

ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.3.591.3

doi: 10.17223/19988591/30/9

С.Г. Баранов¹, И.Е. Зыков², Л.В. Федорова²

¹Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия

²Московский государственный областной гуманитарный институт, г. Москва, Россия

Изучение внутривидовой изменчивости липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) на основе билатеральной асимметрии листовых пластин

Изучены три вида асимметрии различных билатерально симметричных признаков листьев липы мелколистной. Установлено статистически значимое влияние факторов «место сбора», «год сбора» и взаимодействия этих факторов на величину флуктуирующей асимметрии (ФА). Наибольшие различия флуктуирующей асимметрии в зависимости от года сбора материала наблюдались по 4-му и 5-му признакам ($F = 3,4-4,1$). По фактору «место сбора» и при взаимодействии факторов «время» и «место сбора» получены статистически значимо различающиеся величины ФА. Наибольший индекс ФА наблюдался по 4-му признаку в экспериментальной популяции на территории химического завода в 2004 г., что свидетельствует о снижении стабильности ее развития. В этой же популяции выявлена направленная асимметрия по 1-му признаку (t -тест; $p < 0,005$). Антисимметрия, определяемая в виде статистически значимой величины эксцесса, не обнаружена ни в одной из выборок. Отмечены неравномерная изменчивость величины флуктуирующей асимметрии по годам по пяти билатерально симметричным признакам и возможная реакция на стресс под действием химических поллютантов в виде направленной асимметрии.

Ключевые слова: стабильность развития; направленная асимметрия; антисимметрия; флуктуирующая асимметрия.

Введение

В феногенетических исследованиях широко используются три вида билатеральной асимметрии. Большинство авторов склоняется к тому, что направленная асимметрия (НА) и антисимметрия (АНС) – это проявления изменчивости, кодируемые генотипом, поэтому к ним в большей степени применим термин «генотипическая изменчивость». Третий вид билатераль-

ной асимметрии – флуктуирующая асимметрия (ФА). Этот вид асимметрии определяется как незначительные и ненаправленные отклонения морфологических признаков от идеальной симметрии. ФА как вид фенотипической изменчивости изучалась с начала XX в. и подробно рассмотрена в работах Р. Палмера, К. Стробека и других авторов [1, 2]. ФА считается проявлением фенотипа, которое зависит от воздействий со стороны среды, хотя и не исключается канализированное, полностью не объясненное воздействие на нее генотипа [3]. Такой вид асимметрии используется для оценки стабильности развития как способности организма регулировать его на филогенетическом уровне. ФА характеризуется нормальным распределением разностей ($R-L$) вокруг нуля, где R и L – размеры правого и, соответственно, левого гомологичных билатерально симметричных признаков. Считается, что величина ФА показывает относительную неэффективность организменных систем контроля процессов развития [1, 2].

В практике биоиндикации флуктуирующая асимметрия используется для тестирования стрессовых воздействий на организм, хотя в некоторых работах указывается и на аналогичное свойство направленной асимметрии [3–5].

Направленная асимметрия и антисимметрия привлекают интерес генетиков и экологов, так как проявление этих видов асимметрии содержит как генотипический компонент, так и чисто фенотипический элемент вариации, обусловленный действием окружающей среды. Примеси НА и АнС не позволяют точно определить величины ФА. Присутствие этих двух видов асимметрии удается оценить количественно [1, 2].

В литературе по экологическому мониторингу и оценке стабильности развития весьма редко встречаются работы, посвященные направленной асимметрии и антисимметрии, определяемых в абсолютном значении или в терминах статистической вероятности. Между тем эти два вида асимметрии, как и флуктуирующая асимметрия, имеют органную, индивидуальную и групповую (популяционную) изменчивость и, по некоторым данным, могут, как и флуктуирующая асимметрия, отражать уровень стабильности развития [5].

