

НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА ЧУКИНА

кандидат биологических наук, доцент кафедры физиологии и биохимии растений Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

*nady\_dicusar@mail.ru*

ЕЛЕНА ИВАНОВНА ФИЛИМОНОВА

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

*elena.filimonova@urfu.ru*

АЙГУЛЬ ИДЕЯТОВНА ФАЙРУЗОВА

магистрант кафедры экологии Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

*aygul.fayruzova@mail.ru*

ГАЛИНА ГРИГОРЬЕВНА БОРИСОВА

доктор географических наук, профессор кафедры физиологии и биохимии растений Института естественных наук, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация)

*borisova59@mail.ru*

## МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИСТЬЕВ *BETULA PENDULA* ROTH НА ЗОЛООТВАЛАХ СРЕДНЕГО УРАЛА\*

Целью данной работы было изучение морфофизиологических показателей листовой пластинки у древесных растений (на примере *Betula pendula* Roth), произрастающих на золоотвалах, и выявление наиболее информативных биомаркеров степени нарушенности местообитаний. Проведен сравнительный анализ структурно-функциональных параметров листа (размеры, масса, толщина, удельная поверхностная плотность, флуктуирующая асимметрия, размеры хлорoplastов, содержание фотосинтетических пигментов, флавоноидов и аскорбата) с техногенно нарушенных территорий (золоотвалы Среднеуральской ГРЭС) и естественных местообитаний (биостанция университета). У *B. pendula*, произрастающей на техногенно нарушенных землях, выявлены изменения структурно-функциональных параметров фотосинтетического аппарата, связанные как с низкой обеспеченностью зольного субстрата доступными питательными веществами, так и с особенностями водного режима. Обнаружены достоверные отличия у *B. pendula* с золоотвалов по морфометрическим параметрам листа, размерам хлорoplastов и содержанию каротиноидов и флавоноидов. Установлено, что изменения морфофизиологических параметров у *B. pendula* на золоотвалах имеют приспособительный характер. Сделан вывод об отсутствии односторонних изменений изученных параметров у растений из техногенных местообитаний, что указывает на необходимость проведения комплексной оценки состояния растений.

Ключевые слова: золоотвалы, *Betula pendula*, морфология листа, флуктуирующая асимметрия, мезоструктура фотосинтетического аппарата, фотосинтетические пигменты, флавоноиды, аскорбат

В результате работы теплоэлектростанций образуется большое количество отходов – золы и шлаков. По данным государственного мониторинга, к настоящему времени на территории Свердловской области вследствие сжигания твердого топлива накопилось около 265 млн т отходов<sup>1</sup>.

Зола каменных и бурых углей, слагающая золоотвалы, обладает рядом особенностей. Для нее характерна щелочная реакция среды, низкая

микробиологическая активность, недостаточная обеспеченность элементами питания, особенно доступным азотом [12]. Химический состав, особый температурный режим, бесструктурность, быстрое иссушение делают золу специфическим техногенным субстратом, на котором процесс естественного самозарастания замедлен.

Значительную роль в естественном зарастании золоотвалов в горно-таежной и лесостепной зонах играют бересклеты, в том числе бересклет повис-

лая (*Betula pendula* Roth). Она является одной из самых светолюбивых древесных пород, достаточно засухоустойчива, мало требовательна к почвенному плодородию, отличается высокой семяпродуктивностью и длительным сохранением всхожести семян [17]. Вследствие широкого распространения, биологических особенностей и хозяйственной значимости *B. pendula* часто используется в качестве объекта исследований.

В литературе достаточно много сведений о морфологических и физиолого-биохимических особенностях берез в условиях техногенного воздействия. Обнаружены определенные закономерности в изменчивости морфологических, структурных и биохимических признаков двух лесообразующих видов березы, связанных с адаптацией к основным экологическим факторам [13], [15]. Многие исследователи акцентировали внимание на оценке морфометрических параметров листовой пластинки, в том числе флюктуирующей асимметрии [5], [10], [14], [20].

Изучена анатомия листовой пластинки *B. pendula*, произрастающей в градиенте аэротехногенного загрязнения [25]. Показаны изменения в содержании фотосинтетических пигментов у березы повислой в зависимости от уровня атмосферного загрязнения среды [22], [25]. Изучено накопление тяжелых металлов в разных органах *B. pendula* на техногенно нарушенных территориях в зависимости от расстояния от медеплавильного комбината [11]. Выполнена оценка устойчивости *B. pendula* к выбросам металлургических предприятий г. Тулы по комплексу физиолого-биохимических показателей. Показано, что аккумуляция тяжелых металлов в листьях березы повислой сопряжена с развитием окислительного стресса, происходящего на фоне снижения количества низкомолекулярных метаболитов и увеличения активности гваяковой пероксидазы и каталазы [4].

Анализ имеющихся в литературе данных показал, что в большей степени изучение особенностей *B. pendula* проводилось в связи с загрязнением почв и атмосферы, а влияние на ее структурно-функциональные показатели мало-плодородных субстратов, к которым относится зола, изучено слабо: встречаются лишь единичные работы [9].

