

УДК [581.5+581.1]:504

ВЛИЯНИЕ УРБОСРЕДЫ НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ ТУИ ЗАПАДНОЙ (*THUJA OCCIDENTALIS*) В УСЛОВИЯХ Г. МИНСКА

R. S. БОНДАРУК¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт
имени А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Городская среда отличается своеобразием экологических процессов, специфичностью техногенных воздействий, приводящих к значительной трансформации окружающей среды. Растения являются основным фактором экологической стабилизации городской среды благодаря своей жизнедеятельности, фотосинтезу и способности к аккумуляции загрязняющих веществ. В связи с этим представляется актуальным изучение резистентности различных видов растений к городским условиям. Оценка экологической пластиности растений и определение их адаптивного потенциала позволяет решать разнообразные экологические и практические задачи. В процессе изучения влияния урбанизированной среды на примере г. Минска на некоторые физиологические показатели растений туи западной установлено, что изменение клеточного метаболизма проявляется в увеличении проницаемости клеточных мембран, изменении водного обмена растений, увеличении на 35 % активности пероксидазы и снижении более чем в 1,6 раза активности каталазы. В крупных городах складывается особый температурный режим, характеризующийся повышенными температурами, что влияет на продолжительность вегетационного периода растений. Важное экологическое значение для растений имеет понижение относительной влажности воздуха в городе, что особенно заметно в летний период. В городских условиях наблюдается нивелирование ветров, усиление турбулентности воздушных потоков, связанных с планировочными особенностями городской застройки и приводящими к скоплению вредных атмосферных примесей. Задымление и запыленность воздуха в условиях мегаполиса задерживают до 20 % солнечной радиации, оказывающей неблагоприятное влияние на жизнедеятельность растений. Городская среда характеризуется особенностями светового режима, который нарушает естественные биологические ритмы. Сильной трансформации подвергаются почвы, испытывающие комплексное антропогенное воздействие. Уплотненность и загрязненность почвы, наличие асфальтового покрытия отрицательно воздействуют на температурный режим, воздухо- и водообмен почв и, как следствие, на состояние растительности.

Ключевые слова: городская среда; каталаза; пероксидаза; проницаемость клеточных мембран; водный обмен.

THE IMPACT OF THE URBANIZED ENVIRONMENT ON THE EXAMPLE ON SOME PHYSIOLOGICAL INDICATORS (*THUJA OCCIDENTALIS*) OF THE CITY OF MINSK

R. S. BONDARUK^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Образец цитирования:

Бондарук РС. Влияние урбосреды на некоторые показатели растений туи западной (*Thuja occidentalis*) в условиях г. Минска. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;2:36–43.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-36-43>

For citation:

Bondaruk RS. The impact of the urbanized environment on the example on some physiological indicators (*Thuja occidentalis*) of the city of Minsk. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:36–43. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-36-43>

Автор:

Роман Сергеевич Бондарук – магистр биологических наук, аспирант кафедры общей биологии и генетики.

Author:

Roman S. Bondaruk, master of biological sciences, postgraduate student at the department of general biology and genetics.
mikheyeva@tut.by

In large cities a special temperature condition is formed, which is characterized by the increased temperatures that affects the duration of the growing season of plants. A decrease in the relative humidity of the air in the city is of great ecological importance for plants; this is especially noticeable in the summer. In urban conditions, a leveling of winds and the increased turbulence of air flows, which is associated with the planning features of urban development, lead to the accumulation of harmful atmospheric impurities. Smoke and dust content of the air in urban conditions retain up to 20 % of solar radiation, which has an adverse effect on the vital activity of plants. The urban environment is characterized by the features of the light regime, which disrupts the natural biological rhythms. In cities, the soils are exposed by a strong transformation and go through a complex anthropogenic impact. Compaction and contamination of the soil as well as asphalt coating negatively affect the temperature conditions, air and water exchange of the soils, and, as a result, the state of vegetation. The urban environment is distinguished by the originality of environmental factors, the specificity of technogenic impacts, leading to a significant transformation of the environment. Plants are the main factor in the ecological stabilization of the urban environment due to their vital activity, photosynthesis and the ability to accumulate pollutants. In this regard, it seems relevant to study the resistance of various plant species to urban conditions. Assessment of the ecological plasticity of plants and determination of their adaptive potential allows solving various ecological and practical problems. In the process of studying the influence of the urbanized environment on the example of the city of Minsk on some physiological indicators of *thuja occidentalis* plants, it was found that a change in cellular metabolism manifests itself in an increase in the permeability of cell membranes, a change in water metabolism of plants, an increase in peroxidase activity by 35% and a decrease in catalase activity by more than 1,6 times.

