

пазона. Кроме того, следует учитывать абсолютные величины расхождений или модули разностей приведенных и исходных сумм осадков. С этих позиций картина расхождений в табл. 1 выглядит следующим образом.

В целом по Кыргызстану в зимний период времени, когда осадки носят преимущественно обложной фронтальный характер, исходные данные выше приведенных примерно на 18 %, что соответствует типу 3, то есть спутник завывает на эту цифру фактические осадки. Весной, когда осадки в году максимальны и имеют как конвективный, так и фронтальный характер, расхождение представлено типом 4, когда приведенные суммы существенно больше (они здесь занижены), на нижнем конце диапазона значений и меньше примерно на 10 % на верхнем конце диапазона значений (они здесь завышены). Летом, осадки имеют преимущественно конвективный характер [2] и их суммы примерно такие же, как и зимой. В этот сезон наблюдается тип расхождений 2 – приведенные осадки больше исходных на всем диапазоне. На верхнем конце диапазона, в отличие от зимы, они завышаются по спутнику примерно на 20 %. Наконец осенью, с ее типичными сильными холодными вторжениями, приведенные значения также выше исходных, но уже всего на 5 % в среднем, что соответствует расхождению по типу 1.

Таким образом, можно сделать следующий общий вывод по результатам выполненного анализа: количество обложных осадков, имеющих фронтальный характер, по спутниковым данным чаще всего оказывается переоцененным, в то время как конвективные осадки (фронтальные и локальные) недооцениваются спутниковой моделью ТМРА. Это можно объяснить тем, что конвективные процессы носят кратковременный характер и спутниковые сенсоры зачастую их не фиксируют. Кроме того, в целом справедливо также, что в областях с малыми осадками они завышаются по спутниковым данным, а в областях с большими осадками – занижаются. В связи с этим поле осадков по спутниковым данным является более сглаженным как во времени, так и в пространстве.

По абсолютному большинству наблюдений (85 %), прослеживаются значимые статистические связи и зависимости на уровне доверительной вероятности, равной 0,95 между сезонными суммами осадков, полученными по спутниковым и наземным данным. Для тех редких ситуаций, когда регрессии не значимы следует использовать два варианта приведения: 1) по значимой регрессии общей для всей территории Кыргызстана, б) по значению корректирующего коэффициента $k_{корр.} = \text{сумма по спутнику} / \text{сумма по наземным данным}$.

Указанные выше статистические зависимости рекомендуются к практическому использованию для приведения спутниковых данных об осадках, получаемых по модели ТМРА, к показаниям наземных осадкомеров. В случае применения геоинформационных систем для построения карт осадков по приведенным спутниковым данным полученные результаты позволят критически оценить, а для высокогорной зоны уточнить, полученные ранее карты осадков Кыргызстана. Надо также полагать, что они представляют значительную ценность для разработчиков спутниковых программ косвенных расчетов осадков в горных районах с целью их возможного уточнения и совершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Национальное Авиационное и Космическое Агентство сайт (NASA) [Электронный ресурс]. – URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#> (дата обращения: 15.11.2018).
2. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 2. Вып. 3. Средняя Азия. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 320 с.
3. Karaseva, M. O. Validation of high-resolution TRMM-3B43 precipitation product using rain gauge measurements over Kyrgyzstan / M. O. Karaseva, S. Prakash, R. M. Gairola // J. Theoretical and Applied Climatology. – 2011. – Vol. 108. – P. 147 – 157

ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЛИПИДОВ И АКТИВНОСТЬ КАТАЛАЗЫ В ЛИСТЬЯХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ INTENSITY OF LIPID PEROXIDATION AND CATALASE ACTIVITY IN LEAVES OF WOOD PLANTS, GROWING IN THE CONDITIONS OF INDUSTRIAL POLLUTION

Е. А. Самусик¹, С. Е. Головатый¹, Т. П. Марчик²

E. Samusik¹, S. Golovatyj¹, T. Marchik²

¹Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь

²Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь
e.samusik@mail.ru

Belarusian State University, ISEU BSU, Minsk, Republic of Belarus
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Republic of Belarus

Проведена оценка состояния про- и антиоксидантной системы у древесных растений, произрастающих в условиях промышленного загрязнения (на примере ОАО «Красносельскстройматериалы»), в градиенте

расстояния от источника загрязнения и с учетом направления ветра (СЗ, ЮЗ, СВ, ЮВ). В листьях *Betula pendula* Roth., произрастающих в условиях техногенного (газо-пылевого) загрязнения, наблюдалась активация перекисного окисления липидов. Повышенное содержание МДА было зафиксировано на расстоянии 1–2 км от источника загрязнения – на 19–34 % по сравнению с контролем, за исключением юго-западного направления. Анализ размаха активности каталазы в листьях березы повислой свидетельствует, что наименьшая степень защитных механизмов характерна для насаждений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения в радиусе 2 и 6,5 км от источника загрязнения.