В связи с этим целью данной работы было изучение морфофизиологических показателей листовой пластинки у древесных растений (на примере *Betula pendula*), произрастающих на золоотвалах, и выявление наиболее информативных биомаркеров степени нарушенности местообитаний.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования была *Betula pendula* Roth (береза повислая, или бородавчатая), произрастающая на золоотвалах Среднеуральской

ГРЭС (СУГРЭС), расположенной на берегу Исетского озера в 26 км от г. Екатеринбурга. СУГРЭС была пущена в эксплуатацию в 1936 году. Площадь золоотвала 103,75 га. Исследования проводили на двух участках:

1) СУГРЭС-1 – смешанный лес, формирующийся 40–45 лет на зольном полигоне со сплошным перекрытием глиной и вторичным намывом сверху золы;

2) СУГРЭС-2 – более молодой лес, возрастом 25–30 лет, произрастающий на чистой золе.

Зола представляет собой светло-серый рыхлый субстрат. Имеет малую связность, обладает пылеватой структурой, большой воздухо- и водопроницаемостью и малой водоудерживающей способностью. Основу золы составляют алюмосиликаты:  $\text{SiO}_2$  – 66,8 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 24,5 %, что в 1,9–2,1 раза превышает содержание этих элементов в черноземе. Зола содержит следы азота и вместе с тем значительное количество подвижных форм фосфора и калия. Реакция среды слабощелочная, pH водной вытяжки – 7,8; солевой – 8,6 [23].

Техногенный субстрат на золоотвале СУГРЭС-2 отличается низкими влагозапасами. Влажность верхнего горизонта (слой 0–20 см) во время отбора растительного материала на данном участке была в 4 раза ниже по сравнению с участком СУГРЭС-1.

В качестве контроля были заложены опытные площадки в окрестностях биологической станции Уральского федерального университета, расположенной вблизи поселка Двуреченск Сысертского района Свердловской области. В почвенном покрове района преобладают дерново-подзолистые почвы разной степени оподзоливания, нередко в сочетании с болотно-подзолистыми почвами. Растительный покров достаточно разнообразен, и здесь представлены практически все основные типы естественных растительных сообществ Среднего Урала.

Для сравнительной оценки *B. pendula* с техногенными (золоотвалов) и природных (биостанция) объектов были взяты образцы листьев для определения морфометрических, мезоструктурных и биохимических показателей. Отбор материала с золоотвалов был произведен 24 июля, с биостанции – 25 июля 2013 года. На каждом участке отбирали 10 близко растущих средневозрастных деревьев одинаковой высоты. Для исследований использовали сформированные листья с укороченными побегами с ветвью из нижней трети кроны южной стороны. Для морфометрического и мезоструктурного анализа с каждого дерева отбирали по 5 листьев среднего размера, всего 50 листьев с участка.

Для оценки уровня вариабельности признаков использовали коэффициент вариации по шкале уровней изменчивости признаков, принятой для лесной зоны. Коэффициент флюктуирующей асимметрии определяли с помощью интеграль-

ного показателя – величины среднего относительного различия по пяти морфологическим признакам [7]. Оценку результатов проводили по таблице соответствия баллов качества среди значениям коэффициентов асимметрии [21].

Для анализа мезоструктурных характеристик использовали высечки листьев, фиксированные в 70 % растворе этанола. Мезоструктурный анализ проводили согласно методике А. Т. Мокроносова и Р. А. Борзенковой [16]. Поперечные срезы листьев получали с использованием замораживающего микротома МЗ-2 (Россия). С помощью окуляр-микрометра и объект-микрометра изучали толщину листа, соотношение палисадного и губчатого мезофилла. С помощью системы анализа изображений Simagis Mesoplant Macro (ООО «СИАМС», г. Екатеринбург) определяли объем, площадь поверхности и площадь проекции хлоропласта. Повторность измерений 50-кратная.

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилл *a*, хлорофилл *b* и каротиноиды) в листьях определяли в 80 % растворе ацетона спектрофотометрически, измеряя оптическую плотность экстракта при длинах волн 440,5; 649 и 665 нм. Расчет содержания хлорофиллов проводили по формуле Vernon, содержания каротиноидов – по Wettstein [3].

Содержание флавоноидов определяли в спиртовом (1 % раствор тритона в 96 % этаноле) экстракте с использованием лимонноборного реагента на спектрофотометре при длине волны 420 нм. При определении содержания аскорбиновой кислоты за основу взят метод спектрофотометрического определения аскорбата Е. J. Hewitt и G. J. Dicke<sup>2</sup>.

Определение содержания фотосинтетических пигментов и низкомолекулярных антиоксидантов проводили в трех биологических и трех аналитических повторностях. Биологическая повторность представляла собой смешанный образец листьев, собранных с 10 деревьев из каждого местообитания.

**Статистическая обработка данных.** Достоверность различий оценивали по непараметрическому критерию Манна – Уитни при  $p < 0,05$ . В таблицах и на рисунке представлены средние арифметические значения из трех биологических повторностей и их стандартные ошибки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфометрические параметры листовой пластинки древесных растений отражают реакцию организма на все многообразие действующих на него факторов и могут использоваться в качестве биоиндикационных показателей [8], [10].

Морфометрические характеристики листьев *B. pendula*, произрастающей на исследуемых участках, приведены в табл. 1.

