

**В ГРАДИЕНТЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБРОСОВ  
КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА  
ИЗМЕНЯЕТСЯ РАЗМЕР, НО НЕ ФЛУКТУИРУЮЩАЯ АСИММЕТРИЯ  
ЛИСТА БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ**

© 2015 г. Е. В. Коротева, Д. В. Веселкин, Н. Б. Куянцева, О. Е. Чашина

Представлено академиком РАН В.Н. Большаковым 30.05.2014 г.

Поступило 25.08.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565215020279

Березы (*Betula L.*) широко используются в биологическом мониторинге в связи с быстрым ростом, способностью произрастать в большом диапазоне условий и высокой хозяйственной значимостью. Рост популярности берез в биоиндикационных и мониторинговых исследованиях отчасти объясняется тем, что на примере промеров листа видов рода *Betula* предложены относительно легко реализуемые подходы индикации качества среды, основанные на измерении флуктуирующей асимметрии (ФА) [1, 2]. В основе использования ФА, как индикатора благоприятности или неблагоприятности внешних условий, лежат общие представления о взаимосвязи между стабильностью развития билатеральных структур и проявлением неблагоприятных внешнесредовых факторов [3].

Целью работы была оценка информативности разных морфологических характеристик листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth) для индикации нарушения естественных местообитаний в результате загрязнения поллютантами, выбрасываемыми Карабашским медеплавильным комбинатом. Использовали две группы структурных признаков листа: размер и флуктуирующую асимметрию. Нас интересовало, какие признаки лучше отражают техногенное изменение условий существования березы.

Ильменский государственный заповедник  
им. В.И. Ленина

Уральского отделения Российской Академии наук,  
Миасс Челябинской обл.

Институт экологии растений и животных  
Уральского отделения Российской Академии наук,  
Екатеринбург

Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург

Карабашский медеплавильный комбинат (КМК, Челябинская обл.) — крупный, действующий с 1910 г. источник промышленных загрязняющих веществ, основными из которых являются SO<sub>2</sub> и пыль тяжелых металлов (Cu, Cd, Zn, Pb). Максимальные объемы выбросов (до 140–360 тыс. т в год) наблюдались в 1970–1980 гг. [4]. В настоящее время выбросы снизились больше, чем на порядок. Вследствие сильного загрязнения на ближайших к комбинату территориях зональные экосистемы полностью разрушены, растительность и верхние части исходных почв отсутствуют, образовалась техногенная пустошь. Работы проведены на 11 площадях, расположенных на расстояниях от 2 до 53 км от КМК. Максимальное содержание водорастворимых форм Zn, Cu, Pb, Cd в почвах наиболее загрязненных площадей превышает фоновые уровни в 11–38 раз. Кратность превышения фонового уровня валовых концентраций металлов в листьях — 4–21 раз. На каждой площади собирали по 10 листьев у 5 особей крупного подростка (особи высотой 1.5–3 м) *B. pendula*, произраставших под пологом основного яруса березы. 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 поврежденных беспозвоночными-фитофагами. Общие размеры листа характеризовали длиной листовой пластинки по главной жилке и шириной в самой широкой части. При измерении ФА использовали стандартную регистрацию пяти признаков (табл. 1) на правой и левой половинах листа [2].

При сравнении средних значений признаков в фоновой, буферной и импактной зонах техногенной нагрузки установлено, что на наиболее загрязненных импактных участках, по сравнению с фоновыми, значительно снижается ширина листа

**Таблица 1.** Характеристики тесноты связи между расстоянием до Карабашского медеплавильного комбината, загрязнением почвы и листьев\* и признаками строения листа *Betula pendula*

