами опыта наблюдались только при дефиците меди. Активность КАТ в варианте опыта с обработкой СК оказалась заметно выше, чем в варианте без обработки СК при дефиците обоих микроэлементов.

Полагают, что при дефиците цинка и меди основной причиной развития окислительного стресса является уменьшение активности *Cu/ZnSOD*, что было, например, выявлено у пшеницы [17] и кукурузы [18]. Однако повышение активности других изоформ фермента, в частности, *FeSOD*, обеспечивает нейтрализацию супероксид-радикала в клетках в условиях стресса, связанного с дефицитом микроэлементов. Накопление при этом избыточных количеств пероксида приводит через механизм обратной связи к увеличению активности ферментов, участвующих в ее нейтрализации. Так, повышение активности КАТ при недостатке микроэлементов ранее было отмечено у риса [20] и кукурузы [18]. В наших исследованиях у растений без обработки семян СК общая активность СОД уменьшалась только при дефиците меди, а активность КАТ при дефиците обоих микроэлементов. Предобработка семян СК способствовала повышению активности изученных антиоксидантных ферментов, что отчасти могло быть связано с более высоким содержанием цинка и меди в листьях. Это позволило в условиях их дефицита не допустить повышения интенсивности ПОЛ, о чем свидетельствует отсутствие увеличения содержания МДА (по сравнению с оптимальным уровнем микроэлементов) в этих условиях (табл. 2).

Таким образом, нами впервые обнаружено, что после обработки семян пшеницы СК у проростков в условиях дефицита цинка и меди возрастает (по сравнению с необработанными растениями) экспрессия генов, ответственных за синтез двух изоформ СОД – *Cu/ZnSOD* и *FeSOD*, и гена, контролирующего синтез КАТ, и увеличивается активность этих ферментов, что способствует поддержанию

на необходимом уровне окислительно-восстановительного баланса клеток. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что положительный эффект обработки семян СК на активность основных ферментов антиоксидантной защиты может отчасти объяснить механизм ее положительного воздействия на физиологические процессы у растений, испытывающих дефицит цинка или меди. Это также служит дополнительным аргументом в пользу высказанного нами ранее предположения о том, что защитный эффект СК на растения носит достаточно пролонгированный характер, поэтому обработка СК семян способна при дальнейшем росте проростков приводить к увеличению их стрессоустойчивости [12]. Учитывая доступность и невысокую цену СК, обработка ею семян злаков может быть экономически выгодным, безопасным и эффективным способом повышения устойчивости растений к дефициту цинка и меди и повышения их продуктивности на почвах с низким содержанием этих микроэлементов.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей работы.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-26-00168 (<https://rscf.ru/project/22-26-00168/>) на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Al Jabri H., Saleem M.H., Rizwa M., et al.* Zinc oxide nanoparticles and their biosynthesis: Overview // *Life*. 2022. V. 12: 594.
2. *Zaheer I.E., Ali S., Saleem M.H., et al.* Combined application of zinc and iron-lysine and its effects on morphophysiological traits, antioxidant capacity and chromium uptake in rapeseed (*Brassica napus L.*) // *PloS One*. 2022. V. 17: e0262140.
3. *Mermoud M., Takusagawa M., Kurata T., et al.* SQUAMOSA promoter-binding protein-like 7 mediates copper deficiency response in the presence of high nitrogen in *Arabidopsis thaliana* // *Plant Cell Reports*. 2019. V. 38 (7). P. 835–846.
4. *Gong Q., Li Z.H., Wang L., et al.* Gibberellic acid application on biomass, oxidative stress response, and photosynthesis in spinach (*Spinacia oleracea L.*) seedlings un-

