

Наталья Михайловна Назарова

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

nazarova-1989@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УРБОСРЕДЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ЛИСТЬЕВ *SYRINGA VULGARIS L.*

Цель исследования – определение степени экологической трансформации урбосреды с использованием метода флуктуирующей асимметрии листьев *Syringa vulgaris L.* Задачи: определить точки отбора проб фитомассы по городу с последующей оценкой показателей билатеральных признаков листа *Syringa vulgaris L.*; установить, является ли асимметрия листьев направленной или случайной; оценить степень зависимости билатеральных признаков листа от экологической напряженности точки отбора проб; определить концентрации тяжелых металлов (*Cd* и *Pb*) в точках отбора проб с целью подтверждения или опровержения данных о качестве среды, полученных методом флуктуирующей асимметрии. Установлено, что высокие и средние показатели изменчивости по пяти метрическим признакам указывают на их значительную асимметричность. Проведенный анализ билатеральных признаков по критерию Вилкоксона показал значительные различия в величинах левой и правой половин листа ($p \leq 0,05$). Значения коэффициента ранговой корреляции Спирмена указывают на различную степень зависимости билатеральных признаков листа в зависимости от точки сбора проб фитомассы. Отмечена тенденция снижения интегрального показателя ФА при снижении антропогенной нагрузки. Установлен признак – ширина левой и правой половин листа, который является наиболее важным показателем при оценке листьев *Syringa vulgaris L.* в качестве индикаторов техногенного загрязнения. Исключение других признаков из анализа предоставляет возможность получения достоверной информации о качестве окружающей среды при значительном сокращении времени, которое затрачивается на обработку данных биометрии. Данные, полученные при использовании морфометрического метода, подтверждаются результатами проведенных биохимических исследований, направленных на определение концентрации кадмия (*Cd*) и свинца (*Pb*), как приоритетных загрязнителей антропогенно-трансформированной урбосреды. Флуктуирующая асимметрия листьев *Syringa vulgaris L.* может использоваться при определении степени экотоксичности среды, являясь альтернативой более дорогостоящим методам экологического мониторинга.

Ключевые слова: флуктуирующая асимметрия, лист, морфометрия, *Syringa vulgaris L.*

Для цитирования: Назарова Н.М. Определение достоверности результатов оценки экологического состояния урбосреды на основе анализа флуктуирующей асимметрии листьев *Syringa vulgaris L.* // Вестник КрасГАУ. 2025. № 11. С. 57–69. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-57-69.

Natalya Mikhailovna Nazarova

Orenburg State University, Orenburg, Russia

nazarova-1989@yandex.ru

DETERMINING RESULTS RELIABILITY OF ASSESSING URBAN ENVIRONMENT ECOLOGICAL STATE BASED ON FLUCTUATING ASYMMETRY OF *SYRINGA VULGARIS* L. LEAVES ANALYSIS

The aim of the study is to determine the degree of ecological transformation of the urban environment using the fluctuating asymmetry method of *Syringa vulgaris* L. leaves. Objectives: to determine the sampling points of phytomass in the city with subsequent evaluation of the indices of bilateral traits of *Syringa vulgaris* L. leaves; to establish whether the leaf asymmetry is directed or random; to evaluate the degree of dependence of bilateral leaf traits on the environmental stress of the sampling point; to determine the concentrations of heavy metals (Cd and Pb) at sampling points in order to confirm or refute the data on the quality of the environment obtained using the fluctuating asymmetry method. It was found that high and medium variability indices for five metric traits indicate their significant asymmetry. The analysis of bilateral traits using the Wilcoxon test revealed significant differences in the values between the left and right halves of the leaf ($p \leq 0.05$). The values of the Spearman rank correlation coefficient indicate different degrees of dependence of bilateral leaf traits depending on the point of phytomass sampling. A trend toward a decrease in the integral FA indicator with decreasing anthropogenic load was noted. The width of the left and right halves of the leaf was identified as the most important parameter when assessing *Syringa vulgaris* L. leaves as indicators of anthropogenic pollution. Eliminating other parameters from the analysis makes it possible to obtain reliable information on environmental quality while significantly reducing the time spent processing biometric data. The data obtained using the morphometric method are confirmed by the results of biochemical studies aimed at determining the concentration of cadmium (Cd) and lead (Pb), as priority pollutants in anthropogenically transformed urban environments. Fluctuating asymmetry of *Syringa vulgaris* L. leaves can be used to determine the degree of ecotoxicity of the environment, offering an alternative to more expensive environmental monitoring methods.

Keywords: fluctuating asymmetry, leaf, morphometry, *Syringa vulgaris* L.

For citation: Nazarova NM. Determining results reliability of assessing urban environment ecological state based on fluctuating asymmetry of *Syringa vulgaris* L. leaves analysis. *Bulletin of KSAU*. 2025;(11):57-69. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-57-69.

Введение. Рост экономического производства привел к усилению экологических рисков, связанных с загрязнением окружающей среды. Экспансивная урбанизация коренным образом изменяет естественную среду обитания и оказывает прямое влияние на связанную с ней биоту. Поэтому биомониторинг в городах может предоставить важную информацию для управления охраной окружающей среды [1].

В настоящее время изменения окружающей среды из-за загрязняющих веществ в городских районах активно изучаются исследователями с позиции их влияния на морфологическое, биохимическое и физиологическое состояние растений и их реакции [2]. Характеристики растительности (широкое распространение, большая площадь контакта) являются эффективными индикаторами общего воздействия загрязнения. Ткани и органы растений обладают способностью к адсорбции (накоплению) тяжелых металлов и пыли как основных продуктов антропогенной деятельности [3]. Поэтому в настоящее время все чаще появляются исследования, описывающие фито-

ремедиационную активность растений, произрастающих в условиях города [4].