Направленная асимметрия характеризуется асимметричным распределением частот ($R-L$) в гистограммах и обычно сопутствует флуктуирующей асимметрии. Признаки, содержащие НА в таких случаях, исключаются из интегрального общего усредненного значения. Антисимметрия как вид ненаправленной асимметрии также сопутствует флуктуирующей асимметрии. Бимодальное и плосковершинное распределения частот значений ($R-L$) характерны для АнС, а нормальное распределение характерно для флуктуирующей асимметрии. Островершинная форма распределения частот ($R-L$) часто характеризует смесь флуктуирующей асимметрии и антисимметрии, что означает проявление фенотипической и одновременно генотипической изменчивости [1]. Величина НА находится на основе различия величин правого и левого признаков. Присутствие АнС определяется величиной эксцес-

са γ . На практике используются табулированные значения эксцессов при их непараметрическом распределении, получаемые с помощью искусственного размножения выборок ($R-L$) и, в большей степени, на основе данных лабораторного биологического материала. Подробно процедуры определения НА и АнС описаны в зарубежных [1, 2] и отечественных [3, 6] публикациях. Работ по скринингу и изучению воздействия различных факторов на число и величину выбросов числовых значений в выборке немного. Главным образом это работы в области морфogeометрического изучения черепов некоторых млекопитающих и человека [7].

Возрастает число публикаций о внутреннем и внешнем эффектах в ответ на стрессирующие факторы, длительность и характер филогенеза и онтогенеза млекопитающих [8], а также о совместной генотипической и фенотипической ответной реакции в виде совокупного проявления НА, АнС и флуктуирующей асимметрии.

В предыдущих исследованиях сообщалось о снижении стабильности развития липы мелколистной при воздействии поллютантов со стороны химического предприятия [9–12], при воздействии оксидов серы [13], а также об изменении морфологических характеристик листовых пластин [14]. Поскольку флуктуирующая асимметрия проявляется (хотя и не всегда) при стрессовых воздействиях, выбраны экспериментальные территории (локалитеты), находящиеся в разных экологических условиях.

Целью настоящего исследования являлось изучение проявлений трех видов билатеральной асимметрии в трех экспериментальных популяциях липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) и, следовательно, генотипических и фенотипических проявлений в величине билатерально симметричных признаков на популяционном уровне изменчивости.

Материалы и методики исследования

Сбор и гербаризация материала проводились в течение 2004–2007 гг. по методике В.М. Захарова [15]. С каждой из трех экспериментальных территорий ежегодно собиралось по 100 максимально приближенных по размеру листьев липы мелколистной и определялись их метрические признаки (рис. 1).

Первое место сбора располагалось в центре г. Орехово-Зуево Московской области в 30 м к югу от АЗС «British Petroleum» (АЗС ВР) (55°48'13.8"N; 38°58'23.8"E). Второе место сбора выбрано в западной части г. Орехово-Зуево в 70 м к юго-западу от территории химического завода «Карболит», выпускающего пластмассы на основе фенолформальдегидных смол, и в 30 м от автодороги, идущей параллельно территории этого предприятия (55°48'13.1"N; 38°58'23.9"E). Третья точка находилась на территории Крутовского заказника, в пойменном лесу правобережья р. Клязьмы в 8 км юго-восточнее г. Петушки Владимирской области (55°53'44.1"N; 39°25'43.8"E).

Ход определения трех видов асимметрии основан на методологическом подходе, подробно разработанном А. Палмером и К. Стробеком [1, 2]. Под выборкой понимался ряд значений $|R-L|/(R+L)$ по каждому признаку для каждой популяции за каждый год.

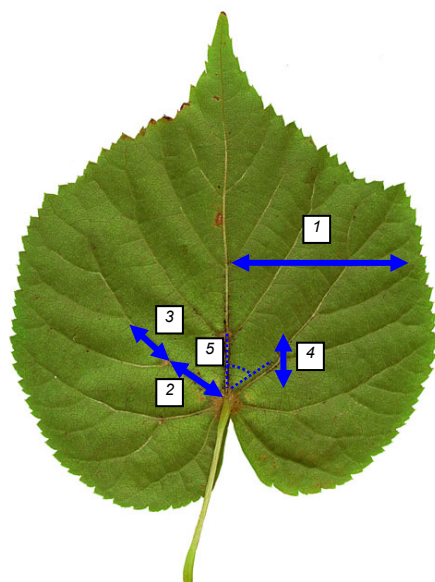


Рис. 1. Признаки для определения флуктуирующей асимметрии листовых пластин липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.): 1 – ширина середины листа; 2 – расстояние между основаниями первой жилки первого порядка и второй жилки второго порядка; 3 – расстояние между основаниями второй и третьей жилок второго порядка; 4 – расстояние между основаниями первой и второй жилок первого порядка; 5 – угол между рахисом и первой билатеральной жилкой

