
БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 582.632.1:574.24

В.И. Полонский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ СУПРОТИВНЫХ ЛИСТЬЕВ *SYRINGA JOSIKAEA* JACQ. В БИОИНДИКАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ г. КРАСНОЯРСКА

С целью усовершенствования метода биоиндикации загрязнения окружающей среды проведено сравнительное исследование величины индекса флуктуирующей асимметрии (ФА) отдельных листьев (ИФАП) и пар супротивных листьев (ИФАС) сирени венгерской *Syringa josikaea* Jacq. Растения росли в различных по степени загрязнения районах г. Красноярска. Контрольный участок – микрорайон Академгородок – был представлен территорией с отсутствием промышленных объектов, чрезвычайно низкой интенсивностью движения автотранспорта и расположенной на окраине города вблизи лесного массива. В качестве опыта служили территории, находящиеся в центральной части Красноярска, загрязненные в основном выхлопными газами автотранспорта: Железнодорожный район (Красная площадь), Ленинский район (КрасТЭЦ), Октябрьский район (проспект Свободный). Морфологическим признаком асимметрии листовых пластинок служила ширина целых листьев или их половин. В контроле ИФАС и ИФАП составили соответственно 0,030 и 0,024, а в опытах 0,044 и 0,032. Усиление различий под воздействием загрязнения окружающей среды между ИФАС и ИФАП произошло из-за большего увеличения доли асимметричных пар целых супротивных листьев по сравнению с половинами отдельных листьев. Величина ИФАС в опытах по отношению к контролю для 1, 2 и 3-й пар листьев на однолетнем побеге составила соответственно 194,7; 149,3 и 134%. Сделано заключение о том, что для оценки качества городской среды целесообразно проводить вычисления индекса ФА, основываясь на измерении морфологического признака целых супротивных листьев, а не половин отдельных листьев. При этом измерения следует выполнять на 1-й паре супротивных листьев побега текущего года. Указанный подход к биоиндикации качества окружающей среды обладает более высокой чувствительностью и меньшей относительной погрешностью.

Ключевые слова: сирень *Syringa josikaea* Jacq., супротивные листья, ширина, флуктуирующая асимметрия, загрязнение среды, город.

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды, особенно в промышленных городах, год от года не теряет своей актуальности. Город Красноярск с населением 1 млн человек является одним из крупнейших промышленных центров Сибири. В течение последних пяти лет уровень загрязнения атмосферы краевого центра стабильно характеризуется как «очень высокий» [1]. Основными загрязнителями городской атмосферы и почвы выступают топливно-энергетические предприятия и автотранспорт.

Одним из современных методов интегральной характеристики качества окружающей среды может служить оценка состояния растительных организмов по показателям стабильности их развития [2–5]. Последнее характеризуется уровнем флуктуирующей асимметрии (ФА) билатеральных морфологических структур, к которым относятся семядоли, половинки простых листьев, противоположные листочки сложных листьев, иглы хвойных в мутовке, лепестки цветков, створки стручков [6–8]. Среди указанных растительных структур наиболее

чувствительными к воздействию стрессоров являются листья [8], которые и получили сегодня широкое применение для мониторинга качества окружающей среды. Как известно, под влиянием неблагоприятных экологических факторов симметрия листовых пластинок нарушается [9], и этот факт регистрируется на основе сравнения линейных размеров, величин углов или площадей правой и левой половин листа [2; 10], а также оптических характеристик верхней и нижней сторон листа [11].

В последнее время в условиях непрерывного появления новых химических загрязнителей окружающей среды задача повышения чувствительности метода ее мониторинга, в том числе на основе индекса ФА листьев, становится все более актуальной. Сегодня при определении ФА листьев за основу главным образом берутся морфологические признаки каждой из двух половин листа [2]. В литературе описаны результаты сравнения длины дихотомически ветвящихся веточек разных порядков бурой водоросли *Fucus furcatus latifrons* в условиях загрязнения среды [12]. Авторы нашли, что разность между левой и правой веточками (т.е. уровень ФА этих органов) у различных порядков четко возрастала по направлению от наименьшей пары веточек (верхушка растения) к наибольшей паре (основание растения). Из полученных авторами результатов логично заключить, что негативное влияние неблагоприятных факторов на стабильность развития минимально пространственно разделенных билатеральных структур (пары веточек верхушки) было наименьшим, а реакция на стрессор самой большой пары веточек, пространственно наиболее отдаленных друг от друга в организме, была максимальной.