- der copper stress // Environ. Sci. Pollut. Res. 2021. V. 28. P. 53594–53604.
5. Chen H.-H., Chen X.-F., Zheng Z.-C., et al. Characterization of copper-induced-release of exudates by *Citrus sinensis* roots and their possible roles in copper-tolerance // Chemosphere. 2022. V. 308 (2): 136348.
  6. Schulten A., Pietzenuk B., Quintana J., et al. Energy status-promoted growth and development of *Arabidopsis* require copper deficiency response transcriptional regulator SPL7 // Plant cell. 2022. V. 34. P. 3873–3898.
  7. Zeng H., Zhang X., Ding M., et al. Transcriptome profiles of soybean leaves and roots in response to zinc deficiency // Physiol. Plant. 2019. V. 167 (3). P. 330–351.
  8. Kumar D. Salicylic acid signaling in disease resistance // Plant Sci. 2014. V. 228. P. 127–134.
  9. Sharma A., Sidhu G.P., Arantti F., et al. The role of salicylic acid in plants exposed to heavy metals // Molecules. 2020. V. 25 (3): 540.
  10. Mohsenzadeh S., Shahrtash M., Mohabatkar H. Interactive effects of salicylic acid and silicon on some physiological responses of cadmium-stressed maize seedlings // Iran J. Sci. Technol. 2011. V. 35. P. 57–60.
  11. Gondor O.K., Pál M., Janda T., et al. The role of methyl salicylate in plant growth under stress conditions // J. Plant Physiology. 2022. V. 277: 153809.
  12. Ignatenko A.A., Nilova I.A., Kholoptseva E.S., et al. Effect of seed treatment with salicylic acid on the carbonic anhydrase activity, photosynthesis rate, stomatal conductance, and pigments content in wheat leaves at zinc excess // Doklady Biological Sciences. 2023.
  13. Kaznina N., Repkina N., Ignatenko A., et al. Effect of salicylic acid on physiological parameters of wheat under zinc or copper deficiency // Vegetos. 2023. V. 36 (3).
  14. Livak K.J., Schmittgen T.D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2<sup>-ΔΔCt</sup> method // Methods. 2001. V. 25. P. 402–408.
  15. Yamasaki H., Abdel-Ghany S.E., Cohu C.M., et al. Regulation of copper homeostasis by micro-RNA in *Arabidopsis* // J. Biol. Chem. 2007. V. 282. P. 16369–16378.
  16. Li Y., Zhang Y., Shi D., et al. Spatial-temporal analysis of zinc homeostasis reveals the response mechanisms to acute zinc deficiency in *Sorghum bicolor* // New Phytol. 2013. V. 200. P. 1102–1115.
  17. Hacisalihoglu G., Hart J.J., Wang Y.-H., et al. Zinc efficiency is correlated with enhanced expression and activity of zinc-requiring enzymes in wheat // Plant Physiol. 2003. V. 131. P. 595–602.
  18. Tewari R.K., Kumar P., Sharma P.N. An effective antioxidant defense provides protection against zinc deficiency-induced oxidative stress in Zn-efficient maize plants // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2019. V. 182. P. 701–707.
  19. Batova Yu., Kaznina N., Repkina N., et al. Effect of zinc deficiency and excess on catalase activity and *HvCAT2* gene expression in barley // Vegetos. 2022. V. 35. P. 833–838.
  20. Chen W., Yang X., He Z., et al. Differential changes in photosynthetic capacity, 77 K chlorophyll fluorescence and chloroplast ultrastructure between Zn-efficient and Zn-inefficient rice genotypes (*Oryza sativa*) under low zinc stress // Physiol. Plant. 2008. V. 132. P. 89–101.

## SEEDS TREATMENT WITH SALICYLIC ACID INCREASES GENE EXPRESSION AND ACTIVITY OF ANTIOXIDANT ENZYMES IN WHEAT PLANTS UNDER ZINC OR COPPER DEFICIENCY

**N. M. Kaznina<sup>#</sup>, N. S. Repkina, Yu. V. Batova, A. A. Ignatenko,  
Corresponding Member of the RAS A. F. Titov**

*Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: kaznina@krc.karelia.ru*

The effect of wheat seeds treatment with salicylic acid (SA) on the expression of the *TaCu/ZnSOD*, *TaFeSOD* and *TaCAT2* genes and the activity of antioxidant enzymes (superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT)) in leaves at the optimal content of zinc (2 μM) and copper (0.3 μM) in root environment or there deficiencies has been studied. It was shown for the first time that seeds treatment with SA leads to an increase of the number of genes transcripts compared to untreated plants, both under optimal conditions of mineral nutrition and under zinc or copper deficiency. The activity of enzymes, especially catalase, also increases. Judging by the MDA content, this allows one to avoid increasing the intensity of lipid peroxidation (LPO) and, accordingly, the development of oxidative stress. It is concluded that the discovered positive effect of seed treatment with SA on the activity of the main enzymes of antioxidant system may underlie the stimulating effect of this phytohormone on physiological processes in plants under microelements deficiency.

**Keywords:** *Triticum aestivum* L., phytohormones, zinc, copper, superoxide dismutase, catalase, gene expression, enzyme activity.