Признаки	Предиктор					
	расстояние до КМК		индекс загрязнения			
			почвы		листьев	
	$r_s^{**}$	$p$	$r_s$	$p$	$r_s$	$p$
Размер						
Ширина листа	+0.81	0.003	-0.68	0.021	-0.74	0.010
Длина листа	+0.63	0.039	-0.38	0.247	-0.49	0.125
Признаки, измеряемые при определении ФА						
Ширина половины листа	+0.71	0.015	-0.55	0.083	-0.65	0.029
Длина жилки второго порядка	+0.83	0.002	-0.74	0.010	-0.75	0.007
Расстояние между основаниями жилок	+0.84	0.001	-0.46	0.151	-0.74	0.010
Расстояние между концами жилок	+0.61	0.047	-0.15	0.670	-0.33	0.326
Угол между главной и боковой жилками	+0.64	0.035	-0.45	0.170	-0.75	0.008
ФА						
ФА ширины половины листа	+0.15	0.650	-0.05	0.894	-0.32	0.340
ФА длины жилки второго порядка	+0.35	0.298	+0.03	0.937	-0.13	0.709
ФА расстояния между основаниями жилок	-0.21	0.537	+0.18	0.593	+0.24	0.484
ФА расстояния между концами жилок	+0.55	0.077	-0.52	0.102	-0.58	0.060
ФА угла между главной и боковой жилками	+0.20	0.555	-0.05	0.894	-0.17	0.612
Общая ФА	+0.23	0.502	+0.02	0.958	-0.12	0.729

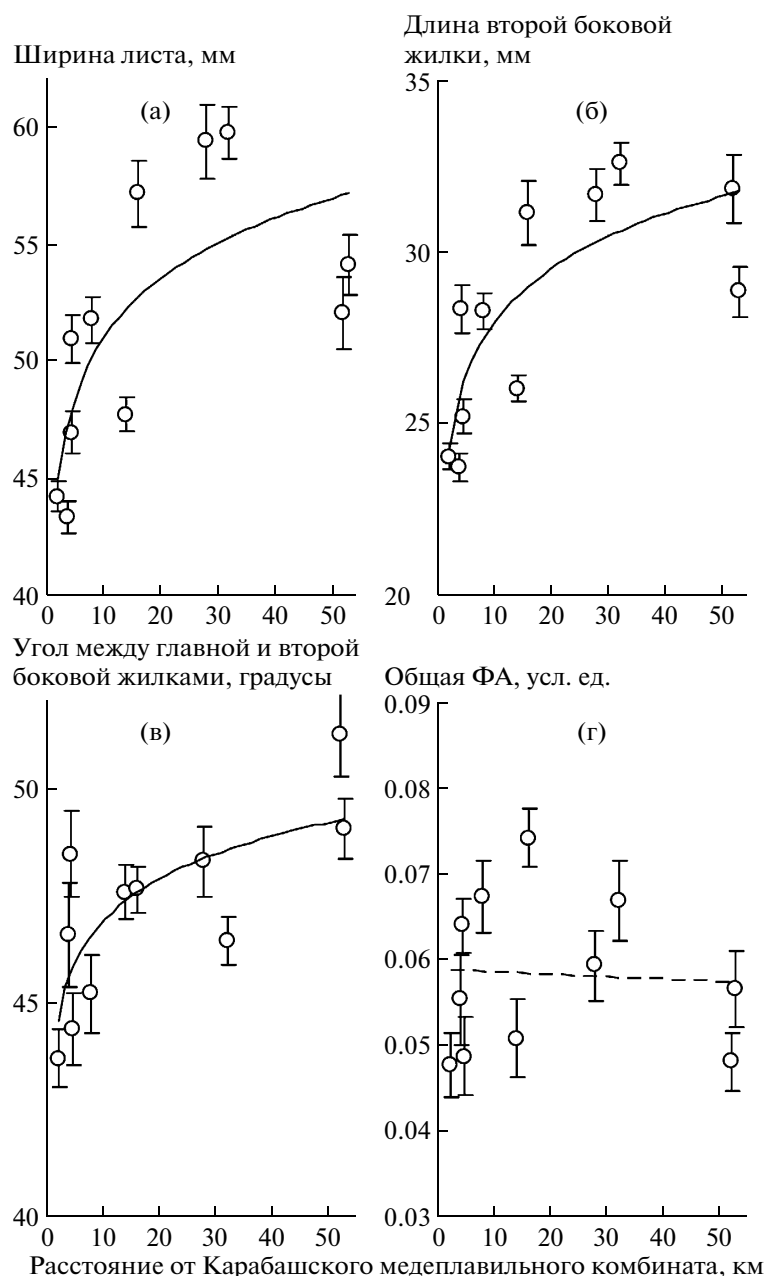
Примечание. \* – в качестве меры загрязнения использовали среднее превышение (разы) концентраций четырех приоритетных поллютантов (Zn, Cu, Pb, Cd) над минимальными фоновыми концентрациями; в почве измерены водорастворимые, в листьях *Betula pendula* – валовые формы металлов; \*\* – значение коэффициента корреляции Спирмена при  $n = 11$ ;  $p$  – уровень значимости.