[Fig. 1. Traits to determine the fluctuating asymmetry of *FA Tilia cordata* (Mill.) leaves: 1 - leaf width; 2 - distance between the bases of the first vein of the first order and the second vein of the second order; 3 - distance between the bases of the second and the third veins of the second order; 4 - distance between the bases of the first and the second veins of the first-order; 5 - angle between the rachis and the first bilateral vein]

Проверка отклонений выборок от нормального распределения проводилась с помощью программы SPSS 14 (SAS Inc.) и основана на выбраковке значений, которые при сравнении со средним и при отнесении к стандартному отклонению выборки превышают критические. Проверка на присутствие направленной асимметрии проводилась парным двухвыборочным *t*-тестом для средних значений (MS Excel). НА как проявление популяционной генотипической изменчивости оценивалась для каждой выборки.

Проведен регрессионный анализ на присутствие корреляционной связи между размером признака $(R+L)/2$ и флуктуирующей асимметрией $|R-L|/$

(R+L) для каждой популяции по каждому году. Этот анализ необходим, чтобы установить, не является ли величина ФА признака зависимой от размера признака.

Присутствие антисимметрии проводилось с использованием описательной статистики выборок $|R-L|/(R+L)$ и сравнением значений эксцесса с табличными данными [2]. Общее количество выборок:

$$60 = 5 \text{ признаков} \times 3 \text{ локалитета} \times 4 \text{ года наблюдения.}$$

Определение флуктуирующей асимметрии проводилось по формуле $|R-L|/(R+L)$. ФА рассматривалась как проявление популяционной фенотипической изменчивости и находилась по каждому из пяти признаков за каждый год. Для этого строились матрицы планов с данными по каждой листовой пластинке. В среде SPSS выполнялся двухфакторный анализ влияния на флуктуирующую асимметрию факторов «место сбора» и «год сбора». Анализ на нормальность распределения проводился тестом Колмогорова–Смирнова с поправкой Лиллиефорса для проверки нулевой гипотезы. При уровне статистической значимости $p > 0,05$ делался вывод об отклонении от нормального распределения разности (R–L). Большинство статистических анализов выполнялось с помощью программных средств MS Excel и SPSS 14.

Результаты исследования

Отклонение от нормальности

Наибольшее число значений (R–L), т.е. выбросов, способствующих отклонению выборки от нормального распределения, отмечено в сборах листьев, собранных вблизи АЗС ВР. Эти значения регистрировались в среде SPSS в виде точек, отклоняющих распределение частот (R–L) от формы нормального распределения. Наибольшее количество выбросов за весь период наблюдения (28,5%, $n = 100$) получено в выборках, соответствующих 4-му признаку в районе АЗС ВР (табл. 1).

Т а б л и ц а 1 [Table 1]

Количество выбросов (% от выборки)
[Emissions (% of sampling)]

Признак [Trait]	АЗС ВР [BP gas station]	Завод «Карболит» [Chemical plant CARBOLIT]	ООПТ Крутовский [Krutovsky conservation area]
1	5,50	1,75	0,00
2	2,75	2,75	1,67
3	6,50	5,00	3,33
4	28,50	4,50	8,33
5	3,75	0,50	2,67
Σ	47	14,5	16

Генотипическая изменчивость

Т-тест на проверку равенства величин правого и левого признаков ($n = 100$) показал присутствие направленной асимметрии ($p < 0,005$) только

в одной выборке (1-й признак, 2004 г., завод «Карболит»). В то же время анализ данных с этого места сбора показал наибольшие значения флуктуирующей асимметрии и в 2004 г., но по 4-му признаку. Таким образом, направленная асимметрия как генотипический популяционный признак статистически значимая в том же локалитете и в тот же год, когда зарегистрирована самая высокая флуктуирующая асимметрия.

На популяционном уровне значимых эксцессов, за пределами превышающих табличные значения ($n = 100$; $\alpha = 95\%$), не найдено ни по одному из признаков. Значения эксцессов γ не выходили за пределы диапазона $[-3 \div +3]$, что соответствовало нормальному распределению значений ($R-L$). Анализ Колмогорова–Смирнова с поправкой Лиллиефорса на нормальность распределения показал нормальное распределение ($p > 0,05$). Не обнаружено связи между размером признака $(R+L)/2$ и величиной ΦA , так как коэффициент корреляции Пирсона не показал высоких значений ($r = 0,1-0,5$).