Оценку экотоксичности среды с использованием растений в городских экосистемах проводят различными способами, среди которых особая роль принадлежит различным морфометрическим методам, в том числе флюктуирующей асимметрии (ФА) [5] и биохимическим методам [6] – определение концентрации тяжелых металлов (ТМ) в фитомассе.

Флюктуирующая асимметрия, определяемая как случайные отклонения от ожидаемой идеальной двусторонней симметрии организма, приобрела известность как индикатор стабильности развития в экотоксикологии. Индекс флюктуирующей асимметрии (ИФА) является индексом стабильности развития организма. Исследования флюктуирующей асимметрии уже долгое время основываются в первую очередь на измерениях длин и углов на левой и правой сторонах растительных организмов [7]. Флюктуирующая асимметрия (ФА) предложена в качестве полезного неспецифического индикатора экологического

стресса. Многочисленные литературные данные предоставляют информацию о факторах окружающей среды, которые коррелируют с ФА [8, 9].

Как особый тип фенотипической изменчивости флюктуирующая асимметрия является проявлением изменчивости развития. Этот тип изменчивости является повсеместным и играет существенную роль в наблюдаемом фенотипическом разнообразии. Поэтому уровень флюктуирующей асимметрии оказывается индикатором оптимальных условий развития и генетической коадаптации. Он также рассматривается как параметр приспособленности. Таким образом, ФА выступает как мера стабильности развития в биологии и экологии развития, а также как мера состояния популяции в популяционной биологии [10].

Флюктуирующая асимметрия является широко используемым инструментом для выявления нестабильности развития, и ожидается, что растения в стрессовых условиях будут демонстрировать повышенные значения асимметрии. Однако мировое исследовательское сообщество не может прийти к единому мнению о достоверности результатов при использовании этого метода биологической индикации. Ряд авторов считают, что метод обладает высокой долей погрешности ввиду предельно упрощенных методов сбора материала, часто измеренного с недостаточной точностью, и отсутствием достоверности статистического анализа данных [11, 12], другие же считают его соответствующим современным методам биомониторинга, позволяющим оценить отклонения в развитии растений в условиях загрязнения [13, 14].

Министерство природных ресурсов Российской Федерации определяет листья *Betula pendula* (L.) Roth. как традиционный растительный объект для изучения ФА [15]. Однако в литературе встречается множество данных об использовании для оценки ФА растений представителей других семейств. Среди таксонов рода *Syringa* L. в качестве объекта для изучения ФА хорошо исследован вид *Syringa josikaea* Jacq. [16, 17].

Цель исследования – определение степени экологической трансформации урбосреды с использованием метода флюктуирующей асимметрии листьев *Syringa vulgaris* L.

Задачи: определить точки отбора проб фитомассы по городу с последующей оценкой показателей билатеральных признаков листа *Syringa vulgaris* L.; установить, является ли асимметрия листьев направленной или случайной;

оценить степень зависимости билатеральных признаков листа от экологической напряженности точки отбора проб; определить концентрации тяжелых металлов (Cd и Pb) в точках отбора проб с целью подтверждения или опровержения данных о качестве среды, полученных методом флюктуирующей асимметрии.

Объекты и методы. *Syringa vulgaris* L. – широко распространенный и активно применяемый для озеленения вид в Оренбуржье, что позволяет использовать его как объект биомониторинга.

Для проведения настоящего исследования проведено два эксперимента с применением различных методов биоиндикации.

1. Определение степени билатеральной асимметрии листьев *Syringa vulgaris* L. – биометрический метод.

2. Определение концентрации тяжелых металлов – кадмия и свинца в фитомассе *Syringa vulgaris* L. – биохимический метод.

Для первого эксперимента, в соответствии с методическими рекомендациями Министерства природных ресурсов Российской Федерации [15], для исследования выбирались групповые и/или аллейные посадки кустарников *Syringa vulgaris* L., достигших генеративного возрастного состояния. Сбор биоматериала проводился после остановки роста листьев (июль месяц) по 50 штук в троекратной повторности с каждой точки отбора проб на территории четырех административных районов города Оренбурга и в точке контроля. Всего проанализировано 1 350 листовых пластинок. Листья собирались со стороны куста, обращенной к дороге, на высоте около 1,5 м.

В качестве контроля была взята территория Ботанического сада (точка III). В каждом районе определены по 2 точки отбора проб: непосредственная близость к дороге (до 5–10 м) – точка I и частный сектор (удаление от автомагистрали на расстояние 100–150 м) – точка II. Значительное удаление от автомагистрали (расстояние более 500 м) – точка III (рис. 1, б).

Координаты точек сбора образцов:

– в Промышленном районе – проспект Братьев Коростелевых (точка I – 51.803758, 55.058875 и точка II – 51.801883, 55.056134);

– в Ленинском районе – проспект Гагарина (точка I – 51.774704, 55.181982 и точка II – 51.771785, 55.181235);

- в Центральном районе – улица Чкалова (точка I – 51.764277, 55.117609 и точка II – 51.764067, 55.117553);
- в Дзержинском районе – улица Театральная (точка I – 51.834194, 55.130228 и точка II – 51.834723, 55.134219);
- территория ботанического сада ОГУ (точка III – 51.816536, 55.120979).

Для оценки величины флюктуирующей асимметрии листовой пластинки *S. vulgaris* использовались методические рекомендации Министерства природных ресурсов Российской Федерации

рации. Процесс подготовки проб к анализу данных морфометрии складывался из нескольких этапов.

1. Сбор биоматериала (листовых пластинок).
2. Гербаризация листовых пластинок.
3. Определение метрических параметров листовых пластинок с точностью до 0,1 мм и степени их асимметричности (рис. 1, а).
4. Статистический анализ биометрических признаков.