(на 18% от фонового уровня;  $H = 7.14$ ,  $p = 0.028$ ;  $H$  – критерий Краскела–Уоллеса при  $n = 11$  и  $dF = 2$ ) и уменьшается длина второй боковой жилки (на 19%;  $H = 7.14$ ,  $p = 0.028$ ). Сравнение показателей динамики в разных зонах иных признаков, в том числе показателей ФА, не выявило достоверных различий. Абсолютные значения интегрального показателя ФА везде высоки: 0.048–0.074 условных ед. По шкале оценки качества среды [2] ее среднее состояние в фоновой и буферной зонах квалифицируется как критическое, а в импактной – как существенно отклоняющееся от нормы.

При расчете корреляций установлено уменьшение всех размерных признаков листа при приближении к КМК (табл. 1). Сильно выражено снижение ширины листа, длины второй боковой жилки, расстояния между основаниями жилок (для этих признаков корреляции с расстоянием от КМК  $r_s > +0.80$ ). Другие размерные признаки связаны с расстоянием до источника выбросов не так тесно ( $r_s = +0.61...+0.71$ ). Никакие характеристики ФА не коррелировали с удалением от предприятия. Изменения размерных признаков не

прямо пропорциональны расстоянию до источника загрязнения. В соответствии с видом кривых на рис. 1 стабилизация большинства признаков на уровнях, близких к фоновым, наблюдается на расстояниях 10–15 км от КМК. Содержание четырех приоритетных поллютантов (Zn, Cu, Pb, Cd) в листьях и, особенно, в почве оказалось худшим предиктором для объяснения морфологической изменчивости листа, чем расстояние до КМК. Однако общая закономерность просматривается однозначно. В связи с варьирующими уровнями содержания металлов в почве и листьях признаки размера листовой пластинки, по меньшей мере, некоторые, изменяются статистически значимо, а все показатели флуктуирующей асимметрии остаются неизменными.

Вывод о снижении размеров и преимущественном угнетении роста листа в ширину в условиях влияния выбросов КМК ожидаем и соответствует большинству опубликованных данных. Уменьшение листа в ответ на разные типы загрязнений – часть неспецифического комплекса реакций, обозначаемых как приобретение ксероморфного строения [5, 6]. Уменьшение размера



**Рис. 1.** Ширина (а), длина второй боковой жилки (б), угол между главной и второй боковой жилками (в) и общая флуктуирующая асимметрия (г) листа *Betula pendula* в зависимости от расстояния до КМК. Аппроксимации логарифмической функцией (а–в) и прямой линией (г);  $\bar{X} \pm SE$ ,  $n = 11$ .

