

2016

## АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

### ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ КАРАБАШКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА (ЮЖНЫЙ УРАЛ) НА РАЗМЕР И ФЛУКТУИРУЮЩУЮ АСИММЕТРИЮ ЛИСТА ПОДРОСТА *BETULA PENDULA* (BETULACEAE)

©Д. В. Веселкин,<sup>1</sup> \* Н. Б. Куянцева\*\*\*\*\* О. Е. Чащина\*\*  
Е. В. Коротева\*\*

\* Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург

\*\* Ильменский государственный заповедник, Челябинская область

\*\*\* Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

<sup>1</sup> E-mail: [denis\\_v@ipae.uran.ru](mailto:denis_v@ipae.uran.ru)

Оценена информативность морфологических характеристик листа *Betula pendula* для индикации нарушенности местообитаний выбросами Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал). Исследованы листья крупного подростка, собранные на 11 пробных площадях на расстоянии 2—53 км от комбината. В градиенте влияния выбросов предприятия установлена несогласованность изменений морфометрических показателей и флуктуирующей асимметрии листа. Ширина листа и длина второй боковой жилки достоверно уменьшаются с увеличением уровня загрязнения листьев тяжелыми металлами. Флуктуирующая асимметрия листа подростка березы в фоновой, буферной и импактной зонах варьирует на одинаково высоком уровне (0.054—0.064 усл. ед.) и не связана с уровнем техногенной нагрузки.

Ключевые слова: биологический мониторинг, *Betula pendula*, листовая пластинка, морфометрические параметры, флуктуирующая асимметрия, тяжелые металлы, Южный Урал, Карабашский медеплавильный комбинат.

Березы (*Betula* L.) активно используются в биологическом мониторинге в связи с широкой распространенностью и быстрым ростом. Интерес к видам рода *Betula* связан с их хозяйственным и средообразующим значением и с хорошей изученностью морфологических, физиологических и экологических характеристик.

В целях мониторинга и биоиндикации у деревьев чаще всего анализируют характеристики фотосинтетического аппарата. Много данных накоплено в отношении физиологических параметров листьев. Для решения разнообразных задач используются анатомические и морфологические характеристики листьев. Для оценки качества среды предложен относительно легко реализуемый способ, основанный на показателе флуктуирующей асимметрии (ФА) листа березы [1, 2], который рекомендован для широкого использования [1]. Интерес к исследованию ФА листьев после этого усилился. Это привело к накоплению значительных эмпирических материалов [3—11 и др.].

Наш интерес к анализу строения листовой пластинки березы повислой *Betula pendula* Roth в условиях техногенного воздействия на естественные экосистемы связан с поиском, по возможности, простых и однозначных показателей для оценки нарушенности среды в сильно трансформированном районе г. Карабаш на Южном Урале. Выбор березы в качестве модельного объекта объясняется ее широкой распространенностью и высокой устойчивостью к техногенной нагрузке, более высокой, чем у другого широко распространенного древесного растения — сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Цель работы — оценка информативности характеристик (общие размеры и показатели флуктуирующей асимметрии) листовой пластинки березы повислой для индикации уровня нарушенности местообитаний в результате загрязнения выбросами Карабашского медеплавильного комбината (КМК), в частности выявление признаков, наиболее ярко отражающих изменение условий существования березы в градиенте загрязнения выбросами КМК.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований включает часть восточного склона Южного Урала и прилегающую с востока зону Зауральского пенеблена. Западная часть района горная, с меридиональным простиранием хребтов. Типичные высоты возвышенностей — 250—600 м над ур. моря. Климат континентальный, умеренно холодный. Среднемесячная температура января  $-(16-17)^\circ\text{C}$ , июля  $+18^\circ\text{C}$ ; продолжительность вегетационного периода 160—170 дней; количество осадков около 430 мм в год; высота снежного покрова достигает 40 см. В геоботаническом отношении район относится к подзоне южно-таежных сосново-березовых лесов, преобладающие типы лесов — сосняки разнотравные и производные березняки злаково-разнотравные.

Источник атмосферных выбросов — Карабашский медеплавильный комбинат (КМК, ЗАО «Карабашмедь», г. Карабаш, Челябинская обл.) — крупный источник промышленных загрязняющих веществ, основными из которых являются  $\text{SO}_2$  и пыль тяжелых металлов. Завод начал действовать в 1910 г., максимальные объемы выбросов (до 140—360 тыс. т в год) были достигнуты в 1970—1980 гг. [12]. В период 1990—1998 гг. производство меди было остановлено; после повторного открытия и модернизации производства объемы выбросов снизились, например в 2008 г. выбросы составили около 10 тыс. т. Вследствие сильного загрязнения на ближайших к предприятию территориях зональные экосистемы полностью разрушены: растительность и верхние части исходных почв отсутствуют — образовалась обширная техногенная пустошь.