Можно предположить, что в условиях действия неблагоприятных факторов будет зарегистрирована относительно более высокая величина индекса ФА в случае измерения соответствующих показателей не у разных половин одного листа, а у пространственно более отдаленных билатеральных структур, например целых супротивных листьев, имеющих зеркальное друг относительно друга расположение на побеге растения. При этом чувствительность метода биоиндикации степени загрязнения среды на основе определения индекса ФА супротивных листьев, вероятно, будет выше. Сравнительных результатов определения индекса ФА на основе измерения половин листьев и пар целых супротивных листьев в публикациях встретить не удалось.

Целью исследований является определение индекса ФА супротивных листьев растений и выявление возможности использования этого показателя для индикации степени суммарного загрязнения районов г. Красноярск.

Объекты и методы

В качестве объекта исследования был выбран вид, имеющий простые супротивные листья, сирень венгерская, *Syringa josikaea* Jacq. Это растение широко распространено в городских и поселковых зеленых насаждениях нашей страны. Сирень венгерская произрастала в двух контрастных по степени загрязненности условиях г. Красноярск: контроль и опыт. Контрольный участок был представлен относительно чистой территорией с отсутствием промышленных объектов, чрезвычайно низкой интенсивностью движения автотранспорта и расположенной на юго-западной окраине города вблизи лесного массива (микрорайон Академгородок) [13]. В качестве опыта служили территории, находящиеся в центральной части Красноярска, загрязненные в основном выхлопными газами автотранспорта [13–14]: Железнодорожный район (участок Красная площадь), Ленинский район (участок КрасТЭЦ), Октябрьский район (участок проспект Свободный).

Следуя известной методике [2], при изучении реакции растений сирени венгерской в каждом исследуемом участке города отбирали не менее 200 шт. (100 пар) листьев (табл. 1). Листья разных пар (ярусов) на однолетнем побеге сирени собирали и анализировали отдельно. Под первой в работе подразумевается самая верхняя на побеге пара листьев. Эту операцию выполняли в нижней части кроны с 5–10 растений для каждой выбранной городской территории.

Для выполнения измерений параметров, необходимых для вычисления индекса ФА листьев, из пяти стандартных метрических билатеральных признаков [2] использовали лишь

один – ширину. Как показано в литературе, данный показатель часто применяется для определения ФА листьев [3; 15], их ширина является одним из наиболее чувствительных к воздействию стрессоров морфометрических параметров [16], абсолютная величина индекса ФА листа, определенная на основе измерения ширины его половин, мало отличается от значения комплексного индекса ФА, найденного по измерениям пяти билатеральных признаков [17]. Кроме того, только указанный признак из пяти стандартных может быть использован для измерения и расчета индекса ФА целых супротивных листовых пластинок. Поэтому в работе выполняли промеры ширины левой и правой половин каждого из составляющих одну пару супротивно расположенных листьев, а также измеряли ширину целых супротивных листьев каждой пары на побеге текущего года. Согласно стандартной методике [2], на листовой пластинке ровно посередине делали сгиб и в этом месте измеряли ширину целого листа и двух его половин. Измерения выполняли линейкой с точностью 0,5 мм. Исследования были выполнены на полностью сформированных листьях в конце августа – сентябре 2013 г.

Индекс ФА отдельного листа, который характеризовал асимметричность собственно листовой пластинки (ИФАП), выражали как отношение разности значений ширины левой и правой половин листа к их сумме [2; 18]. При определении индекса ФА пары супротивных листьев с учетом вклада асимметрии половин каждого листа (ИФАС) использовали частное от деления разности между шириной одного целого листа и шириной другого листа из пары супротивных листьев на их сумму.