листа — негативная реакция, поскольку у берез этот показатель является индикатором продуктивности особи [7]. Отчасти неожиданно, что не установлено техногенной динамики ФА. Это не соответствует представлениям о влиянии тяжелых металлов на онтогенез растений и большому числу эмпирических данных, в соответствии с которыми ФА возрастает под влиянием химического загрязнения [1, 8, 9]. Однако известно немало случаев, когда не зарегистрировано повышения уровня ФА листьев при антропогенном стрессе

[4, 10–12]. В единственной известной предшествующей работе по оценке ФА листа деревьев в районе КМК [4], так же как и в нашем исследовании, не была установлена корреляция ФА листьев *B. pendula* с расстоянием до КМК, но была найдена корреляция с содержанием металлов в листьях. Невыраженность динамики ФА листа при приближении к КМК может объясняться тем, что нами изучен крупный подрост под пологом взрослых деревьев. Фитоценотический стресс, в котором существует подрост, может быть причиной

высокого уровня ФА, поскольку нарушение стабильности развития – неспецифическая реакция на стрессовые факторы разной природы, в том числе на биотический стресс [13–15]. Еще одно возможное объяснение отсутствия техногенной динамики ФА – предположение о произошедших генетических адаптациях березы к повышенному содержанию тяжелых металлов в среде [12].

Итак, впервые показано, что в градиенте влияния выбросов КМК динамика изменения двух групп признаков строения листа подроста *V. pendula* – размеров и флуктуирующей асимметрии – несогласованна. Учитывая высокий уровень загрязнения среды вблизи КМК тяжелыми металлами, неожиданно, что техногенный пресс не сказался на уровне ФА листа. При этом трансформация размерных характеристик листа в условиях загрязнения происходит вполне ожидаемо. В соответствии с этим либо уровень ФА листа вообще не связан со степенью загрязнения и техногенной трансформацией условий, либо влияние ценотического стресса или других факторов превышает стрессирующее воздействие, обусловленное поступлением тяжелых металлов. Следовательно, ФА листа не является универсальным показателем степени трансформации среды при загрязнении тяжелыми металлами, а простые и легко интерпретируемые морфометрические характеристики листа могут быть более чувствительными и однозначными индикаторами загрязнения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozlov M.V., Wilsey B.J., Koricheva J., Haukioja E. // J. Appl. Ecol. 1996. V. 33. № 6. P. 1489–1495.
2. Захаров В.М., Чубинишвили А.Т., Дмитриев С.Г. и др. Здоровье среды: практика оценки. М.: Центр эколог. политики России, 2000. 318 с.
3. Palmer A.R., Strobeck C. // Ann. Rev. Ecol. Syst. 1986. V. 17. P. 391–421.
4. Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. Impacts of Point Polluters on Terrestrial Biota. Dordrecht; Heidelberg; L.; N.Y.: Springer, 2009. 466 p.
5. Кулагин Ю.З. Древесные растения и промышленная среда. М.: Наука, 1974. 156 с.
6. Неверова О.А., Колмогорова Е.Ю. // Изв. вузов. Лесной журн. 2002. № 3. С. 29–33.
7. Мигалина С.В., Иванова Л.А., Махнев А.К. // Экология. 2010. № 4. С. 257–265.
8. Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Захаров В.М. // Экология. 1996. № 6. С. 441–444.
9. Vasil'ev A.G., Vasil'eva I.A., Marin Yu.F. // Rus. J. Ecol. 2008. V. 39. № 7. P. 483–489.
10. Ерофеева Е.А., Наумова М.М. // Вестн. ННГУ. 2010. № 1. С. 140–143.
11. Ерофеева Е.А., Наумова М.М. // Раст. ресурсы. 2012. Т. 48. № 1. С. 59–70.
12. Valkama J., Kozlov M.V. // J. Appl. Ecol. 2001. V. 38. № 3. P. 665–673.
13. Гелашвили Д.Б., Лобанова И.В., Ерофеева Е.А., Наумова М.М. // Поволж. экол. журн. 2007. № 2. С. 106–115.
14. Амосова И.Б., Феклистов П.А. // Изв. вузов. Лесной журн. 2010. № 2. С. 60–66.
15. Баландайкин М.Э. // Вопр. соврем. науки и практики. 2012. № 3. С. 15–22.