

**СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
АНТИОКСИДАНТНОЙ СИСТЕМЫ В ЛИСТЬЯХ
ДЕКОРАТИВНОГО ДЕРЕВА *PAULOWNIA TOMENTOSA*,
ИНТРОДУЦИРОВАННОГО ДЛЯ БЛАГОУСТРОЙСТВА
ГОРОДА ТАШКЕНТА**

^{1,2}Мухамедова С.Н., ^{1,2}Ахмедова С.О., ²Левицкая Ю.В., ¹Абдуллаева М.М.

¹*Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Ташкент;*

²*Центр передовых технологий при Министерстве инновационного развития
Республики Узбекистан, Ташкент, e-mail: shoxoldarova@gmail.com*

В настоящее время одной из фундаментальных проблем является изучение клеточных и молекулярных механизмов приспособления растений к неблагоприятным условиям среды. Формирование адаптивного ответа на абиотические стрессоры в растительном организме происходит в результате многих метаболических изменений. Известно, что все живые организмы обладают способностью приспосабливаться к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды и защищаться от неблагоприятных условий. В статье приведены сведения о состоянии антиоксидантной системы павловнии, декоративного растения, произрастающего в Ташкенте, с июня по сентябрь. Исследования проводились в течение трех лет, изучалась активность в листьях павловнии антиоксидантных ферментов – каталазы и СОД, а также количество свободного пролина и малонового диальдегида. Помимо воздействия экологических факторов изучалось и антропогенное воздействие в виде дополнительных автомобильных дорог. В июле в листьях *Paulownia tomentosa*, растущих в ботаническом саду, наблюдалось резкое снижение содержания малонового диальдегида, в это время наблюдалась активация каталазы, а к августу также активация СОД. В связи с активацией перекисного окисления липидов в магистрали видно, что количество пролина также имеет высокие значения в течение сезона, что в свою очередь контролирует образование активных форм кислорода.

Ключевые слова: антиоксидантная система, стрессоустойчивость растений, супероксиддисмутаза, каталаза, перекисное окисление липидов, пролин, коэффициент повреждения мембран

**SEASONAL CHANGES IN THE STATE OF THE ANTIOXIDANT SYSTEM
IN THE LEAVES OF THE DECORATIVE TREE *PAULOWNIA TOMENTOSA*,
INTRODUCED FOR THE IMPROVEMENT OF THE CITY OF TASHKENT**

^{1,2}Mukhamedova S.N., ^{1,2}Akhmedova S.O., ²Levitskaya Yu.V., ¹Abdullaeva M.M.

¹*National University of Uzbekistan named after M. Ulugbek, Tashkent;*

²*Center for Advanced Technologies under the Ministry of Innovative Development
of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, e-mail: shoxoldarova@gmail.com*

Currently, one of the fundamental problems is the study of cellular and molecular mechanisms of plant adaptation to adverse environmental conditions. Formation of adaptive response to abiotic stressors in plant organism occurs as a result of many metabolic changes. It is known that all living organisms have the ability to adapt to biotic and abiotic factors of environment and protect themselves from adverse conditions. The article provides information on the state of antioxidant system of Paulownia, an ornamental plant growing in Tashkent, from June to September. The research was conducted for 3 years and the activity of antioxidant enzymes in Paulownia leaves, such as catalase and SOD, as well as the amount of free proline and malonic dialdehyde were studied. In addition to the impact of environmental factors, anthropogenic impact in the form of additional roads was also studied. In July, a sharp decrease in malonic dialdehyde content was observed in the leaves of Paulownia tomentosa growing in the Botanical Garden; at this time, catalase activation was observed, and by August, SOD activation was also observed. Due to the activation of lipid peroxidation in the mainline, we can see that the amount of proline also has high values during the season, which in turn controls the formation of reactive oxygen species.

Keywords: antioxidant system, plant stress tolerance, superoxide dismutase, catalase, lipid peroxidation, proline, membrane damage factor

Изучение механизмов, лежащих в основе устойчивости растений к стрессовым факторам, позволяет максимально эффективно использовать эти ресурсы для создания благоприятных условий жизни человека, особенно в условиях глобальной урбанизации. В условиях крупных городов большинство декоративных деревьев претерпевают изменения из-за влияния дополнительного стресса в виде оживленных

автомагистралей и загрязнения воздуха выхлопными газами. Одним из часто используемых в благоустройстве городских территорий деревьев является павловния войлочная (*Paulownia tomentosa*) – дерево до 25 м высоты с широкой яйцевидной кроной, быстрорастущее и живущее до 100 лет. Родиной этого дерева считаются Южная и Юго-Восточная Азия. *Paulownia tomentosa* может расти на засоленных почвах, кроме

того, она засухоустойчива, теневынослива, что в совокупности делает ее предпочтительным объектом для благоустройства и озеленения в условиях Узбекистана.

