

УДК 581.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ
АСИММЕТРИИ ЛИСТА БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ И ЛИПЫ
МЕЛКОЛИСТНОЙ В ГРАДИЕНТЕ АВТОТРАНСПОРТНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Е. А. ЕРОФЕЕВА *, В. С. ЛОСЕВА **, Е. В. ЯМУШЕВА ***

*Кафедра экологии ФГАОУ ВО, Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия*

Флуктуирующая асимметрия (ФА) листа растений используется для биоиндикации и при экологическом мониторинге. Однако видовые особенности ответов различных ФА признаков листа изучены недостаточно. Анализ этой проблемы на примере ФА листа *Betula pendula* и *Tilia cordata* при автотранспортном загрязнении воздуха показал, что у вида более устойчивого к загрязнению (*T. cordata*) ФА не изменялась на загрязненных участках. Однако у вида более чувствительного к загрязнению (*B. pendula*) отмечалось увеличение ФА в трех из пяти промеров листа в градиенте загрязнения, при этом интегральный показатель ФА не изменялся. Таким образом, при использовании ФА листа растений в мониторинге необходимо учитывать видовую устойчивость растений к поллютантам и различную чувствительность ФА признаков листа к загрязнению.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.298>

Keywords: fluctuating asymmetry, motor transport, developmental stability, developmental noise, pollutants, leaf measurements.

Введение. В настоящее время автомобильный транспорт является одним из основных источников загрязнения окружающей среды в мегаполисах, что обусловлено быстрым ростом автотранспортного парка [1]. Так, в 2000 г. на территории Российской Федерации выбросы автотранспорта в атмосферный воздух составили 89,2% от суммарного количества загрязняющих веществ, поступивших от всех подвижных источников загрязнения [2]. Данная проблема характерна как для развивающихся стран, так и для индустриально развитых государств с высоким уровнем экологизации автотранспорта [3]. Автомобильные средства вызывают световое и шумовое загрязнение, являются источником поступления в окружающую среду различных химических поллютантов.

* E-mail: ele77785674@yandex.ru

** E-mail: inquotes@mail.ru

*** E-mail: yamusheva9helen@gmail.com

Флуктуирующая асимметрия (ФА) листа березы повислой и липы мелколистной используется в биоиндикации для оценки уровня химического загрязнения на городских территориях. Кроме того, данный показатель является индикатором стабильности развития билатеральных признаков листа в стрессовых условиях среды, в том числе при воздействии поллютантов, и используется для изучения закономерностей морфогенеза листа при средовом стрессе [4–7].

Полагают, что любые стрессоры вызывают увеличение ФА. В то же время известно, что иногда низкий уровень загрязнения приводит к снижению ФА или не влияет на нее [8, 9]. Поэтому актуальной проблемой является изучение закономерностей изменения интегрального показателя ФА и ФА отдельных признаков листа в значительном градиенте концентраций поллютантов, в том числе содержащихся в выхлопах автотранспорта. Липа мелколистная и береза повислая широко используются в озеленении городов и имеют различную устойчивость к газообразным поллютантам выхлопов автотранспорта и могут быть использованы для изучения выше указанной проблемы.

Целью работы являлось изучение в сравнительном плане изменения интегрального показателя ФА и ее значений у отдельных признаков листа березы повислой (*Betula pendula* Roth) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях автотранспортного загрязнения на территории г. Нижний Новгород.

Для решения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) изучить и оценить изменение интегрального показателя ФА листа, а также ФА отдельных признаков листа липы и березы при воздействии автотранспортного загрязнения;
- 2) провести сравнительный анализ изменения интегрального показателя ФА листа липы и березы, произрастающих на участках с одинаковым уровнем автотранспортного загрязнения;
- 3) оценить качество окружающей среды на придорожных территориях по балльной шкале для интегрального показателя ФА листа березы.

Материалы и методы исследования. Для оценки величины ФА листа на каждом участке собирали по 10 листьев с каждого из 10 деревьев березы повислой и липы мелколистной ($n = 100$ для каждого вида деревьев). Собирали зрелые листья с укороченных побегов у березы и со зрелых удлиненных побегов липы. После сбора листовые пластинки сканировали не позднее 4 дней хранения в холодильнике.