Статистическую обработку полученных данных проводили общепринятыми методами с помощью стандартной компьютерной программы Microsoft Excel. Достоверность результатов оценивали, используя t-критерий Стьюдента при $p \leq 0,05$.

Результаты исследований

В табл. 1 приведены результаты вычисления значений индекса ФА у сирени венгерской, определенных с помощью измерения целых листьев, а также их половин в зависимости от места произрастания растений. Можно видеть, что величины ИФАП и ИФАС листьев, вычисленные для растений, произрастающих в Академгородке (контроль), существенно отличались в меньшую сторону от таковых значений для растений, взятых из загрязненных городских территорий (опыт). Последнее в сочетании с данными о ширине листьев свидетельствует об ухудшении условий для роста растений в опытных вариантах. Величины ИФАС листьев для всех вариантов существенно (на 25–47%) превышали значения ИФАП независимо от условий произрастания растений в г. Красноярске. Указанный факт явился следствием в том числе меньшей частоты проявления флуктуирующей асимметрии листьев при определении ИФАП (табл. 1). Наибольшие абсолютные величины индекса ФА и максимальные различия в отношении ИФАС/ИФАП отмечались для опытного варианта (район проспекта Свободный). Различия между опытом и контролем по показателю ИФАС были заметно выше, чем по ИФАП, что может говорить в пользу большей чувствительности подхода к биомониторингу среды при использовании целых листьев, вместо их половин. Подчеркнем, что поскольку для вычисления индекса ФА использовался показатель ширины целых листьев, а не их половин, то при одинаковой абсолютной ошибке измерения ширины с помощью линейки относительная ошибка измерения в первом случае была вдвое ниже.

Полученные результаты вычисления индекса ФА листьев разных ярусов представлены в табл. 2. Видно, что существенные различия между контролем и большинством загрязненных участков по значениям индекса ФА листьев, определенным с помощью измерения ширины целых листьев, были зарегистрированы для 1-го и 2-го ярусов на однолетнем побеге. При этом наибольшие отличия контроля от опыта найдены для 1-й пары листьев (верхнего яруса). Следовательно, при выполнении оценки относительного уровня загрязненности городской среды в сравнении с фоном по показателю индекса ФА целых листовых пластинок сирени целесообразно использовать для измерения ширины листа верхнего яруса. Существенной разницы в величине индекса ФА между парами листьев в пределах каждого варианта показано не было.

Таблица 1

Величины индекса ФА листа (ИФАП), индекса ФА пары целых супротивных листьев (ИФАС) и их отношений растений сирени венгерской, произрастающих в различных по уровню загрязнения районах г. Красноярска

Показатель		Место произрастания				Среднее в опыте
		Академгородок (контроль)	Красная площадь (опыт)	КрасТЭЦ (опыт)	Проспект Свободный (опыт)	
Объем выборки листьев, шт.		324	256	206	282	248
Ширина листа, мм		73,2 ± 1,2 а	51,6 ± 0,8б	59,2 ± 1,1в	59,8 ± 1,2 в	56,9
Ширина листа, опыт/контроль, %		100	70,5	80,9	81,7	77,7
ИФАП		0,024 ± 0,001 а*	0,030 ± 0,001 б*	0,031 ± 0,002 б*	0,035 ± 0,003 б*	0,032
ИФАС		0,030 ± 0,002 а*	0,044 ± 0,004 б*	0,040 ± 0,003 б*	0,047 ± 0,004 б*	0,044
ИФАС/ИФАП, %		125,0	146,7	129,0	134,3	136,7
Частота проявления ФА листьев, %	ИФАП	82	95	90	83	89,3
	ИФАС	92	99	97	95	97,0
Опыт/контроль, %	ИФАП	100	125	129	146	133,3
	ИФАС	100	147	133	157	145,7

В табл. 1 представлена средняя арифметическая величина и ошибка средней; значения в колонках с разными буквами различаются существенно между собой в пределах каждой строки по t-критерию при $p \leq 0,05$; значения со звездочками в строках различаются существенно между собой в пределах каждой колонки при $p \leq 0,05$.