Минимальные значения длины и ширины, а также площади листовой пластинки были об-

Таблица 1  
Морфометрические характеристики листовой пластинки *B. pendula*

Показатели	СУГРЭС-1	СУГРЭС-2	Биостанция (контроль)
Длина листа, см			
Среднее	$5,3 \pm 0,1$	$5,1 \pm 0,1$	$5,8 \pm 0,1$
Мин	4,0	3,2	4,2
Макс	6,1	6,4	7,0
Cv, %	9,2	13,7	12,6
Максимальная ширина листа, см			
Среднее	$4,6 \pm 0,1$	$4,1 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$
Мин	3,3	3,2	3,7
Макс	5,4	5,4	5,3
Cv, %	9,1	12,4	8,6
Масса сухого листа, мг			
Среднее	$73,0 \pm 3,0$	$86,1 \pm 3,0$	$90,2 \pm 3,0$
Мин	32,0	44,0	55,0
Макс	117,2	133,0	139,0
Cv, %	28,2	23,9	20,8
Площадь листа, см <sup>2</sup>			
Среднее	$14,7 \pm 0,4$	$11,9 \pm 0,4$	$14,2 \pm 0,4$
Мин	6,8	6,4	9,4
Макс	20,9	19,7	21,0
Cv, %	19,4	23,3	17,8

наружены у растений с участка СУГРЭС-2. Это объясняется высоким уровнем освещенности, поскольку этот участок более молодой по сравнению с остальными и сомкнутость крон еще не большая. Вероятно, уменьшение листовой поверхности является проявлением ксерофитизации листьев *B. pendula* в условиях недостаточного обеспечения влагой.

В табл. 1 приведены также коэффициенты вариации, которые дают возможность сравнивать изменчивость изученных признаков. Для растений из всех местообитаний отмечена высокая изменчивость таких признаков, как масса и площадь листовой пластинки. Линейные размеры листа (длина и ширина) характеризовались средними значениями коэффициентов вариации. Сопоставление совокупности морфометрических характеристик листовой пластинки бересклета с золоотвалов выявило достоверные различия по всем изученным показателям по сравнению с контрольным участком.

Результаты исследования структурно-функциональных параметров листьев показали (табл. 2), что *B. pendula* на СУГРЭС-1 и СУГРЭС-2, в сравнении с растениями из контрольного местообитания, отличались достоверно большей толщиной листовой пластинки. Максимальная ее величина была характерна для бересклета с более молодого участка с хорошей освещенностью и низкой

Структурно-функциональные параметры листьев *B. pendula*

Таблица 2

Показатели	СУГРЭС-1	СУГРЭС-2	Биостанция (контроль)	Южная тайга*
Толщина листа, мкм	170,0 ± 3,0	188,0 ± 1,5	164,0 ± 1,9	199,0 ± 6,0
Соотношение палисадного и губчатого мезофилла листа, % / %	34/66	43/57	33/67	—**
УППЛ, мг/дм <sup>2</sup>	491,0 ± 11,2	725,0 ± 12,3	639,0 ± 15,0	564,0 ± 22,7
Коэффициент асимметрии	0,047	0,041	0,050	—**

Примечание. \* – по литературным данным [16]; \*\* – нет данных.

влажностью почвы (СУГРЭС-2). Растения этого участка отличались также увеличением толщины палисадного и снижением толщины губчатого мезофилла. Толщина листовой пластинки у *B. pendula* на СУГРЭС-2 приближалась к среднему значению по южной тайге, в то время как на СУГРЭС-1 и биостанции толщина листа была меньше.

Одним из важнейших показателей активности физиологических процессов в растении является удельная поверхностная плотность листа (УППЛ, мг/дм<sup>2</sup>), или сухой вес единицы площади листа, тесно связанный со скоростью роста, интенсивностью фотосинтеза и газообмена [13]. Максимальной величиной УППЛ отличались растения с участка СУГРЭС-2, что, очевидно, можно объяснить высокой степенью освещенности и низкой влажностью почвы. Для этих же растений, как было показано выше, характерна минимальная площадь и максимальная толщина листовой пластинки. Полученные данные согласуются с результатами исследования других авторов [8], которые показали, что растения в условиях хорошего освещения отличались максимальной толщиной листа и величиной УППЛ. Сочетание небольшой площади листа со значительной толщиной листовой пластинки является адаптивным свойством растений, способствующим более интенсивному максимальному фотосинтезу [18]: уменьшение площади листа приводит к снижению транспирации, а увеличение его толщины – к возрастанию ассимилирующей поверхности.

Состояние природных популяций билатерально симметричных организмов может быть оценено величиной флюктуирующей асимметрии, характеризующей мелкие ненаправленные нарушения стабильности развития и являющейся интегральным ответом организма на состояние окружающей среды [7].