Были собраны листья липы и березы на 6 загрязненных участках нагорных районов г. Нижний Новгорода: пр. Гагарина (ост. Ул. Лебедева), ул. Белинского, ул. Невзоровых, пр. Гагарина (возле ННГУ им. Лобачевского), ул. Тимирязева, ул. Медицинская. Контрольный участок для березы был в 20 км к северу от города вблизи п. Киселиха, а для липы – на территории лесопарка “Щелоковский хутор”.

Измерение признаков листовых пластинок проводилось по электронным изображениям с помощью программы Adobe Photoshop CS6. В процессе работы было измерено 5 морфологических признаков листа (рис. 1).



Рис. 1. Промеры листовой пластинки [10]:

- 1 – ширина половины листа в районе половины длины центральной жилки;
- 2 – длина второй от основания листа жилки второго порядка;
- 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка;
- 4 – расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка;
- 5 – угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка.

Интегральный показатель (ИП) ФА листовой пластинки \bar{A} рассчитывали по алгоритму нормированной разности [11]:

$$\bar{A} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{|L_{ij} - R_{ij}|}{(L_{ij} + R_{ij})},$$

где L_{ij} и R_{ij} – значение j -го признака у i -го листа соответственно слева и справа от плоскости симметрии; m – количество анализируемых признаков; n – объем выборки листьев.

По бальной шкале для интегрального показателя величины ФА листа определяли уровень загрязнения окружающей среды [10].

Таблица 1

Максимально-разовый выброс (г/с) автотранспортом загрязняющих веществ в г. Нижнем Новгороде в 2021г.

Участок	Поток автотранспорта, автомаш. / ч	СО	Азота диоксид оксид	Углеводороды	Оксиды серы (на SO ₂)	Формальдегид Бенз(а)пирен
Контроль	0	0	0	0	0	0
ул. Невзоровых	283	0,37	$\frac{0,085}{0,011}$	0,057	0,002	$\frac{0,0003}{0,00000003}$
ул. Медицинская	882	1,15	$\frac{0,265}{0,035}$	0,176	0,007	$\frac{0,0009}{0,00000008}$
ул. Тимирязева	1092	1,42	$\frac{0,327}{0,044}$	0,218	0,009	$\frac{0,0011}{0,00000010}$
ул. Белинского	2324	3,02	$\frac{0,697}{0,093}$	0,465	0,019	$\frac{0,0023}{0,00000023}$
Пр. Гагарина (ост. ул. Лебедева)	3702	4,81	$\frac{1,111}{0,148}$	0,741	0,030	$\frac{0,0037}{0,00000037}$
пр. Гагарина (ост. Университет)	4557	5,92	$\frac{1,367}{0,182}$	0,911	0,037	$\frac{0,0046}{0,00000046}$

Максимальный разовый выброс загрязняющих веществ (оксиды углерода, серы, азота; формальдегид; бенз(а)пирен; углеводороды) был рассчитан в программе “Автомобиль” на основе данных о потоке автотранспорта в 2021 г. (табл. 1).

Результаты исследований и их обсуждение. Статистический анализ показал, что ИП ФА листа липы не различался у деревьев на изученных участках. Кроме того, с помощью регрессионного анализа было показано, что данный показатель листа не зависел от уровня автотранспортного загрязнения. Аналогичные данные были получены для ФА всех промеров листа липы (данные не представлены на рисунках). Эти факты указывают на способность липы поддерживать стабильность развития билатеральной симметрии листа даже при значительном уровне загрязнения воздуха.

ИП ФА листа березы не различался у деревьев на изученных участках. Кроме того, с помощью регрессионного анализа было показано, что данный показатель листа березы не зависел от уровня автотранспортного загрязнения (рис. 2). Однако, для ФА первого и четвертого признаков листа были получены линейные зависимости от уровня загрязнения воздуха (рис. 3, 4) (в качестве примера представлены зависимости от выброса диоксида серы автотранспортом). ФА этих признаков линейно увеличивалась при возрастании загрязнения и статистически значимо отличалась от контроля на наиболее загрязненных участках, что полностью соответствует литературным данным о нарушении стабильности развития листа средовыми стрессорами и увеличении его ФА в стрессовых условиях. В то же время у остальных признаков ФА не зависела от загрязнения, хотя ФА второго признака статистически значимо увеличивалась при загрязнении (рис. 5).