Условия урбанизированной среды негативно сказываются на состоянии, росте и развитии растений, а также на их функциональной активности [1]. Реакции у растений на различные факторы, в том числе антропогенные воздействия, можно отслеживать по изменению активности антиоксидантных ферментов – СОД и каталазы [2].

В связи с усилением антропогенного воздействия на окружающую среду актуально изучение воздействия факторов внешней среды на живые организмы, особенно на растения. Негативные факторы внешней среды оказывают постоянное или периодическое влияние на жизнь растений [3].

В связи с усилением антропогенной нагрузки на окружающую среду актуальным является изучение воздействия факторов внешней среды на живые организмы, в частности на растения. Степень устойчивости индивидуальна, она также варьирует в зависимости от вида растения, влияния других факторов условий проживания. Даже разные клетки, ткани и органы растения могут различаться по степени выносливости.

В условиях биотического и абиотического стресса в растениях образуются активные формы кислорода (АФК), вызывающие окислительный стресс. В то же время АФК выполняют дополнительные сигнальные роли в адаптации растений к стрессу. Изучение механизмов этого процесса позволяет разработать новые способы защиты организмов, в частности сельскохозяйственных растений, от негативного стрессового воздействия.

Целью нашей работы явилось проведение сравнительного анализа уровня развития окислительного стресса в листьях *Paulownia tomentosa* в зависимости от условий произрастания – вдоль оживленной крупной автомагистрали или в ботаническом саду Национального университета Узбекистана, что позволит оценить степень адаптации *Paulownia tomentosa* к условиям урбанизации г. Ташкента. Важно отметить, что окислительный стресс является вполне нормальным физиологическим процессом для растений, который также запускает процессы адаптации.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в период с 2019 по 2021 г. В работе использовались листья растений вида павловния войлочная (*Paulownia tomentosa*), произрастающих

в районе ботанического сада и зеленых насаждений Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека (группа «Ботанический сад») и листья растений, произрастающих в районе оживленного перекрестка центральной магистрали в районе площади Амира Тимура г. Ташкента (группа «Магистраль»). Листья собирались в утренние часы (7–9 часов утра). Для исследования использовались деревья примерно одного возраста [4]. Все измерения проводились в летний период, в одном и том же разрезе времени (июнь, июль, август). При этом самые высокие температуры воздуха наблюдались в июле и августе (39–42 °С).

Для определения количества МДА как конечного продукта ПОЛ была использована методика определения ТБК-реакционных продуктов. Активность фермента супероксиддисмутазы определяли по ингибированию супероксидрадикала в реакции аутоокисления адреналина в щелочной среде *in vitro* при длине волны 347 нм. Активность каталазы изучали спектрофотометрическим методом, основанным на способности пероксида водорода образовывать с солями молибдена стойкий окрашенный. Нингидриновую реакцию использовали для определения количества свободного пролина [4]. Коэффициент повреждения мембраны определялся методом кондуктометрия (кондуктометр Oakton PC2700) [5]. Статистическую обработку данных производили с использованием программы Excel 2016 (Microsoft, США). Каждое из наших исследований было выполнено не менее пяти раз. Статистическую обработку данных проводили на программе Excel 2016 (Microsoft, США), среднее отклонение считали методом т-Стьюдента.

Результаты исследования и их обсуждение

Количественное накопление МДА в листьях растений может быть использовано как информационный показатель для фитодиагностики и оценки их состояния в условиях загрязнения окружающей среды. Уровень МДА в листьях растений ботанического сада НУУз составлял почти 3,5 мкм/г сырой массы в июне, а в июле резко снижался практически до нулевых значений (рис. 1).

В это же время отмечалась активация каталазы в среднем в 2,3 раза (рис. 2). К концу летнего сезона наблюдалось повышение количества МДА до 5,6 мкм/г сырой массы, что в 1,6 раза выше по сравнению с данными, полученными в июне. Вероятно, рост количества МДА связан со снижением активности каталазы в 1,2 раза.