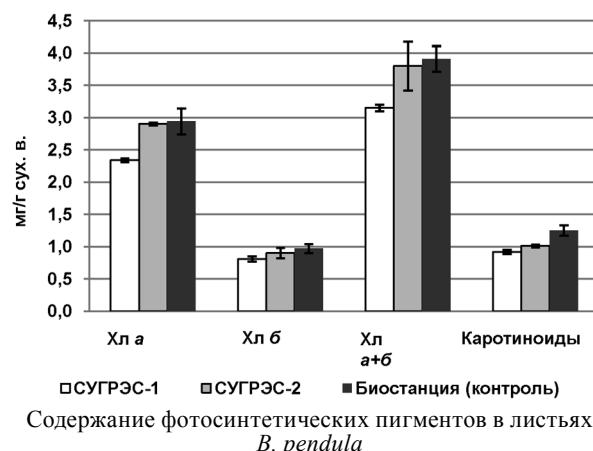
Согласно классификации показателей флюктуирующей асимметрии высших растений А. Б. Стрельцова [21], полученные нами коэффициенты (см. табл. 2) соответствуют 1 баллу (< 0,055), что указывает на благоприятные условия для произрастания растений. Следовательно, показатель флюктуирующей асимметрии не является надежным биомаркером техногенно нарушенных условий обитания *B. pendula*. К аналогичному выводу пришли другие исследователи при оцен-

ке степени трансформации среды в зоне влияния выбросов медеплавильного комбината [10].

Фотосинтетический аппарат растений обеспечивает их функционирование в различных экологических условиях, в том числе техногенно нарушенной среде. Эффективность фотоассимиляции углекислого газа в значительной степени обусловлена состоянием пигментной системы.

Результаты определения содержания фотосинтетических пигментов, представленные на рисунке, свидетельствуют о том, что наименьшее количество хлорофиллов наблюдалось в листьях *B. pendula* на золоотвале СУГРЭС-1. На участке СУГРЭС-2 и контрольном участке содержание хлорофиллов было примерно на одном уровне. Содержание каротиноидов в листьях березы на контрольном участке в среднем на 20 % превышало соответствующие показатели растений с золоотвалов.

Фотосинтетический аппарат растений, функционирование которого определяется количеством пигментов и их соотношением, является достаточно чувствительным к техногенному воздействию [4], [24]. Уменьшение количества фотосинтетических пигментов в условиях техногенно нарушенной среды часто объясняют их деградацией либо ингибированием синтеза в результате активации процессов свободнорадикального окисления [4]. Однако наше исследование показало, что на таких нарушенных территориях, как золоотвалы, по-видимому, эти процессы не были заметно выражены.



Одним из важных показателей напряженности энергетических процессов в хлоропластах является отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* и суммы хлорофиллов *a* и *b* к каротиноидам. Вследствие этого изучение изменения их содержания имеет большое значение при оценке устойчивости растений к внешним стрессорам. Анализ соотношения фотосинтетических пигментов показал, что у *B. pendula* на золоотвалах и контрольном участке отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* было примерно одинаковым. Вместе с тем отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам в листьях березы на золоотвалах было выше по сравнению с контролем. Это может быть связано с тем, что каротиноиды выполняют широкий спектр функций в растительном организме, в том числе и антиоксидантную, реализация которой сопряжена с участием этих пигментов в инактивации активных форм кислорода.

Адаптивные перестройки фотосинтетического аппарата в ответ на неблагоприятные условия среды затрагивают изменения фотоактивной поверхности, регулируемой размерами и числом пластид в клетке. Наши исследования показали (табл. 3), что у *B. pendula* на контрольном участке значения площади проекции и поверхности, а также объема хлоропластов были достоверно выше, чем на нарушенных землях. Поскольку содержание хлорофилла в листьях растений всех исследованных участков было примерно на одном уровне, можно предположить, что число хлоропластов в расчете на единицу площади листа у березы на золоотвалах выше.

Таким образом, проведенные исследования показали, что у березы, произрастающей на нарушенных землях, происходит изменение структурно-функциональных параметров фотосинтетического аппарата. Эти изменения имеют приспособительный характер, поскольку связаны как с особенностью техногенного субстрата (недостаток и низкая доступность биогенных элементов), так и с особенностями светового и водного режимов. Данные морфологические и анатомические изменения являются, очевидно, одной из форм адаптации этого вида к техногенным субстратам.

Под действием различных неблагоприятных факторов растительный организм может подвергаться разрушающему действию активных форм

кислорода, что в конечном итоге приводит к развитию окислительного стресса.

У всех живых организмов одним из механизмов, обеспечивающих устойчивость к различным стрессорам внешней среды, является активизация компонентов антиоксидантной системы, включая низкомолекулярные антиоксиданты: флавоноиды, аскорбат, каротиноиды, глутатион и другие.

Флавоноиды выполняют целый ряд функций в жизнедеятельности растений, их защитная роль, как правило, выражается в повышении биосинтеза этих соединений в ответ на действие неблагоприятных факторов [26]. Например, показано, что в условиях роста уровня загрязнения среды в хвое *Pinus sylvestris* L. повышался уровень флавоноидов, таких как рутин и катехин. При этом отмечена положительная корреляция между содержанием в хвое тяжелых металлов и концентрацией изученных флавоноидов. Данный факт, по мнению автора, связан со способностью флавоноидов инактивировать активные формы кислорода, препятствуя развитию окислительного стресса и способствуя повышению толерантности голосеменных растений к загрязнению [1].