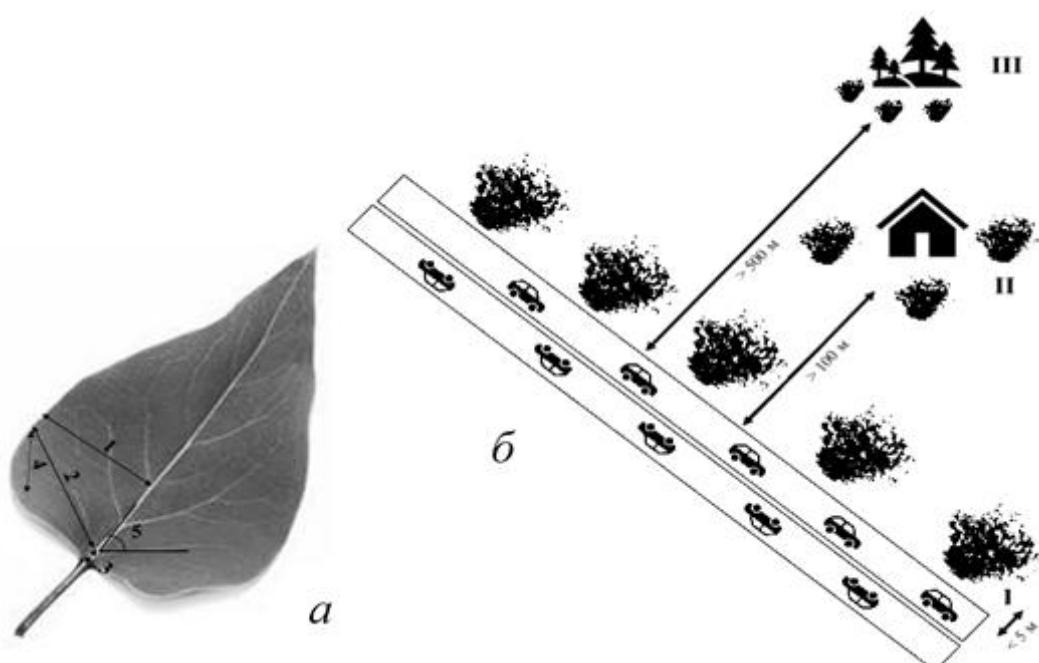


Рис. 1. Определение морфометрических параметров (а) и расположение точек отбора проб (б):
а: 1 – ширина листа; 2 – длина второй жилки второго порядка; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 – расстояние между внешними концами этих же жилок; 5 – угол между главной и второй жилкой второго порядка;
б: I – непосредственная близость к автомагистрали; II – удаление на расстояние до 100 м; III – контроль (Ботанический сад ОГУ)

Determination of morphometric parameters (a) and location of sampling points (b):

- а: 1 – leaf width; 2 – length of the second vein of the second order; 3 – distance between the bases of the first and second veins of the second order; 4 – distance between the outer ends of the same veins; 5 – angle between the main and the second vein of the second order; б: I – close proximity to the highway; II – distance up to 100 m; III – control (OSU Botanical Garden)

Для интерпретации данных о качестве окружающей среды по показателю ФА использована шкала Л.В. Аношкиной [18].

Для второго эксперимента отбор проб фитомассы проводили одновременно с отбором проб для изучения листьев методом флюктуирующей асимметрии. Сбор средней по району пробы листьев сирени осуществляли с южной стороны

куста. Вес пробы – 250–350 г. Определение концентрации тяжелых металлов проводили атомно-абсорбционным методом по ГОСТ 30692-2000.

Статистическая обработка полученных в ходе исследования данных осуществлялась с помощью программного обеспечения MS Excel и Statistica 10.0.

Результаты и их обсуждение. На основании полученных первичных метрических данных выведены средние значения по каждому признаку с указанием стандартного отклонения.

Высоким и очень высоким коэффициентом вариации отличается признак расстояния между основаниями первой и второй жилок второго порядка как с левой, так и с правой стороны листа. Причем данная особенность отмечена у всех листовых пластинок на каждой точке отбора проб, кроме зоны контроля. Также высокую степень вариабельности проявляет признак

расстояния между концами этих жилок в точке I (непосредственная близость к автомагистрали) как с правой, так и с левой стороны листа в Центральном и Ленинском районах города. Очень низкий и низкий C_v отмечен для признаков ширины левой и правой половинок листа, а также для длины жилки второго порядка. Другие изученные метрические признаки листа варьируют незначительно или в средней степени. Стоит отметить, что в точке сбора контрольных образцов значительно варьирующих признаков выявлено не было (табл. 1).

Таблица 1
Средние значения и коэффициент вариации биометрических признаков листьев
Syringa vulgaris L.
Average values and coefficient of variation of biometric characteristics
of *Syringa vulgaris* L. leaves

