

УДК 574.24

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/01>

Беренцева С.В., Борисова Г.Г., Собенин А.В., Малева М.Г.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЛИСТА И ПИГМЕНТНОГО КОМПЛЕКСА *BETULA PENDULA* В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

S.V. Berentseva, G.G. Borisova, A.V. Sobenin, M.G. Maleva

CHANGES IN THE LEAF STRUCTURE AND PIGMENT COMPLEX OF *BETULA PENDULA* UNDER CONDITIONS OF TECHNOGENIC AIR POLLUTION

Аннотация. Загрязнение атмосферы в условиях городской среды не только нарушает баланс элементов в фитоценозах, но и приводит к изменениям на разных уровнях организации растительных организмов, в том числе затрагивающих их фотосинтетический аппарат. Изучены анатомо-морфологические особенности и содержание фотосинтетических пигментов в листьях *Betula pendula* Roth, произрастающей в зоне влияния промышленного кластера на территории г. Челябинска (Россия) с разной степенью токсической нагрузки. Было выбрано шесть участков вблизи Челябинского металлургического комбината: пять импактных и один фоновый (северо-западная часть Каштакского бора). По содержанию тяжелых металлов в почве для каждого импактного участка был рассчитан индекс суммарной токсической нагрузки, который в среднем составлял 3,6. Отмечено, что на импактных участках достоверно увеличивалась толщина листовой пластинки (в среднем на 23%), в большей степени за счет палисадного мезофилла и кутикулы верхнего эпидермиса; более того, возрастало количество устьиц, а также величина удельной поверхностной плотности листа (в среднем на 30%), что сопровождалось уменьшением его площади (в среднем на 65%). В условиях повышенной техногенной нагрузки отмечено уменьшение содержания хлорофиллов *a* и *b* (в среднем на 44%), однако соотношение между ними достоверно не изменялось (в среднем 1,75). Каротиноиды оказались более стабильными: их содержание на импактных участках снижалось в меньшей степени. Сделано заключение о значимости компенсаторных перестроек фотосинтетического аппарата *B. pendula* при адаптации к длительному стрессовому воздействию.

Ключевые слова: береза повислая; промышленное загрязнение воздуха; тяжелые металлы; структура

Abstract. Atmospheric pollution in an urban environment not only disrupts the balance of elements in phytocoenoses, but also leads to changes at different levels of organization of plant organisms, including those affecting their photosynthetic apparatus. The anatomical and morphological features as well as photosynthetic pigment content in the leaves of *Betula pendula* Roth, growing in the zone of influence of the industrial cluster in Chelyabinsk (Russia) with varying degrees of toxic load, were studied. Six sites were selected taking into account the wind rose near the Chelyabinsk Metallurgical Plant: five impact and one background (northwestern part of the Kashtaksky pine forest). Based on the content of heavy metals in the soil, the total toxic load index was calculated for each impact site, which averaged 3.6. It was noted that in the impact sites the thickness of the leaf blade significantly increased (on average by 23%), largely due to the palisade mesophyll and upper cuticle. Moreover, the number of stomata increased, as well as the leaf mass per area (by an average of 30%), which was accompanied by a decrease in its area (by an average of 65%). Under conditions of increased technogenic load, a decrease in the content of chlorophylls *a* and *b* was also noted (on average by 44%), but the ratio between them did not change significantly (1.75 on average). Carotenoids turned out to be more stable: their content in impact sites reduced to a lesser extent. The conclusion about the significance of compensatory rearrangements of *B. pendula* photosynthetic apparatus during adaptation to long-term stress has been made.

Keywords: silver birch; industrial air pollution; heavy metals; structure of the

фотосинтетического аппарата; хлорофиллы; photosynthetic apparatus; chlorophylls; каротиноиды. carotenoids.

Сведения об авторах: Беренцева Сусанна Вадимовна, ORCID: 0000-0001-9143-7918, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, berentseva.sus@gmail.com; Борисова Галина Григорьевна, ORCID: 0000-0001-6663-9948, д-р геогр. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, G.G.Borisova@urfu.ru; Собенин Артем Вячеславович, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия, arsob@yandex.ru; Малева Мария Георгиевна, ORCID: 0000-0003-1686-6071, канд. биол. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, maria.maleva@mail.ru

About the authors: Susanna V. Berentseva, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, berentseva.sus@gmail.com; Galina G. Borisova, ORCID: 0000-0001-6663-9948, Doctor of Geographical Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, G.G.Borisova@urfu.ru; Artem V. Sobenin, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, arsob@yandex.ru; Maria G. Maleva, ORCID: 0000-0003-1686-607, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, maria.maleva@mail.ru