Минимальный уровень флавоноидов у *B. pendula* наблюдался на золоотвале СУГРЭС-1 (табл. 4). Очевидно, это можно объяснить истощением пуль вследствие дисбаланса между процессами синтеза и расходования. Максимальное содержание флавоноидов было отмечено у растений, произрастающих на более молодом золоотвале СУГРЭС-2. Очевидно, это связано с большей освещенностью местообитания, поскольку известно, что под действием света в растениях происходит активация ряда ферментов, принимающих участие в биосинтезе фенольных соединений [6].

Данный факт свидетельствует об изменении хода метаболических процессов и биохимического состава растений *B. pendula*, адаптированных к комплексу условий среды: недостаточному обеспечению влагой, низкому плодородию субстрата, высокой освещенности.

Аскорбиновая кислота принимает участие в процессах роста, цветения, вегетативной и репродуктивной дифференциации, в водном обмене, регуляции ферментативной активности, стимуляции реакций метаболизма, связанных

**Таблица 3**  
Параметры хлоропластов в листьях  
*B. pendula*

Показатели	СУГРЭС-1	СУГРЭС-2	Биостанция (контроль)
Площадь проекции, $\text{мкм}^2$	$7,6 \pm 0,4$	$7,9 \pm 0,3$	$8,2 \pm 0,4$
Площадь поверхности, $\text{мкм}^2$	$28,2 \pm 1,4$	$27,7 \pm 1,1$	$33,3 \pm 1,7$
Объем, $\text{мкм}^3$	$14,5 \pm 1,0$	$13,9 \pm 0,8$	$18,6 \pm 1,5$

**Таблица 4**  
Содержание низкомолекулярных антиоксидантов в листьях *B. pendula*

Местообитание	Флавоноиды, мг/г сух. в.	Аскорбат, мг/г сух. в.
СУГРЭС-1	$9,20 \pm 2,00$	$0,055 \pm 0,001$
СУГРЭС-2	$31,70 \pm 1,90$	$0,053 \pm 0,004$
Биостанция (контроль)	$19,04 \pm 2,80$	$0,066 \pm 0,003$

с обменом нуклеиновых кислот и синтезом белка, в антиоксидантных реакциях. Имеющиеся литературные данные указывают на увеличение концентрации аскорбата в растениях при действии на них различных неблагоприятных факторов [2], [19]. Однако в нашем исследовании наблюдалось достоверное (хотя и не столь значительное) снижение содержания аскорбиновой кислоты у *B. pendula* на обоих золоотвалах. Аналогичная тенденция была отмечена и для каротиноидов. Вероятно, это свидетельствует об истощении пула данных антиоксидантов вследствие отставания процессов синтеза от процессов расходования. Таким образом, однозначной тенденции в изменении содержания низкомолекулярных антиоксидантов (аскорбиновой кислоты, флавоноидов, каротиноидов) у *B. pendula* на золоотвалах не выявлено. Следовательно, уровень их накопления у береск повислой не является надежным маркером нарушенности среды при произрастании в неблагоприятных условиях обитания.

## ВЫВОДЫ

1. У *Betula pendula*, произрастающей на техногенно нарушенных землях (золоотвалах), выявлены изменения структурно-функциональных параметров фотосинтетического аппарата, связанные как с низкой обеспеченностью зольного субстрата доступными питательными веществами, так и с особенностями водного режима.

2. Растения *Betula pendula*, выросшие на более молодом золоотвале (СУГРЭС-2), отличались минимальной площадью и максимальной толщиной и удельной плотностью листовой пластинки в сравнении с растениями из других местообитаний.

3. Неблагоприятные условия техногенно нарушенных местообитаний не оказали влияния на коэффициент флуктуирующей асимметрии листовой пластинки.

4. Фотосинтетический аппарат *Betula pendula* на нарушенных землях оказался чувствительным к действию стрессовых факторов. Это проявилось в достоверном уменьшении размеров хлоропластов, в то время как существенного снижения содержания фотосинтетических пигментов не произошло.

5. Однозначной тенденции в изменении содержания низкомолекулярных антиоксидантов (аскорбиновой кислоты, флавоноидов, каротиноидов) у *Betula pendula* на золоотвалах не выявлено.

6. Выявленные изменения морфофизиологических параметров у *Betula pendula* на техногенно нарушенных территориях имеют приспособительный характер. Отсутствие однодirectionalных тенденций в изменении изученных показателей свидетельствует о сложности ответных реакций растительного организма на действие стрессовых факторов и необходимости оценки состояния растений по комплексу показателей.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания УрФУ № 2014/236, код проекта 2485.

## ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>1</sup> Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2014. Екатеринбург, 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mprso.ru> (дата обращения 25.02.2016).

