DOI: 10.58168/CCTIBSPC2026_214-221
УДК 577.012

АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ *(BETA VULGARIS L.)* В УСЛОВИЯХ СОЛЕВОГО СТРЕССА

Мажарина А.А., студент кафедры биохимии и физиологии клетки медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Россия, Воронеж
Сороколетова А.С., студент кафедры биохимии физиологии клетки медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Россия, Воронеж
Селиванова Н.В., к. б. н., доцент кафедры биохимии и физиологии клетки, медико-биологического факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Россия, Воронеж

Аннотация. В ходе работы было исследовано функционирование ферментов антиоксидантной системы растений: каталазы (КАТ), аскорбатпероксидазы (АПО) и супероксиддисмутазы (СОД) в условиях солевого стресса в зеленых листьях сахарной свёклы (*Beta vulgaris* L.) разных сортов. С помощью спектрофотометрического метода были выявлены изменения в активности ферментов в растительном материале, подвергшемся воздействию солевого стресса, по сравнению с контрольными образцами.

Было установлено, что изменения активности данных ферментов в листьях в ответ на стрессовые условия носят сортоспецифический характер и зависят от ионной силы раствора. Увеличение активности каталазы наблюдалось у большинства изученных сортов, что свидетельствует об активации основного ферментативного пути детоксикации пероксида водорода. Исключение составил один сорт, показавший ингибирование активности КАТ, что может указывать на большую чувствительность свеклы данного сорта к окислительному повреждению.

© Мажарина А. А., Сороколетова А. С., Селиванова Н. В., 2026

Изменение активности аскорбатпероксидазы и супероксиддисмутазы в опытных образцах может указывать на активацию аскорбат-глутатионового цикла как альтернативного пути детоксикации пероксида водорода.

Ключевые слова: *Beta vulgaris* L., сахарная свекла, солевой стресс, активность ферментов, каталаза, аскорбатпероксидаза, супероксиддисмутаза

ANALYSIS OF ANTIOXIDANT ENZYME ACTIVITY IN SUGAR BEET LEAVES (*BETA VULGARIS L.*) IN CONDITIONS OF SALT STRESS

Mazharina A.A. Student of the Department of Biochemistry and Cell Physiology, Faculty of Medicine and Biology, VSU, Russia, Voronezh

Sorokoletova A.S. Student of the Department of Biochemistry and Cell Physiology, Faculty of Medicine and Biology, VSU, Russia, Voronezh

Selivanova N.V., PhD in Biology, Associate Professor of the Department of Biochemistry and Cell Physiology, Faculty of Medicine and Biology, Voronezh State University, Russia, Voronezh

Abstract. The present study examined the activity of key antioxidant enzymes: catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), and superoxide dismutase (SOD) in the leaves of various varieties of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under salt stress conditions. Spectrophotometric analysis revealed alterations in enzyme activity in plant tissues subjected to salt stress, as compared to control samples.

Results demonstrate that the responses of leaf enzyme activity to stress conditions exhibit variety-specific patterns and are influenced by the ionic strength of the salt solution. Most varieties displayed increased catalase activity, indicating the activation of the primary enzymatic pathway for hydrogen peroxide detoxification. However, one variety showed inhibited CAT activity, potentially indicating greater susceptibility to oxidative damage.

Modifications in APX and SOD activity levels in the experimental samples suggest the possible activation of the ascorbate-glutathione cycle as an alternative mechanism for hydrogen peroxide detoxification.

Keywords: *Beta vulgaris* L., sugar beet, salt stress, enzyme activity, catalase, ascorbate peroxidase, superoxide dismutase.

