

УДК 574.24

## Влияние золошлаков ТЭС на изменение параметров листьев *Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh. в условиях Зауралья

### Influence of power station ashes on shifts in leaf parameters of *Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh. in the Trans-Urals

Калашникова И. В., Мигалина С. В.

Kalashnikova I. V., Migalina S. V.

Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия.  
E-mail: iren.kalashnikova@gmail.com

Institute Botanic Garden, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

**Реферат.** Изучены параметры листьев *Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh. (площадь, коэффициент формы, толщина и удельная поверхностная плотность) в естественных фитоценозах на золоотвале Рефтинской ГРЭС, расположенной в западной части Зауральской равнинной провинции. Показано, что площадь и коэффициент формы листа различались между видами и менялись в зависимости от погодных условий сезона, но не имели направленных изменений при смене экотопа. Общей закономерностью в изменении параметров листа у *Betula pendula* и *B. pubescens* было существенное увеличение толщины листовой пластинки на зольном субстрате. Для *B. pubescens* на золоотвале также отмечено стабильное увеличение удельной поверхностной плотности листа. Сделан вывод, что изменения толщины и плотности листа являются адаптивными реакциями берез, направленными на поддержание высокой интенсивности фотосинтеза в условиях дефицита почвенного азота в золе.

**Summary.** Leaf parameters of *Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh. (leaf area, leaf shape coefficient, thickness and leaf mass per area (LMA)) were studied in natural phytocoenosis at ashes of Reftinskaya power station, located in the west part of Trans-Urals. It was shown that in the two birch species leaf area and leaf shape coefficient depended on species, weather condition of the season and did not vary in different ecotopes. A significant increase in the leaf thickness was revealed both for *Betula pendula* and *B. pubescens* growing on the ash substrate. *B. pubescens* also had stable enhance in leaf density (LMA) on the ashes. It was concluded that shifts in leaf thickness and density reflected the adaptive response of *B. pendula* and *B. pubescens* aimed at maintaining a high intensity of photosynthesis in conditions of nitrogen deficiency in the ashes.

Золошлакоотвалы тепловых электростанций (ТЭС) относятся к особой категории техногенных ландшафтов, не имеющих аналогов в природе, и являются источником загрязнения прилегающих природных территорий (Махнев и др., 2002). Создание устойчивых лесных сообществ является наиболее эффективным и целесообразным методом рекультивации территории золоотвалов в бореальной зоне, поскольку позволяет не только предотвратить попадание летучей золы в окружающие экосистемы, но и обеспечивает возвращение нарушенных территорий в лесной фонд. Основными негативными факторами для развития растительности на золошлаках являются высокая щелочность субстрата (рН выше 9,6), наличие токсичных концентраций тяжелых металлов и растворимых солей, недостаток основных элементов питания, нестабильность температурного и водного режима на поверхности и в глубине отвала (Тарчевский, 1964; Махнев и др., 2002). К числу древесных видов, активно возобновляющихся на золоотвалах ТЭС таежной и лесостепной зоны, относятся широко распространенные на Урале *Betula pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh. (Махнев и др., 2002), что определяет интерес изучения их адаптивного потенциала. Известно, что устойчивость растений к условиям среды во многом связана с особенностями адаптации фотосинтетического аппарата воздействию внешних факторов. В данной работе был проведен сравнительный анализ параметров листьев берез (*Betula pendula* и *B. pubescens*), совместно произрастающих в естественном сообществе на золошлакоотвале тепловой электростанции.