<sup>2</sup> Методы оценки антиоксидантного статуса растений: Учеб.-метод. пособие / Г. Г. Борисова и др.; Отв. ред. Н. В. Чукина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. 72 с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Л. В. Изменение содержания фенольных соединений в хвое сосны обыкновенной в условиях техногенного стресса // Факторы устойчивости растений в экстремальных природных условиях и техногенной среде: Материалы Всероссийской научной конференции. Иркутск, 2013. С. 27–30.
2. Баландакин М. Э. Коррелирование содержания аскорбиновой кислоты в ассимиляционном аппарате *Betula pendula* Roth с действием патологического агента // Химия растительного сырья. 2014. № 1. С. 153–157.
3. Гавриленко В. Ф., Жигалова Т. В. Большой практикум по фотосинтезу. М.: Академия, 2003. 256 с.
4. Гарифзянов А. Р., Иванышев В. В., Музрафов Е. Н. Оценка устойчивости *Betula pendula* Roth при произрастании на техногенно загрязненных территориях // Известия ТУГУ. 2011. Вып. 2. С. 315–324.
5. Ерофеева Е. А., Наумова М. М., Нижегородцев А. А. Морфогенетические и биохимические аспекты оценки стабильности развития на примере листовой пластинки береск повислой (*Betula pendula* Roth) // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Биология. 2007. № 5. С. 75–77.
6. Запрометов М. Н. Фенольные соединения и их роль в жизни растения: 56-е Тимирязевское чтение. М.: Наука, 1996. 45 с.
7. Захаров В. М., Баранов А. С., Борисов Б. И., Валецкий А. В., Кряжева Н. Г., Чистякова Е. К., Чубинишили А. Т. Здоровье среды: методика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000. 68 с.
8. Иванова Л. А., Пьянков В. И. Влияние экологических факторов на структурные показатели мезофилла листа // Ботанический журнал. 2002. Т. 87. № 12. С. 17–28.
9. Калашникова И. В. Структура фитомассы береск (*Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh.) в условиях зольного субстрата: Дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2014. 166 с.
10. Коротеева Е. В., Веселкин Д. В., Куюнцева Н. Б., Чашина О. Е. В градиенте влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината изменяется размер, но не флуктуирующая асимметрия листа береск повислой // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 3. С. 364–367.

11. Коротеева Е. В., Веселкин Д. В., Куянцева Н. Б., Мумбер А. Г., Чашина О. Е. Накопление тяжелых металлов в разных органах березы повислой возле Карабашского медеплавильного комбината // Агрохимия. 2015. № 3. С. 94–102.
12. Махнев А. К., Чибрик Т. С., Трубина М. Р., Лукина Н. В., Гебель Н. Э., Терин А. А., Еловиков Ю. И., Топорков Н. В. Экологические основы и методы биологической рекультивации золоотвалов тепловых электростанций на Урале. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 355 с.
13. Махнев А. К., Мигалина С. В. Особенности адаптаций популяций лесообразующих видов берез на южном пределе распространения // Материалы Международной конференции «Биоразнообразие степных сообществ». Костанай, 2006. С. 18–28.
14. Мигалина С. В., Иванова Л. А., Махнев А. К. Размеры листа березы как индикатор ее продуктивности вдали от климатического оптимума // Физиология растений. 2009. Т. 56. № 6. С. 948–953.
15. Мигалина С. В., Иванова Л. А., Махнев А. К. Изменение морфологии листа *Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh. вдоль зонально-климатической трансекты Урала и Западной Сибири // Экология. 2010. № 4. С. 257–265.
16. Мокроносов А. Т., Борзенкова Р. А. Методика количественной оценки структуры и функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1978. Т. 61. С. 119–133.
17. Николайчик И. В. Особенности естественного лесозарастания породных отвалов угольных разрезов // Рекультивация нарушенных земель в Сибири: Сб. науч. трудов. Кемерово: Типография «ИНТ», 2005. Вып. 1. С. 112–116.
18. Придacha B., Cazonova T. A. Морфофизиологические показатели березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) на ранних этапах онтогенеза // Сборник статей и лекций IV Всероссийской школы-конференции «Актуальные проблемы геоботаники». Уфа: Издательский центр «МедиаПринт», 2012. С. 610–615.
19. Рябухина М. В. Содержание аскорбиновой кислоты – информативный показатель мониторинга окружающей среды крупных промышленных центров (на примере г. Оренбурга) // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2011. № 2 (30). С. 231–233.
20. Скрипальщикова Л. Н., Стасова В. В. Биоиндикационные показатели стабильности развития насаждений в нарушенных ландшафтах // Сибирский лесной журнал. 2014. № 2. С. 62–72.
21. Стрельцов А. Б. Региональная система биологического мониторинга. Калуга: Изд-во Калужского ЦНТИ, 2003. 158 с.
22. Цандекова О. Л., Неверова О. А. Влияние выбросов автотранспорта на пигментный комплекс листьев деревесных растений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1 (3). С. 853–856.
23. Чибрик Т. С., Лукина Н. В., Филимонова Е. И., Глаэрина М. А. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2011. 268 с.
24. Шубина А. Г. Содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale*) и березы повислой (*Betula pendula*), растущих в г. Тамбове // Вестник ТГУ. 2011. Т. 6. № 1. С. 353–355.
25. Neverova O. A., Legoshchina O. M., Bukov A. A. Anatomy of leaves of *Betula pendula* (Roth) affected by air emissions in industrial area of Kemerovo City // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013. Vol. 17 (3). P. 354–358.
26. Pietrowska-Borek M., Chadzinkolau T., Kozlowska M. Effect of urban pollution on 4-coumarate: CoA ligase and flavonoid accumulation in *Berberis thunbergii* // Dendrobiology. 2010. Vol. 64. P. 79–85.