Пробные площади (ПП) заложены преимущественно в южном направлении на расстоянии от 2 до 53 км от КМК (табл. 1) в средне- и старовозрастных березняках семенного происхождения, исходно, предположительно, разнотравно-злаковых, расположенных на средневозвышенных элементах рельефа на горных фрагментарных и горно-лесных бурых неполноразвитых почвах. На всех площадях представлена исключительно береза повислая *B. pendula*.

По нашим данным [13], максимальное содержание водорастворимых форм металлов в почвах самых загрязненных пробных площадей превышает фоновые уровни в 11—38 раз: Fe — в 17 раз, Zn — в 31, Si — в 38, Рb — в 24, Cd — в 11. Степень превышения фонового уровня валовых концентраций металлов в листьях растений меньше, чем в почве. На самой загрязненной площади фоновые концентрации металлов в листьях березы превышены в 2—21 раз: Fe — в 2 раза, Zn — в 6, Si — в 4, Рb — в 21, Cd — в 15.

ТАБЛИЦА 1

Характеристики пробных площадей (ПП) в районе  
Карабашского медеплавильного комбината  
(КМК, ЗАО «Карабашмедь», г. Карабаш, Челябинская обл.)

Table 1. Characteristics of the study sites (ПП) around Karabash Copper Smelting  
(КМК, Karabash, Chelyabinsk region)

Номер ПП Numbг of ПП	Расстояние до источника вы- бросов, км Distance from the polluter, km	Обозначение Symbol	Географические координаты, градусы Geografic coordinates, degrees		Высота над ур. моря, м Height above sea level, m	Состав древостоя Composition of the trees	Сомкнутость крон, % Closeness of the crowns, %	Содержание водорастворимых форм металлов в почве, мкг/кг Concentration of water- soluble forms of metals in the soil, mkg/kg		
			северной широты latitude (N)	восточной долготы longitude (E)				Cu	Pb	Cd
1	2.0	ПП 6	55.4511	60.1907	341	10Б	30	481	23	10
2	3.8	ПП 5	55.4986	60.1948	404	10Б	30	792	198	64
3	4.4	ПП 3	55.4975	60.2553	347	10Б	40	241	199	15
4	4.5	ПП 4	55.5088	60.2020	388	10Б	30	1095	285	67
5	8.0	ПП 2	55.4236	60.2912	345	10Б	40	344	209	45
6	14.0	ПП 7	55.3285	60.2578	323	10Б	50	775	52	16
7	16.0	ПП 1	55.3259	60.3179	308	10Б+С	40	216	190	17
8	28.0	ПП 11	55.1794	60.3126	319	10Б	40	51	34	7
9	32.0	ПП 10	55.1737	60.2644	334	9Б1С	60	29	14	6
10	52.0	ПП 8	54.9841	60.2139	390	10Б+С	50	131	12	6
11	53.0	ПП 9	54.9913	60.1787	374	10Б+С	60	59	21	27

На каждой пробной площади листья собирали у 5 особей крупного подроста (растения высотой 1.5—3 м), произраставших под пологом основного яруса березы. Подрост в качестве объекта исследования выбрали для того, чтобы соблюсти методические требования, указанные авторами методики [1], относительно однородности условий формирования листьев по степени освещенности и влажности. Листья всегда собирали на высоте 1.3 м равномерно из всех частей кроны независимо от их ориентации по сторонам света. Собирали только листья, сформированные на укороченных побегах, полностью закончивших рост, без механических повреждений и повреждений беспозвоночными фитофагами. С каждого дерева анализировали по 10 листьев, т.е. на каждой площади — по 50 листьев. Сбор выполнен в июле 2011 г.

Измерения показателей листьев выполняли на гербаризированном материале. Общие размеры листа характеризовали длиной листовой пластинки по главной жилке и шириной в самой широкой части. При измерении флукутирующей асимметрии (ФА) оценивали асимметричность проявления на правой и левой половинах листа пяти признаков [2]: 1) ширина половины листа (измерено посередине длины листовой пластинки) ( $fac_1$ ); 2) длина жилки второго порядка, второй от основания листа ( $fac_2$ ); 3) расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка ( $fac_3$ ); 4) расстояние между концами этих же жилок ( $fac_4$ ); 5) угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка ( $fac_5$ ). Общую ФА ( $fac$ ) рассчитывали как сред-

ную арифметическую частных показателей. Абсолютные значения признаков, измеряемых для анализа ФА, дополнительно использовали как характеристики размера листа. Все измерения выполнены с использованием металлической линейки с точностью 0.5 мм.

Для определения валового содержания тяжелых металлов анализировали листья (одна смешанная проба с ПП), собранные одновременно с пробами для морфологического анализа. В соответствии с ГОСТ 26929—94 и 30178—96 листья озоляли при 450 °С, затем удаляли органические вещества смесью HCl и HNO<sub>3</sub> (3:1); сухой остаток разводили 1н. HNO<sub>3</sub>. Концентрации металлов определяли на атомно-абсорбционных спектрометрах Aanalyst 400 (PerkinElmer) с пламенной атомизацией (Cu, Zn) и Aanalyst 300 (PerkinElmer) с графитовой печью HGA-850 (Pb, Cd). Лаборатория, в которой выполняли измерения, сертифицирована: аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.514536. В качестве интегрального показателя использован индекс загрязнения листьев (усл. ед.). Его рассчитывали как сумму превышений концентраций цинка, меди, свинца и кадмия в каждой пробе над минимальной для каждого металла концентрацией, найденной в листьях березы во всех измерениях.