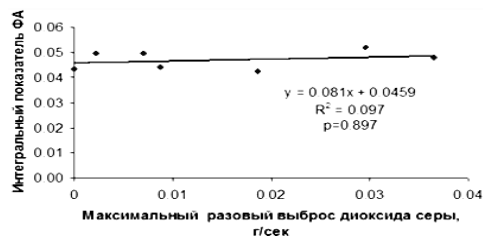


Рис. 2. Зависимость ИП ФА листа березы от уровня автотранспортного загрязнения воздуха.

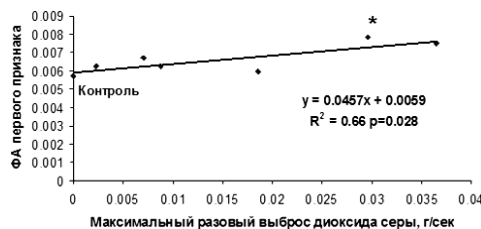


Рис. 3. Зависимость ФА первого признака листа березы от уровня автотранспортного загрязнения воздуха (* – статистически значимо отличается от контроля при $p < 0,05$).

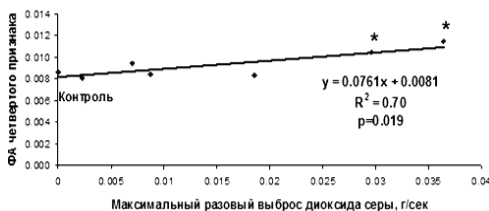


Рис. 4. Зависимость ФА четвертого признака листа березы от уровня автотранспортного загрязнения воздуха (* $p < 0,05$).



Рис. 5. Зависимость ФА второго признака листа березы от уровня автотранспортного загрязнения воздуха (* $p < 0,05$).

Наши данные факты показывают, что разные промеры листа обладают разной чувствительностью к поллютантам выхлопов. По-видимому, это было причиной того, что для ИП не было выявлено влияние загрязнения. Отсутствие изменения ФА “малочувствительных” признаков листа маскировало ответы на

загрязнение “высокочувствительных” признаков. Таким образом, наши данные показывают необходимость анализа чувствительности ФА каждого признака к воздействию поллютантов при выборе признаков для расчета ИП ФА листа, который предполагается использовать в биоиндикации.

Статистический анализ показал, что ИП ФА листа березы на контрольном и всех загрязненных участках был статистически значимо выше, чем у липы (рис. 6). Это указывает, что существуют видовые особенности стабильности развития билатеральной симметрии листа у древесных растений и данный показатель существенно выше у липы по сравнению с березой. Таким образом, липа способна эффективно уменьшать онтогенетический шум при развитии билатеральных морфологических структур листа даже в стрессовых условиях среды на загрязненных участках. Возможно, это обусловлено более мощной антиоксидантной защитой липы мелколистной, которая является теневыносливым видом и отличается по сравнению с березой высоким содержанием каротиноидов в листьях. Каротиноиды, кроме функции дополнительных светосборщиков, являются эффективными антиоксидантами. По-видимому, они способны препятствовать окислительному повреждению белков, регулирующих морфогенез листа и таким образом уменьшать онтогенетический шум при развитии листа и его флуктуирующую асимметрию.

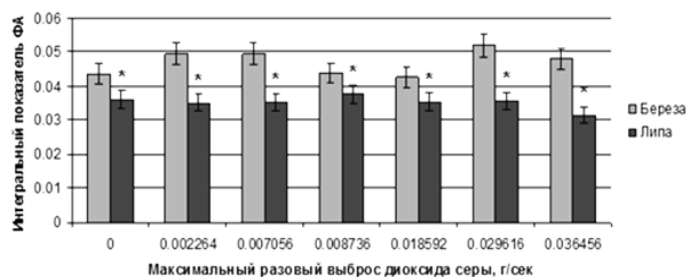


Рис. 6. Сравнительный анализ ИП ФА листа березы и липы на контрольных и загрязненных участках (* $p < 0,05$).

Для оценки окружающей среды на придорожных территориях использовали балльную шкалу для интегрального показателя ФА листа березы (табл. 2).