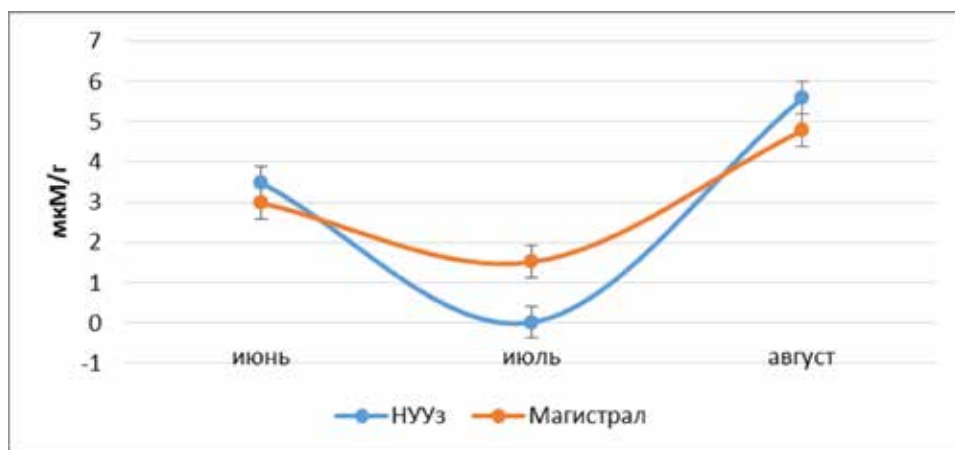


Рис. 1. Сезонная динамика изменения количества МДА в листьях *Paulownia tomentosa* ($n = 20, p < 0,05$)

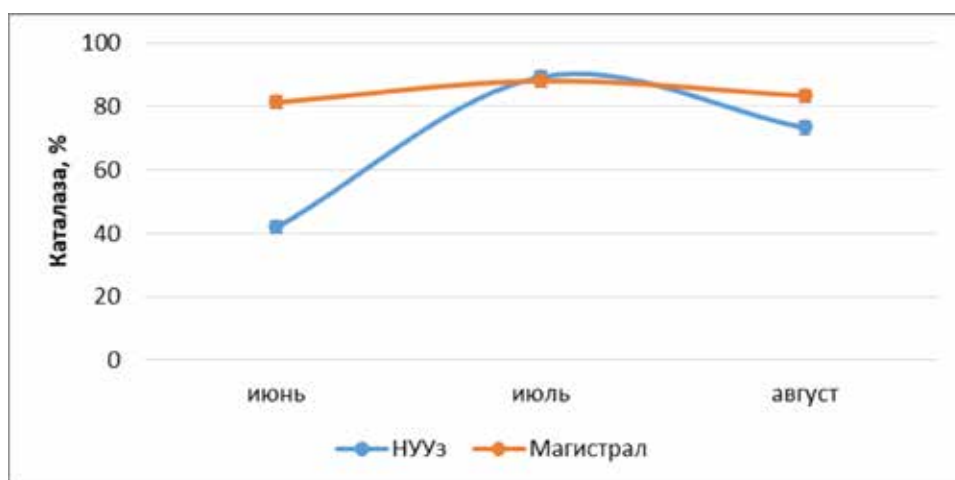


Рис. 2. Ферментативная активность каталазы в листьях *Paulownia tomentosa* ($n = 20, p < 0,05$)



Рис. 3. Ферментативная активность СОД в листьях *Paulownia tomentosa* ($n = 20, p < 0,05$)

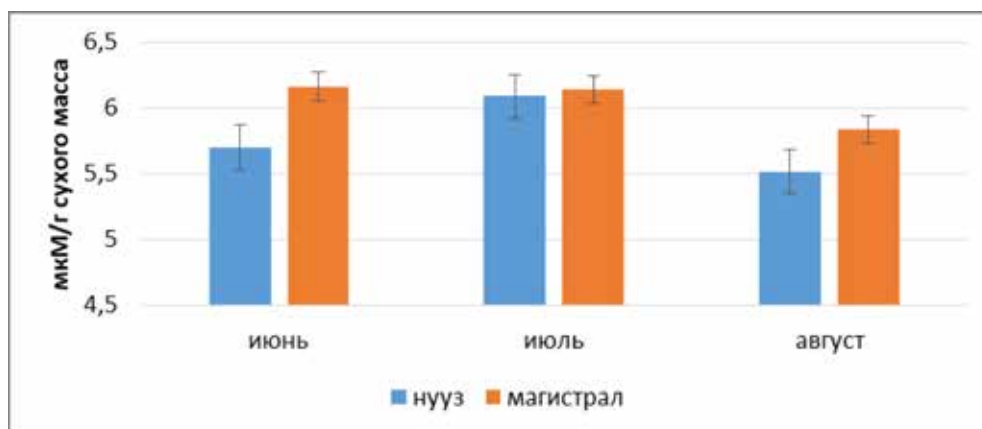


Рис. 4. Динамика накопления свободного пролина в листьях павловнии ($n = 20, p < 0,05$)

Активность СОД увеличивалась монотонно и к концу периода наблюдения достигала максимальных значений (в среднем активность фермента увеличивалась в 3,6 раза по сравнению со значениями в июне) (рис. 3).