Таблица 2

Величины индекса ФА пары целых супротивных листьев (ИФАС) в зависимости от расположения пар листьев на однолетнем побеге сирени венгерской, произрастающей в различных по уровню загрязнения районах г. Красноярска

Показатель		Место произрастания				Среднее в опыте
		Академгородок (контроль)	Красная площадь (опыт)	КрасТЭЦ (опыт)	Проспект Свободный (опыт)	
ИФАС	1 пара	0,024 ± 0,002 а	0,045 ± 0,005 б	0,043 ± 0,004 б	0,052 ± 0,009 б	0,047
	2 пара	0,025 ± 0,003 а	0,035 ± 0,003 б	0,033 ± 0,004 а	0,044 ± 0,006 б	0,037
	3 пара	0,036 ± 0,007 а	0,052 ± 0,010 а	0,045 ± 0,006 а	0,048 ± 0,005 а	0,048
ИФАС, опыт/контроль, %	1 пара	100	188	179	217	194,7
	2 пара	100	140	132	176	149,3
	3 пара	100	144	125	133	134,0

В табл. 2 представлена средняя арифметическая величина и ошибка средней; значения в колонках с разными буквами различаются существенно между собой в пределах каждой строки при $p \leq 0,05$.

При использовании целых листьев для расчета индекса ФА практически невозможно применять 4 из 5 стандартных морфометрических признаков, измеряемых, как известно [2], раздельно на левой и правой половинах и характеризующих их асимметрию, а не различия в асимметрии целых листьев. Поэтому при использовании целых листьев возможно использовать лишь один из пяти, а именно ширину всей листовой пластинки в средней ее части, как и рекомендуется в литературе [2]. Опыт использования подобных целым супротивным листьям структур у хвойных растений *Pinus sylvestris* L. для оценки стабильности их развития описан в литературе [7; 19]. Авторы на основе измерений длины и массы каждой из двух хвоинок, расположенных в одной мутовке, продемонстрировали наличие ФА, усиливающейся в неблагоприятных условиях внешней среды, что совпадает с полученными нами результатами.

Заключение

Величина индекса ФА, вычисленная для пары целых простых супротивных листьев (ИФАС) сирени венгерской по сравнению с величиной индекса ФА, определенной на основе измерений двух разных половин одного и того же листа (ИФАП), имела более высокое значение. При этом указанные различия усиливались под воздействием неблагоприятных внеш-