Статистический анализ выполнен в пакете Statistica 6.0. Выбор непараметрических методов (критерии Краскела—Уоллеса, Манна—Уитни и коэффициента корреляции Спирмена) связан с тем, что условия применимости параметрических подходов, как правило, не выполнялись. Учетной единицей при выполнении статистического анализа было среднее значение признака на одной пробной площади.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности строения листовой пластинки подростка березы по мере приближения к КМК анализировали двумя способами. Во-первых, сравнивали средние значения признаков, объединив площади по принадлежности к трем традиционно выделяемым зонам техногенной нагрузки: импактной — вблизи КМК (ПП 3—6), буферной (ПП 1, 2 и 7) и фоновой — на наибольшем удалении от КМК (ПП 8—11). Во-вторых, анализировали коэффициенты корреляции всех исследуемых признаков с индексом загрязнения листьев.

При переходе от фоновых к импактным участкам достоверно изменяются только два признака строения листа: уменьшаются ширина листа и длина второй боковой жилки (табл. 2). Ширина уменьшается на 18 % от фонового значения, длина второй жилки — на 19 %. Это свидетельствует о снижении размера листовой пластинки с ростом техногенной нарушенности. Кроме этого, при переходе от фоновых к импактным участкам наблюдается тенденция к уменьшению длины листа и расстояний между жилками.

Между разными зонами нагрузки не установлено направленных изменений показателей флуктуирующей асимметрии листа. Из пяти стандартно включаемых в анализ ФА признаков только ФА длины второй боковой жилки ( $fac_2$ ) имеет достоверные изменения в градиенте загрязнения. Но эти изменения нелинейны — значения  $fac_2$  увеличиваются при переходе от фоновых участков к буферным, а в импактной зоне вновь снижаются до фонового уровня. Отсутствие достоверных различий в значениях интегрального показателя ФА свидетельствует, что общая стабильность развития листа в фоновой, буферной и импактной зонах не различается. По шкале оценки качества среды [ 1 ] ее состояние в фоновой и буферной зонах следует классифицировать как критическое (класс V), в импактной — как существенно отклоняющееся от нормы (класс IV).

ТАБЛИЦА 2

Средние значения и достоверность различий признаков строения листа *Betula pendula* в градиенте техногенной нагрузки Карабашского медеплавильного комбината

Table 2. Mean values and significant of differences of traits of the *Betula pendula* leaf blade in the pollution load gradient of the Karabash Copper Smelter

Признак Trait	Зона нагрузки Zones of pollution load			Достоверность различий (над чертой) и их уровень значимости (под чертой) Significance of differences (above the line) and their significant level (below the line)			
	фоновая (n = 4) control (n = 4)	буферная (n = 3) buffer (n = 3)	импактная (n = 4) impact (n = 4)	Критерий Краскел- ла—Уоллеса Value of Kruskal— Wallis test	Критерий Манна—Уитни Value of Mann—Whitney test		
					Ф—Б* С—В*	Б—И В—И	Ф—И С—И

	Размеры листа Size of the leaf blade							
Ширина листа, мм (W) Leaf width, mm (W)	56.3	52.2	46.4	7.14	2.0	1.0	0.0	0.028
Длина листа, мм (L) Leaf length, mm (L)	46.3	44.5	41.4	3.33	4.0	3.0	2.0	0.190
Отношение W/L Ratio W/L	1.25	1.19	1.14	4.48	3.0	6.0	0.0	0.107

Признаки, измеряемые при определении флуктуирующей асимметрии  
Traits, measured for determination of the fluctuating asymmetry

Ширина половины листа, мм Half width of the leaf, mm	19.4	18.8	16.2	4.71	4.0	2.0	1.0	0.095
Длина второй боковой жилки, мм The length of the second lateral vein, mm	31.2	28.5	25.3	7.14	1.0	2.0	0.0	0.028
Расстояние между основаниями жилок, мм The distance between the bases of the veins, mm	4.5	4.0	3.6	5.05	2.0	3.0	1.0	0.080
Расстояние между концами жилок, мм The distance between the ends of the veins, mm	11.6	11.7	10.0	4.41	4.0	2.0	1.0	0.110
Угол между главной и боковой жилками, град The angle between the midrib and lateral vein, degrees	49	47	46	3.08	2.0	4.0	3.0	0.215

Флуктуирующая асимметрия (ФА)  
Fluctuating asymmetry (FA)

ФА ширины половины листа (fac <sub>1</sub> ) FA of the half the width of the leaf (fac <sub>1</sub> )	0.041	0.041	0.039	0.14	6.0	5.0	7.0	0.931
					1.000	0.724	0.773	

ТАБЛИЦА 2 (продолжение)