Исследования проводили в течение 3 вегетационных сезонов на участке естественного зарастания золошлакоотвала Рефтинской ГРЭС (N 57°7'1,61", E 61°44'28,87"). В качестве контроля был выбран участок естественных лесных насаждений вблизи золоотвала. Район исследований расположен в западной части Зауральской равнинной провинции, округа сосново-березовых предлесостепных лесов (Колесников и др., 1973). На каждом участке с 20 деревьев *B. pendula* и *B. pubescens* с укороченных побегов в нижней трети кроны отбирали полностью сформированные листья, не имеющие признаков повреждения. Для каждого дерева определяли размеры листа (анализатор изображений Simagis Mesoplant Macro (ООО «СИАМС», Екатеринбург)), коэффициент формы (как отношение квадрата периметра листа к его площади), толщину листа (электронным цифровым микрометром РК–1012E («Mitutoyo Corp.», Япония)), а также удельную поверхностную плотность листьев (УППЛ). Статистическая обработка проведена с использованием непараметрических критериев. На графиках указаны средние значения параметров листьев за весь период наблюдений и ошибки среднего. Анализ эдафических условий в исследуемых экотопах показал, что с момента консервации золоотвала на участке естественного зарастания наблюдаются начальные процессы почвообразования и снижение щелочности золы. При этом в зольном субстрате сохраняется предельно низкая концентрация доступного для растений азота (0,0005 %), мало калия (0,003 %) и достаточно высокое содержание фосфора (0,010 %) по сравнению с лесными почвами в контроле (Калашникова и др., 2017).

Результаты исследований показали, что у *B. pendula* и *B. pubescens* размеры и форма листа не зависели от эколого-ценотических условий произрастания, а определялись преимущественно погодными особенностями вегетационного сезона (табл.). Вместе с тем, существенные различия по данным параметрам листа наблюдались между видами (рис.). На участке леса и золоотвале *Betula pubescens* отличалась более высокими значениями площади листа, что согласуется с полученными ранее данными (Мигалина и др., 2009). При этом листья *B. pendula* имели более высокий коэффициент формы, что является отличительным признаком данного вида (Мигалина и др., 2010).

Таблица

Влияние погодных условий сезона и экологических условий произрастания на параметры листьев *Betula pendula* и *B. pubescens*.

	Площадь, см <sup>2</sup>	Коэффициент формы	Толщина, мкм	УППЛ, мг дм <sup>-2</sup>
<i>Betula pendula</i>				
Год	19,4***	40,9***	12,4***	26,3***
Условия произрастания	0,1 ns	1,0 ns	17,0***	0,4 ns
<i>Betula pubescens</i>				
Год	18,8***	52,5***	2,5 ns	7,3*
Условия произрастания	2,4 ns	0,4 ns	42,1***	44,2***

Прим.: *H* – критерия Краскела–Уоллеса ( $df = 1$  и  $n = 60$ ), \*  $P < 0,05$ , \*\*  $P < 0,01$ , \*\*\*  $P < 0,001$ , ns – влияние фактора не значимо.

Анализ изменения поверхностной плотности листа отдельно по каждому виду показал, что у *B. pendula* более значительное влияние на данный параметр оказывали погодные условия вегетационного сезона (табл.). Напротив, у *B. pubescens* изменение УППЛ определялось условиями произрастания (табл.). В течение всего периода наблюдений у данного вида на золоотвале наблюдалось увеличение поверхностной плотности листа, по сравнению с участком леса (рис.). Сравнительный анализ видов на каждом экотопе показал, что более высокая плотность листа на участке леса была характерна для *B. pendula*, а на золоотвале – для *B. pubescens* (рис.). Известно, что увеличение УППЛ позволяет растениям эффективнее использовать высокую солнечную радиацию, а также противостоять водному и азотному стрессу (Cunningham et al., 1999; Wright et al., 2002; Poorter et al., 2009). Мы предполагаем, что формирование более плотных листьев у *B. pubescens* является адаптивной реакцией к недостатку азота в