Keywords: urban environment; catalase; peroxidase; permeability of cell membranes; water exchange.

Введение

Городская среда отличается своеобразием экологических процессов, специфичностью техногенных воздействий, приводящих к значительной трансформации окружающей среды. Растения хотя и подвергаются комплексному химическому, физическому, биогенному воздействию вследствие загрязнения атмосферы, поверхностных и грунтовых вод, но, тем не менее, остаются основным фактором экологической стабилизации городской среды благодаря своей жизнедеятельности, прежде всего, фотосинтезу и способности к аккумуляции загрязняющих веществ [1; 2]. В крупных городах складывается особый температурный режим, характеризующийся повышенными температурами. Его формирование обусловлено усиленным притоком антропогенного тепла (работа промышленных предприятий, транспорт, отопительные системы жилых массивов, а также дополнительные источники теплового излучения – искусственные покрытия улиц и площадей, крыши и стены зданий). По этой причине температура воздуха в городе в среднем на 0,5–5 °C выше по сравнению с пригородной зоной, а безморозный период продолжительнее на несколько дней [3–5].

Важное экологическое значение для растений имеет понижение относительной влажности воздуха в городе, это особенно заметно в летний период, когда разница между городом и пригородом по этому показателю достигает 7–15, а в центре – 20–22 %. Большая концентрация ядер конденсации в атмосфере над городом приводит к повышенной облачности и увеличению частоты выпадения осадков примерно на 10–15 % [6].

В городских условиях наблюдается нивелирование ветров, усиление турбулентности воздушных потоков, что связано с орографическими неровностями и планировочными особенностями городской застройки. Наличие своеобразного «острова тепла» над центром города вызывает образование системы ветров, дующих от периферии к центру. Это приводит к ослаблению вентилируемости его центральных районов и скоплению вредных атмосферных примесей [7; 8].

Задымление и запыленность воздуха, частая повторяемость туманов задерживают 18–20 % солнечной радиации (в сильно загрязненных районах – до 50 %, для коротковолновой ультрафиолетовой радиации – до 80 %). Ослабление наиболее активной в биологическом отношении радиации оказывает неблагоприятное влияние на жизнедеятельность растений. Несмотря на то что в районах с многоэтажной застройкой растения нередко испытывают недостаток света из-за прямого затенения, особенностью светового режима в урбанизированных экосистемах является дополнительное освещение улиц, искусственно продлевающее световой день, которое не влияет на процессы фотосинтеза (из-за низкой интенсивности), но оказывает влияние на фотопериодических реакциях растений и нарушает естественные биологические ритмы поведения насекомых-фитофагов, вызывая их перераспределение и скопление в отдельных частях насаждений [9].

В городах сильной трансформации подвергаются почвы, испытывающие комплексное антропогенное воздействие. Естественные почвы часто оказываются погребенными под слоем насыпного грунта, в том числе с примесью строительного мусора, и на его профиле с трудом выделяются горизонты. Уплотненность и загрязненность урбанизированных земель, наличие асфальтового покрытия отрицательно воздействуют на температурный режим, воздухо- и водообмен почв, состояние почвенной микрофлоры, мезофауны и, как следствие, состояние растительности. В результате угнетается рост деревьев, появляются признаки суховершинности, происходит частичное или полное исчезновение травянистого покрова. Внесение противогололедных

реагентов вызывает в городских условиях засоление и способствует формированию условий «физиологической» сухости для растений [10].

Вследствие высокой теплопроводности асфальтового покрытия годовой перепад температур в корнеобитаемых горизонтах почв в городах составляет 40 °C (в естественных условиях не более 20–25 °C). В результате летом почва под асфальтом перегревается и иногда достигает 50–55 °C, а зимой сильно промерзает (до -10–13 °C). В итоге верхние слои почв не содержат живых корней [11].

Ежегодная уборка опавшей листвы, скашивание газонных трав изменяют элементный состав грунта, что может привести к размыканию естественных биогеохимических циклов. Кроме того, происходит подщелачивание городских почв, снижающее доступность элементов питания. Плодородие во многом определяется деятельностью почвенной микрофлоры и мезофауны, но по причинам, указанным ранее, городские почвы практически стерильны почти до метровой глубины [12].