Признак Trait	Зона нагрузки Zones of pollution load			Достоверность различий (над чертой) и их уровень значимости (под чертой) Significance of differences (above the line) and their significant level (below the line)			
	фоновая (n = 4) control (n = 4)	буферная (n = 3) buffer (n = 3)	импактная (n = 4) impact (n = 4)	Критерий Краскел- ла—Уоллеса Value of Kruskal- Wallis test	Критерий Манна—Уитни Value of Mann—Whitney test		
					Ф—Б* С—В*	Б—И В—I	Ф—И С—I
ФА длины второй боковой жилки ( <i>f'ac-i</i> ) FA of the length of the second lateral vein ( <i>faci</i> )	0.028	0.038	0.023	7.14 0.028	0.0 0.034	0.0 0.034	3.0 0.149
ФА расстояния между основа- ниями жилок ( <i>fac^</i> ) FA of the distance between the bases of the veins ( <i>fac</i> )	0.103	0.141	0.108	3.48 0.176	2.0 0.157	1.0 0.077	6.0 0.564
ФА расстояния между конца- ми жилок ( <i>fac,</i> ) FA of the distance between the ends of the veins ( <i>fac4</i> )	0.070	0.061	0.057	3.58 0.167	3.0 0.289	5.0 0.724	1.0 0.043
ФА угла между главной и бо- ковой жилками ( <i>fac,</i> ) FA of the angle between the midrib and lateral vein ( <i>fac,</i> )	0.047	0.040	0.042	1.33 0.515	3.0 0.289	4.0 0.480	6.0 0.564
Общая ФА <i>fac,</i> ) Total FA ( <i>fac,</i> )	0.058	0.064	0.054	2.60 0.273	3.0 0.289	2.0 0.157	5.0 0.386

Примечание. \* — зоны техногенной нагрузки: Ф — фоновая, Б — буферная, И — импактная.

Note. \* — zones of pollution load: С — control (relatively unpolluted), В — buffer (moderately polluted), I — impact (heavily polluted).

Корреляционный анализ данных показал достоверную отрицательную связь уровня загрязнения листьев Zn, Cu, Pb и Cd с большинством размерных признаков листа (табл. 3). Значимые коэффициенты корреляции выявлены для таких признаков, как ширина листа, отношение ширины к длине листа, ширина половины листа, длина второй боковой жилки, расстояние между основаниями первой и второй жилок, угол между главной и боковой жилками. Другие признаки (длина листа, расстояние между концами жилок) листовой пластинки не связаны со степенью загрязнения листьев. Частные характеристики флуктуирующей асимметрии листовой пластинки и интегральный показатель ФА не продемонстрировали связи с индексом загрязнения листьев Zn, Cu, Pb и Cd (табл. 3).

Изменения размерных признаков листьев не всегда прямо пропорциональны уровню их загрязнения тяжелыми металлами. Об этом свидетельствует сопоставление значений коэффициентов детерминации регрессионных уравнений, описывающих зависимости «индекс загрязнения — признак» функциями прямой линии, параболы второго порядка и логарифмической (табл. 3). Для нелинейных аппроксимаций значения  $R^2$  всегда больше, чем для прямой линии, поэтому для аппроксимации таких зависимостей можно использовать ло-

ТАБЛИЦА 3

Коэффициенты корреляции между признаками строения листа *Betula pendula* и индексом загрязнения листьев и коэффициенты детерминации при аппроксимации эмпирических данных различными функциями

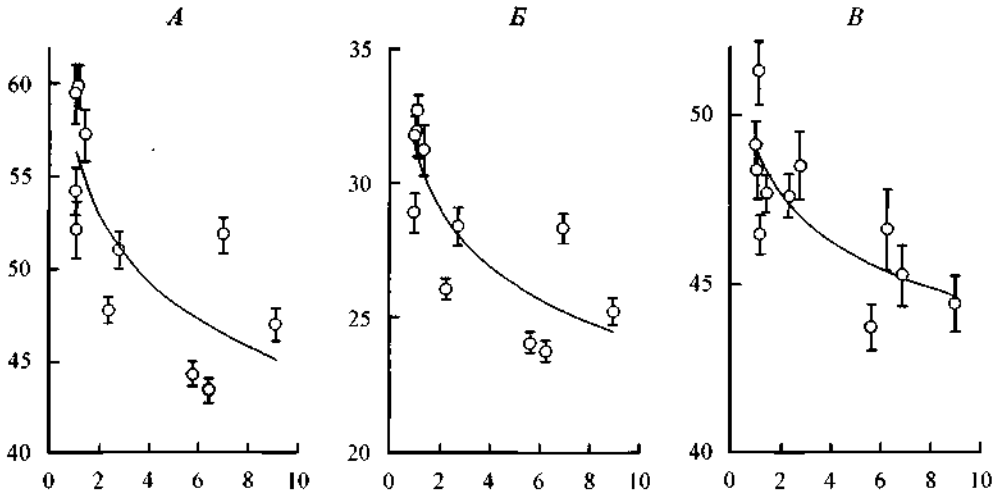
Table 3. Correlation coefficients between leaf structure traits of *Betula pendula* and pollution index for leaves, and coefficients of determination for the approximation of the empirical data by different functions (n = 11)