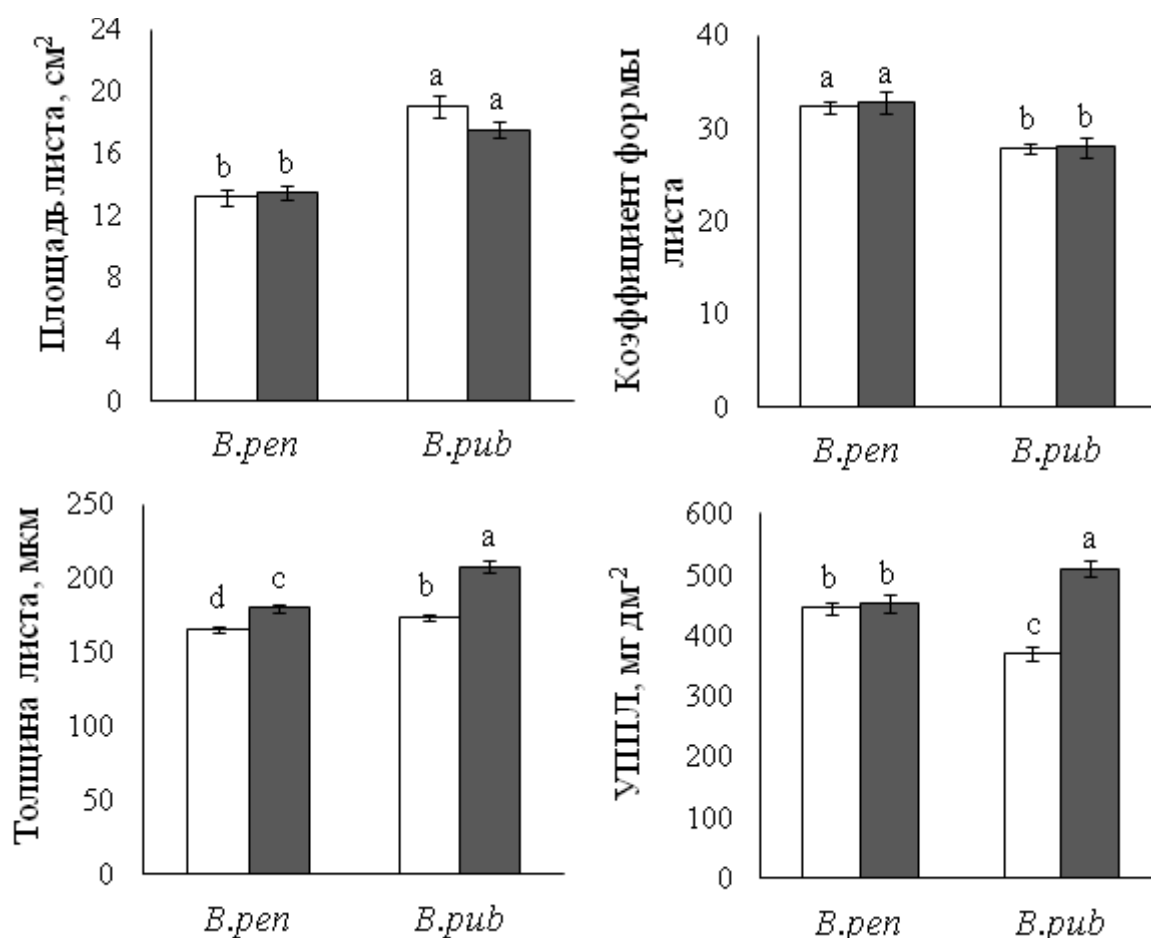


Рис. Листовые параметры *Betula pendula* Roth. (*B. pen*) и *B. pubescens* Ehrh (*B. pub*) на участке леса (□) и золотувале (■). УППЛ – удельная поверхностная плотность листа. Разными буквами (a,b,c, d) указаны значимые различия ( $p < 0,05$ ).

зольном субстрате в связи с большей требовательностью данного вида к водно-минеральным ресурсам по сравнению с *B. pendula* (Погребняк, 1968).

У исследованных видов берез наблюдалось сходное направление изменения толщины листа, обусловленное условиями роста (табл.). В течение всего периода наблюдений деревья *B. pendula* и *B. pubescens* на зольном субстрате отличались большей толщиной листа в сравнении с деревьями, произрастающими на участке леса (рис.). Особенности экотопа более существенно влияли на изменения толщины листовой пластинки у *B. pubescens*. У *B. pendula* на варьирование толщины листа также оказывали влияние особенности вегетационного сезона (таб.). Известно, что толщина листа во многом определяется структурой мезофилла и положительно связана с фотосинтетической активностью листового аппарата (Pyankov et al., 1999), а также с содержанием азота в единице площади листа (Niinemets, 1999). Поскольку зольные субстраты характеризуются крайне низким содержанием доступных для растений форм азота (Тарчевский, 1964; Махнев и др., 2002; Haunes, 2009), увеличение толщины листа, очевидно, является адаптацией исследованных видов, направленной на поддержание высокой интенсивности фотосинтеза в условиях дефицита азота. Существенное увеличение толщины листовой пластинки у *B. pendula* показано и на территории другого золотувала ТЭС (Чукина и др., 2016). Кроме того, наблюдались существенные межвидовые различия. Для *B. pubescens* отмечено формирование более толстых листьев, в сравнении с *B. pendula* (рис.), что согласуется с полученными ранее данными (Мигалина, 2012) и является видоспецифичным признаком.