Содержание органического углерода в почвах крупных промышленных центров обуславливается не только сугубо почвенными процессами, но и оседающей пылью, включающей углеродсодержащие соединения промышленных и транспортных выбросов. Такой органический углерод не имеет прямого отношения к гумусу и не может служить показателем плодородия почв. Таким образом, в крупных промышленных городах происходит значительное увеличение антропогенной нагрузки на урбанизированные экосистемы. В этих условиях важным свойством живых организмов является способность сочетать устойчивость (гомеостаз) и приспособления (адаптации) к изменяющимся условиям среды, что дает возможность выжить в условиях нарастающего антропогенного стресса [13].

Значительную роль в создании благоприятной для людей среды обитания играют древесные растения. В городских ландшафтах они выполняют важнейшие средообразующие и средозащитные функции, связанные с выделением кислорода и фитонцидов, ионизацией воздуха, формированием своеобразного микроклимата [14].

В то же время насаждения, произрастающие на урбанизированных территориях, испытывают на себе постоянное влияние техногенного загрязнения. В связи с этим большое значение приобретает проблема изучения резистентности различных видов растений к городским условиям. Оценка экологической пластичности растений и определение их адаптивного потенциала позволяет решать разнообразные экологические и прикладные задачи, а также прогнозировать поведение видов при климатических изменениях и антропогенных воздействиях.

Особую ценность в улучшении качества городской среды представляют хвойные растения. Большинство из них являются вечнозелеными, что повышает их роль в озеленении городов, расположенных особенно в зоне умеренного климата, так как они участвуют в очистке воздуха от пыли и вредных газов даже в зимнее время.

Использование хвойных растений в озеленении городов зачастую затруднено из-за их высокой чувствительности к ряду загрязняющих веществ, что определяется преимущественно значительной продолжительностью жизни хвои. Но все же некоторые виды хвойных отличаются значительной устойчивостью к техногенному загрязнению. Среди них можно отметить виды рода туя (*Thuja* L.), которые не только обладают высокими декоративными качествами, но и по сравнению с другими хвойными растениями способны максимально противостоять действию токсичных газов.

Таким образом, изучение эколого-биологических особенностей видов рода туя в городских районах с различной антропогенной нагрузкой позволит провести оценку перспективности применения его форм и сортов для улучшения качества окружающей среды. В связи с этим целью наших исследований было изучение некоторых физиологических показателей растений туи западной, произрастающих в условиях г. Минска.

Материалы и методы исследования

Объект исследований – насаждения туи западной (сорта и формы) в составе зеленых насаждений в различных (с точки зрения экологических условий) районах г. Минска. В качестве зон условного контроля в г. Минске были выбраны: территория Центрального Ботанического сада НАН Беларуси, Лошицкого парка, улицы, парки и скверы Партизанского района. В качестве критериев стрессоустойчивости к неблагоприятным экологическим факторам городской среды оценивали такие физиологические показатели, как водоудерживающая и водопоглощающая способность, а также активность пероксидазы и каталазы.

Для проведения исследований физиологических показателей клеток растений *T. occidentalis* проводили сбор образцов побегов и хвои. Образцы отбирали из средней части кроны с южной стороны. Выборка в каждом местообитании составляла 10 растений. Определение активности фермента пероксидазы проводили фотоэлектроколориметрическим методом. Для этого навеску растительного материала растирали в ступке с дистиллированной водой, вытяжку настаивали, фильтровали. Надосадочную жидкость использовали для определения пероксидазной активности, для чего в кювету помещали бензидин, анализируемую жидкость

и вливали перекись водорода, при этом отмечали время, за которое стрелка гальванометра достигала 0,2 единиц оптической плотности. Активность фермента рассчитывали по значению оптической плотности исследуемой жидкости при длине волны 670 нм, деленному на грамм сырой массы за секунду ($\Delta D_{670} \text{Г}^{-1} \text{с}^{-1}$) [15].

Активность фермента каталазы определяли титrimетрическим методом. При этом отфильтрованный гомогенат инкубировали в течение 10 мин с раствором перекиси водорода. Инкубацию прекращали, добавляя 5 мл 10 % серной кислоты. Неразложившуюся перекись водорода инактивировали 0,05 н раствором перманганата калия до появления слаборозовой окраски, не исчезающей в течение минуты. Активность каталазы выражали количеством перекиси водорода, разложившейся в результате действия фермента за 1 мин на 1 г сырой массы ($\text{млH}_2\text{O}_2\text{мин}^{-1}\text{г}^{-1}$) [15].