Беренцева С.В., Борисова Г.Г., Собенин А.В., Малева М.Г. Изменение структуры листа и пигментного комплекса *Betula pendula* в условиях аэротехногенного загрязнения // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 4-14. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/01>

Berentseva, S.V., Borisova, G.G., Sobenin, A.V., & Maleva, M.G. (2024). Changes in the Leaf Structure and Pigment Complex of *Betula pendula* Under Conditions of Technogenic Air Pollution. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2(66), 4-14. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/01>

Введение

Промышленное загрязнение воздуха оказывает негативное влияние на все компоненты окружающей среды и здоровье населения крупных промышленных городов, и, с учетом трансграничного переноса, влияет на соседние территории [21]. Биомониторинг, для которого часто используется урбанофлора, существенно дополняет сведения об экологическом состоянии городских экосистем [1; 15].

В условиях городской среды в тканях растений происходит ряд физиолого-биохимических изменений, по которым можно судить о степени влияния техногенной нагрузки на растения и экосистемы в целом [16; 21]. Для урбанофлоры характерна выраженная пластичность и изменчивость, являющаяся механизмом выживания в нестабильной природной среде городов [1]. Растения могут адаптироваться к неблагоприятным условиям за счет изменения структурных и функциональных характеристик, в том числе фотосинтетического аппарата [5; 14]. Важной характеристикой фотосинтетического аппарата растений при действии различных факторов является состояние пигментного комплекса, поскольку от него зависит интенсивность фотосинтеза и продуктивность растений. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений может использоваться не только как биоиндикатор стресса в условиях

антропогенного воздействия, но и как показатель нарушенности экосистемы в целом [15; 16].

Betula pendula Roth (береза повислая) – легко идентифицируемый вид, удобный для отбора растительных образцов. Береза является одной из самых светолюбивых древесных пород, достаточно засухоустойчива, мало требовательна к почвенному плодородию, отличается высокой семенной продуктивностью и длительным сохранением всхожести семян [12]. Известно, что *B. pendula* играет значительную роль в естественном зарастании техногенно нарушенных территорий в горно-таежной и лесостепной зонах [10; 12]. Различные аспекты, связанные с оценкой структурно-функциональных особенностей этого вида в нарушенных местообитаниях, изучались многими авторами [4; 7; 9-12; 16; 18; 22]. Однако на территории г. Челябинска, где располагаются крупнейшие в России по объему выпускаемой продукции металлургические предприятия [3], комплексных исследований морфофизиологических характеристик *B. pendula* ранее не проводилось.

Цель работы – изучить анатомо-морфологические особенности и содержание фотосинтетических пигментов в листьях *B. pendula*, произрастающей в зоне влияния промышленного кластера на территории г. Челябинска с разной степенью токсической нагрузки.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели было выбрано шесть участков вблизи Челябинского металлургического комбината (ЧМК) и других сопутствующих предприятий производства стали и прокатных изделий, пять импактных: У1 – шлакоотвал, непосредственно прилегающий к ЧМК; У2 – дорога к Челябинскому аэропорту, около 3 км от ЧМК; У3 – дорога возле карьера, между ЧМК и Челябинским заводом стройиндустрии «Кемма»; У4 – дорога рядом с рекультивированной свалкой, около 4 км от ЧМК; У5 – грунтовая дорога за аэропортом, около 5 км от ЧМК; и один фоновый, К – северо-западная часть Каштакского бора (рис. 1). Каштакский бор, выбранный в качестве фонового участка с учетом розы ветров, является особо охраняемой природной территорией, расположенной на правом берегу реки Миасс, г. Челябинск [6]. По данным Росгидромета, в розе ветров этого города преобладают ветра южного, юго-западного и северо-западного направления, поэтому территория, на которой расположен бор, менее подвержена аэротехногенному воздействию.

На каждом участке в конце июля 2022 года были выбраны три дерева примерно одинакового репродуктивного возраста и высоты. С южной экспозиции кроны на высоте 1,5–2,0 м отбирали по 20 листьев срединной формации с каждого дерева. Параллельно на каждом участке отбирали почвенные образцы (до 20 см глубиной) для определения содержания тяжелых металлов (ТМ). Отбор растительных и почвенных образцов проводили в дневные часы при сходных метеорологических условиях (ясный, солнечный день).

Содержание подвижных форм ТМ определяли в 3-кратной повторности из композитной пробы при помощи атомно-абсорбционного спектрометра Varian AA240FS (Varian Australia Pty Ltd., Австралия), после 24-ч экстрагирования 5 %-раствором азотной кислоты (осч.) в соотношении 1:20 (вес:объем). Суммарный индекс токсической нагрузки (Si) рассчитывали по формуле [19]: $Si = (1/n)\sum(C_i/C_{фон})$, где C_i – концентрация металла в почве импактного участка, $C_{фон}$ – концентрация металла в почве фонового участка, n – число исследованных ТМ.