Фенотипическая изменчивость

При изучении фактора «год сбора» анализ флуктуирующей асимметрии дал значимые различия для 4-го и 5-го признаков ($p < 0,005$). Анализ фактора «место сбора» и взаимодействия обоих факторов показал высокую фенотипическую изменчивость ΦA по каждому признаку (табл. 2).

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

Изменчивость величины флуктуирующей асимметрии пяти признаков в зависимости от года (2004–2007), места сбора и взаимодействия факторов
[Variability of fluctuating asymmetry value of five traits depending on the observation year (2004–2007), the site and the factor interaction]

Источник вариации [Source of variation]	trait	SS	df	MS	F	p
Год исследования [Year]	1*	0,001	3	0,000	0,483	0,694
	2	0,005	3	0,002	0,693	0,557
	3	0,004	3	0,001	0,520	0,669
	4	0,012	3	0,004	3,425	0,017
	5	0,009	3	0,003	4,070	0,007
Место сбора [Site]	1*	0,012	2	0,006	10,468	0,000
	2	0,048	2	0,024	10,414	0,000
	3	0,028	2	0,014	5,287	0,005
	4	0,083	2	0,041	38,967	0,000
	5	0,005	2	0,002	3,424	0,033
Год × место сбора [year × site]	1*	0,018	10	0,002	3,161	0,001
	2	0,062	10	0,006	2,653	0,003
	3	0,062	10	0,006	2,653	0,003
	4	0,119	10	0,012	11,514	0,000
	5	0,016	10	0,002	2,258	0,013

Примечание. SS – сумма квадратов; df – степень свободы; MS – средний квадрат; F – показатель Фишера; p – уровень значимости; * – направленная асимметрия, 2004 г.

[Note. SS - sum of squares; df-degree of freedom; MS - mean square; F - Fisher index; p - level of significance; * - directional asymmetry, 2004].

Наибольшее статистически значимое различие по флуктуирующей асимметрии по фактору «место сбора» показал 4-й признак ($F = 38,97$; $p < 0,000$). Наивысшую статистическую значимость по этому признаку дал и двухфакторный анализ ($F = 11,51$; $p < 0,000$).

Максимальное значение флуктуирующей асимметрии по 4-му признаку получено в процессе изучения листовых пластин липы мелколистной, произрастающей в районе завода «Карболит», в 2006 г. ($0,058 \pm 0,002$). Для сравнения: этот показатель у АЗС ВР равен $0,030 \pm 0,002$, а на территории заказчика – $0,042 \pm 0,002$ (рис. 2).