Водоудерживающую способность тканей устанавливали методом подсушивания, проводимым в экспираторе над насыщенным раствором хлорида натрия. Проницаемость мембран определяли кондуктометрическим методом. Для этого готовили вытяжку растительной ткани, измеряли величину ее электропроводности, по которой судили о выходе электролитов. В работе использовали следующие статистические характеристики: среднее арифметическое, ошибка среднего арифметического, минимальные и максимальные значения в выборке, коэффициент корреляции, *t*-критерий Стьюдента с поправкой Бонферони. При изучении физиологических показателей растений, произраставших в различных районах города, применялись одно- и двухфакторный дисперсионный анализ, множественные сравнения. Экспериментальные данные, полученные в результате проведенных исследований, обрабатывали с помощью программ «Statistica».

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из важнейших показателей жизнеспособности растений является степень оводненности их тканей. Содержание и состояние воды в клетках и тканях влияют на устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды и, в конечном счете, на рост и продуктивность. Известно, что влажность тканей значительно изменяется в течение года, а величина содержания общей воды (общая оводненность) используется как интегральный показатель эколого-физиологических особенностей водного режима растений, механизмов их адаптации к условиям среды. В связи с этим в 2018–2020 гг. нами была прослежена сезонная динамика водоудерживающей способности тканей растений *T. occidentalis* в районах г. Минска с различным уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Как показали результаты, значения данного показателя изменяются в зависимости от сезона. Самые низкие значения водоудерживающей способности тканей побегов *T. occidentalis*, произрастающих в экологически чистом районе города (ЦБС НАН Беларуси), были отмечены в весенние месяцы, а потери воды при этом были наибольшими и составили 11,5 %. Высокая водоудерживающая способность была обнаружена в октябре–ноябре, так как потери воды были незначительны и равнялись всего 3,0–3,4 %. Известно, что весной, с началом роста побегов происходят активные метаболические процессы, сопровождающиеся высокой интенсивностью аэробного дыхания и высокой активностью АТФ-азы. Эти процессы идут в условиях повышенного содержания свободной воды и низкой водоудерживающей способности тканей.

Установлено, что значения водоудерживающей способности растительных тканей у *T. occidentalis* в июне–августе варьировали от 7,3 до 10,7 %. Такое изменение водоудерживающей способности тканей побегов у туи в июне–августе, по-видимому, является адаптивным механизмом к изменениям температуры и влажности атмосферного воздуха в летние месяцы. Увеличение же значений данного показателя в осенние месяцы было вполне закономерно и соответствовало периоду подготовки растений к зимнему сезону. Побеги туи западной, произрастающей в районах с интенсивным антропогенным воздействием (район Минского тракторного завода), характеризовались более широким диапазоном колебаний значений потери воды при высушивании (от 2 до 14 %).

Анализ сезонных изменений водоудерживающей способности побегов *T. occidentalis*, произрастающих вблизи автомагистралей Партизанского р-на г. Минска, свидетельствует, что по сравнению с контрольным местообитанием имеются некоторые отличия. Так, в апреле растения, произраставшие в районах с низким (ЦБС НАН Беларуси) и средним (Лошицкий парк) уровнем загрязнения, характеризовались значительным снижением водоудерживающей способности тканей, при этом потеря воды тканями составляла от 8,2 до 15,5 %. В мае изученные показатели находились на одном уровне с контролем (ЦБС НАН Беларуси) – 10–12 %. В июне же потери воды побегами туи западной были выше на 35 %, чем в ЦБС НАН Беларуси. В июле–августе изученные растения не имели статистически значимых различий.

В ноябре, когда в контрольном варианте потери воды снижались, в побегах *T. occidentalis* произрастающих в районах, подверженных антропогенному загрязнению, было отмечено понижение водоудерживающей способности тканей в 1,2–1,4 раза. Таким образом, при снижении значений данного показателя в побегах растений *T. occidentalis* в районе промышленных предприятий наблюдалось увеличение водоудерживающей способности у растений данного вида в экологически чистом районе города. Аналогичная картина отмечена

нами и в июне. В ходе исследований просматривались два четко выраженных направления в водном обмене у туи западной: весенне-летнее, когда потери воды были максимальными и составляли 7,3–15,6 %, и осенне-зимнее – с более стабильными параметрами водного режима и высокой водоудерживающей способностью тканей (потери воды равнялись 2,2–8,7 %). По всей видимости, это связано с тем, что летом ткани растений физиологически более активны, а зимой находятся в состоянии покоя, поэтому потеря воды (метаболической, транспортной, обменной и др.) в летние месяцы больше, чем зимой.

Однако установлено, что растения *T. occidentalis*, произрастающие в местообитаниях с большей антропогенной нагрузкой, характеризуются более существенными колебаниями водоудерживающей способности в течение года. Вероятно, на водный обмен туи западной в более загрязненных районах города оказывают влияние различные загрязняющие вещества, находящиеся в атмосфере.