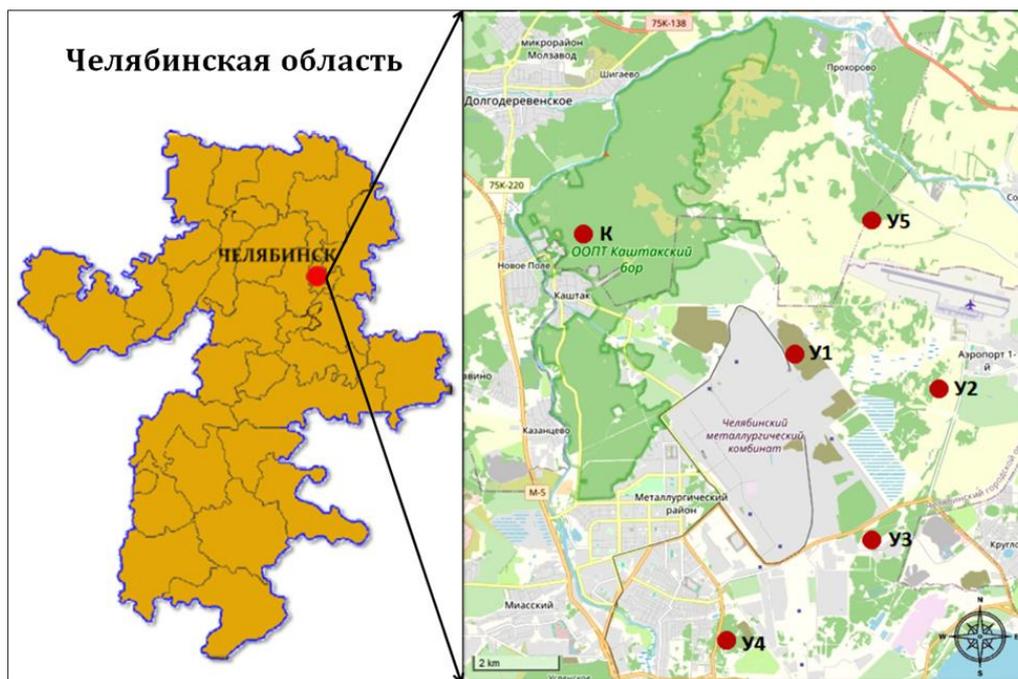


Рис. 1. Карта Челябинской области и расположение участков отбора проб на территории г. Челябинска: У1–У5 – импактные; К – фоновый

Величину рН почвы определяли в почвенно-водной суспензии в соотношении 1:2,5 (почва: деионизированная вода) с помощью портативного рН-метра/кондуктометра (Hanna Instruments GmbH, Graz, Австрия).

Для изучения структурных характеристик листьев *B. pendula* использовали высечки (0,7 см диаметром), которые затем фиксировали в 70%-этаноле. Поперечные срезы листа делали на замораживающем микротоме МЗ-2 (ОАО ХЗ «Точмедприбор», Украина). Измерение мезоструктурных параметров выполняли в 30-кратной повторности при помощи светового микроскопа Meiji MT 4300 L (Meiji Techno, Япония) с применением программы SIAMS MesoPlant (ООО «СИАМС», Екатеринбург). Площадь листьев рассчитывали путем обработки фотографий 20 листьев с каждого участка в программе JMicroVision, версия 1.2.7.

Удельную поверхностную плотность листа (УППЛ) рассчитывали как отношение сухого веса листовой пластинки к ее площади. Содержание хлорофилла *a* (Хл *a*), хлорофилла *b* (Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически при 470, 649 и

664 нм в смешанных образцах листьев в 4-кратной повторности, после экстрагирования в 95% этаноле, и рассчитывали согласно Lichtenthaler [20].

Для оценки достоверности различий между вариантами использовали непараметрический критерий Краскела–Уоллиса. В таблицах и на рис. 2 представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки (SE). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Почвы всех участков, включая фоновый, отличались повышенным содержанием подвижных форм изученных ТМ, по сравнению с предельно допустимыми и ориентировочно допустимыми концентрациями (ПДК и ОДК, соответственно), что отражает геохимические особенности региона [2; 13]. На фоновом участке содержание Zn, Ni, Mn и Pb было выше допустимых значений в среднем в 2,5 раза, в то время как по кадмию их превышения не отмечено (табл. 1).