Введение. В настоящее время засоление почв одна из важнейших проблем в сельском хозяйстве. Помимо осмотического и токсического действия на растения, солевой приводит к подавлению основных физиологических процессов и существенному снижению продуктивности сельскохозяйственных культур [1]. Нарушение осмотического баланса стимулирует генерацию активных форм кислорода (АФК), таких как пероксид водорода, синглетный кислород, супероксид-радикал, способных разрушать важнейшие органические компоненты клетки [2]. Образование АФК у растений является одним из признаков окислительного стресса [3]. В ответ на окислительный стресс активируется антиоксидантная система, которая снижает концентрацию образовавшихся АФК и ограничивает их действие в зоне генерации [4]. Ферменты антиоксидантной защиты растений играют важную роль в формировании устойчивости растений к стрессовым условиям.

Цель: исследовать функционирование антиоксидантных ферментов в зелёных листьях сахарной свеклы *(Beta vulgaris* L.) разных сортов в условиях воздействия NaCl концентрацей 150 и 280 мМ.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования служили зеленые листья сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.) сортов РМС 127, О-ТИП 2113, О-ТИП 09021. Растения выращивали при 25°С с фотопериодом в течение 14 ч / 10 ч в теплице в ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А. Л. Мазлумова". После появления зеленых листьев проростки обрабатывали 150 и 280 мМ NaCl в течение 30 дней. Контрольные образцы растений поливались водой. Каждая обработка содержала четыре сеянца и имела два биологических повтора.

Для определения активности каталазы использовали 0,5 моль/л К-фосфатный буфер рН7,0 для приготовления гомогената. Реакцию начинали добавлением 0,2 моль/л раствора H_2O_2. Оптическую плотность определяли при 240 нм в течение 30 секунд [8].

Активность аскорбатпероксидазы определяли спектрофотометрически при 290 нм по уменьшению светопоглощения в результате окисления аскорбиновой кислоты [6].

Определение активности СОД проводили по ингибированию скорости восстановления нитросинего тетразолия в неэнзимотической системе феназинметасульфата и НАДН на СФ при λ=540 нм [9].

Результаты исследования и их обсуждение. В условиях абиотического стресса защитная система растений не справляется с нейтрализацией АФК из-за их избыточного образования, что приводит к окислительному повреждению клеток [5]. Индикатором этого процесса служит изменение активности ключевых ферментов антиоксидантной системы: супероксиддисмутазы, катализирующей дисмутацию супероксид-радикала, а также каталазы и аскорбатпероксидазы, участвующих в детоксикации образующегося пероксида водорода [6].

В работе была исследована активность АПО, КАТ и СОД в листьях трёх сортов сахарной свёклы (*Beta vulgaris* L.) – РМС 127, О-ТИП 2113 и О-ТИП 09021– в ответ на обработку NaCl в концентрациях 150 и 280 мМ.

В ходе исследования были получены следующие данные по активности аскорбатпероксидазы в зеленых листьях сахарной свеклы: у сортов РМС 127 и О-ТИП 2113 наблюдалась значительная интенсификация фермента пропорционально увеличению степени засоления (рис. 1.). По сравнению с контролем скорость функционирования аскорбатпероксидазы при засолении 280 мМ выросла в 3 раза у обоих сортов. Активность АПО у сорта О-ТИП 09021также выросла в 1,5 раза в условиях сильного засоления.