Признак Trait	Коэффициент корреляции Спирмена (n = 11) Value of Spearman correlation coefficient	Коэффициент детерминации (R <sup>2</sup> ) при аппроксимации функциями: Coefficients of determination (R <sup>2</sup> ) for the approximation by functions		
		линейной straight line	степенной power	логарифми- ческой logarithmic
<b>Размеры листа</b> Size of the leaf blade				
Ширина листа (W) Leaf width (W)	<b>-0.74</b>	<b>0.49</b>	<b>0.65</b>	<b>0.60</b>
Длина листа (L) Leaf length (L)	-0.49	0.33	0.41	<b>0.38</b>
Отношение W/L Ratio W/L	<b>-0.67</b>	0.29	0.40	<b>0.38</b>
<b>Признаки, измеряемые при определении флуктуирующей асимметрии</b> Traits, measured for determination of the fluctuating asymmetry				
Ширина половины листа Half width of the leaf	<b>-0.65</b>	<b>0.53</b>	<b>0.63</b>	<b>0.59</b>
Длина второй боковой жилки The length of the second lateral vein	<b>-0.75</b>	<b>0.56</b>	<b>0.70</b>	<b>0.67</b>
Расстояние между основаниями жилок The distance between the bases of the veins	<b>-0.74</b>	0.32	<b>0.80</b>	<b>0.49</b>
Расстояние между концами жилок The distance between the ends of the veins	-0.33	0.18	0.29	0.25
Угол между главной и боковой жилками The angle between the midrib and lateral vein	<b>-0.75</b>	<b>0.59</b>	<b>0.61</b>	<b>0.60</b>
<b>Флуктуирующая асимметрия (ФА)</b> Fluctuating asymmetry (FA)				
ФА ширины половины листа (fac <sub>1</sub> ) FA of the half the width of the leaf (fac <sub>1</sub> )	-0.32	0.11	0.19	0.08
ФА длины второй боковой жилки (fac <sub>2</sub> ) FA of the length of the second lateral vein (fac <sub>2</sub> )	-0.13	0.07	0.09	0.07
ФА расстояния между основаниями жилок (fac <sub>3</sub> ) FA of the distance between the bases of the veins (fac <sub>3</sub> )	+0.24	0.01	0.07	0.01
ФА расстояния между концами жилок (fac <sub>4</sub> ) FA of the distance between the ends of the veins (fac <sub>4</sub> )	-0.58	0.35	0.46	<b>0.42</b>

ТАБЛИЦА 3 (продолжение)

Признак Trait	Кoeffициент корреляции Спирмена ( $n = 11$ ) Value of Spearman correlation coefficient	Кoeffициент детерминации ( $R^2$ ) при аппроксимации функциями: Coefficients of determination ( $R^2$ ) for the approximation by functions		
		линейной straight line	степенной power	логарифмической logarithmic
ФА угла между главной и боковой жилками ( $fac_3$ ) FA of the angle between the midrib and lateral vein ( $fac_3$ )	-0.17	0.02	0.16	0.07
Общая ФА ( $fac_1$ ) Total FA ( $fac_1$ )	-0.12	0.08	0.09	0.06

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены значимые при  $P < 0.05$  коэффициенты.  
Note. Significant coefficients ( $P < 0.05$ ) are shown in bold.



Зависимость ширины (А), длины второй боковой жилки (Б) и угла между главной и второй боковой жилками (В) листа *Betula pendula* от уровня загрязнения листьев Zn, Cu Pb и Cd.

По оси абсцисс во всех случаях — индекс загрязнения листьев, усл. ед. По оси ординат — ширина листа, мм (А); длина второй боковой жилки, мм (Б); угол между главной и второй боковой жилками, градусы (В). Аппроксимация логарифмической функцией; вертикальные линии — стандартная ошибка.

Dependence of the width (А), length of the second lateral vein (Б), and angle between the midrib and second lateral vein (В) of *Betula pendula* leaf on the level of Zn, Cu, Pb, and Cd foliage contamination.

X-axis of all cases — the pollution index of leaves (conventional units); y-axis — leaf width, mm (А); the length of the second lateral vein, mm (Б); the angle between the midrib and second lateral vein, degrees (В). Approximation by a logarithmic function; vertical lines indicate standard errors.



гарифмическую функцию (см. рисунок). Как видно из рисунка, наибольшие отклонения параметров листа от фоновых наблюдаются при значениях индекса загрязнения листьев больше 5 усл. ед. Такие значения индекса регистрируются на пробных площадях импактной и части площадей буферной зон, расположенных на расстоянии менее 8 км от КМК. На площадях буферной зоны на расстоянии 14—16 км от источника выбросов при индексах загрязнения листьев в пределах 1.5—2.5 усл. ед. значения большинства характеристик листьев сопоставимы с фоновыми величинами.