The state of the pro- and antioxidant system in woody plants growing in conditions of industrial pollution (on the example of OJSC «Krasnoselskstroyaterialy») was evaluated in the gradient of the distance from the source of pollution and taking into account the wind direction (NW, SW, NE, SE). In leaves of *Betula pendula* Roth., growing in the conditions of technogenic pollution, activation of lipid peroxidation was observed. The increased content of MDA was recorded at a distance of 1–2 km from the source of pollution – by 19-34% compared with the control, with the exception of the south-west direction. Analysis of the scope of catalase activity in leaves of *Betula pendula* Roth. indicates that the least degree of defense mechanisms is characteristic of plantations growing in conditions of industrial pollution within a radius of 2 and 6.5 km from the source of pollution.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, цементная пыль, древесные растения, МДА, активность каталазы, адаптация.

Keywords: industrial pollution, cement dust, woody plants, MDA, catalase activity, adaptation.

Одной из фундаментальных задач экологии является выявление многообразия механизмов адаптации живых организмов к техногенному стрессу, которые обеспечивают основные процессы жизнедеятельности организмов на достаточном уровне и позволяют им стабильно развиваться [1].

Одним из индикаторов загрязнения промышленных выбросов на окружающую природную среду является растительность, так как именно она, благодаря высокой чувствительности к антропогенному воздействию, первой принимает на себя воздействие техногенного пресса.

Проведенные ранее исследования показывают, что разнообразие реакций растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения, определяется прежде всего спецификой воздействия факторов, а также степенью устойчивости разных видов растений. Наиболее опасным последствием произрастания древесных растений в техногенно загрязненных условиях можно считать развитие окислительного стресса, сопровождающегося избыточной генерацией активных форм кислорода (АФК). Одной из основных мишеней действия АФК являются липиды – основные компоненты клеточных мембран. АФК способны инициировать их перекисное окисление (ПОЛ), в результате чего происходит повреждение этих структур, связанное с нарушением функций мембранных белков. Оно обнаруживается в явлении, которое называют «протечкой мембран», проявляющейся в увеличении проницаемости для ионов и органических веществ.

Малоновый диальдегид (МДА) является одним из конечных продуктов окисления липидов, а его содержание является интегральной характеристикой соотношения анаболизма и катаболизма биополимеров.

Важнейшим механизмом устойчивости растений в условиях промышленного загрязнения является активизация биохимической многоуровневой и многокомпонентной системы антиоксидантной защиты. Наибольшее значение придается роли, выполняемой низкомолекулярными метаболитами (аскорбиновая кислота, глутатион, пролин, каротиноиды, флавоноиды и др.) и антиоксидантными ферментами (супероксиддисмутаза, каталаза, пероксидаза) [2]. При этом многие особенности функционирования антиоксидантной системы растений в техногенных условиях остаются неясными. До сих пор отсутствовали исследования, в которых были бы одновременно представлены отмеченные реакции антиоксидантной системы в пределах одного биологического объекта. Древесные растения представляют в этом аспекте особый интерес, поскольку они обладают высоким биологическим потенциалом при способности длительно депонировать токсичные соединения в многолетних органах [3–6].

К числу ферментов, остро реагирующих на проникновение в клетки листьев токсичных веществ, относится супероксиддисмутаза, пероксидаза, каталаза, принимающие участие во многих процессах жизнедеятельности растений [7].

В результате нарушений нормального функционирования биохимических циклов повышается содержание свободных радикалов в тканях, и в частности (АФК), которые повреждают саму клетку и ее структуры [8; 9]. Перекись водорода (H_2O_2) является самой стабильной из активных форм кислорода и играет ключевую роль как сигнальная молекула в координации других реакций устойчивости, включая реакцию сверхчувствительности. Одним из главных звеньев защиты от АФК служит фермент каталаза.