Так как водоудерживающую способность, определенную методом высушивания, принято считать показателем экологической пластиичности вида, то можно предположить, что значительные колебания данного признака (от 2,26 до 15,6 %) у *T. occidentalis* в различных местообитаниях, находящихся в одном возрастном состоянии (g) и на одном уровне жизненности (здоровые растения), могут свидетельствовать о высоких адаптивных способностях этого вида к условиям окружающей среды.

Основные функции клеточных мембран заключаются в отделении содержимого клетки от внешней среды, в создании ее внутренней архитектуры, поддержании градиента концентраций и электрохимического градиента, осуществлении транспорта веществ. Благодаря регуляторным свойствам биомембран растения в значительной мере контролируют свой водный режим, минеральное питание и взаимодействие. Наличие эндомембранный системы, указывающее на существование регуляторных взаимодействий клеточных органелл, обеспечивает системный ответ клетки на изменение условий внутренней и внешней среды. Начальные этапы реакции клеток на действие различных стрессоров связывают с изменением состояния мембран и деградацией липидов [16; 17].

Содержащиеся в атмосфере газообразные вещества проникают в межклетники растений через устьица, далее они растворяются в воде, пропитывающей целлюлозные оболочки клеток, и на пути в клетку вступают в контакт с клеточной мембраной. Многие промышленные газообразные соединения обладают свойствами сильных окислителей, поэтому они, адсорбируясь на поверхности мембраны и проникая через нее, могут вызывать окислительное разрушение. Кроме того, изменение проницаемости клеточных мембран для электролитов является одной из ранних реакций растительной клетки на экстремальные воздействия различной этиологии (низкие и высокие температуры, засуха, засоление, инфекции, наличие тяжелых металлов и др.), что приводит к ускорению выхода из клетки минеральных и органических ионов и потере воды.

Таким образом, для устойчивости растений к стрессовым факторам внешней среды важно сохранение целостности мембран, поэтому проницаемость клеточных мембран для электролитов – интегральный показатель функционального состояния растительных тканей, свидетельствующий о их выносливости и стабильности в неблагоприятных условиях произрастания.

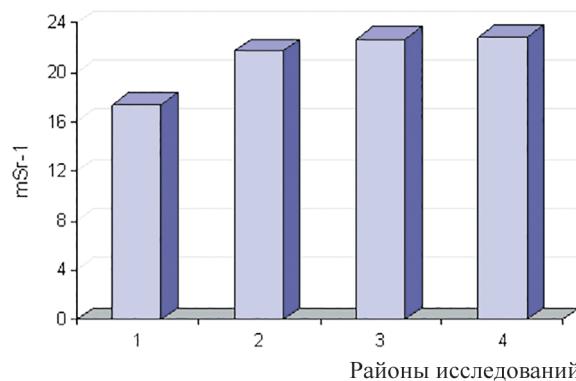
Результаты наших исследований свидетельствуют, что минимальная электропроводность раствора – 17,42 mS \cdot Г $^{-1}$ – была обнаружена в тканях растений *T. occidentalis*, произраставших в более чистом местообитании – ЦБС НАН Беларусь (см. рисунок).

Растения *T. occidentalis* из местообитаний с более высокой антропогенной нагрузкой характеризовались увеличением удельной электропроводности раствора практически в 1,3 раза, то есть эти параметры были равны 21,7–22,8 mS \cdot Г $^{-1}$. Попарное сравнение значений удельной электропроводности исследуемых растворов (t-критерий Стьюдента) показало, что значение проницаемости клеточных мембран побегов растений *T. occidentalis*, произраставших в ЦБС НАН Беларусь, было достоверно ниже, чем у растений, произраставших в промышленной зоне города (при $p < 0,05$). Установлено, что группы растений *T. occidentalis*, произраставшие в Лошицком парке и в микрорайоне МТЗ, по значениям проницаемости клеточных мембран достоверно не отличались друг от друга.

Наиболее часто при изучении устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды учитывается активность некоторых антиоксидантных ферментов. Поддержание равновесия окислительно-восстановительных процессов в клетках при действии газообразных соединений, особенно кислотогенных, имеет особое значение, так как последние вызывают сдвиг межклеточной и внутриклеточной среды в кислую сторону. Поскольку оптимумы действия большинства гидролитических ферментов находятся в кислой зоне, падение pH клеточной среды способствует их активации, что в дальнейшем может привести к усилению окислительных процессов в клетках.