Таблица 1

Содержание подвижных форм металлов в почве и суммарный индекс токсической нагрузки

Участок	Содержание металлов в почве, мг/кг сухого веса					
	Zn	Ni	Mn	Cd	Pb	Si
У1	99,8±5,3 ^c	33,7±0,4 ^a	932,6±12,3 ^b	1,0 ± 0,10 ^c	49,3 ± 1,0 ^c	3,0
У2	88,0±0,6 ^c	16,6±0,2 ^c	613,5±7,0 ^d	0,82 ± 0,01 ^c	28,3 ± 0,1 ^d	2,0
У3	168,0±1,3 ^b	22,0±0,2 ^b	1026,0±9,2 ^a	1,64 ± 0,01 ^b	94,8 ± 0,9 ^b	4,1
У4	487,9±3,4 ^a	25,9±0,1 ^b	778,3±6,2 ^c	3,13 ± 0,01 ^a	158,6 ± 0,1 ^a	7,2
У5	69,6±1,3 ^{cd}	18,3±0,7 ^c	332,0±14,7 ^e	0,54 ± 0,02 ^d	31,0 ± 1,7 ^d	1,7
К	47,5±0,1 ^d	8,4±0,1 ^d	391,1±1,5 ^c	0,32 ± 0,02 ^d	14,8 ± 0,2 ^c	1,0
ПДК _{подв./} ОДК [8]	23/220	4/80	140/–	–/2	6/130	

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 3). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$. У1–У5 – импактные участки; К – фоновый участок; Si – суммарный индекс токсической нагрузки.

В почвах импактных участков содержание цинка составляло от 3ПДК (У5) до 21ПДК (У4), никеля – от 4ПДК (У2) до 8ПДК (У1), марганца – от 2,5ПДК (У5) до 7ПДК (У3). Наибольшему загрязнению кадмием и свинцом подвергался У4, на котором содержание кадмия по сравнению с фоновым участком было выше почти в 10 раз, а свинца – в 11 раз. Суммарный индекс токсической нагрузки на импактных участках в среднем составлял около 3,6. В целом наиболее загрязненными оказались почвы на У3 и У4 (табл. 1).

На содержание подвижных форм ТМ в почве влияет показатель кислотности. Почвы фонового участка были слабокислыми (в среднем pH составляло 6,3), а почвы импактных участков – слабощелочными (в среднем 7,6).

Для листьев *B. pendula* характерен дорсовентральный тип строения мезофилла. В условиях техногенной нагрузки наблюдалось достоверное увеличение толщины листа, в большей степени за счет палисадного мезофилла, а также кутикулы верхнего эпидермиса (табл. 2). Максимальное увеличение толщины листа обнаружено на участке У2 – на 36%

выше по сравнению с фоном. При этом также возрастало количество устьиц: в среднем на 30% по сравнению с фоном, максимум – на 62%. Кроме того, на всех импактных участках у *B. pendula* наблюдалось достоверное уменьшение площади листа, в среднем в 1,7 раза.

Одним из важнейших показателей активности физиологических процессов в растении является УППЛ, значение которого в листьях *B. pendula* на импактных участках было в среднем на 30% выше по сравнению с фоновым. Максимальной величиной УППЛ отличались деревья на У5 (табл. 2).

Таблица 2

Структурные характеристики листа *Betula pendula*

Параметры	Участок					
	У1	У2	У3	У4	У5	К
Толщина листа, мкм	161,3±8,2 ^b	193,0±12,9 ^a	185,2±13,6 ^a	150,1±3,7 ^{bc}	180,5±7,4 ^{ab}	141,4±6,2 ^c
Толщина кутикулы ВЭ, мкм	8,6±0,7 ^a	8,5±1,7 ^a	7,4±0,9 ^{ab}	7,7±0,9 ^{ab}	7,3±0,6 ^{ab}	6,3±0,5 ^{bc}
Толщина ВЭ, мкм	16,9±1,6 ^b	24,2±2,3 ^a	18,9±2,1 ^b	17,7±2,1 ^b	23,6±2,3 ^a	16,2±1,5 ^b
Толщина НЭ, мкм	12,9±0,9 ^{bc}	17,6±1,6 ^a	14,3±1,5 ^b	13,2±0,9 ^{bc}	14,6±1,3 ^b	11,2±1,3 ^c
Общая толщина мезофилла, мкм	124,6±8,0 ^{bc}	139,2±9,4 ^{ab}	141,9±3,2 ^a	110,2±3,9 ^c	133,9±6,1 ^{ab}	105,9±6,1 ^c
Толщина ПМ, мкм	40,9±4,3 ^{ab}	43,4±2,9 ^{ab}	41,0±3,2 ^{ab}	36,9±2,7 ^{bc}	44,1±2,7 ^a	31,36±2,1 ^c
Площадь листа, см ²	17,5±2,9 ^{bc}	12,6±1,2 ^c	18,4±2,4 ^b	15,6±2,9 ^{bc}	14,9±1,5 ^{bc}	26,1±2,8 ^a
Количество устьиц на НЭ, шт.	62,4±1,1 ^a	54,5±0,8 ^b	37,3±0,5 ^c	46,1±0,6 ^b	47,7±1,0 ^b	38,5±1,0 ^c
УППЛ, мг/дм ²	570,7±14,3 ^c	659,9±9,4 ^b	534,2±15,0 ^c	562,9±11,8 ^c	719,5±20,1 ^a	470,2±6,3 ^d