Chukina N. V., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)  
 Filimonova E. I., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)  
 Fayruzova A. I., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)  
 Borisova G. G., Ural Federal University (Ekaterinburg, Russian Federation)

## MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL FEATURES OF *BETULA PENDULA* ROTH GROWING ON ASH DUMPS OF THE MIDDLE URALS

The aim of this work was to study multiple morphological and physiological parameters of some woody plants growing on ash dumps (for example, *Betula pendula* Roth) and to identify the most informative biomarkers of habitat destruction. A comparative analysis of the leaf's structural and functional parameters (size, weight, thickness, specific leaf weight, fluctuating asymmetry, the chloroplasts size, the content of photosynthetic pigments, flavonoids and ascorbic acid) from anthropogenically disturbed territories (ash dumps of Sredneuralsk GES) and natural habitats (university biological station) was carried out. It was shown that in disturbed areas (ash dumps) *B. pendula* changes its mesostructural parameters when compared with plants from natural habitats. It is caused by the nutrients' deficit and lower water supply of ash substrates. Plants growing on ash dumps significantly differ in their leaf morphometric parameters, their chloroplast size and in the content of carotenoids and flavonoids. It was found that such morphological and physiological changes have adaptive nature. It was concluded that plants from disturbed habitats have no unidirectional changes of studied parameters. The research results speak of the necessity to use a set of parameters to estimate the level of complex changes in the plants in focus.

**Key words:** ash dumps, *Betula pendula*, leaf morphology, fluctuating asymmetry, mesostructure of the photosynthetic apparatus, photosynthetic pigments, flavonoids, ascorbate

## REFERENCES

1. Afanas'eva L. V. Changes in compounds of phenolic content in pine needles under anthropogenic stress [Изменение соединений фенольных соединений в хвое сосны обыкновенной в условиях техногенного стресса]. Материалы Всероссийской научной конференции «Факторы устойчивости растений в экстремальных природных условиях в техногенной среде». Иркутск, 2013. Р. 27–30.
2. Balanaykin M. E. Correlation of the ascorbic acid content in the assimilation apparatus *Betula pendula* Roth with the action of the pathological agent [Корреляция содержания аскорбиновой кислоты в аппаратуре фотосинтеза *Betula pendula* Roth с действием патологического агента]. Khimiya rastitel'nogo sryza. 2014. № 1. P. 153–157.
3. Gavrilenko V. F., Zhigalova T. V. Bol'shoy praktikum po fotosintezu [Large workshop on photosynthesis]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 256 p.