Механизм токсического действия газообразных кислотных оксидов на растения заключается в неспецифическом повреждении деятельности многих ферментов в клетках вследствие подкисления и нарушения ионного режима, метаболизма и накопления балластных и, возможно, токсических продуктов, в разрушении фотосинтетических структур, в нарушении электронно-транспортных путей, в миграции энергии от пигментов к центрам их использования, в уменьшении использования световой энергии на

восстановительные процессы и появления автокаталитических цепных реакций свободнорадикального фотодинамического окисления. Летальные концентрации кислых газов вызывают быструю инактивацию многих ферментов и фиксацию клеток без разрушения пигментов вследствие чисто химического отравления, гидролиза и окислительного распада важных биологических белковых структур клетки.



Проницаемость клеточных мембран в побегах *T. Occidentalis*: 1 – ЦБС НАН Беларуси, 2 – Лошицкий парк, 3 – микрорайон МТЗ

Permeability of cell membranes in shoots of *T. Occidentalis*:

1 – Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, 2 – Loshitskiy Park, 3 – MTZ microdistrict

При негативных воздействиях в клетках растений усиливается образование активных форм кислорода, что в итоге может привести к окислительному стрессу. Перекись водорода способна легко диффундировать через мембранные из мест образования (хлоропласти, митохондрии) в клеточную стенку, где она используется для катализируемого пероксидазами образования перекисных связей в структурных белках и пектинах. Образование и быструю диффузию через мембранные перекиси водорода рассматривают как проявление сигнальной функции и вторичный мессенджер при трансдукции стрессорного сигнала, включающего индукцию синтеза ферментов-антиоксидантов.

Под влиянием неблагоприятных воздействий среды происходит активирование пероксидазы – одного из ключевых ферментов в формировании и развитии защитных реакций в растительной клетке, обеспечивающего нормальный ход окислительных процессов. Газообразные соединения на свету инициируют возникновение свободнорадикальных цепных реакций окисления, в ходе которых образуются органические перекиси. Образование и накопление последних, видимо, обусловливает субстратную активацию пероксидазы, которая, как известно, при катализитическом действии может использовать органические перекиси в качестве источника активного кислорода. Известно, что с повышением активности пероксидазы усиливаются ее оксидазные свойства, следовательно, в условиях действия CO , SO_2 , NO_2 может преобладать функционирование пероксидазы как терминальной оксидазы. Таким образом, в этих условиях при ингибировании других оксидаз происходит адаптивная перестройка окислительного аппарата, препятствующая нарушению дыхательного процесса.

Защитные функции от окислительного эффекта перекиси водорода в клетке выполняет не только пероксидаза, но и другой антиоксидантный фермент – каталаза. Она катализирует реакцию разложения перекиси водорода на воду и молекулярный кислород. Каталаза проявляет умеренную пероксидазную активность, то есть катализирует реакции окисления перекисью водорода различных доноров электронов, среди которых этанол и др. Каталаза в растительной клетке в основном локализована в митохондриях и пероксисомах. Кроме того, ее активность обнаружена в хлоропластиах. Каталаза инактивируется сильной кислотой, сероводородом, фторидами. Наиболее сильное торможение активности каталазы вызывает нитрат-ион. Данный фермент всегда присутствует в системах, где происходят процессы дыхания с участием цитохромов, то есть в тех случаях, когда образуется токсичная для клетки перекись водорода.

Так как пероксидаза и каталаза являются наиболее чувствительными ферментами при воздействии на растения неблагоприятных факторов среды, было проведено изучение их активности в побегах растений туи западной, произраставших в различных районах г. Минска. В ходе исследования было установлено, что в побегах *T. occidentalis*, произраставших в ЦБС НАН Беларуси, активность пероксидазы составляла около 6,6 ед. измерения ($\Delta D_{670} \text{ Г}^{-1} \text{ с}^{-1}$), в Лошицком парке значения данного показателя равнялись 6,8 ед. изм. Максимальная активность пероксидазы обнаружена у растений туи западной, произраставших в микрорайоне МТЗ – 8,9 ед. изм. Следовательно, достоверное увеличение активности пероксидазы связано с воздействием на растения загрязняющих веществ, содержащихся в атмосферном воздухе.

При изучении активности фермента каталазы у растений туи западной было установлено, что в противоположность пероксидазе данный фермент в неблагоприятных условиях снижает свою активность. Так, если в побегах растений *T. occidentalis*, произрастающих в ЦБС НАН Беларуси, каталазная активность

составляла 2,9 ед. изм. ($\text{млH}_2\text{O}_2\text{мин}^{-1}\cdot\text{г}^{-1}$), то у растений микрорайона МТЗ значения данного показателя были статистически значимо ниже – 1,8 ед. изм. Уровень активности каталазы в побегах туи западной, произрастающей в Лошицком парке, составил 2,0 ед. изм.