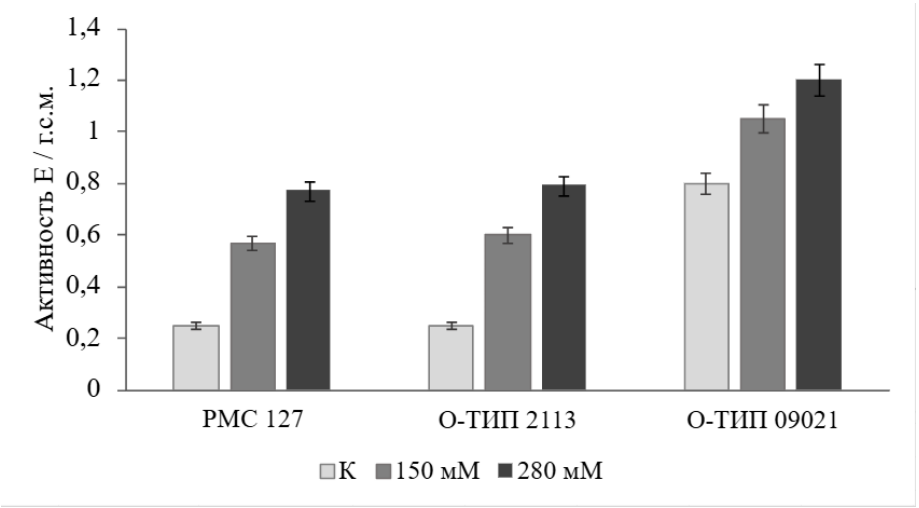


Рис. 1. Активность АПО в зеленых листьях сахарной свеклы сортов РМС 127, О-ТИП 2113, О-ТИП 09021 в условиях солевого стресса. К – контрольная группа растений, 150 мМ и 280 мМ – концентрации соли, которые были добавлены в почву

Такое значительное усиление активности АПО у большинства сортов указывает на интенсивную активацию аскорбат-глутатионового цикла как

ключевого альтернативного пути детоксикации пероксида водорода в условиях солевого стресса [7].

Динамика активности каталазы, основного фермента, разлагающего H_2O_2 в пероксисомах, также варьировала в зависимости от сорта и ионной силы раствора (рис. 2.). Наиболее сильную реакцию на воздействие стрессового фактора продемонстрировали сорта О-ТИП 2113 и О-ТИП 09021.

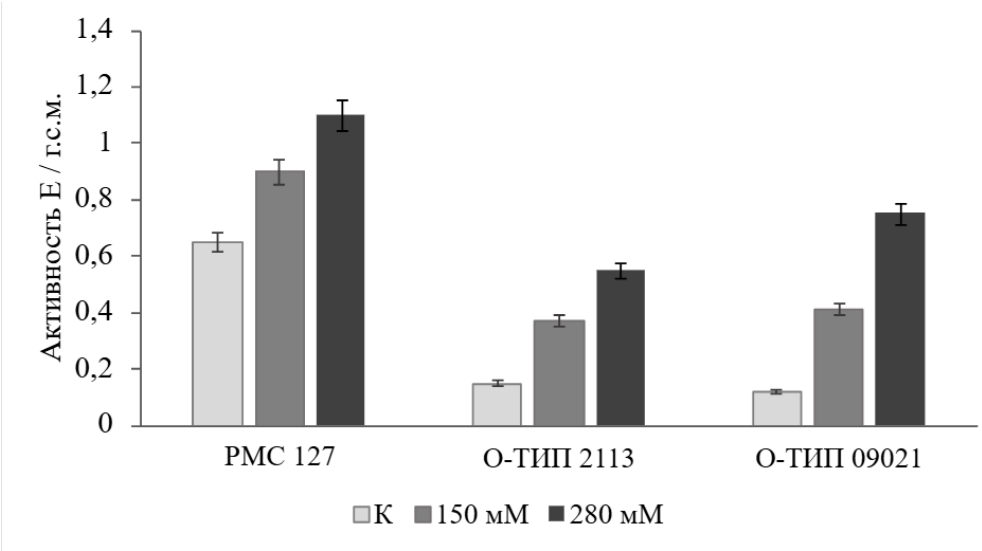


Рис. 2. Активность каталазы в зеленых листьях сахарной свеклы сортов РМС 127, О-ТИП 2113, О-ТИП 09021 в условиях солевого стресса. К – контрольная группа растений, 150 мМ и 280 мМ – концентрации соли, которые были добавлены в почву

У сорта О-ТИП 2113 активность каталазы возросла в 2 и 3 раза, а у О-ТИП 09021 – в 4 и 8 раз при 150 и 280 мМ NaCl соответственно. У сорта РМС 127 можно отметить прямую зависимость скорости ферментативной реакции от концентрации NaCl.

Повышение активности каталазы у трех сортов подтверждает активацию основного ферментативного пути утилизации H_2O_2.