Таким образом, проведенные нами исследования показали, что при естественном возобновлении на золотувале у *Betula pendula* и *B. pubescens* происходило увеличение толщины листовой пла-

стинки. Кроме того, у *B. pubescens* на зольном субстрате наблюдалось также стабильное увеличение удельной поверхностной плотности листа. Поскольку толщина и плотность листа тесно связаны с интенсивностью фотосинтеза и содержанием азота в единице площади листа, увеличение данных параметров направленно на оптимизацию газообмена и поддержание высокой интенсивности фотосинтеза в условиях дефицита почвенного азота и является адаптацией исследованных видов берез к росту на зольном субстрате. Эдафические условия не оказывали существенного влияния на размеры и форму листа берез, изменение данных параметров в значительной степени определялось погодными условиями сезона.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Калашикова И. В., Мигалина С. В., Иванова Л. А., Иванов Л. А.** Структурно-функциональная адаптация фотосинтетического аппарата берез к условиям золоотвалов тепловых электростанций // Экспериментальная биология растений: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. материалов годичного собрания Общества физиологов растений России науч. конф. и школы для молодых ученых (18–24 сентября 2017 г., Крым, Судак). – Москва, 2017. – С. 180.

**Колесников Б. П., Зубарева Р. С., Смолоногов Е. П.** Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области: практ. руководство. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. – 176 с.

**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. – 356 с.

**Мигалина С. В.** Изменение размеров и удельной поверхностной площади листьев у деревьев вдоль зонально-климатической трансекты Урала // Бот. журн., 2012. – Т. 97, № 10. – С. 45–52.

**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.

**Мигалина С. В., Иванова Л. А., Махнев А. К.** Изменение морфологии листа *B. pendula* Roth и *B. pubescens* Ehrh. вдоль зонально-климатической трансекты Урала и Западной Сибири // Экология, 2010. – № 4. – С. 257–265.

**Погребняк П. С.** Общее лесоводство. – М.: Колос, 1968. – 440 с.

**Тарчевский В. В.** Биологические методы консервации золоотвалов тепловых электростанций Урала // Растения и промышленная среда: сб. науч. тр. – Свердловск: УрГУ им. Горького, 1964. – Сб. 1. – С. 70–115.

**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 гос. ун-та. Общая биология, 2016. – № 6 (159). – С. 68–75.

**Cunningham S. A., Summerhayes B., Westoby M.** Evolutionary divergences in leaf structure and chemistry, comparing rainfall and soil nutrient gradients // Ecology, 1999. – Vol. 69(4). – P. 569–588.

**Haynes R. J.** Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites – Challenges and research needs // J Environ Manage, 2009. – Vol. 90(1). – P. 43–53.

**Niinemets Ü.** Components of leaf dry mass per area – thickness and density – alter leaf photosynthetic capacity in reverse directions in woody plants // New Phytologist, 1999. – Vol. 144. – P. 35–47.

**Poorter H., Niinemets Ü., Poorter L., Wright I. J., Villar R.** Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis // New Phytologist, 2009. – Vol. 182. – P. 565–588.

**Pyankov V. I., Kondratchuk A. V., Shipley B.** Leaf structure and specific leaf mass: the alpine desert plants of the Eastern Pamirs, Tadjikistan / New Phytologist, 1999. – Vol. 143. – P. 131–142

**Wright I. J., Westoby M., Reich P. B.** Convergence towards higher leaf mass per unit area in dry and nutrient poor habitats has different consequences for leaf life span // J. of Ecology, 2002. – Vol. 90. – P. 534–543.