Основные заключения об изменении признаков строения листовой пластинки подроста *B. pendula* в окрестностях Карабашского медеплавильного комбината, полученные с использованием дисперсионного и корреляционного анализов, близки. Результаты свидетельствуют об уменьшении параметров листа при возрастании уровня загрязнения. Наиболее выражено уменьшение ширины листовой пластинки, в меньшей степени — других признаков, не установлено достоверного уменьшения длины листа. Изменение этих признаков регистрируется не во всем диапазоне расстояний от КМК и техногенных нагрузок. Эффекты изменения морфологии листьев проявляются при значениях индекса загрязнения листьев выше 5 усл. ед., что наблюдается на расстояниях меньше 10 км от предприятия. При меньших уровнях загрязнения параметры строения листовых пластинок варьируют в пределах, близких к фоновому уровню. Следует отметить, что влияние техногенного загрязнения, по-видимому, не единственная причина экологической изменчивости размеров листа. В каждой зоне техногенной нагрузки при любых уровнях загрязнения листьев размах варьирования признаков между разными пробными площадями достаточно велик (см. рисунок). Естественная экологическая вариабельность листьев выступает, вероятно, одной из причин большей информативности корреляционного анализа их признаков с уровнем загрязнения листьев тяжелыми металлами по сравнению с дисперсионным анализом различий признаков между пробными площадями, сгруппированными по принадлежности к разным зонам нагрузки.

Заключение об уменьшении размеров листовых пластинок в условиях влияния выбросов КМК соответствует большинству литературных данных [14—20]. Уменьшение листьев в ответ на разные типы загрязнений рассматривается как часть широкого комплекса реакций, обозначаемых как приобретенный черт ксероморфного строения. Помимо редукции размеров усиление ксероморфности обычно выражается в увеличении плотности расположения устьиц, утолщении кутикулы, снижении размеров клеток [16, 18, 21]. Закономерность преимущественной редукции ширины листа и меньшее угнетение роста в направлении главной жилки также соответствует опубликованным данным и предположительно объясняется разной чувствительностью к токсикантам апикальных и маргинальных меристем [17]. Наиболее интересными и новыми сведениями, полученными в отношении линейных размеров листьев, являются критические уровни суммарного загрязнения листьев тяжелыми металлами, при которых их размеры начинают существенно отклоняться от фоновых значений. Этим порогом является значение индекса загрязнения листьев 5 усл. ед.

Отчасти неожиданно, что не найдено связи флуктуирующей асимметрии листьев с уровнем загрязнения листьев тяжелыми металлами. При этом частота ненаправленных отклонений от билатеральной симметрии листовых пластинок подроста *B. pendula* во всех местообитаниях независимо от уровня техногенной нарушенности оказалась высокой. В рамках представлений о сопряженности стабильности развития и внешних условий [2], качество среды во

всех зонах техногенной нагрузки следует оценить как низкое — сильно отклоняющееся от нормального или критическое. Это означает, что для объекта наших исследований — подроста *B. pendula* — условия фоновой зоны не являются абсолютно благоприятными и признаки листьев березы из этого района не являются эталонными. Но при этом независимые характеристики качества среды, такие как содержание тяжелых металлов в почве и листьях березы, не подтверждают предположения о техногенной обусловленности пессимальности условий на пробных площадях, расположенных далее 15—20 км от КМК.

Полученные данные об отсутствии изменений ФА листьев в градиенте загрязнения окружающей среды противоречат представлениям о влиянии тяжелых металлов на онтогенез растений. Этот вывод также не согласуется с большим числом эмпирических данных, в соответствии с которыми ФА возрастает при разного рода антропогенных воздействиях: под влиянием химического загрязнения [22—24], при рекреационных нагрузках [11], при комплексном изменении условий среды вследствие урбанизации [3, 8] или под влиянием других факторов [5]. Однако известно немало случаев, когда не зарегистрировано повышения уровня флукутирующей асимметрии листьев при антропогенном прессе. Так, В. П. Иванов с соавторами [6] не обнаружили однозначных связей между уровнем ФА листьев березы в лесном массиве и содержанием в них тяжелых металлов. Близкий результат получен Е. А. Ерофеевой и М. М. Наумовой [10], которые не нашли корреляций между содержанием металлов в листьях березы и их ФА в городских условиях. В ходе многолетних наблюдений *B. pubescens* ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hamet-Ahti на Кольском п-ове не найдено взаимосвязи ФА листа ни с расстоянием до источника загрязняющих веществ, ни с содержанием Ni и SO<sub>2</sub> на участках; авторы пришли к выводу о большой роли климатических флуктуации в определении величины ФА [25]. Значительное число примеров отсутствия корреляции ФА листьев с расстоянием до точечных источников эмиссии поллютантов или с уровнем загрязнения листьев приведено в монографии М. В. Козлова с соавторами [12]. О. М. Шабалина и Т. М. Демьяненко [9], исследуя березу в г. Красноярске, заключили, что флукутирующая асимметрия листа «существенно повышается в условиях стресса. Однако повышение уровня ФА связано не столько с общим уровнем загрязнения среды, сколько с влиянием физических, физико-химических и биологических свойств почв...» (стр. 138). Единственная известная нам предшествующая попытка оценить асимметрию листа деревьев в районе Карабашского медеплавильного комбината принадлежит М. В. Козлову с соавторами [12]. По их оценкам ФА листьев *B. pendula* не коррелировала с расстоянием до КМК, но увеличивалась при возрастании содержания металлов в листьях. Таким образом, вывод об отсутствии изменения уровня ФА листьев вблизи Карабашского медеплавильного завода не соответствует значительному количеству опубликованных данных, но не уникален.