Таблица 2

Пятибалльная шкала оценки качества окружающей среды по величине ИП ФА листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth) [11]

Величина интегрального показателя ФА	Стабильность развития в баллах	Качество среды
<0,040	1	условно нормальное
0,040÷0,044	2	начальные (незначительные) отклонения от нормы
0,045÷0,049	3	средний уровень отклонений от нормы
0,050÷0,054	4	существенные (значительные) отклонения от нормы
>0,054	5	критическое состояние

Были получены следующие баллы качества среды для изученных придорожных участков (табл. 3).

Таблица 3

Оценка качества окружающей среды по величине ИП ФА листовой пластинки березы повислой на придорожных участках Нижнего Новгорода

Участок	Величина интегрального показателя ФА	Стабильность развития в баллах	Качество среды
Контроль	0,04354	2	начальные (незначительные) отклонения от нормы
ул. Невзоровых	0,049634	3	средний уровень отклонений от нормы
ул. Медицинская	0,049617	3	средний уровень отклонений от нормы
ул. Тимирязева	0,044084	2	начальные (незначительные) отклонения от нормы
ул. Белинского	0,042588	2	начальные (незначительные) отклонения от нормы
пр. Гагарина (ост. ул. Лебедева)	0,051979	4	существенные (значительные) отклонения от нормы
пр. Гагарина (ост. Университет)	0,04804	3	средний уровень отклонений от нормы

Из табл. 3 следует, что баллы качества не увеличиваются при возрастании уровня загрязнения, как это следовало бы ожидать. Это также может быть связано с разной чувствительностью ФА признаков листа к средовому стрессу.

Таким образом, полученные результаты указывают на значительную устойчивость морфогенеза листа липы к загрязнению по сравнению с данным процессом у березы. В то же время ФА разных признаков листа березы отличается по чувствительности к загрязнению, что влияет на зависимость ИП ФА от уровня загрязнения. Данные факты следует учитывать при использовании ФА листа древесных растений в биоиндикации.

Заключение. В результате работы были сделаны следующие выводы:

1. ИП ФА листа липы и ФА отдельных признаков листа не зависели от уровня автотранспортного загрязнения воздуха.
2. ИП ФА листа березы не зависел от уровня автотранспортного загрязнения воздуха. Однако ФА первого и четвертого признаков листа березы линейно возрастала при увеличении антропогенной нагрузки.
3. ИП ФА листа березы был существенно выше данного показателя у липы на контрольном и загрязненном участках.

При возрастании уровня автотранспортного загрязнения воздуха не наблюдалось увеличение баллов качества окружающей среды. Таким образом, бальная оценка качества среды по ИП ФА листа березы не соответствовала реальному уровню загрязнения на придорожных территориях.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 11.06.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Белкина Т.Д. *Состояние городов России*. Москва, Город–Регион–Семья (2008), 146.
2. Денисов В.Н., Рогалев В.А. *Проблемы экологизации автомобильного транспорта*. СПб., МАНЕБ (2005), 312.
3. Денисов В.Н. *Приоритетные направления повышения экологической безопасности дорожно-транспортных систем в крупных городах России. Экологические проблемы мегаполисов и промышленных агломераций*. СПб., Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет) (2010), 72–80.
4. Калякина Р.Г., Журавлев А.С., Дмитриев А.А. Влияние удаленности от автомобильной дороги на величину асимметрии листовой пластинки березы повислой. *Актуальные проблемы лесного комплекса* 47 (2017а), 113–116.
5. Калякина Р.Г., Бурлуцкий А.Ю., Дмитриев А.А. Влияние автотранспорта на состояние придорожных полос г. Оренбурга. *Актуальные проблемы лесного комплекса* 47 (2017б), 107–110.
6. Мамиева Е.Б., Ширнина Л.В. Липа мелколистная как биоиндикатор загрязнения атмосферного воздуха тяжелыми металлами. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета* 1 (2017), 34–40.
<https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2017.1.34>
7. Zverev V., Lama A.D., Kozlov M.V. Fluctuating Asymmetry of Birch Leaves did not Increase with Pollution and Drought Stress in a Controlled Experiment. *Ecological Indicators* 84 (2018), 283–289.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.058>
8. Kozlov M.V., Zverev V. Temperature and Herbivory, but not Pollution, Affect Fluctuating Asymmetry of Mountain Birch Leaves: Results of 25-year Monitoring around the Copper-Nickel Smelter in Monchegorsk, Northwestern Russia. *Science of the Total Environment* 640–641 (2018), 678–687.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.328>
9. Sandner M.T., Matthies D. Fluctuating Asymmetry of Leaves is a Poor Indicator of Environmental Stress and Genetic Stress by Inbreeding in *Silene vulgaris*. *Ecological Indicators* 79 (2017), 247–253.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.030>
10. Захаров В.М., Трофимов И.Е. *Здоровье среды. Человек и природа*. Москва, Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. Центр устойчивого развития и здоровья среды ИБР РАН. Центр экол. политики России (2015), 96.
11. Захаров В.М. и др. *Здоровье среды: практика оценки*. Москва, Центр экол. политики России (2000), 318.