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 30). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$. У1–У5 – импактные участки; К – фоновый участок; ВЭ – верхний эпидермис; НЭ – нижний эпидермис; ПМ – палисадный мезофилл; УППЛ – удельная поверхностная плотность листа.

Структурные характеристики листьев *B. pendula* на техногенно нарушенных территориях изучались ранее и другими авторами [12; 18]. У *B. pendula*, произрастающей на золоотвалах Среднеуральской ГРЭС [12], величина УППЛ достигала 725 мг/дм², а толщина листа – 188 мкм, что близко к значениям, отмеченным на импактных участках У2, У3 и У5. Согласно Kalashnikova et al. [18], показатель УППЛ у *B. pendula* на золоотвалах почти достигал 600 мг/дм², а толщина листа колебалась от 170 до 180 мкм.

Как известно, процесс фотосинтеза зависит от многих внешних факторов. Фотосинтетические пигменты чувствительны к негативному влиянию окружающей среды и подвержены разрушению в условиях техногенного стресса [14]. Содержание Хл *a* и *b* в листьях *B. pendula* на всех импактных участках было достоверно ниже фонового значения (в среднем на 47 и 40%, соответственно), в то время как содержание каротиноидов достоверно снижалось лишь на У3 (рис. 2А, Б). Снижение фотосинтетической способности ассимиляционного аппарата у *B. pendula* и других видов древесных растений в городской среде было отмечено и ранее [9–11]. Известно, что древесные растения могут усваивать и

вовлекать в метаболизм различные газообразные загрязнители, при этом в листьях наблюдается снижение уровня содержания фотосинтетических пигментов [5; 14].