Признак	Ленинский район				Центральный район				Дзержинский район				Промышленный район				Контроль	
	I точка		II точка		I точка		II точка		I точка		II точка		I точка		II точка		III точка	
	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$	Среднее	$C_v\%$
Левая половина листа																		
1	1,39± 0,2	12	1,68± 0,1	7	1,58± 0,2	11	1,73± 0,2	10	1,59± 0,1	9	1,63± 0,2	9	1,63± 0,2	12	1,69± 0,2	11	1,92± 0,2	9
2	2,36± 0,2	10	2,7± 0,2	7	2,42± 0,3	13	2,6± 0,2	8	2,59± 0,2	8	3,08± 0,3	9	2,57± 0,2	9	2,55± 0,3	12	2,97± 0,3	11
3	0,37± 0,2	52*	0,39± 0,1	30	0,45± 0,2	35	0,28± 0,1	39	0,37± 0,1	31	0,45± 0,1	29	0,37± 0,1	37	0,39± 0,1	35	0,39± 0,2	17
4	1,25± 0,2	17	1,31± 0,3	20	1,17± 0,3	23	1,2± 0,2	19	1,24± 0,2	15	1,24± 0,2	17	1,32± 0,2	18	1,24± 0,2	18	1,3± 0,3	18
5	47,9± 6,9	14	52± 8,1	16	51,2± 5,7	11	51,4± 6,4	13	51,8± 6,2	12	48,4± 5,4	11	50,9± 5,8	11	52,3± 8,3	16	53,7± 6,1	11
Правая половина листа																		
1	1,49± 0,2	11	1,78± 0,1	7	1,63± 0,2	10	1,75± 0,2	9	1,64± 0,2	9	1,73± 0,2	12	1,66± 0,2	10	1,72± 0,1	8	1,93± 0,2	9
2	2,3± 0,2	9	2,76± 0,2	7	2,38± 0,3	12	2,55± 0,3	10	2,54± 0,2	10	3,12± 0,2	7	2,48± 0,2	7	2,47± 0,2	9	2,98± 0,3	10
3	0,4± 0,2	56	0,41± 0,1	30	0,42± 0,1	29	0,28± 0,1	47	0,38± 0,1	27	0,45± 0,1	32	0,38± 0,1	34	0,32± 0,1	40	0,47± 0,2	20
4	1,27± 0,3	21	1,36± 0,2	11	1,09± 0,2	20	1,27± 0,2	18	1,25± 0,2	16	1,42± 0,2	15	1,3±0, 2	13	1,21± 0,2	16	1,33± 0,3	20
5	51± 7,4	15	51,3± 5,7	11	52± 5,4	10	49,6± 6,2	12	50,8± 7,9	15	47,8± 4,9	10	52,6± 6	11	52,1± 6,1	12	52,6± 6,7	13

* – коэффициенты, указывающие на высокую степень изменчивости.

В ходе дальнейшего анализа данных морфометрии определялась направленность асимметрии по всем признакам с левой и правой стороны листовой пластинки (критерий Вилкоксона).

По четырем из пяти билатеральных признаков обнаружены статистически значимые ($p \leq 0,05$) отличия левой и правой стороны листа. По признаку «расстояние между основаниями первой и

второй жилок второго порядка» отличий не выявлено.

По ширине листа значимые отличия выявлены в Ленинском районе на обеих пробных точках и в Дзержинском районе в точке I. По признаку длины жилки второго порядка, второй от основания листа – только в Ленинском районе в точке II. По признаку расстояния между концами первой и второй жилок второго порядка – в

Дзержинском районе (в точке II) и в Центральном районе (в точке I). По признаку угла между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка статистически значимое отличие выявлено только в пробах листьев, собранных в Ботаническом саду. Таким образом, листовые пластиинки *S. vulgaris* проявляют достаточно высокую степень асимметричности (табл. 2).

Таблица 2

Статистическая значимость (р) различий между левой и правой сторонами листа *Syringa vulgaris* L. по изучаемым признакам в разных точках отбора проб
Statistical significance (p) of the differences between the left and right sides of the *Syringa vulgaris* L. leaf in terms of the studied characteristics at different sampling points

Точка отбора	1	2	3	4	5
Промышленный район					
I	0,41	1,18	0,61	0,37	0,81
II	0,94	0,94	0,35	0,67	0,33
Дзержинский район					
I	0,03*	0,22	0,12	0,55	0,61
II	0,09	0,18	0,93	0,01	0,11
Ленинский район					
I	0,05	0,16	0,89	0,76	0,26
II	0,03	0,03	0,16	0,21	0,19
Центральный район					
I	0,75	0,26	0,77	0,03	0,26
II	0,33	0,31	0,51	0,59	0,79
Контроль					
III	0,68	0,92	0,14	0,39	0,05

* – статистически значимые параметры (при $p \leq 0,05$).

Для установления зависимости между пятью парами биометрических признаков листьев с левой и правой стороны листа был применен коэффициент ранговой корреляции Спирмена (Rs). Проанализировав корреляционные связи пяти пар билатеральных признаков листовой пластиинки *S. vulgaris*, установлено, что для всех районов и точек сбора характерно наличие статистически значимой корреляционной зависимости только по одной паре признаков – ширине левой и правой половинок листа.

Статистически значимая корреляционная связь отмечена между признаками ширины половины листа и длины жилки второго порядка справа – на обоих точках в Промышленном районе и в Ленинском районе в точке II; ширины половины листа справа и расстояния между основаниями первой и второй жилок слева – в Промышленном районе в точке I и в контроле; длины жилки второго порядка справа и слева – в Дзержинском и Ленинском районах в точке I; длины

жилки второго порядка и расстояния между концами первой и второй жилок второго порядка справа – в Промышленном районе в обоих точках и в точке сбора контроля. Остальные признаки, являющиеся в высокой степени взаимозависимыми, единичны и регистрируются в разных точках сбора, однако в основном в точках II, расположенных на удалении от автомагистрали.

В ходе проведения анализа выявлен один признак – ширина половины листа слева и справа, который является в высокой степени значимым в каждой точке сбора. Данный параметр – наиболее важный показатель оценки асимметричности листьев *S. vulgaris* в условиях техногенного загрязнения, так как по изменению ширины половин листа можно достоверно оценить отклонения, возникающие при различном уровне антропогенного воздействия на растение сирени, исключая из анализа остальные четыре признака (табл. 3).

Таблица 3

Показатели корреляционной связи билатеральных признаков листьев *Syringa vulgaris* L.
Correlation coefficients of bilateral leaf characteristics of *Syringa vulgaris* L.