Заключение

Растения туи западной, произрастающие на урбанизированных территориях, испытывают негативное воздействие комплекса загрязняющих веществ, что приводит к изменению клеточного метаболизма. Изменение клеточного метаболизма у растений *T. occidentalis* проявляется в увеличении проницаемости клеточных мембран и изменении водного обмена растений.

В клетках и тканях растений *T. occidentalis* загрязнение атмосферного воздуха способствует увеличению на 35 % активности пероксидазы и снижению более чем в 1,6 раза активности каталазы.

Библиографические ссылки

1. Бояркин АН. Быстрый метод определения активности пероксидазы. *Биохимия*. 1951;16(4):73–77.
2. Бухарина ИЛ, Поварница ТМ, Веденников КЕ. *Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде*. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА; 2007. 216 с.
3. Герасимов АО. *Устойчивость хвойных пород в уличных посадках Санкт-Петербурга*. Санкт-Петербург: Наука; 2003. 181 с.
4. Горышнина ТК. *Растение в городской среде*. Ленинград: Издательство Ленинградского университета; 1991. 152 с.
5. Калашникова ОВ. *Техногенное загрязнение почвы и состояние древесных растений в г. Москве*. Москва: МГУ; 2003. 21 с.
6. Карапес ВН, Карапеса МА, Маторкин АА. Эколого-физиологическая диагностика состояния городских зеленых насаждений. В: *Глобальные проблемы национальной безопасности России в 21 веке. – Седьмые Вавиловские чтения*. Йошкар-Ола: МарГУ; 2003. Том 2. с. 201–203.
7. Крылова ЛН, Каменщикова ЛВ, Ефремова ЛП. Эколого-физиологическая диагностика состояния городских зеленых насаждений. В: *Диалог наук на рубеже XX–XXI веков и глобальные проблемы современности. Вавиловские чтения*. Йошкар-Ола: МарГУ; 1996. с. 318–320.
8. Кулагин ЮЗ. *Древесные растения и промышленная среда*. Москва: Наука; 1974. 124 с.
9. Лихачева ЭА, Тимофеев ДА, Жидков МП и др. *Город – экосистема*. Москва: ИГРАН; 1996. 336 с.
10. Михайлова ТА. *Эколого-физиологическое состояние лесов, загрязненных промышленными эмиссиями*. Иркутск: Глазковская типография; 1996. 20 с.
11. Негребов ОП, Жуков ДМ, Фирсова НВ. *Экологические основы оптимизации и управления городской средой*. Экология города. Воронеж: Издательство Воронежского университета; 2000. 271 с.
12. Сергейчик СА. Роль древесных растений в очищении атмосферного воздуха от газообразных сернистых токсикантов. В: *Проблемы фитогигиены и охраны окружающей среды*. Ленинград: Гидрометоиздат, 1981. 133–136.
13. Хвастунов АИ. *Экологические проблемы малых и средних промышленных городов: оценка антропогенного воздействия*. Йошкар-Ола: МарГУ; 1999. 248 с.
14. Якушина ЭИ. Древесные растения в озеленении промышленных зон. *Бюллетень главного ботанического сада РАН*. 1992;165:176.
15. Воскресенская ОЛ, Сарбаева ЕВ. *Эколого-физиологические адаптации туи западной (*Thuja occidentalis L.*) в городских условиях*. Йошкар-Ола: МарГУ; 2006. 130 с.
16. Чиркова ТВ. Клеточные мембранные и устойчивость растений к стрессовым воздействиям. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;9: 12–17.
17. Чиркова ТВ. *Физиологические основы устойчивости растений*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета; 2002. 244 с.