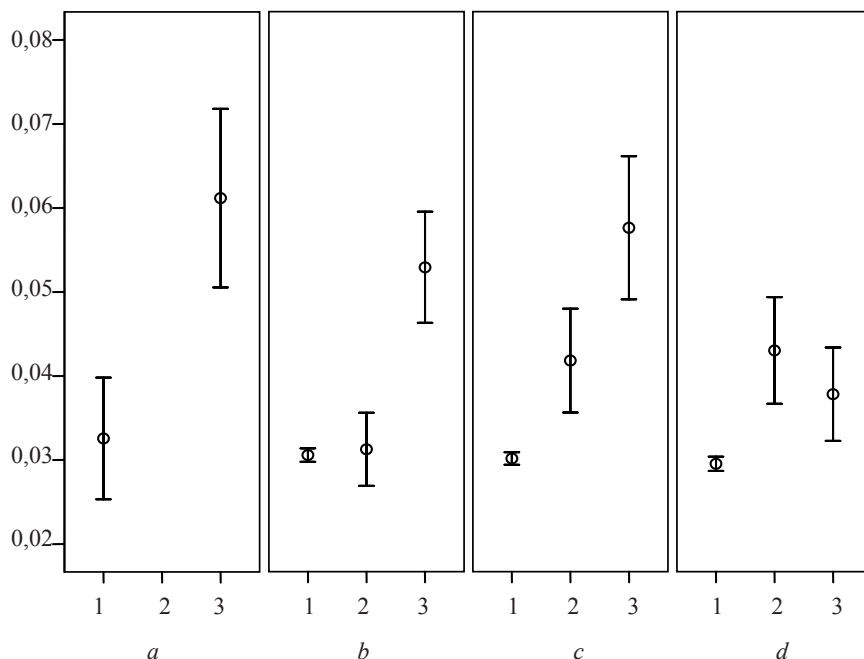


Рис. 2. Динамика флуктуирующей асимметрии за 2004–2007 гг. по 4-му признаку: 1 – АЗС ВР; 2 – заказник; 3 – завод «Карболит» (а – 2004 г., б – 2005 г.; в – 2006 г., г – 2007 г.). По оси ординат – величина флуктуирующей асимметрии, данные представлены в виде средней с доверительным интервалом 95% ($p < 0,01$) [Fig. 2. Fluctuating asymmetry dynamics in 2004–2007, the fourth trait: 1 – BP gas station, 2 – conservation area, 3 – chemical plant Carbolit, a – 2004, b – 2005, c – 2006, d – 2007]. Y-axis - FA value. Data are presented as a mean with 95% confidence interval ($p < 0.01$)]

Обсуждение результатов исследования

Определение отклонений выборок от нормального распределения зачастую является важным моментом предварительной инспекции величин гомологичных билатеральных признаков. Точки выбросов как значения, выходящие за пределы доверительного интервала, содержат информацию о

степени отклонения от нормального распределения величин, а значит, и о вероятном присутствии антисимметрии.

Количество значений выбросов в процентном отношении к общему числу по 4-му признаку оказалось наибольшим в районе АЗС ВР. Считаем, что это обстоятельство не случайно. Присутствие большого числа значений выбросов частотного распределения ($R-L$) по 4-му признаку в экспериментальной популяции в районе АЗС ВР является косвенным подтверждением их роли в биоиндикационной характеристике химического загрязнения окружающей среды вблизи АЗС и вдоль автомагистрали. Большое число значений выбросов по 4-му признаку характеризует его как более чувствительный к изменению факторов среды. Это подтверждается результатами двухфакторного анализа (место $\times$ год сбора). Анализ взаимодействия этих факторов показал высокую изменчивость ФА как проявления фенотипической изменчивости. Вблизи химического завода наблюдалось стойкое повышенное значение ФА по 4-му признаку при четырехлетнем наблюдении. Рост производства продукции завода «Карболит» в 2004–2006 гг. мог вызвать ответную реакцию в экспериментальной популяции липы мелколистной в виде снижения стабильности развития, приводящей к увеличению величины ФА. Структурно этот признак связан с главной жилкой (рахис), объединяющей проводящую систему листа с тканями листовой пластинки. Хронологически он развивается раньше остальных и заслуживает особого внимания для целей биоиндикации по показателю ФА.

Антисимметрия как высоко отрицательное значение эксцесса не обнаружена. Это довольно редко встречающийся вид асимметрии у листовых пластин древесных растений [3]. Из трех экспериментальных популяций в течение 4 лет генотипическая изменчивость проявилась в виде направленной асимметрии (по 1-му признаку) в год, когда получено самое высокое значение флуктуирующей асимметрии по 4-му признаку. Это позволяет сделать вывод о некой трансформации формы листовой пластины, являющейся проявлением популяционной изменчивости одновременно генотипического (НА) и фенотипического происхождения (ФА).

Флуктуирующая асимметрия как фенотипический признак различалась и территориально, и в зависимости от времени сбора. Наиболее статистически значимым признаком при оценке стабильности развития 4-й признак – расстояние между основаниями 1-й и 2-й жилок первого порядка. Этот признак с высокой статистической значимостью различался по годам сбора листьев в разных популяциях. Следовательно, в условиях Подмоскovie этот признак тоже целесообразно использовать для тестирования стабильности развития липы мелколистной.

Химический завод «Карболит» в начале 2000-х гг. увеличил мощность по производству пластмасс (максимальный объем производства зафиксирован в 2007 г.), поэтому повышение ФА в 2004 г. может служить косвенным подтверждением ранних нарушений стабильности развития эксперимен-

тальной популяции липы мелколистной. Снижение стабильности развития можно объяснить в этом случае большим количеством токсичных соединений в окружающей среде, образующихся во время производства, прежде всего диоксида углерода (CO_2) и триоксида серы (SO_3). Результаты работы не означают преимущественного использования отдельно взятых признаков, а напротив, предполагают интегральный анализ, основанный на морфогеометрическом подходе учета размера, формы и величины билатеральных параметров.