них факторов по сравнению с фоновыми условиями. Полученные в работе результаты позволяют говорить о том, что пространственно друг от друга более отдаленные билатеральные морфологические структуры листьев способны заметнее проявлять ФА. Причина этого, по-видимому, может заключаться в более высокой вероятности ошибки в реализации наследственной информации у формирующихся пар супротивных листьев по сравнению с половиной одного листа. Это предположение подтверждается меньшей частотой проявления ИФАП, чем ИФАС. Прикладное значение выполненного исследования состоит в том, что подход к определению индекса флуктуирующей асимметрии на основе измерения ширины целых супротивно расположенных листьев (ИФАС) вместо их половин (ИФАП) повышает чувствительность метода сравнительной оценки степени загрязнения городской среды, проводимой на основе фитоиндикации с использованием сирени венгерской, а также снижает относительную ошибку измерения.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2013 год». – Красноярск : Мин-во природных ресурсов и экологии Красноярского края, 2014. – 242 с.
2. *Здоровье* среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития : методологич. руководство для заповедников / В.М. Захаров [и др.]. – М. : Центр экологической политики России, 2000. – 66 с.
3. Kozlov, M.V. Fluctuating asymmetry of birch leaves increases under pollution impact / M.V. Kozlov, B.J. Wilsey, J. Koricheva, E. Haukioja // *Journal of Applied Ecology*. – 1996. – V. 33. – № 6. – P. 1489–1495.
4. *Fluctuating Asymmetry : Methods, Theory, and Applications* / J.H. Graham, S. Raz, H. Hel-Or, E. Nevo // *Symmetry*. – 2010. – V. 2. – P. 466–540.
5. Wuytack, T. The effect of air pollution and other environmental stressors on leaf fluctuating asymmetry and specific leaf area of *Salix alba* L. / T. Wuytack, K. Wuyts, S. Van Dongen // *Environmental Pollution*. – 2011. – V. 159. – № 10. – P. 2405–2411.
6. Ерофеева, Е.А. Стабильность развития листа *Pisum sativum* L. при действии формальдегида в широком диапазоне доз / Е.А. Ерофеева // *Онтогенез*. – 2012. – Т. 43. – № 5. – С. 320–326.
7. Kozlov, M.V. Needle fluctuating asymmetry is a sensitive indicator of pollution impact on Scots pine (*Pinus sylvestris*) / M.V. Kozlov, P. Niemelä, J. Junntila // *Ecological Indicators*. – 2002. – V. 1. – № 4. – P. 271–277.
8. Roy, B.A. Asymmetry of wild mustard, *Sinapis arvensis* (Brassicaceae), in response to severe physiological stresses / B.A. Roy, M.L. Stanton // *Journal of Evolutionary Biology*. – 1999. – V. 12. – P. 440–449.
9. *Growth models and the expected distribution of fluctuating asymmetry* / J.H. Graham [et al.] // *Biological Journal of the Linnean Society*. – 2003. – V. 80. – P. 57–65.
10. Graham, J.H. The effects of drought and disturbance on the growth and developmental instability of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) / J.H. Graham, J.J. Duda, M.L. Brown // *Ecological Indicators*. – 2012. – V. 20. – № 1. – P. 143–150.
11. Zadeh, A.R. Dorsi-ventral leaf reflectance properties of *Carpinus betulus* L.: An indicator of urban habitat quality / A.R. Zadeh, K.F. Veroustraete, K. Wuyts // *Environmental Pollution*. – 2012. – V. 162. – № 2. – P. 332–337.
12. Freeman, D.C. Developmental stability in plants: symmetries, stress and epigenesis / D.C. Freeman, J.H. Graham, J.M. Emlen // *Genetica*. – 1993. – V. 89. – № 1. – P. 97–119.
13. Полонский, В.И. Сирень венгерская – перспективный биоиндикатор для сравнительной оценки степени загрязнения городской среды / В.И. Полонский, И.С. Полякова // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2014. – Вып. 2. – С. 89–92.
14. Шабалина, О.М. Оценка влияния загрязнения среды и почвенных факторов на показатели флуктуирующей асимметрии листа березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в г. Красноярске / О.М. Шабалина, Т.Н. Демьяненко // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2011. – № 12. – С. 134–139.
15. Zhang, H. Leaf developmental stability of *Platanus acerifolia* under urban environmental stress and its implication as an environmental indicator / H. Zhang, X. Wang // *Frontiers of Biology in China*. – 2006. – V. 1. – № 4. – P. 411–417.
16. Зорина, А.А. Изменчивость показателей и индексов асимметрии признаков листа в кроне *Betula pendula* Roth. (Betulaceae) / А.А. Зорина, А.В. Коросов // *Ботанический журнал*. – 2009. – Т. 94. – № 8. – С. 1172–1192.
17. Черных, Е.П. Оценка экологического благополучия территории г. Красноярска с использованием черемухи обыкновенной в качестве биоиндикатора / Е.П. Черных, Г.Г. Первышина, О.В. Гоголева // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2014. – № 1. – С. 96–100.
18. Polonskiy, V.I. Increased Size of Epidermal Cells in *Syringa josikaea* Jacq. Smaller Leaf Side as an Adaptive Mechanism for Reducing Its Asymmetry / V.I. Polonskiy, I.S. Polyakova // *Russian Journal of Developmental Biology*. – 2015. – V. 46. – № 6. – P. 356–361.
19. Скрипальщикова, Л.Н. Оценка экологического состояния сосны обыкновенной на урбанизированных территориях Красноярской лесостепи / Л.Н. Скрипальщикова, В.В. Стасова, М.А. Пляшечник // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2013. – № 11. – С. 176–181.