Каталаза относится к классу ферментов – оксиредуктаз. Это двухкомпонентный фермент, состоящий из белка (апофермент) и соединенной с ним простетической группы (кофермент); последняя содержит гематин, в состав которого входит железо. Данный фермент катализирует реакции окисления различных доноров электронов перекисью водорода.

Активность фермента каталазы – один из показателей потенциальной биологической активности, осуществляющая обезвреживающую функцию по отношению к токсичным перекисным соединениям, образующимся

в клетках при воздействии негативных факторов среды, что обуславливает важную роль фермента в устойчивости растений.

Анализ литературных данных показывает, что большинство исследований по изучению активности каталазы выполнено для растений, произрастающих в городских условиях, менее всего изучено влияние техногенного (цементного) воздействия на активность фермента для древесных растений.

В связи с этим, одной из актуальных задач в настоящее время является оценка состояния про- и антиоксидантной системы у древесных растений, произрастающих в условиях промышленного (газо-пылевого) загрязнения.

Цель исследований заключалась в оценке интенсивности окислительных процессов и активности антиоксидантных ферментов (каталазы) в листьях древесных растений в условиях воздействия предприятия по производству строительных материалов (на примере ОАО «Красносельскстройматериалы»).

Объектом исследования являлась *Betula pendula* Roth. (береза повислая), как наиболее часто встречающаяся лиственная порода.

Климатические условия территории, прилегающей к цементному предприятию, оцениваются по метеорологическим показателям Волковской метеорологической станции. Преобладающими ветрами для летнего периода являются ветры с западной составляющей (СЗ, З, ЮЗ).

Материалом исследования являлись листья *Betula pendula*, которые отбирались по окружности в нижнем ярусе кроны деревьев на высоте 1,5–2 м, в градиенте расстояния от источника загрязнения (1, 1.5, 2, 3.5, 6.5, 8, 15 км) и с учетом направления ветра (СЗ, ЮЗ, СВ, ЮВ). Отбор контрольных (фоновых) растительных образцов был осуществлен на расстоянии 15 км от источника загрязнения. Сборы листьев проводились в одно и то же время суток в ясную погоду. Выборку листьев делали с 10 близко расположенных деревьев на площади 10×10 м. Отбирались не поврежденные листья. Всего собиралось не менее 25 листьев среднего размера с одного дерева. Использовались только средневозрастные генеративные древесные растения. Отборы проб проводились в летний период года (июль).

Перекисное окисление липидов тестировали по количеству малонового диальдегида, содержание которого определяли по цветной реакции с 2-тиобарбитуровой кислотой, с последующим измерением оптической плотности при длине волны 532 нм [10]. Количество МДА рассчитывали, используя коэффициент молярной экстинкции $1,55 \cdot 10^5 \text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Активность каталазы определяли газометрическим методом по количеству выделяющегося кислорода. Единица измерения активности каталазы согласно данному методу представляет собой мл O_2 , разлагаемой 0,5 г исследуемого вещества в течение 1 минуты [10].

Полученные данные подвергались стандартному статистическому анализу с использованием программы STATISTICA 10.0. Достоверность различий обсуждалась при 5-процентном уровне значимости.

Характеристика про- и антиоксидантной системы березы повислой определяется, с одной стороны, содержанием малонового диальдегида, с другой – активностью фермента каталазы (CAT).

В листьях *Betula pendula* Roth., произрастающих в условиях техногенного (газо-пылевого) загрязнения, наблюдалась активация перекисного окисления липидов. Об интенсивности протекания ПОЛ большинство авторов судят по накоплению в тканях конечного продукта липопероксидации – МДА. Так, повышенное содержание МДА было зафиксировано на расстоянии 1–2 км от источника загрязнения – на 19–34 % (табл. 1) по сравнению с контролем, за исключением юго-западного направления.

Таблица 1 – Интенсивность процесса перекисного окисления липидов в листьях *Betula pendula*, произрастающих в градиенте расстояния от источника загрязнения и с учетом розы ветров

Показатель	Направление ветра	Расстояние от объекта загрязнения, км							
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5	8	контроль
МДА, мкмоль/1 г в.-с. массы	ЮЗ	4,35	–*	–	3,80	–	–	–	4,50
	ЮВ	5,04	–	4,60	–	4,05	3,81	–	3,88
	СЗ	–	5,44	–	–	5,20	4,58	4,61	4,07
	СВ	6,17	–	3,46	4,30	3,98	6,00	–	4,00

Примечание: *– отсутствие возможности отбора растительных образцов в связи с неоднородностью произрастания.