Признак	1Л	1П	2Л	2П	3Л	3П	4Л
Промышленный район, I							
1П	0,71*	0,73	–	–	–	–	–
3Л	–**	–0,61	–	–0,66	–	–	–
4П	–	–	–	0,81	–0,62	–	–
5Л	–	0,78	–	–	–	–	–
Промышленный район, II							
1Л	0,83	–	–	–	–	–	–
2П	–	0,61	–	–	–	–	–
3П	–	–	–	–	0,77	–	–
4П	–	–	–	0,81	–	–	–
Дзержинский район, I							
1П	0,74	–	–	–	–	–	–
2П	–	–	0,65	–	–	–	–
3Л	–	–	0,65	0,61	–	–	–
4П	–	0,77	–	–	–	–	–
5Л	–	–	–0,61	–	–	–	–0,64
Дзержинский район, II							
1П	0,73	–	–	–	–	–	–
3П	–	–	–	0,81	–	–	–
4П	–	–	–	–	–	0,74	–
5П	–	0,64	–	–	–	–	–
Ленинский район, I							
1П	0,85	–	–	–	–	–	–
2П	0,77	0,61	–	–	–	–	–
4П	–	–	–	–	–	–	0,67
5П	–	–	0,65	–	–	–	–
Ленинский район, II							
1П	0,81	–	–	–	–	–	–
2П		0,66	0,74	–	–	–	–
4Л	0,78	0,64	–	–	–	–	–
5Л	–	–	–	–	–0,71	–	–
Центральный район, I							
1П	0,86	–	–	–	–	–	–
2Л	0,81	–	–	–	–	–	–
4П	–	–	–	0,81	–	–	–
5Л	–	–	–	–	–	–0,66	–
Центральный район, II							
1П	0,75	–	–	–	–	–	–
2Л	0,77	–	–	–	–	–	–
5П	–	–	–	–0,72	–	–0,72	–
Контроль, III							
1П	0,87	–	–	–	–	–	–
3Л	0,69	0,69	–	–	–	–	–
3П	0,71	–	–	–	–	–	–
4П	–	–	–	–	–	–	0,67
5П	–	–	0,65	–	–	–	–

Примечания: * – статистически значимые параметры (при $p \leq 0,05$); П – правая половина листа; Л – левая половина листа.

Величина флуктуирующей асимметрии листьев *S. vulgaris* по каждому району г. Оренбурга определена с помощью интегрального показателя – индекса ФА – величины среднего относительного различия между сторонами на признак. В точке сбора контроля (Ботанический сад) отмечен самый низкий интегральный показатель флуктуирующей асимметрии, что свидетельствует о большем экологическом благополучии данной точки отбора проб в сравнении с другими. В Дзержинском, Центральном и Промышленном районах города показатель асимметрии значительно выше контрольного, что позволяет

констатировать факт реакции растений сирени на увеличение техногенной нагрузки. Причем для Промышленного района характерно наличие одинаково высоких значений асимметрии независимо от точки отбора проб. В других же районах отмечена тенденция уменьшения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии при движении от точки I к точке II и контролю, т. е. при удалении от источника техногенного воздействия листья становятся менее асимметричными, что свидетельствует о снижении степени антропогенной трансформации среды (рис. 2).

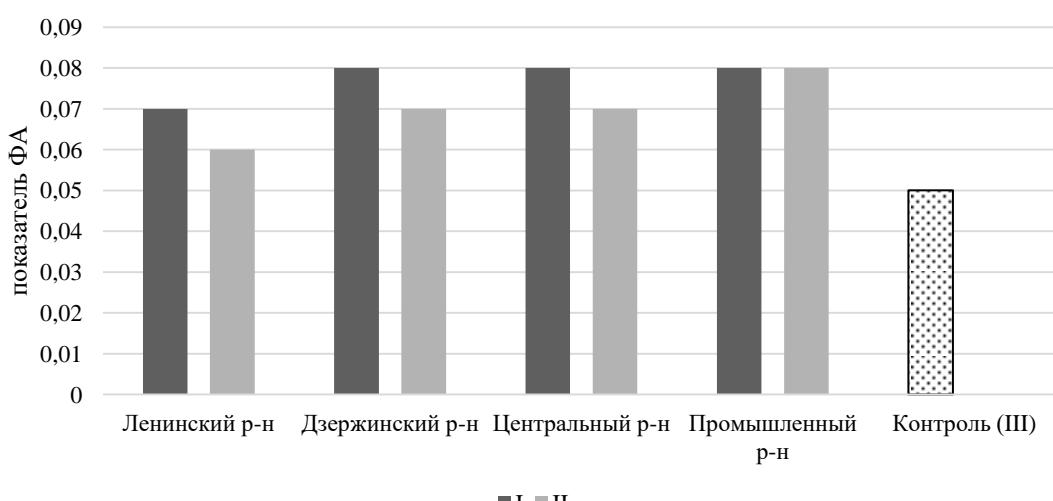


Рис. 2. Средние интегральные показатели ФА листьев *Syringa vulgaris* L. по районам г. Оренбурга
Average integral PA values of *Syringa vulgaris* L. leaves in the districts of Orenburg

Статистически значимые различия по интегральному показателю асимметрии отмечены между пробами фитомассы, отобранными в непосредственной близости к транспортному по-

лотну и на удалении до 100 м, в сравнении с контролем. Между I и II точкой сбора проб значимых различий не выявлено (табл. 4).

Таблица 4

Статистическая значимость различий по интегральному показателю асимметрии между точками отбора проб (HSD тест Тьюки)
Statistical significance of differences in the integral asymmetry index between sampling points (Tukey's HSD test)

Точка отбора	I	II	III
I	–		
II	0,09	–	
III	0,01*	0,03	–

* – статистически значимые параметры (при $p \leq 0,05$).

Однако на диаграмме размаха отмечается тенденция снижения среднего значения интегрального показателя ФА при удалении от источника загрязнения. Вероятно, концентрация

поллютантов на удалении до 100 м от проезжей части (точка II) остается достаточно высокой, что и приводит к проявлению асимметрии в листьях сирени (рис. 3).