В случае *Paulownia tomentosa*, произрастающих вдоль автотрассы и оживленного перекрестка, основным работающим ферментом АОС являлась СОД – уже в начале лета (июнь) ее активность было на 30% выше, чем аналогичный показатель у деревьев ботанического сада НУУз. Это позволяет удерживать значения МДА на относительно низком уровне (на 17% ниже по сравнению с растениями ботанического сада НУУз). В июле благодаря увеличению активности СОД в 2,2 раза отмечается снижение количества МДА в 2 раза по сравнению с начальными значениями. Однако в августе отмечается резкое снижение активности СОД в 2,6 раза, сопровождаемое повышением уровня МДА в 3 раза, что может быть объяснено накопительным эффектом воздействия неблагоприятных факторов и угнетением активности АОС. При этом уровень активности каталазы в листьях этих деревьев не претерпевал серьезных изменений.

Таким образом, в предотвращении драматического развития оксидативного стресса в листьях растений участвуют как минимум два фермента АОС, однако выбор лидирующего фермента в реализации адаптивных процессов зависит от условий произрастания и комплекса действующих внешних факторов (как абиотической, так и антропогенной природы).

В ответ на неблагоприятные условия в клетках возрастает содержание углеводов, пролина (аминокислота), которые

участвуют в защитных реакциях, стабилизируя цитоплазму. При водном дефиците и засолении у ряда растений концентрация пролина в цитоплазме возрастает в 100 раз и более. Благодаря своим гидрофильным группам пролин может образовывать агрегаты, которые ведут себя как гидрофильные коллоиды. Этим объясняется высокая растворимость пролина, а также способность его связываться с поверхностными гидрофильными остатками белков. Необычный характер взаимодействия агрегатов пролина с белками повышает растворимость белков и защищает их от денатурации [6].

В частности, участие пролина в адаптации растений к засухе как осморегулятора общеизвестно. Его накопление приводит к увеличению клеточной осмолярности, что вызывает приток воды в клетки или снижает ее отток, обеспечивая при этом водный потенциал, необходимый для поддержания тургора в условиях недостатка воды [7].

У *Paulownia tomentosa* значения пролина были с начала сезона достаточно высокими и оставались постоянными весь сезон вне зависимости от места произрастания. Так, например, в ботаническом саду динамика была равномерной: в июне количество свободного пролина составляло около 5,69 мкМ/г сухого вещества, в июле – 6,08 мкМ/г сухого вещества, к августу наблюдалось незначительное снижение уровня пролина на 1,2% (рис. 4).

Вокруг автотрасс уже начальные значения были немного выше, чем в ботаническом саду: в июне – 6,16 мкМ/г сухого вещества, в июле меняется очень незначительно (6,14 мкМ/г сухого вещества), здесь тоже в конце сезона немного падает количество пролина – 5,83 мкМ/г.

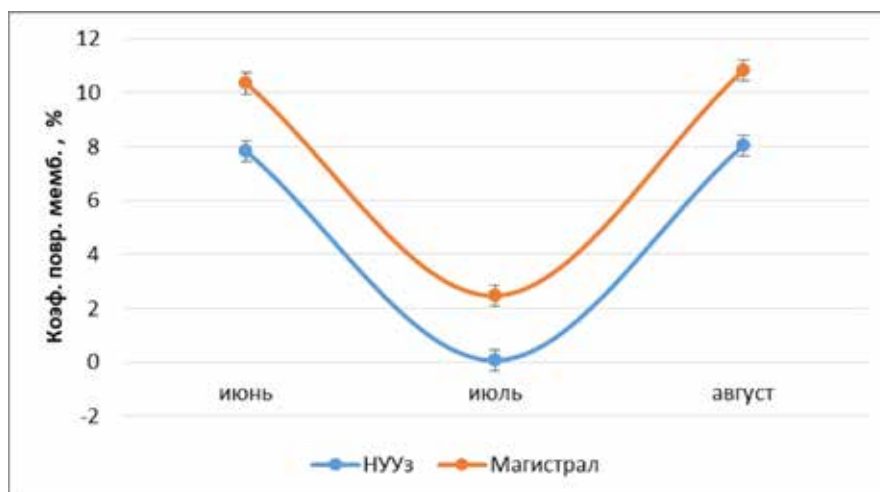


Рис. 5. Коэффициент повреждения мембран в листьях *Paulownia tomentosa* ($n = 20$, $p < 0,05$)