Установленное отсутствие изменений флукутирующей асимметрии листьев березы при возрастании уровня техногенной нагрузки вблизи КМК может быть связано со спецификой объекта исследований. Изучены листья крупного подроста — имматурных растений, произраставших под пологом деревьев первого яруса, в то время как авторы методики оценки качества среды на основе ФА рекомендовали использовать листья генеративных растений [1]. Подрост испытывает одностороннее конкурентное воздействие со стороны взрослых деревьев, т.е. существует в условиях фитонотического давления или стресса. Исходя из представления о неспецифическом увеличении ФА в ответ на стрессовые факторы разной природы, высокий и не зависящий от за-

грязнения уровень ФА листьев можно связать с подчиненным состоянием подроста. Известно, что биотический стресс может быть причиной увеличения флуктуирующей асимметрии. Это показано в отношении заболеваний деревьев, вызванных разными патогенами [4, 26]. Есть также прямые свидетельства более высокой ФА у подроста березы по сравнению с взрослыми растениями [7].

Существуют противоположные результаты относительно связи флуктуирующей асимметрии с ростовыми характеристиками растений: быстрый рост листьев может отрицательно коррелировать с уровнем ФА [25]; связь между ФА листьев, размером листьев и ростом особей может отсутствовать [27]; быстрорастущие листья могут иметь большую ФА, чем медленнорастущие [28]. В целом, несмотря на наличие свидетельств в пользу того, что наблюдаемая высокая ФА листьев связана с ценотическим стрессом, в котором существует подрост, это объяснение имеет гипотетический характер. Другой гипотезой, объясняющей отсутствие изменений флуктуирующей асимметрии в градиенте влияния выбросов КМК, может быть предположение о произошедших у березы генетических адаптациях к повышенному содержанию тяжелых металлов. Поскольку изучался подрост семенного происхождения, такое предположение имеет основания. Подобное предположение выдвигалось как вероятное объяснение отсутствия изменений ФА листьев березы возле комбината «Североникель» [25].

В целом возможны две конкурирующие формулировки, объясняющие наблюдающееся отсутствие изменений флуктуирующей асимметрии листьев березы в зоне влияния КМК: 1) уровень флуктуирующей асимметрии листьев не связан со степенью техногенной трансформации окружающей среды, характеризуемой индексом загрязнения листьев тяжелыми металлами; 2) влияние ценотического давления превышает стрессовое воздействие, обусловленное постоянным поступлением тяжелых металлов в лесные экосистемы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В градиенте влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината установлено несогласованное изменение двух групп признаков строения листа подроста *Betula pendula* Roth — морфометрических и флуктуирующей асимметрии. Большинство линейных размеров листа и коррелятивно связанных с ними морфометрических признаков с увеличением уровня техногенной нагрузки уменьшаются. Критическим значением интегрального индекса загрязнения листьев, приводящим к достоверному уменьшению ширины листа и длины второй боковой жилки, является величина 5 усл. ед., регистрируемая на расстоянии ближе 10 км от предприятия. Эти реакции ожидаемы и могут быть уверенно интерпретированы как имеющие негативное значение, поскольку у берез размер листьев является индикатором общей продуктивности особи [21]. Учитывая высокий уровень загрязнения почвы и листьев тяжелыми металлами на пробных площадях вблизи КМК, неожиданно, что техногенный стресс не сказался на уровне флуктуирующей асимметрии листьев. По-видимому, ценотическое давление, испытываемое подростом *B. pendula* со стороны полога древостоя, оказывает более выраженное стрессовое влияние на флуктуирующую асимметрию листа, чем техногенное воздействие, обусловленное постоянным поступлением тяжелых металлов в лесные экосистемы.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования поддержаны Комплексной программой фундаментальных исследований Уральского отделения РАН, проект № 15-12-5-31.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В. М., Баранов А. С, Борисов В. И. и др. Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методологическое руководство для заповедников. М., 2000. 68 с.
2. Захаров В. М., Чубинишвили А. Т., Дмитриев С. Г., Баранов А. С. и др. Здоровье среды: практика оценки. М., 2000. 318 с.
3. Бойко А. А. Оценка стабильности развития листьев березы повислой в условиях аэротехногенного загрязнения окружающей среды // Вестн. МГУЛ. Лесн. вестн. 2004. №5 (36). С. 121—123.
4. Гелашвили Д. Б., Лобанова И. В., Ерофеева Е. А., Наумова М.М. Влияние лесопатологического состояния березы повислой на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки // Поволжский экол. журн. 2007. № 2. С. 106—115.
5. Булатова Е. С, Бабина С. Г., Онищенко С. С, Ильяшенко В. Б., Сонникова А. Е. Оценка состояния популяции березы повислой (*Betula pendula*) в ООПТ юга Сибири // Изв. Самарского НЦ РАН. 2009. Т. 11, № 1—3. С. 363—368.
6. Иванов В. П., Марченко С. И., Акименков Н. В. Использование асимметрии площадей листовых пластинок *Betula pendula* в качестве индикатора экологического состояния природной среды // Вестн. Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2009. № 3. С. 68—74.
7. Амосова И. Б., Феклисов П. А. Асимметрия листовой пластинки березы повислой у особей разного возрастного состояния в пригородных лесах г. Архангельска // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 2. С. 60—66.
8. Мандра Ю. А., Еременко Р. С. Биоиндикационная оценка состояния окружающей среды города Кисловодска на основе анализа флуктуирующей асимметрии // Изв. Самарского НЦ РАН. 2010. Т. 12, № 1—8. С. 1990—1994.
9. Шабалина О. М., Демьяненко Т. Н. Оценка влияния загрязнения среды и почвенных факторов на показатели флуктуирующей асимметрии листа березы повислой (*Betula pendula* Roth) в г. Красноярске // Вестн. КрасГАУ. 2011. № 12. С. 135—140.
10. Ерофеева Е. А., Наумова М. М. Сезонная динамика морфофизиологических показателей листа *Betula pendula* (Betulaceae) при автотранспортном загрязнении // Раст. ресурсы. 2012. Т. 48, вып. 1. С. 59—70.
11. Собчак Р. О., Афанасьева Т. Г., Копылов М. А. Оценка экологического состояния рекреационных зон методом флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth // Вестн. Томского гос. ун-та. 2013. № 368. С. 195—199.
12. Kozlov M. V., Zvereva E. L., Zverev V. E. Impacts of point polluters on terrestrial biota. Dordrecht; Heidelberg; London; New York, 2009. 466 p.
13. 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 // Агрехимия. 2015. № 3. С. 94—102.
14. Кулагин Ю. З. Древесные растения и промышленная среда. М., 1974. 156 с.
15. Фролов А. К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем. СПб., 1998. 328 с.