References

1. Boyarkin AN. A quick method for determining the activity of peroxidase. *Biokhimiya*. 1951;16(4):73–77. Russian.
2. Bukharina IL, Povarnitsina TM, Vedernikov KE. *Ekologo-biologicheskie osobennosti drevesnykh rasteniy v urbanizirovannoy srede* [Ecological and biological characteristics of woody plants in an urbanized environment]. Izhevsk: FGOU VPO Izhevskaya GSKhA, 2007. 216 p. Russian.
3. Gerasimov AO. *Ustoychivost' khvoynykh porod v ulichnykh posadkakh Sankt-Peterburga* [Sustainability of conifers in street plantings in Saint Petersburg]. Saint Petersburg: Nauka; 2003. 181 p. Russian.
4. Goryshina TK. *Rastenie v gorodskoy srede* [A plant in an urban environment]. Leningrad: Izdatelstvo Leningradskogo universiteta; 1991. 152 p. Russian.
5. Kalashnikova OV. *Tekhnogennoe zagryaznenie pochyv i sostoyanie drevesnykh rasteniy v g. Moskve*. [Technogenic soil pollution and the state of woody plants in Moscow]. Moscow: MGU; 2003. 21 p. Russian.
6. Karasev VN, Karaseva MA, Matorkin AA. *Ekologo-fiziologicheskaya diagnostika sostoyaniya gorodskikh zelenykh nasazhdeniy*. [Ecological and physiological diagnostics of the state of urban green spaces]. In: *Global'nye problemy natsional'noy bezopasnosti Rossii v 21 veke. – Sed'mye Vavilovskie chteniya*. [Global problems of Russia's national security in the 21st century. – 7th Vavilov Readings]. Yoshkar-Ola: MarGU; 2003. Part 2. p. 201–203. Russian.
7. Krylova LN, Kamenshchikova LV, Efremova LP. *Ekologo-fiziologicheskaya diagnostika sostoyaniya gorodskikh zelenykh nasazhdeniy* [Ecological and physiological diagnostics of the state of urban green spaces]. In: *Dialog nauk na rubezhe XX–XXI vekov i global'nye problemy sovremennosti. Vavilovskie chteniya* [Dialogue of sciences at the turn of XX–XXI centuries and global problems of our time. Vavilov readings]. Yoshkar-Ola: MarGU; 1996. p. 318–320. Russian.

8. Kulagin YuZ. *Drevesnye rasteniya i promyshlennaya sreda* [Woody plants and industrial environments]. Moscow: Nauka; 1974. 124 p. Russian.
9. Likhacheva EA, Timofeev DA, Zhidkov MP, i dr. *Gorod – ekosistema* [City – ecosystem]. Moscow: IGRAN; 1996. 336 p. Russian.
10. Mikhaylova TA. *Ekologo-fiziologicheskoe sostoyanie lesov, zagryaznennykh promyshlennymi emissiyami* [Ecological and physiological state of forests polluted by industrial emissions]. Irkutsk: Glazkovskaya tipografiya; 1996. 20 p. Russian.
11. Negrobov OP, Zhukov DM, Firsova NV. *Ekologicheskie osnovy optimizatsii i upravleniya gorodskoy sredoy. Ekologiya goroda* [Ecological bases of optimization and management of the urban environment. Ecology of the city]. Voronezh: Izdatelstvo Voronezhskogo universiteta; 2000. 271 p. Russian.
12. Sergeychik SA. *Rol' drevesnykh rasteniy v ochishchenii atmosfernogo vozdukha ot gazoobraznykh sernistykh toksikantov* [The role of woody plants in the purification of atmospheric air from gaseous sulfurous toxicants]. In: *Problemy fitogigieny i okhrana okruzhayushchey sredy* [Problems of phytohygiene and environmental protection]. Leningrad: Gidrometrioizdat, 1981. p. 133–136. Russian.
13. Khvastunov AI. *Ekologicheskie problemy malykh i srednikh promyshlennikh gorodov: otsenka antropogenного vozdeystviya* [Environmental problems of small and medium-sized industrial cities: assessment of anthropogenic impact]. Yoshkar-Ola: MarGU, 1999. 248 p. Russian.
14. Yakushina EI. *Drevesnye rasteniya v ozelenenii promyshlennikh zon* [Woody plants in industrial landscaping]. *Byulleten glavnogo botanicheskogo sada RAN* [bulletin chapter of the Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences]. 1992;165:176. Russian.
15. Voskresenskaya OL, Sarbaeva EV. *Ekologo-fiziologicheskie adaptatsii tui zapadnoy (Thuja occidentalis L.) v gorodskikh usloviyakh* [Ecological and physiological adaptations of western thuja (*Thuja occidentalis L.*) in urban conditions]. Yoshkar-Ola: MarGU; 2006. 130 p. Russian.
16. Chirkova TV. *Kletochnye membrany i ustoychivost' rasteniy k stressovym vozdeystviyam*. [Cell membranes and plant resistance to stress]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. 1997;9:12–17. Russian.
17. Chirkova TV. *Fiziologicheskie osnovy ustoychivosti rasteniy* [Physiological foundations of plant resistance]. Saint Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta; 2002. 244 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 21.02.2021.
Received by editorial board 21.02.2021.