Усиленное ПОЛ и накопление МДА может привести к нарушению целостности мембраны и повреждению клетки. В условиях окислительного стресса время жизни образовавшихся АФК и их токсическое действие контролируется системой антиоксидантной защиты клетки, то есть соответствующими ферментами и метаболитами.

При проведении исследований были выявлены изменения показателей (достоверно по критерию Краскелла–Уоллиса при $p < 0,05$) каталазной активности в листьях березы повислой, произрастающей в градиенте расстояния от источника воздействия аэротехногенных выбросов, представленные в табл. 2.

Таблица 2 – Активность каталазы в листьях *Betula pendula*, произрастающих в градиенте расстояния от источника загрязнения и с учетом направления ветра

Показатель	Направление ветра	Расстояние от объекта загрязнения, км							
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5	8	контроль
Каталаза, мл O ₂ /0,5 г/1 мин.	ЮЗ	3,00	–	–	4,22	–	–	–	5,12
	ЮВ	3,00	–	3,52	–	3,65	3,86	–	3,88
	СЗ	–	3,00	–	–	3,50	3,84	4,14	4,68
	СВ	2,88	–	3,01	3,84	3,98	2,70	–	4,16

Из данных табл. следует, что в условиях промышленного (цементного) загрязнения происходят изменения в уровне каталазной активности в листьях березы повислой. Наблюдается снижение активности каталазы в листьях березы повислой, произрастающей вблизи источника загрязнения, в юго-западном направлении – на 13 % в сравнении с насаждениями, активно растущих на расстоянии 8 км от источника загрязнения; в юго-восточном направлении – на 66 %; в северо-западном – на 46 % и в северо-восточном направлении – на 42 % соответственно.

Проведенные исследования позволили ранжировать древесные растения, произрастающие в градиенте расстояния от источника загрязнения (рис. 1). На основании данного анализа выделились 4 группы близких по средним значениям показателя активности каталазы в градиенте расстояния от источника загрязнения.

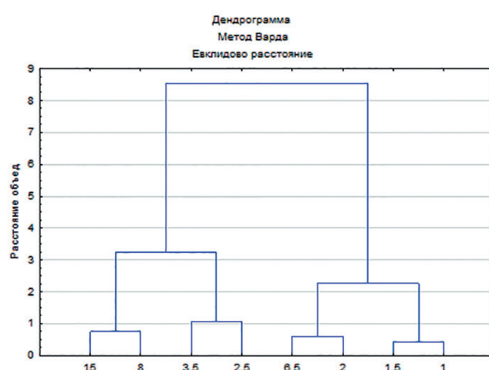


Рисунок 1 – Дендрограмма классификации средних значений активности каталазы в листьях *Betula pendula* в градиенте расстояния от источника загрязнения

Анализ размаха активности каталазы в листьях березы повислой свидетельствует, что наименьшая степень защитных механизмов характерна для насаждений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения в радиусе 2 и 6,5 км от источника загрязнения, за исключением юго-западного направления (рис. 2).

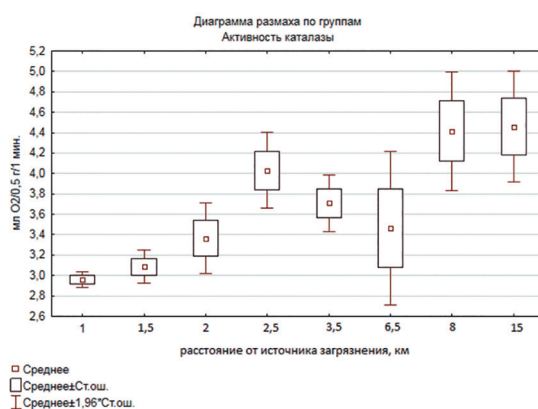


Рисунок 2 – Сравнение групп средних значений активности каталазы в листьях *Betula pendula* в градиенте расстояния от источника загрязнения

Совместный анализ про- и антиоксидантных систем показал, что связь МДА с активностью каталазы достаточно сильная ($r = -0,74$, при $p < 0,05$).