4. Garifzyanov A. R., Ivanishchev V. V., Muzafarov E. N. Estimation of *Betula pendula* Roth stability when growing in the industrially polluted territories [Otsenka ustoychivosti *Betula pendula* Roth pri proizrastanii na tekhnogenno zaryaznennykh territoriyakh]. *Izvestiya TuGU* [Proceedings of TuSU]. 2011. Issue 2. P. 315–324.
5. Erofeeva E. A., Naumova M. M., Nizhegorodtsev A. A. Morphogenetic and biochemical aspects of developmental stability estimation: the case of leaf blades of birch tree (*Betula pendula* Roth) [Morfogeneticheskie i biokhimicheskie aspekty otsenki stabil'nosti razvitiya na primere listovoy plastinki berezy povisloy (*Betula pendula* Roth)]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Biologiya* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after Lobachevskii. Biology]. 2007. № 5. P. 75–77.
6. Zaporozhev M. N. *Fenol'nye soedineniya i ikh rol' v zhizni rasteniya: 56-e Timiryazevskoe chtenie* [Phenolic compounds and their role in plant life: 56th Timiryazev reading]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 45 p.
7. Zakharov V. M., Baranov A. S., Borisov B. I., Valtskiy A. V., Kryazheva N. G., Chistyakov E. K., Chubinashvili A. T. *Zdorov'e sredy: metodika otsenki* [Environment Health: assessment methodology]. Moscow, 2000. 68 p.
8. Ivanova L. A., Pyankov V. I. Influence of environmental factors on the leaf mesophyll structural indicators [Vliyanie ekologicheskikh faktorov na strukturnye pokazateli mezofilla lista]. *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical Journal]. 2002. Vol. 87. № 12. P. 17–28.
9. Kalashnikova I. V. *Struktura fitomassy berez (*Betula pendula* Roth i *B. pubescens* Ehrh.) v usloviyah zol'nogo substrata: Dis. ... kand. biol. nauk* [Structure of birch biomass (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) under the ash substrate]. Ekaterinburg, 2014. 166 p.
10. Koroteeva E. V., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Chashchina O. E. The size, but not the fluctuating asymmetry of the leaf, the silver birch changes under the gradient influence of emissions of the Karabash copper smelter plant. *Doklady Biological sciences*. 2015. Vol. 460. № 1. P. 36–39.
11. Koroteeva E. V., Veselkin D. V., Kuyantseva N. B., Mumber A. G., Chashchina O. E. Accumulation of heavy metals in different organs of birch near the Karabash copper smelter plant [Nakoplenie tyazhelykh metallov v raznykh organakh berezy povisloy vozle Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata]. *Agrokhimiya* [Agrochemistry]. 2015. № 3. P. 94–102.
12. Makhnayev A. K., Chibrik T. S., Trubina M. R., Lukina N. V., Gebele N. E., Terin A. A., Elovikov Yu. I., Toporkov N. V. *Ekologicheskie osnovy i metody biologicheskoy rekul'tivatsii zoloootvalov teplovyykh elektrostantsiy na Urale* [Ecological bases and methods of biological reclamation of ash dumps of thermal power plants in the Urals]. Ekaterinburg, UroRAN Publ., 2002. 355 p.
13. Makhnayev A. K., Migalina S. V. Features of adaptations of populations of forest forming species of birch trees on the southern limits of distribution [Osobennosti adaptatsii populyatsiy lesoobrazuyushchikh vidov berez na yuzhnym predele rasprostraneniya]. *Materialy Mezhdunar. konf. "Bioraznoobrazie stepnykh soobshchestv"*. Kostanay, 2006. P. 18–28.
14. Migalina S. V., Ivanova L. A., Makhnayev A. K. Size of the Leaf as a Marker of Birch Productivity at a Distance from the Climatic Optimum. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2009. Vol. 56. № 6. P. 858–862.
15. Migalina S. V., Ivanova L. A., Makhnayev A. K. Changes of leaf morphology in *Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh. along a zonal-climatic transect in the Urals and Western Siberia. *Russian Journal of Ecology*. 2010. Vol. 41. № 4. P. 293–301.
16. Mokronosov A. T., Borzenkova R. A. Methods of quantitative evaluation of the structure and functional activity of photosynthetic tissues and organs [Metodika kolichestvennoy otsenki struktury i funktsional'noy aktivnosti fotosinteziruyushchikh tkanej i organov]. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii*. 1978. Vol. 61. P. 119–133.
17. Nikolaychenko I. V. Features of the natural forest overgrowth on rock dumps of coal mines [Osobennosti estestvennogo lesozarastaniya porodnykh otvalov ugod'nykh razrezov]. *Sbornik nauchnykh trudov "Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' v Sibiri"*. Kemerovo, INT Publ., 2005. Issue 1. P. 112–116.
18. Pridacha V. B., Sazonova T. A. Morphophysiological indicators of birch trees (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in the early stages of ontogenesis [Morfofiziologicheskie pokazateli berezy borodavchatoy (*Betula pendula* Roth) i berezy pushistoy (*Betula pubescens* Ehrh.) na rannikh etapakh ontogeneza]. *Sbornik statey i lektsiy IV Vserossiyskoy shkoly-konferentsii "Aktual'nye problemy geobotaniki"*. Ufa, MediaPrint Publ., 2012. P. 610–615.
19. Ryabukhin M. V. The content of ascorbic acid – an informative indicator of environmental monitoring of large industrial centers (the example of Orenburg) [Soderzhanie askorbinovoy kisloty – informativnyy pokazatel' monitoringa okruzhayushchey sredy krupnykh promyshlennyykh tsentrov (na primere g. Orenburga)]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State]. 2011. № 2 (30). P. 231–233.
20. Skripal'shchikova L. N., Stasova V. V. Bioindicative indicators of plant's stability in disturbed landscapes [Bioindikacionnye pokazateli stabil'nosti razvitiya nasazhdennyi v narushennykh landshaftakh]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forestry]. 2014. № 2. P. 62–72.
21. Strelets A. B. *Regional'naya sistema biologicheskogo monitoringa* [Regional system of biological monitoring]. Kaluga, Kaluga StNTI Publ., 2003. 158 p.
22. Sandekova O. L., Neverova O. A. Influence of the motor transport emissions on the pigmentary complex of woody plants' leaves [Vliyanie vybrosov avtotransporta na pigmentnyy kompleks list'ev drevesnykh rastenij]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2010. Vol. 12. № 1 (3). P. 853–856.
23. Chibrik T. S., Lukina N. V., Filimonov E. I., Glazyrina M. A. *Ekologicheskie osnovy i opyt biologicheskoy rekul'tivatsii narushennykh promyshlennost'yu zemel'* [Ecological bases and experience of the biological land reclamation industry]. Ekaterinburg, UGU Publ., 2011. 268 p.
24. Shubina A. G. Maintenance of chlorophyll and carotenoids in leaves of dandelion medicinal (*Taraxacum officinale*) and birches (*Betula pendula*), growing in Tambov [Soderzhanie klorofilla i karotinoidov v list'yakh oduvanchika lekarstvennogo (*Taraxacum officinale*) i berezy povisloy (*Betula pendula*), rastushchikh v Tambove]. *Vestnik TGU* [Vestnik of Tambov State University]. 2011. Vol. 6. № 1. P. 353–355.
25. Neverova O. A., Legoshchina O. M., Bykov A. A. Anatomy of leaves of *Betula pendula* (Roth) affected by air emissions in industrial area of Kemerovo City. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013. Vol. 17 (3). P. 354–358.
26. Pietrowska-Borek M., Chadijkola T., Kozłowska M. Effect of urban pollution on 4-coumarate: CoA ligase and flavonoid accumulation in *Berberis thunbergii*. *Dendrobiology*. 2010. Vol. 64. P. 79–85.