Ե. Ա. ԵՐՈՖԵԵՎԱ, Վ. Ս. ԼՈՍԵՎԱ, Ե. Վ. ՅԱՍՈՒՇԵՎԱ

ԿԵԶՈՒ ԵՎ ՄԱՆՐԱՏԵՐԵՎ ԼՈՐԵՆՈՒ ՏԵՐԵՎՆԵՐԻ ՏԱՏԱՆՎՈՂ
ԱՍԻՄԵՏՐԻԱՅԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ՕԴԻ ԱՎՏՈՏՐԱՆՍՊՈՐՏԱՅԻՆ
ԱՂՏՈՏՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԳՐԱԴԻԵՆՏՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Բույսերի տերևների տատանվող անհամաչափությունը (ՏԱ) օգտագործվում է կենսաինդիկացիայի և շրջակա միջավայրի մոնիթորինգի համար:

Այնուամենայնիվ, տերևների տարբեր գծերին ՏԱ արձագանքների տեսակային առանձնահատկությունները բավականաչափ ուսումնասիրված չեն: Այս խնդրի վերլուծությունը, օգտագործելով *Betula pendula*-ի և *Tilia cordata*-ի տերևների օրինակը, օդի աղտոտվածության ժամանակ, որն առաջացել է ավտոմոբիլային տրանսպորտային միջոցներից, ցույց տվեց, որ աղտոտվածության նկատմամբ ավելի դիմացկուն տեսակի (*T. cordata*) ՏԱ-ն չի փոխվել աղտոտված տարածքներում: Այնուամենայնիվ, աղտոտման նկատմամբ ավելի զգայուն տեսակում (*B. pendula*) ՏԱ-ի աճ է նկատվել աղտոտման գրադիենտի հինգ տերևների չափումներից երեքում, մինչդեռ ինտեգրալ ՏԱ ցուցանիշը չի փոխվել: Այսպիսով, մոնիթորինգում բույսերի տերևների ՏԱ-ն օգտագործելիս անհրաժեշտ է հաշվի առնել բույսերի տեսակային դիմադրությունը աղտոտող նյութերի նկատմամբ և տերևների հատկությունների ՏԱ-ի տարբեր զգայունությունը աղտոտման նկատմամբ:

E. A. EROFEEVA, V. S. LOSEVA, E. V. YAMUSHEVA

COMPARATIVE ANALYSIS OF CHANGES IN THE FLUCTUATING ASYMMETRY OF THE HANGING BIRCH AND SMALL-LEAVED LINDEN LEAVES IN THE GRADIENT OF ROAD TRANSPORT AIR POLLUTION

Summary

The fluctuating asymmetry (FA) of a plant leaf is used for bioindication and environmental monitoring. However, the specific features of FA responses of various leaf traits to air pollution have not been studied sufficiently. Analysis of this issue using the example of *Betula pendula* and *Tilia cordata* leaf with roadside air pollution has shown that FA did not change in the polluted areas in the species, which is more resistant to pollution (*T. cordata*). However, in the species, which is more sensitive to pollution (*B. pendula*), there was an increase in the FA of three out of five leaf measurements in the pollution gradient, while the integral FA indicator did not change. Thus, when using the FA of a plant leaf in monitoring, it is necessary to take into account the species resistance of plants to pollutants and the different sensitivity of the leaf FA traits to air pollution.