В отличие от аскорбатпероксидазы и каталазы, данные по активности СОД в зелёных листьях сахарной свеклы отличаются. Во всех исследуемых сортах наблюдалось увеличение скорости функционирования фермента при уровне засоления 150 мМ, однако в условиях сильного стресса изменения в активности фермента относительно контроля были минимальны (рис. 3.).

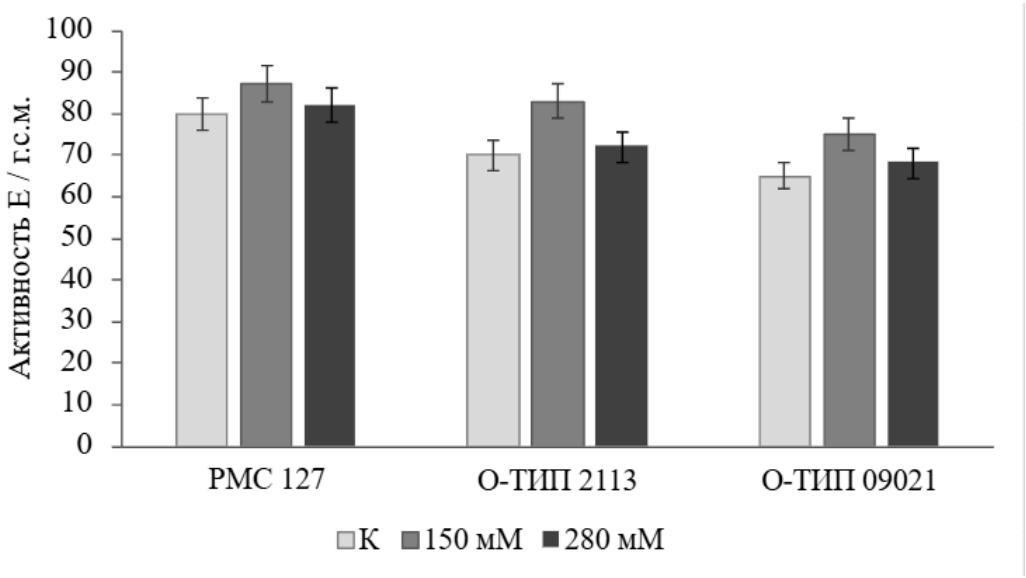


Рис. 3. Активность СОД в зеленых листьях сахарной свеклы сортов РМС 127, О-ТИП 2113, О-ТИП 09021 в условиях солевого стресса. К –контрольная группа растений, 150 мМ и 280 мМ – концентрации соли, которые были добавлены в почву

Незначительные изменения активности СОД могут означать, что исходной активности было достаточно для дисмутации образующегося супероксид-радикала, либо главным механизмом адаптации к солевому стрессу у сахарной свеклы является не обезвреживание супероксид-радикала, а последующая детоксикация пероксида водорода каталазой и аскорбатпероксидазой.

Заключение

Полученные данные свидетельствуют об индукции окислительного стресса у растений под воздействием засоления и активации их ферментативной антиоксидантной системы в качестве защитного ответа. А также о сортоспецифическом ответе на стресс у сахарной свеклы *(Beta vulgaris* L.).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания вузам в сфере научной деятельности на 2026-2028 годы, проект № FZGU-2026-0010.

Список литературы

1. Водный потенциал апопласта подустьичной полости листа Suaeda altissima (L.) Pall. при солевом стрессе / Воронин П. Ю. и др. // Физиология растений. – 2021. – Т. 68. –№ 3. – С. 308-314.

2. Гарифзянов, А. Р. Образование и физиологические реакции активных форм кислорода в клетках растений / А. Р. Гарифзянов, Н. Н. Жуков, В. В. Иванищев // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 2. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=4600.

3. Хозеева, Е. В. Окислительный стресс растений: химия, физиология, способы защиты / Е. В. Хозеева, Ю. А. Зимина, Г. А. Срослова // Природные системы и ресурсы. – 2020. – Т. 10. – № 4. – С. 30-43.