Полонский Вадим Игоревич, доктор биол. наук, профессор, Красноярский ГАУ, тел. (391) 247-23-14, e-mail: vadim.polonskiy@mail.ru.

SUMMARY

V.I. Polonskiy

Using of fluctuating asymmetry of opposite leaves of *Syringa josikaea* Jacq. in the bioindication of Krasnoyarsk city pollution

In order to improve the method of bioindication of environmental pollution comparative study of the index fluctuating asymmetry (FA) of individual leaves (IFAH) and the pairs opposite leaves (IFAO) hungarian lilac *Syringa josikaea* Jacq., was done. Plants were grown in various places of Krasnoyarsk differing on the degree of contamination. A control plot was the territory without industrial facilities with extremely low traffic and vehicles located on the outskirts of city near the forest – Akademgorodok. The experiments were the territories located in the center of Krasnoyarsk, mainly contaminated by exhaust gases of vehicles: Railway district (Red Square), Leninsky district (KrasTEC), Oktyabrsky district (Avenue Free). Morphological signs of asymmetry in leaf served as the width of whole leaves or their halves. In the control IFAO and IFAH were respectively 0.030 and 0.024, or 0.044 and 0.032 in the experiments. Strengthening the differences under the influence of environmental pollution between the IFAO and IFAH was due to a greater increase in the proportion of asymmetrical pairs of opposite leaves as much as compared to the separate halves of leaves. The value of IFAO in the experiments with respect to the control for the 1st, 2nd and 3rd pairs of leaves on the annual shoots were respectively: 194.7, 149.3 and 134%. It was concluded that to assess the quality of the urban environment it is advisable to carry out calculations of the index FA based on the measurement of morphological sign of entire opposite leaves rather than separate halves of the leaves. This measurement should be performed at the first pair of opposite leaves on the annual shoots. This approach to bioindication of environmental quality has a higher sensitivity and lower relative error.

Keywords: lilac *Syringa josikaea* Jacq., opposite leaves, width, fluctuating asymmetry, environment pollution, city.

Polonskiy Vadim Igorevich, Dr. Biol. Sci., Prof., Krasnoyarsk SAU, ph. (391) 247-23-14, e-mail: vadim.polonskiy@mail.ru.

УДК 504.738:581.526.325.2:504.453(571.13)

О.П. Баженова, Я.И. Гульченко

ИНДИКАТОРНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ФИТОПЛАНКТОНА СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ИРТЫША КАК ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ

Проанализировано влияние ряда гидрологических и гидрохимических показателей на структуру фитопланктона среднего течения реки Иртыша (в районе г. Омска) в период открытой воды 2014 г. Используются канонический анализ соответствий и корреляционный анализ. Установлено достоверное влияние расхода и температуры воды, ХПК и БПК₅ на фитопланктон реки. Предложен метод расчета и интерпретации составной переменной загрязнения на основе ХПК и БПК₅. С использованием метода взвешенного усреднения проведен расчет значений оптимума и толерантности по отношению к загрязнению реки для массовых видов фитопланктона. Предложен комбинированный метод определения индивидуальных индикаторных весов видов с использованием значений их толерантности. На основе полученных значений оптимума и толерантности определены индивидуальные индикаторные веса и валентности массовых видов. В составе фитопланктона реки выявлен 31 региональный индикатор степени загрязнения вод, в том числе 1 – чистых вод, 2 – загрязненных, 21 – грязных и 7 – очень грязных вод. Преобладание видов-индикаторов грязных вод указывает на соответствующую степень загрязнения реки. Подробно описана методика определения региональных видов-индикаторов загрязнения воды и расчета индикаторных весов и валентностей массовых видов фитопланктона. Полученные показатели будут использованы при вычислении индекса сапробности воды рек и озер Омского Прииртышья в модификации Марвана-Зелинки.

Ключевые слова: биоиндикация, фитопланктон, виды-индикаторы, класс качества воды, река Иртыш.