16. Неверова О. А., Колмогорова Е. Ю. Ксерофитизация листьев древесных растений как показатель загрязнения атмосферного воздуха (на примере г. Кемерово) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2002. № 3. С. 29—33.
17. Василевская Н. В., Лукина Ю. М. Влияние техногенного загрязнения на динамику роста и мезоструктуру листьев *Betula czerepanovii* Orlova (Мурманская область) // Учен. зап. ПетрГУ. Серия: Естественные и технические науки. 2011. № 8. С. 14—18.
18. Сейдафаров Р. А. Эколого-биологические особенности липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях техногенного загрязнения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2008. 24 с.
19. Зверев В. Е. Влияние промышленного загрязнения на экологию березы Черепанова (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hamet-Ahti) на Кольском полуострове: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2012. 19 с.
20. Коротеева Е. В., Куянцева Н. Б., Веселкин Д. В., Чашина О. Е. В градиенте влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината изменяется размер, но не флуктуирующая асимметрия листа березы повислой // ДАН. 2015. Т. 460, № 3. С. 364—367.
21. 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.
22. Кряжева Н. Г., Чистякова Е. К., Захаров В. М. Анализ стабильности развития березы повислой в условиях химического загрязнения // Экология. 1996. № 6. С. 441—444.
23. Kozlov M. V., Wilsey B. J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuating asymmetry of birch leaves increases under pollution impact // J. Appl. Ecol. 1996. Vol. 33, N 6. P. 1489—1495.
24. Vasil'ev A. G., Vasil'eva I. A., Marin Yu. F. Phenogenetic monitoring of the weeping birch (*Betula pendula* Roth) in the Middle Urals: testing a new method for assessing developmental instability in higher plants // Russ. J. Ecol. 2008. Vol. 39, N 7. P. 483—489.
25. Valkama J., Kozlov M. V. Impact of climatic factors on the developmental stability of mountain birch growing in a contaminated area // J. Appl. Ecol. 2001. Vol. 38, N 3. P. 665—673.
26. Баландайкин М. Э. Взаимосвязь действия инфекционного начала *Inonotus obliquus* (Pers.) Pil. на березу и величины интегрального показателя флуктуирующей асимметрии ассимиляционного аппарата // Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. 2012. № 3. С. 15—22.
27. Black-Samuelsson S., Andersson S. The effect of nutrient stress on developmental instability in leaves of *Acer platanoides* (Aceraceae) and *Betula pendula* (Betulaceae) // Am. J. Bot. 2003. Vol. 90, N 8. P. 1107—1112.
28. Martel J., Lempa K., Haukioja E. Effects of stress and rapid growth on fluctuating asymmetry and insect damage in birch leaves // Oikos. 1999. Vol. 86, N 2. P. 208—216.

Поступило 5 II 2015