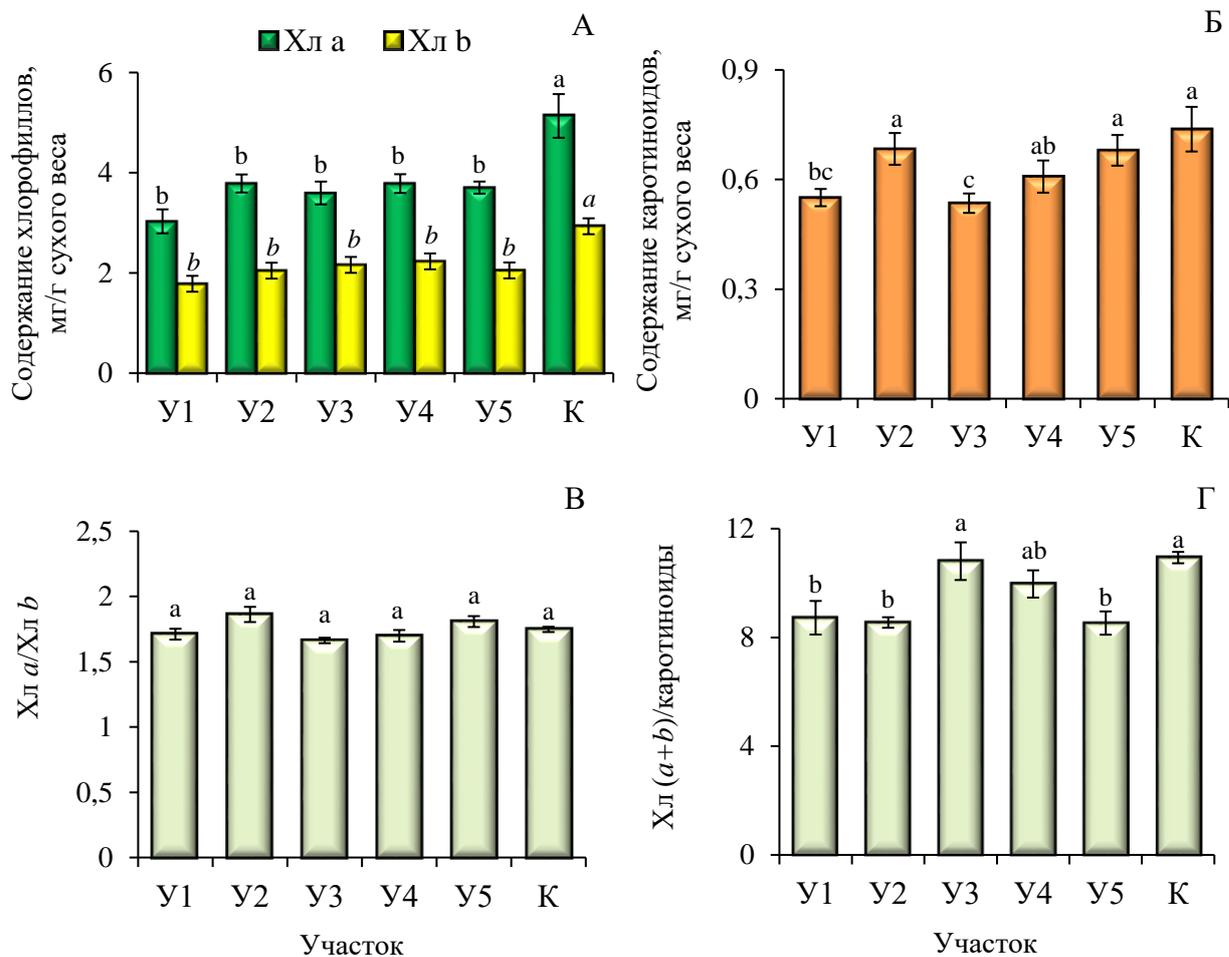


Рис. 2. Содержание (А, Б) и соотношение (В, Г) фотосинтетических пигментов в листьях *Betula pendula*: У1–У5 – на импактных участках; К – на фоновом участке. Представлены средние арифметические значения \pm SE (n = 4). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при $p < 0,05$

Одной из важных характеристик пигментного комплекса является соотношение фотосинтетических пигментов, по которому можно судить об адапционных процессах фотосинтетического аппарата. Соотношение Хл a/Хл b было сравнительно низким и в среднем составляло 1,75 (рис. 2В), что свидетельствует о важной роли Хл b в поглощении солнечной энергии. При этом аэротехногенное загрязнение на импактных участках не влияло на этот показатель. Соотношение Хл (a+b)/каротиноиды, характеризующее в целом светособирающую функцию фотосинтетических пигментов, достоверно снижалось лишь на импактных участках У1, У2 и У5 по сравнению с фоновым (рис. 2Г). Уменьшение этого показателя в условиях техногенной нагрузки свидетельствует о стабильности каротиноидов, которые играют важную роль не только как фотопротекторы, но и антиоксиданты, участвующие в защите от окислительного стресса [17].

Заключение

Изменение морфофизиологических характеристик древесных растений в условиях городской среды является ответной реакцией на комплекс негативных факторов природного и антропогенного характера. В условиях техногенной нагрузки в листьях *Betula pendula* были отмечены структурные перестройки фотосинтетического аппарата, проявляющиеся в увеличении толщины листа за счет хлорофиллоносной части мезофилла, компенсирующей сокращение его ассимиляционной поверхности, а также кутикулы верхнего эпидермиса. При этом возрастание толщины кутикулы, по-видимому, играет защитную роль в условиях аэротехногенного загрязнения. Несмотря на существенное уменьшение содержания хлорофиллов *a* и *b* на импактных участках, их соотношение достоверно не изменялось. Более высокая стабильность каротиноидов, по сравнению с хлорофиллами, вероятно, свидетельствует о защитной роли пигментов-антиоксидантов. В целом, такие адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата берёзы, возможно, поддерживают фотосинтетическую продуктивность деревьев в условиях городской среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FEUZ-2024-0011.

Литература

1. Бухарина И.Л., Журавлева А.Н., Большова О.Г. Городские насаждения: экологический аспект. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 206 с.
2. Даванков А.Ю., Гордеев С.С., Двинин Д.Ю. Экологическая оценка городских территорий // Известия высших учебных заведений. Уральский регион. 2015. № 2. С. 43-49.
3. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2022 году. Челябинск: Министерство экологии Челябинской области, 2023. 208 с.
4. Коротеева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Мумбер А.Г., Чащина О.Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината. Агрохимия. 2015. № 3. С. 88-96.
5. Мокроносов А.Т. Фотосинтез. Физиолого-эколого-биохимические аспекты. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 448 с.
6. Назаренко Н.Н. Растительность и биотопы регионального ботанического памятника природы «Каштакский бор» (Сосновский район Челябинской области) // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11. № 4. С. 85-90.
7. Неверова О.А., Быков А.А. Оценка адаптивного потенциала *Betula pendula* Roth в условиях преобладающего влияния выбросов промзоны г. Кемерово // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. С. 551-551.
8. Перечень предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно-допустимых количеств (ОДК) химических веществ в почве. Издание специальное. М.: Изд-во Госкомсанэпиднадзора России, 1991. 18 с.
9. Сидоренко М.В., Юнина В.П., Ерофеева Е.А., Савинов А.Б., Кузнецов М.Д., Новожилов Д.А. Оценка экологического состояния рекреационных зон г. Нижнего Новгорода по уровням

загрязнения почв тяжелыми металлами и биоиндикационным показателям листьев *Betula pendula* Roth // Самарский научный вестник. 2020. Т. 8. № 1(30). С. 88-92.