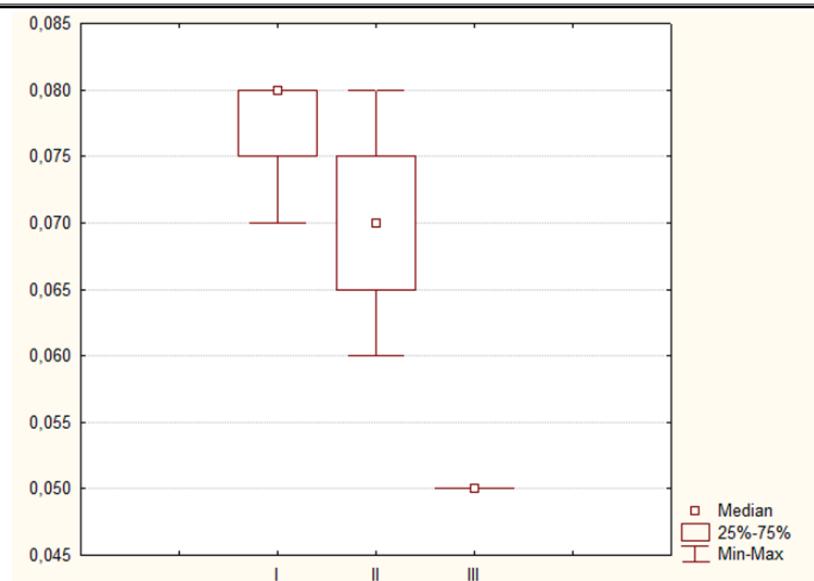


Рис. 3. Размах интегрального показателя FA
The range of the integral FA indicator

Интерпретируя интегральный показатель FA в контексте оценки качества городской среды, в более благоприятных условиях произрастают растения *S. vulgaris* контрольной точки, близко к контролю – в точке II Ленинского района. Дзер-

жинский, Центральный районы испытывают сильную техногенную нагрузку. Максимальный уровень загрязненности отмечен на территории Промышленного района города Оренбурга (табл. 5).

Таблица 5

Оценка качества среды по районам города Оренбурга
Environmental quality assessment by districts of Orenburg city

Административный район	Балл качества с интерпретацией		Состояние среды в среднем по району
	I	II	
Ленинский	4 – грязно	2 – относительно чисто	Загрязнено
Дзержинский	5 – очень грязно	4 – грязно	Опасно
Центральный	5 – очень грязно	4 – грязно	Опасно
Промышленный	5 – очень грязно	5 – очень грязно	Опасно
Контроль III		1 – чисто	

По возрастанию техногенной нагрузки точки отбора проб можно расположить в следующем порядке: контроль > Ленинский р-н > Дзержинский и Центральный р-ны > Промышленный р-н.

В продолжении исследования проведен отбор проб фитомассы для определения концентрации кадмия (Cd) и свинца (Pb) в листовых пластинах *Syringa vulgaris* L. по районам города Оренбурга. Установлено, что в точке отбора проб контроля концентрации исследуемых элементов были наименьшими – 0,01 и 0,03 мг/кг

соответственно. Максимальная концентрация кадмия (0,04 мг/кг) определена в пробах фитомассы, собранной с растений сирени, произрастающей на территории Дзержинского района, а свинца (0,10 мг/кг) – в Промышленном районе города Оренбурга. Даже при условии несколько пониженной концентрации Pb в пробах фитомассы, собранных в Промышленном районе, данный административный округ можно считать наиболее неблагоприятным ввиду многократного превышения концентрации Cd (рис. 4).

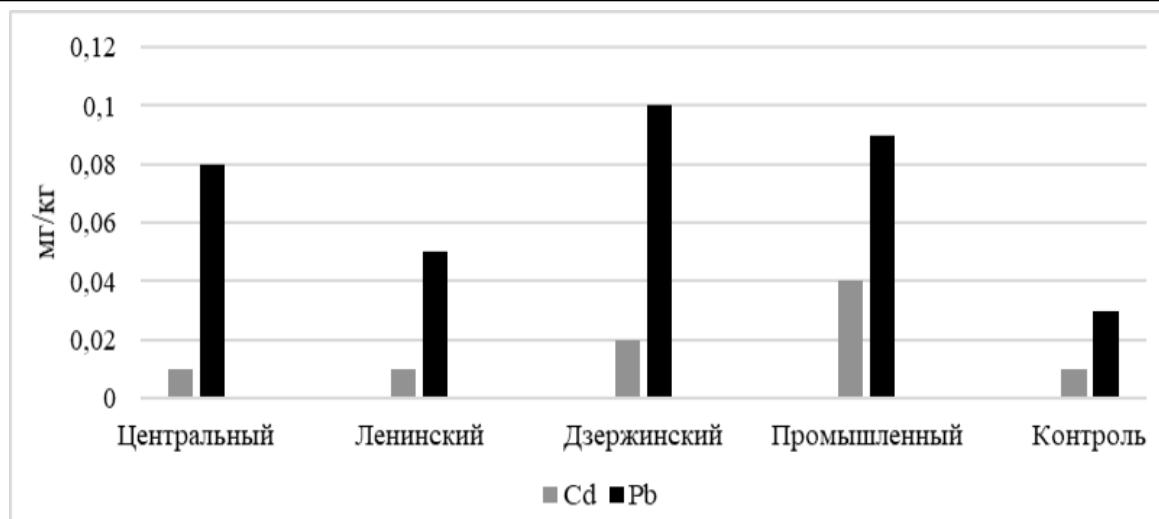


Рис. 4. Содержание кадмия и свинца в листовых пластинках *Syringa vulgaris L.*
(в среднем по районам города Оренбурга)
Cadmium and lead content in *Syringa vulgaris L.* leaf plates (average for Orenburg city districts)

По возрастанию концентраций тяжелых металлов в пробах фитомассы точки отбора проб можно расположить в следующем порядке: контроль > Ленинский р-н > Дзержинский р-н > Центральный р-н > Промышленный р-н.

Заключение. Проведенное исследование позволяет сформулировать ряд выводов.