Таким образом, анализ полученных в ходе исследования данных позволяет заключить, что газо-пылевые выбросы цементного предприятия вызывают стимуляцию окислительных процессов в клетках листьев березы повислой, что выражается в увеличении содержания МДА – продукта перекисного окисления липидов мембран,

и способствуют окислительному повреждению антиоксидантного фермента, которое в свою очередь приводит к понижению его активности в результате накопления избыточного количества перекисей, либо блокирования активного центра каталазы поллютантами. Таким образом, в условиях воздействия предприятия по производству строительных материалов формируются особые защитные механизмы листового аппарата *Betula pendula* Roth., проявляющиеся через изменение ряда ферментативных компонентов антиоксидантной защиты (на примере потенциальной активности каталазы). Большая степень ингибирования активности фермента может являться диагностическим признаком слабой устойчивости древесных растений к антропогенным нагрузкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шималина, Н. С. Особенности про- и антиоксидантных систем *Plantago major*, длительное время произрастающего в зоне радиоактивного загрязнения // Экология. – 2018. – № 5. – С. 333–341.
2. Mittler, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // Trends Plant Sci. – 2002. – Vol. 7 (9). – P. 405–410.
3. Кабата–Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата–Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 430 с.
4. Черненкова, Т. В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. – М.: Наука, 2002. С. 8–9, 20, 72–73, 91, 94–95.
5. Прасад, М. Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами / М. Н. Прасад // Физиол. раст. – 2003. – Т. 50, № 5. – С. 764–780.
6. Федорова, Е. В. Биоаккумуляция металлов растительностью в пределах малого аэротехногенного загрязненного водосбора / Е. В. Федорова, Г. Я. Одинцева // Экология. – 2005. – № 1. – С. 26–31.
7. Калинин Ф. Л. Химическая регуляция метаболизма, роста и продуктивности растений / Ф. Л. Калинин // Физиол. и биохим. культ. раст. – 1996. – Т. 28, № 3. – С. 123–140.
8. Хочачка П. Стратегия биохимической адаптации / П. Хочачка, Дж. Сомеро; пер. с англ. Ю. И. Лашкевича; под ред. Е. М. Крепса. – М.: Мир, 1988. – 586 с.
9. Сарсенбаев, К. Н. Роль ферментов в устойчивости растений / К. Н. Сарсенбаев, Ф. А. Полимбетова; отв. ред. И. Р. Рахимбаев. – Алма-Ата: Наука Казах. ССР, 1986. – 180 с.
10. Продукты перекисного окисления липидов как возможные посредники между воздействием повышенной температуры и развитием стресса-реакции у растений / Л. Н. Курганова и др. // Физиол. раст. – 1999. – Т. 46, № 2. – С. 218–222.

СТОИМОСТНАЯ ОЦЕНКА УГЛЕРОДОДЕПОНИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

VALUATION OF THE CARBON-BEARING FUNCTION ON THE EXAMPLE OF FOREST PHYTOCENOSES OF THE BREAST REGION

Я. Г. Смаль, В. М. Мисюченко
Ya. Smal, V. Misiuchenka

Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь
yanchuk96@inbox.ru, vi925@mail.ru
Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

Анализируется вклад лесных фитоценозов разного возраста Брестской обл. в ежегодное углерододепонирование на основании нормативного документа Республики Беларусь по определению экосистемных услуг. Определено, что наибольший вклад в стоимостную оценку ежегодного поглощения диоксида углерода вносят молодняки и средневозрастные леса в связи с максимальным среднегодовым приростом и наибольшим поглощением диоксида углерода. Сделан вывод о необходимости определения углерододепонирующей способности для каждой возрастной группы лесов отдельно. Оценка потенциала леса поглощать углерод позволяет выявить проблему нехватки озелененности отдельных регионов.

The paper analyzes the contribution of forest phytocenoses of different ages in the Brest region to the annual carbon sequestration on the basis of the normative document of the Republic of Belarus on the definition of ecosystem services. It is determined that the greatest contribution to the cost estimate of annual carbon dioxide uptake is made by young and middle-aged forests due to the maximum annual average growth and the highest absorption of carbon dioxide. The conclusion about the need to define carbon-bearing abilities for each age class of forests separately. Assessment of the potential of forests to absorb carbon allows us to identify the problem of lack of greening individual regions.