4. Жарина, И. А. Влияние температурного стресса на активность ферментов антиоксидантной защиты растений / И. А. Жарина // Итоги научных исследований ученых МГУ имени А. А. Кулешова, 2019 г. : материалы научно-методической конференции, 29 января - 10 февраля 2020 г. / под ред. Н. В. Маковской, Е. К. Сычовой. – Могилев : МГУ имени А. А. Кулешова, 2020. – С. 85–87.

5. Иванищев, В. В. О механизмах солеустойчивости растений и специфике влияния засоления / В. В. Иванищев // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2019. –№ 4. – С. 76-88.

6. Методы оценки антиоксидантного статуса растений : учеб.-метод. пособие / Г. Г. Борисова и др. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 72.

7. Гарифзянов, А. Р. Влияние натрий-хлоридного засоления на содержание компонентов аскорбат-глутатионового цикла в органах тритикале / А. Р. Гарифзянов, Н. Н. Жуков // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2012. –№ 3. – С. 165–176.

8. Землянухин, А. А. Большой практикум по физиологии и биохимии растений / А. А. Землянухин, Л. А. Землянухин. – Воронеж : ВГУ, 1996. – 188 с.

9. Матюшин, Б. Н. Определение супероксиддисмутазной активности в материале пункционной биопсии печени при её хроническом поражении / Б. Н. Матюшин, А. С. Логинов, В. Д. Ткачев // Лабораторное дело. – 1991. – № 7. – С. 16-19.

References

1. Water potential of the apoplast in the substomatal cavity of Suaeda altissima (L.) Pall. leaves under salt stress / Voronin P. Yu. et al. // Russian Journal of Plant Physiology. – 2021. – V. 68. – No. 3. – P. 308–314.

2. Garifzyanov, A. R. Formation and physiological responses of reactive oxygen species in plant cells / A. R. Garifzyanov, N. N. Zhukov, V. V. Ivanishchev // Modern Problems of Science and Education. – 2011. – No. 2. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=4600.

3. Khozeyeva, E. V. Oxidative stress in plants: chemistry, physiology, and defense mechanisms / E. V. Khozeyeva, Yu. A. Zimina, G. A. Sroslova // Natural Systems and Resources. – 2020. – V. 10. – No. 4. – P. 30–43.

4. Zharina, I. A. The effect of temperature stress on the activity of antioxidant defense enzymes in plants / I. A. Zharina // Results of scientific research of scientists from A. A. Kuleshov Moscow State University, 2019: Proceedings of the scientific and methodological conference, January 29 - February 10, 2020 / edited by N. V. Makovskaya, E. K. Sychova. – Mogilev: A. A. Kuleshov Moscow State University, 2020. – P. 85–87.

5. Ivanishchev, V. V. On the mechanisms of plant salt tolerance and the specifics of salinity impact / V. V. Ivanishchev // Izvestiya Tula State University. Natural Sciences. – 2019. – No. 4. – P. 76–88.

6. Methodsfor assessing the antioxidant status of plants : educational and methodological guide / G. G. Borisova et al. – Yekaterinburg : Ural University Press, 2012. – 72 p.

7. Garifzyanov, A. R. The effect of sodium chloride salinity on the content of components of the ascorbate-glutathione cycle in triticale organs / A. R. Garifzyanov, N. N. Zhukov // Izvestiya Tula State University. Natural Sciences. – 2012. – No. 3. – P. 165–176.

8. Zemlyanukhin, A. A. Handbook on Plant Physiology and Biochemistry / A. A. Zemlyanukhin, L. A. Zemlyanukhin. – Voronezh : Voronezh State University. – 1996. – 188 p.

9. Matyushin, B. N. Determination of the superoxide dismutase activity in puncture biopsy specimens of the liver in chronic liver diseases / B. N.Matyushin, A. S. Loginov, V. D. Tkachev // Laboratory Medicine. – 1991. – No. 7. – P. 16–19.