1. Установлено, что билатеральные признаки листа значительно варьируют во всех точках отбора проб, кроме контроля, что подтверждается высокими значениями коэффициента вариации (выше 20 %). Это позволяет предположить, что относительно «чистые» условия способствуют более стабильному развитию листовых пластинок сирени, чем у растений, произрастающих в антропогенно нарушенных местообитаниях.

2. Доказано, что асимметрия является направленной по четырем из пяти исследуемых билатеральных признаков листа (критерий Вилкоксона, при $p < 0,05$). Признак «расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка» является незначимым, поэтому не может быть интерпретирован как показатель изменчивости листа сирени под воздействием техногенной нагрузки.

3. Показано, что значения коэффициента ранговой корреляции Спирмена указывают на различную степень зависимости билатеральных признаков листа в зависимости от точки сбора. Выявлен признак «ширина левой и правой половинок листа», который является в высокой степени значимым в каждой точке сбора. Дан-

ный признак – наиболее важный показатель оценки асимметричности листьев *Syringa vulgaris L.* в условиях техногенного загрязнения. Продвигая только измерения ширины правой и левой половинок листа, исключая другие четыре признака, можно получить достоверную информацию о качестве окружающей природной среды и значительно ускорить процесс обработки данных биометрии.

4. Отмечена тенденция снижения степени асимметричности листьев сирени обыкновенной при удалении от источника прямого техногенного воздействия. Однако статистически достоверны данные отличия только в сравнении точек сбора проб по районам города с контролем ($p < 0,05$).

5. Показано, что данные, полученные в ходе анализа флюктуирующей асимметрии листьев *Syringa vulgaris L.*, подтверждаются результатами атомно-абсорбционного метода определения концентрации тяжелых металлов. На территории Промышленного района (самого неблагоприятного по оценке показателя ФА) выявлено четырехкратное в сравнении с контролем увеличение концентрации Cd и трехкратное по Pb.

Таким образом, биометрический метод на основе ФА листьев *Syringa vulgaris L.* подтверждается данными биохимического анализа: степень ФА изменяется среди растений сирени, произрастающих в районах с различным уровнем техногенной нагрузки. Однако стоит отметить, что данные лабораторных исследований дают возможность получения более точной ин-

формации о степени адсорбции и аккумуляции поллютантов в конкретной точке сбора. Считаем, что флюктуирующую асимметрию можно считать в достаточной мере достоверным и экономически более выгодным методом биомони-

торинга в сравнении с биохимическими методами, зачастую требующими соответствующего оборудования, расходных материалов и квалификации исследователя.

Список источников

1. Zhang S., Zhao J., Yao M. Urban landscape-level biodiversity assessments of aquatic and terrestrial vertebrates by environmental DNA metabarcoding // *J Environ Manage.* 2023. N 340. P. 117971. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117971.
2. Łukowski A., Popek R., Karolewski P. Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: deposition and ecophysiology // *Environ Sci Pollut Res Int.* 2020. N 27 (10). P. 10296-10307. DOI: 10.1007/s11356-020-07672-0.
3. Javanmard Z., Kouchaksaraei M.T., Hosseini S.M., et al. Assessment of anticipated performance index of some deciduous plant species under dust air pollution // *Environ Sci Pollut Res Int.* 2020. N 27 (31). P. 38987–38994. DOI: 10.1007/s11356-020-09957-w.
4. Cao Y., Ma C., Yu H., et al. The role of sulfur nutrition in plant response to metal(loid) stress: facilitating biofortification and phytoremediation // *J Hazard Mater.* 2022. N 443 (Pt. B). P. 130283. DOI: 10.1016/j.jhazmat.
5. Покаместова В.Ю., Касаткин А.С., Замолодчиков Д.Г. Индексы листовой поверхности древостоев в естественных и нарушенных лесах Приморского края // *Экология.* 2020. № 4. С. 243–250.
6. Salinitro M., Mattarello G., Guardigli G., et al. Induction of hormesis in plants by urban trace metal pollution // *Sci Rep.* 2021. N 11 (1). P. 20329. DOI: 10.1038/s41598-021-99657-3.
7. Kashparova E., Levchuk S., Morozova V., et al. A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roth.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone // *J Environ Radioact.* 2020. N 211. P. 105731. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.015.
8. Oliveira S.C.S., Campos I.R. Leaf Fluctuating Asymmetry and Herbivory of *Tibouchina heteromalla* in Restored and Natural Environments // *Neotrop Entomol.* 2016. N 45. P. 44–49. DOI: 10.1007/s13744-015-0342-1.
9. Dodonov P., Braga A.L., Arruda L.H., et al. Is leaf fluctuating asymmetry related to plant and leaf size in *Miconia albicans*, a common Melastomataceae species? // *Braz J Biol.* 2022. N 84. P. e260884. DOI: 10.1590/1519-6984.260884.
10. Zakharov V.M., Trofimov I.E. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress // *Emerg Top Life Sci.* 2022. N 6 (3). P. 295–301. DOI: 10.1042/ETLS20210274.
11. Kozlov M.V. How reproducible are the measurements of leaf fluctuating asymmetry? // *Peer J.* 2015. N 3. P. e1027. DOI: 10.7717/peerj.1027.
12. Stephen M.Y., Stephen C.L., Paul H. Measurement Error and Morphometric Studies: Statistical Power and Observer Experience // *Systematic Biology.* 2022. N 41. P. 471–482. DOI: 10.1093/sysbio/41.4.471.
13. Mendes G., Boaventura M.G., Cornelissen T. Fluctuating Asymmetry as a Bioindicator of Environmental Stress Caused by Pollution in a Pioneer Plant Species // *Environ Entomol.* 2018. N 47 (6). P. 1479–1484. DOI: 10.1093/ee/nyv147.
14. Mabrouk L., Mabrouk W., Mansour H.B. High leaf fluctuating asymmetry in two native plants growing in heavy metal-contaminated soil: the case of Metlaoui phosphate mining basin (Gafsa, Tunisia) // *Environ Monit Assess.* 2020. N 192 (6). P. 406. DOI: 10.1007/s10661-020-08385-0.
15. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). М.: Изд-во Министерства природных ресурсов Российской Федерации, 2003. 21 с.
16. Зацепина А.А., Нарижняк Д.Д., Кулакова Н.Н. Биоиндикация окружающей среды г. Красноярска при помощи флюктуирующей асимметрии листа сирени венгерской. В сб.: Межрегиональная