10. Соколова Г.Г. Влияние техногенного загрязнения на пигментный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях города Барнаула // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. Т. 19. № 1. С. 223-228.

11. Уразгильдин Р.В., Аминова К.З., Зайцев Г.А., Кулагин А.Ю., Яшин Д.А. Сравнительная характеристика формирования пигментного комплекса дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), липы сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения // Карельский научный журнал. 2016. Т. 5. № 1(14). С. 90-94.

12. Чукина Н.В., Филимонова Е.И., Файрузова А.И., Борисова Г.Г. Морфофизиологические особенности листьев *Betula pendula* Roth на золоотвалах Среднего Урала. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2016. Т. 6(159). С. 68-75.

13. Шабанов М.В., Стрекулев Г.Б. Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. №1. С. 184-192. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3011>

14. Ashraf M., Harris P.J.C. Photosynthesis under stressful environments: An overview // *Photosynthetica*. 2013. Vol. 51. P. 163-190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>

15. Bussotti F., Pollastrini M. Evaluation of leaf features in forest trees: Methods, techniques, obtainable information and limits // *Ecological indicators*. 2015. Vol. 52. P. 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.010>

16. Czaja M., Kołton A., Baran A., Muszyńska E., Muras P. Physiological responses of *Betula pendula* Roth growing in polluted areas // *Ecological Questions*. 2015. Vol. 22. P. 39-46. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2015.021>

17. Dymova O., Lashmanova E., Golovko T. Plant pigments and human health. In T.K. Golovko, W. I. Gruszecki, M.N.V. Prasad & K. Strzalka, eds. *Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology*, pp. 423-438. Syktyvkar. Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014.

18. Kalashnikova I.V., Migalina S.V., Ronzhina D.A., Ivanov, L.A., Ivanova L.A. Functional response of *Betula* species to edaphic and nutrient stress during restoration of fly ash deposits in the Middle Urals (Russia) // *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, Vol. 28. P. 12714-12724. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11200-5>

19. Kumar A., Tripti, Raj D., Maiti S.K., Maleva M., Borisova G. Soil pollution and plant efficiency indices for phytoremediation of heavy metal(loid)s: two-decade study (2002–2021) // *Metals*. 2022. Vol. 12. 1330. <https://doi.org/10.3390/met12081330>

20. Lichtenhaler H.K., Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in Enzymology*. 1987. Vol. 148. P. 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

21. Nadgórska–Socha A., Kandziora-Ciupa M., Trzęsicki M., Barczyk G. Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes // *Chemosphere*. 2017. Vol. 183. P. 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>

22. Pająk M., Halecki W., Gąsiorek M. Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach // *Chemosphere*. 2017. Vol. 168. P. 851–859. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.125>

References

1. Buxarina, I.L., Zhuravleva, A.N., & Boly`shova, O.G. (2012). *Gorodskie nasazhdeniya: e`kologicheskij aspekt*. Izhevsk: Izd-vo «Udmurtskij universitet». (in Russ.)

2. Davankov, A.Yu., Gordeev, S.S., Dvinin, & D.Yu. (2015). E`kologicheskaya ocenka gorodskix territorij. *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Ural`skij region*, 2, 43-49. (in Russ.).

3. Doklad ob e`kologicheskoy situacii v Chelyabinskoj oblasti v 2022 godu. (2023). *Ministerstvo e`kologii Chelyabinskoj oblasti*, 208. (in Russ.).

4. Koroteeva, E.V., Veselkin, D.V., Kuyanceva, N.B., Mumber, A.G., & Chashhina, O.E. (2015). Nakoplenie tyazhely`x metallov v razny`x organax berezy` povisloj vozle Karabashskogo medeplavil`nogo kombinata. *Agroximiya*, 3, 88-96. (in Russ.).

5. Mokronosov, A.T. (2006). *Fotosintez. Fiziologo-e`kologo-bioximicheskie aspekty*. M.: Izdatel`skij centr «Akademiya», 448. (in Russ.).