Условия урбанизированной среды негативно влияют на состояние растений, на их рост и развитие, а также на их функциональную активность [1], в частности на проницаемость и целостность мембраны клеток. Самые высокие температуры наблюдались в июле и августе (средняя температура не опускалась ниже показателей 40–42 °С). В начале сезона в листьях павлонии, произрастающей в ботаническом саду, коэффициент повреждения мембран составлял 7,8%. В июле наблюдалось значительное, в 130 раз, снижение коэффициента повреждения (в среднем значение не превышало 0,06%). К концу сезона коэффициент повреждения мембран вновь повышается практически до начальных значений и составляет в среднем 8,04%. Эти значения были приняты нами как контрольные (рис. 5).

Антропогенный стресс в виде магистрали оказался достаточно критическим для растений [4]. Общая картина не менялась – отмечалось понижение коэффициента повреждения в середине жаркого периода и возвращение к начальным значениям к концу сезона. Однако в целом значения были выше, чем у растений, произрастающих в ботаническом саду. Так, в июне коэффициент повреждения мембран превышал контрольные значения этого периода в среднем на 33% и составлял 10,35%. В июле, так же как и в условиях ботанического сада, отмечалось снижение коэффициента повреждения до 2,46%, но снижение было менее заметным и было только в 4,2 раза меньше начального. К концу сезона коэффициент повреждения вновь увеличивался

и составлял 10,8%, что не превышает начальных значений более чем на 5% (рис. 5).

Заключение

Таким образом, снижение количества МДА в листьях павлонии, произрастающих в условиях ботанического сада, связано с активацией в течение сезона ферментов антиоксидантной системы – СОД, каталазы. В то же время в листьях растений, растущих в условиях автомагистралей, наблюдалась активация всех ферментов антиоксидантной системы, а к августу наблюдалось снижение активности СОД. (по сравнению со значениями в июле она была снижена в среднем в 2,7 раза). В связи с активацией перекисного окисления липидов в магистрали видно, что количество пролина также имеет высокие значения в течение сезона, что в свою очередь контролирует образование активных форм кислорода.

На основании полученных нами данных можно предположить, что под влиянием стрессовых факторов декоративные растения активируют систему антиоксидантной защиты, активируя одну или несколько антиоксидантных реакций. Изменение свойств антиоксидантных ферментов позволяет декоративным растениям выдерживать различные условия произрастания, а также неблагоприятные условия внешней среды природы.

Список литературы

1. Симонова З.А., Тихомирова Е.И., Шайденко И.С. Роль железосодержащих оксидов в адаптации древесных растений к факторам городской среды (на примере города Саратова) // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. № 2–3. С. 101–105.

2. Симонова З.А., Чемаркин Д.А. Активность пероксидазы *Betula pendula* как индикатор качества городской среды (на примере г. Саратова) // Фундаментальные исследования. 2013. № 8–5. С. 1097–1101.
3. Theocharis A., Clement Ch., Barka E.A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperature. *Planta*. 2012. Vol. 235. P. 1091–1105.
4. Рахматуллина Н.Ш., Мухамедова С.Н., Рахмедова М.Т., Чарышникова О.С., Абдуллаева М.М., Левицкая Ю.В. Сезонные изменения состояния антиоксидантной системы в листьях Кatalпы бигнониевидной в условиях городской среды семиаридной зоны // *Universum: химия и биология: электрон. научн. журн.* 2020. 11 (77). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/10870> (дата обращения: 16.06.2022).
5. Sairam R.K., Saxena D.C. 2000. Oxidative stress and antioxidants in wheat genotypes: Possible mechanism of water stress tolerance. *J. Agron. Crop. Sci.* 184. P. 55–61.
6. Чудинова Л.А., Орлова Н.В. Физиология устойчивости растений: учебное пособие к спецкурсу. Пермь: Пермский университет, 2006. 124 с.
7. Joseph E.A., Radhakrishnan V.V., Mohanan K.V. A study on the accumulation of proline – an osmoprotectant amino acid under salt stress in some native rice cultivars of North Kerala, India. *Univ. J. Agr. Res.*, 3. P. 15–22. DOI: 10.13189/ujar.2015.030104.