- научно-практическая конференция школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых «Экологическое образование и природопользование в инновационном развитии региона». Красноярск, СибГТУ. 2016. С. 299–301.
17. Полонский В.И. Использование флюктуирующей асимметрии супротивных листьев *Syringa josikaea* Jacq. в биоиндикации загрязнения г. Красноярска // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2016. Т. 1, № 21. С. 77–82.
 18. Аношкина Л.В. Состояние древесных пород в урбанизированной среде г. Братска. Братск: БрГУ, 2011. 182 с.

References

1. Zhang S, Zhao J, Yao M. Urban landscape-level biodiversity assessments of aquatic and terrestrial vertebrates by environmental DNA metabarcoding. *J Environ Manage*. 2023;340:117971. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117971.
2. Łukowski A, Popek R, Karolewski P. Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: deposition and ecophysiology. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2020;27(10):10296-1030. DOI: 10.1007/s11356-020-07672-0.
3. Javanmard Z, Kouchaksaraei MT, Hosseini SM, et al. Assessment of anticipated performance index of some deciduous plant species under dust air pollution. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2020;27(31):38987-38994. DOI: 10.1007/s11356-020-09957-w.
4. Cao Y, Ma C, Yu H, et al. The role of sulfur nutrition in plant response to metal(loid) stress: facilitating biofortification and phytoremediation. *J Hazard Mater*. 2022;443(Pt B):130283. DOI: 10.1016/j.jhazmat.
5. Pokamestova VYu, Kasatkin AS, Zamolodchikov DG. Indexes of leaf surface of stands in natural and disturbed forests of Primorsky Region. *Ekologiya*. 2020;4:243-250. (In Russ.).
6. Salinitro M, Mattarello G, Guardigli G, et al. Induction of hormesis in plants by urban trace metal pollution. *Sci Rep*. 2021;11(1):20329. DOI: 10.1038/s41598-021-99657-3.
7. Kashparova E, Levchuk S, Morozova V, et al. A dose rate causes no fluctuating asymmetry indexes changes in silver birch (*Betula pendula* (L.) Roth.) leaves and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles in the Chernobyl Exclusion Zone. *J Environ Radioact*. 2020;211:105731. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.015.
8. Oliveira SCS, Campos IR. Leaf Fluctuating Asymmetry and Herbivory of *Tibouchina heteromalla* in Restored and Natural Environments. *Neotrop Entomol*. 2016;45:44-49. DOI: 10.1007/s13744-015-0342-1.
9. Dodonov P, Braga AL, Arruda LH, et al. Is leaf fluctuating asymmetry related to plant and leaf size in *Miconia albicans*, a common Melastomataceae species? *Braz J Biol*. 2022;84:e260884. DOI: 10.1590/1519-6984.260884.
10. Zakharov VM, Trofimov IE. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress. *Emerg Top Life Sci*. 2022;6(3):295-301. DOI: 10.1042/ETLS20210274.
11. Kozlov MV. How reproducible are the measurements of leaf fluctuating asymmetry? *Peer J*. 2015;3:e1027. DOI: 10.7717/peerj.1027.
12. Stephen MY, Stephen CL, Paul H. Measurement Error and Morphometric Studies: Statistical Power and Observer Experience. *Systematic Biology*. 2022;41:471-482. DOI: 10.1093/sysbio/41.4.471.
13. Mendes G, Boaventura MG, Cornelissen T. Fluctuating Asymmetry as a Bioindicator of Environmental Stress Caused by Pollution in a Pioneer Plant Species. *Environ Entomol*. 2018;47(6):1479-1484. DOI: 10.1093/ee/nvy147.
14. Mabrouk L, Mabrouk W, Mansour HB. High leaf fluctuating asymmetry in two native plants growing in heavy metal-contaminated soil: the case of Metlaoui phosphate mining basin (Gafsa, Tunisia). *Environ Monit Assess*. 2020;192(6):406. DOI: 10.1007/s10661-020-08385-0.
15. *Metodicheskie rekomendatsii po vypolneniyu otsenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivykh sushchestv (otsenka stabil'nosti razvitiya zhivykh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur)*. Moscow: Publishing House of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation; 2003. 21 p. (In Russ.).

16. Zatsepina AA, Narizhnyak DD, Kulakova NN. Bioindication of the environment of Krasnoyarsk using the fluctuating asymmetry of the Hungarian lilac leaf. *Jekologicheskoe obrazovanie i prirodopol'zovanie v innovacionnom razvitiu regiona*. 2016 Apr 22; Krasnoyarsk: Publishing House of the SibSTU. 2016. P. 299–301. (In Russ.).
17. Polonskiy V.I. Ispol'zovanie fluktuiruyushchey asimmetrii suprotivnykh list'ev *Syringa josikaea* Jacq. v bioindikacii zagryazneniya g. Krasnoyarska. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016;1(21):77-82. (In Russ.).
18. Anoshkina LV. *Sostoyanie drevesnykh porod v urbanizirovannoy srede g. Bratska*. Bratsk: BRGU, 2011. 182 p. (In Russ.).

Статья принята к публикации 23.09.2025 / The article accepted for publication 23.09.2025.

Информация об авторах:

Наталья Михайловна Назарова, руководитель научной группы ботанического сада, кандидат биологических наук

Information about the authors:

Natalya Mikhailovna Nazarova, Head of the Research Group at the Botanical Garden, Candidate of Biological Sciences