6. Nazarenko, N.N. (2022). Rastitel`nost` i biotopy` regional`nogo botanicheskogo pamyatnika prirody` «Kashtakskij bor» (Sosnovskij rajon Chelyabinskoj oblasti). *Samarskij nauchny`j vestnik*, 11(4), 85-90. (in Rus.).

7. Neverova, O.A., & By`kov, A.A. (2015). Ocenka adaptivnogo potenciala *Betula pendula* Roth v usloviyax preobladayushhego vliyaniya vy`brosov promzony` g. Kemerovo. *Sovremennyye problemy` nauki i obrazovaniya*, 2-1, 551-551. (in Russ.).

8. Perechen` predel`no-dopustimy`x koncentracij (PDK) i orientirovochno-dopustimy`x kolichestv (ODK) ximicheskix veshhestv v pochve (1991). *Izdanie special`noe*. M.: Izd-vo Goskomsane`pidnadzora Rossii. (in Russ.).

9. Sidorenko, M.V., Yunina V.P., Erofeeva, E.A., Savinov, A.B., Kuzneczov, M.D., & Novozhilov, D.A. (2020). Ocenka e`kologicheskogo sostoyaniya rekreacionny`x zon g. Nizhnego Novgoroda po urovnyam zagryazneniya pochv tyazhely`mi metallami i bioindikacionny`m pokazatelyam list`ev *Betula pendula* Roth. *Samarskij nauchny`j vestnik*, 8, 1(30), 88-92. (in Russ.).

10. Sokolova, G.G. (2020). Vliyanie texnogennogo zagryazneniya na pigmentny`j sostav list`ev berezy` povisloj (*Betula pendula* Roth) v usloviyax goroda Barnaula. *Problemy` botaniki Yuzhnoj Sibiri i Mongolii*, 19, 1, 223-228. (in Russ.).

11. Urazgil`din, R.V., Amineva, K.Z., Zajcev, G.A., Kulagin, A.Yu., & Yashin, D.A. (2016). Sravnitel`naya charakteristika formirovaniya pigmentnogo kompleksa duba chereshchatogo (*Quercus robur* L.), lipy` serdcevidnoj (*Tilia cordata* Mill.) i berezy` povisloj (*Betula pendula* Roth) v usloviyax promy`shlennogo zagryazneniya. *Karel`skij nauchny`j zhurnal*, 5, 1(14), 90-94. (in Russ.).

12. Chukina, N.V., Filimonova, E.I., Fajruzova, A.I., & Borisova, G.G. (2016). Morfofiziologicheskie osobennosti list`ev *Betula pendula* Roth na zolootvalax Srednego Urala. *Ucheny`e zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 6(159), 68-75. (in Russ.).
13. Shabanov, M.V., & Strekulev, G.B. (2021). Geoximicheskie processy` nakopleniya tyazhely`x metallov v landshaftax Yuzhnogo Urala. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 332(1), 184-192. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3011> (in Russ.).
14. Ashraf, M., & Harris, P.J.C. (2013). Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51, 163-190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>
15. Bussotti, F., & Pollastrini, M. (2015). Evaluation of leaf features in forest trees: Methods, techniques, obtainable information and limits. *Ecological indicators*, 52, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.010>
16. Czaja, M., Kołton A., Baran, A., Muszyńska, E., & Muras, P. (2015). Physiological responses of *Betula pendula* Roth growing in polluted areas. *Ecological Questions*, 22, 39-46. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2015.021>
17. Dymova, O., Lashmanova, E., & Golovko, T. (2014). Plant pigments and human health. In T. K. Golovko, W. I. Gruszecki, M.N.V. Prasad & K. Strzalka (Eds.). *Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology*, pp. 423-438. Syktyvkar. Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. (in Russ.).
18. Kalashnikova, I.V., Migalina, S.V., Ronzhina, D.A., Ivanov, L.A., & Ivanova, L.A. (2021). Functional response of *Betula* species to edaphic and nutrient stress during restoration of fly ash deposits in the Middle Urals (Russia). *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 12714-12724. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11200-5> (in Russ.).
19. Kumar, A., Tripti, Raj D., Maiti, S.K., Maleva, M., & Borisova G. (2022). Soil pollution and plant efficiency indices for phytoremediation of heavy metal(loid)s: two-decade study (2002–2021). *Metals*, 12, 1330. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127799>
20. Lichtenhaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
21. Nadgórska-Socha, A., Kandziora-Ciupa, M., Trzęsicki, M., & Barczyk, G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*, 183, 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>
22. Pająk, M., Halecki, W., & Gąsiorek, M. (2017). Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach. *Chemosphere*, 168, 851-859. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.125>

дата поступления: 21.02.2024

дата принятия: 27.04.2024

© Беренцева С.В., Борисова Г.Г., Собенин А.В., Малева М.Г., 2024