Заключение

Первым по статистической значимости фактором, влияющим на ФА, – фактор «место сбора». Второе по значимости – совместное влияние двух факторов: места и времени сбора листовых пластин. В районе влияния химического комбината получены статистически значимые значения двух видов асимметрии: направленной и флуктуирующей. Полученные данные свидетельствуют о генотипической и фенотипической природе билатеральной асимметрии в листовых пластинах в ответ на близость промышленного источника загрязнения.

Литература

1. Palmer A.R., Strobeck C.H. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns // *An. Rev. Ecol. Syst.* 1986. № 17. P. 391–421.
2. Palmer A.R., Strobeck C.H. Fluctuating Asymmetry Analyses Revisited // *Developmental Instab.: Causes and Consequences*, 2003. P. 279–319.
3. 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 // *Russian Journal of Ecology*. 2008. Vol. 39, № 7. P. 483–489.
4. Захаров В.М., Жданова Н.П., Кирик Е.Ф., Шкиль Ф.Н. Онтогенез и популяция: оценка стабильности развития в природных популяциях // *Онтогенез*. 2001. Т. 32, № 6. С. 164–168.
5. Graham J., Emlen J.M., Freeman D.C., Leamy L.J., Kieser J.A. Directional asymmetry and the measurement of development instability // *Biol. Jour. of the Linn. Soc.* 1998. № 64. P. 1–16.
6. Зорина А.А. Методы статистического анализа флуктуирующей асимметрии // *Принципы экологии*. 2012. Т. 3, № 3. С. 24–47.
7. Bechshoft T., Rigget W., Wiig Ø. et al. Fluctuating asymmetry in metric traits; a practical example of calculating asymmetry, measurement error, and repeatability // *Annales Zoologici Fennici*. Finnish Zoological and Botanical Publishing. 2008. Vol. 45, № 1.
8. Willmore K.E., Klingenberg C.P., Hallgrímsson B. The relationship between fluctuating asymmetry and environmental variance in rhesus macaque skulls // *Evolution*. 2005. 59.4. P. 898–909.
9. Баранов С.Г., Фёдорова Л.В. Динамика флуктуирующей асимметрии липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в интактной зоне и в зоне техногенного загрязнения // *Современные проблемы экологии и экологического образования : матер. междунар. науч.-практ. конф.* (5–6 марта 2009). Орехово-Зуево, 2009. С. 43–46.

10. Зыков И.Е., Никифоров Н.Д., Фёдорова Л.В. К оценке стабильности развития липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях восточного Подмосковья // Актуальные проблемы биоэкологии : сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф., 21–24 октября 2008 г. М. : Диона, 2008. С. 72–74.
11. Шержукова Ю.А., Кривцова А.Н., Мелузова М.И., Мишаленкова Ю.Н. Оценка стабильности развития липы мелколистной на заповедной и урбанизированной территориях // Онтогенез. 2002. Т. 33, № 1. С. 16–18.
12. Баранов С.Г. Использование морфометрического метода для определения флуктуирующей асимметрии липы мелколистной // Биозащита и биобезопасность. 2014. Т. 6, № 1 (18). С. 10–17.
13. Veličković M., Захаров В.М., Жданова Н.П., Кирик Е.Ф., Шкиль Ф.Н. Онтогенез и популяция: оценка стабильности развития в природных популяциях // Онтогенез. 2001. Т. 32, № 6. С. 164–168.
14. Kosiba P. Variability of morphometric leaf traits in small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill) under the influence of air pollution // Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 2008. Vol. 77, № 2. P. 125–137.
15. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур) // Распоряжение Росэкологии от 16.10.2003 № 460. М. : Наука, 2003. 24 с.

Поступила в редакцию 25.01.2015; повторно 06.04.2015 г.; принята 23.04.2015 г.

Авторский коллектив:

Баранов Сергей Геннадьевич – канд. биол. наук, доцент кафедры биологического образования Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (г. Владимир, Россия).

E-mail: bar.serg58@mail.com

Зыков Игорь Евгеньевич – канд. биол. наук, доцент кафедры биологии, экологии и биотехнологии Московского областного государственного гуманитарного университета (г. Орехово-Зуево, Россия).

E-mail: zykov-oz@yandex.ru

Фёдорова Любовь Валерьевна – ст. преподаватель кафедры биологии, экологии и биотехнологии Московского областного государственного гуманитарного университета (г. Орехово-Зуево, Россия).

E-mail: fedorova-oz@yandex.ru

Baranov SG, Zykov IE, Fedorova LV. Studying *Tilia cordata* Mill. intraspecific variation on the basis of leaf bilateral asymmetry. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2015;2(30):134-145. doi: 10.17223/19988591/30/9 In Russian, English summary

Sergey G. Baranov¹, Igor E. Zykov², Liubov V. Fedorova²

¹A and N Stoletov Vladimir State University, Vladimir, Russian Federation

²Moscow State Regional Institute of Humanities, Moscow, Russian Federation

Studying *Tilia cordata* Mill. intraspecific variation on the basis of leaf bilateral asymmetry

The aim of this study was to examine the manifestations of three types of bilateral asymmetry in three experimental *Tilia cordata* Mill. populations and, therefore, genotypic and phenotypic manifestations in the value of bilaterally symmetric traits at the population significance level.

We studied three types of bilateral asymmetry in traits of *T. cordata* Mill. leaves for four years (2004–2007). Annually, we gathered 100 *T. cordata* Mill. leaves as close

as possible in size from each of three experimental areas and measured their metric characteristic. Two populations were under industrial stress (proximity of a gas station and a highway or a chemical factory). The third population was in the mixed forest (Krutovsky conservation area). We determined three asymmetry types using A Palmer and K Strobeck's methodological approach.

Directional asymmetry as a genotypic population trait and fluctuating asymmetry as a phenotypic population trait were statistically significant and showed high value in one population near the chemical factory in 2004. Emission values served as an indirect evidence of the genotypic variety. We noted the highest amount of emissions in industrial stress area near the chemical factory, gasoline station and highway, whereas phenotypic variety in fluctuating asymmetry manifested itself only in population near the chemical factory. Genotypic traits clearly revealed on sites and showed a correlation between genotype and phenotype that was proved by the presence of statistically significant FA and DA. Conservation zone served as a control was not marked by an amount of emissions in patterns of distribution ($R - L$). Thus, directional asymmetry and fluctuating asymmetry can serve as bioindicative markers of anthropogenic stress in population of *T. cordata* Mill. For four years of study genotypic variety revealed itself in DA (first trait) in the same population and in the same year when the FA highest value was obtained on the fourth trait (chemical factory population). It makes us conclude that some transformation of leaf shape exists, which means genotypic and phenotypic effect under chemical factory pollution stress.

The article contains 2 Figures, 2 Tables, 15 References.

Key words: developmental stability; directional asymmetry; antisymmetry; fluctuating asymmetry.

References

1. Palmer AR, Strobeck CH. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns. *An. Rev. Ecol. Syst.* 1986;17:391-421.
2. Palmer AR, Strobeck CH. Fluctuating Asymmetry Analyses Revisited. In: *Developmental Instab.: Causes and Consequences*. Polak M, editor. Oxford University Press; 2003. pp. 279-319.
3. Vasil'ev AG, Vasil'eva IA, Marin YuF. Phenogenetic monitoring of the weeping birch (*Betula pendula* Roth.) in the Middle Urals: Testing a new method for assessing developmental instability in higher plants. *Russian Journal of Ecology*. 2008;39(7):483-489.
4. Zakharov VM, Zhdanova NP, Kirik EF, Shkil' FN. Ontogenez i populyatsiya: otsenka stabil'nosti razvitiya v prirodnkh populyatsiyakh [Ontogenesis and population: evaluation of developmental stability in natural populations]. *Ontogenez*. 2001;32(6):336-351. In Russian
5. Graham JH, Emlenm JM, Freeman DC, Leamy LJ, Kieser JA. Directional asymmetry and the measurement of development instability. *Biol. Jour. of the Linn. Soc.* 1998;64:1-16.
6. Zorina A.A. Metody statisticheskogo analiza fluktuiruyushchey asimmetrii [Methods of statistical analysis of fluctuating asymmetry]. *Printsipy ekologii*. 2012;1(3):24-47. doi: 10.15393/j1.art.2012.1461 In Russian
7. Bechshøft T, Rigget W, Wiig Ø, Sonne K. Fluctuating asymmetry in metric traits; a practical example of calculating asymmetry, measurement error, and repeatability. *Annales Zoologici Fennici*. 2008;45:32-38.
8. Willmore KE, Klingenberg P, Hallgrímsson B. The relationship between fluctuating asymmetry and environmental variance in rhesus macaque skulls. *Evolution*. 2005;59(4):898-909.

9. Baranov SG, Fedorova LV. Dinamika fluktuiruyushchey asimmetrii lipy melkolistnoy (*Tilia cordata* Mill.) v intaktnoy zone i v zone tekhnogenного zagryazneniya [Dynamics of fluctuating asymmetry of *Tilia cordata* Mill. in the intact zone and in the zone of technogenic impact.] In: *Sovremennye problemy ekologii i ekologicheskogo obrazovaniya. Mater. mezhdunar. nauchno-praktich. konf.* [Contemporary problems of ecology and ecological education. Proc. of the Sci. Conf. 5-6 March. Orekhovo-Zuevo]. 2009. pp. 43-46. In Russian
10. Zykov IE, Nikiforov ND, Fedorova LV. K otsenke stabil'nosti razvitiya lipy melkolistnoy (*Tilia cordata* Mill.) v usloviyakh vostochnogo Podmoskov'ya [On estimating developmental stability of *Tilia cordata* Mill. in Eastern Moscow region]. In: *Aktual'nye problemy bioekologii. Sb. mater. Mezhdunar. nauchno-praktich. konf.* [Contemporary problems of bioecology. Proc. of the Sci. Conf. 21-24 October, 2008]. Moscow: Moscow Publ.; 2008. pp. 72-74. In Russian
11. Sherzhikova YuA, Krivtsova AN, Melyzova MI, Mishalenkova IN. Estimation of the developmental stability of small-leaved lime on natural reserves and in urbanized territories. *Ontogenez*. 2002;33(1):16-18. In Russian, English summary.
12. Baranov SG. The use of morphometric method for definition of fluctuating asymmetry of *Tilia parvifolia*. *Biozashchita i biobezopasnost'*. 2014;6(1(18)):10-17. In Russian, English summary
13. Veličković M, Zakharov VM, Zhdanova NP, Kirik EF, Shkil' FN. Reduced developmental stability in *Tilia cordata* leaves: effects of disturbed environment. *Periodicum biologorum*. 2010;112(3):273-281.
14. Kosiba P. Variability of morphometric leaf traits in small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) under the influence of air pollution. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2008;77(2):125-137.
15. Metodicheskie rekomendatsii po vypolneniyu otsenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivyykh sushchestv (otsenka stabil'nosti razvitiya zhivyykh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur) [Guidelines for estimating environment quality according to the state of living beings (estimation of development stability of living organisms by the level of asymmetry of morphological structures)]. *Rasporyazhenie Rosekologiya* ot 16.10.2003 № 460 [Order of Rosekologiya as of 16.10.2003]. Moscow: Nauka Publ.; 2003. 24 p. In Russian

Received 25 January 2015;

Revised 6 April 2015;

Accepted 23 April 2015

Authors info:

Baranov Sergey G, Dr. Sci. (Biol.), Assistant Professor, department Biological Education, Vladimir State University, 87, M. Gorkogo Str., Vladimir, 600000, Russian Federation.

E-mail: bar.serg58@mail.com

Zykov Igor E, Dr. Sci. (Biol.), Assistant Professor, Department of Biology, Ecology and Biotechnology, Moscow Region State Institute of Humanities (MGOGI) 22, Zelenaya Street, Orekhovo-Zuevo, 142611, Russian Federation.

E-mail: zykov-oz@yandex.ru

Fedorova Liubov V, Senior Lecturer, Department of Biology, Ecology and Biotechnology, Moscow Region State Institute of Humanities (MGOGI) 22, Zelenaya Str., Orekhovo-Zuevo, 142611, Russian Federation.

E-mail: fedorova-oz@yandex.ru