

© Ю. А. Штирц

**ПОКАЗАТЕЛЬ ПСЕВДОСИММЕТРИИ ФОРМЫ ЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНКИ
POPULUS NIGRA L. В УСЛОВИЯХ ПРИДОРΟЖНЫХ НАСАЖДЕНИЙ Г. ДОНЕЦКА**

ГУ «Донецкий ботанический сад»

283059, г. Донецк, пр. Ильича, 110; e-mail: strelkova@i.ua

Штирц Ю. А. Показатель псевдосимметрии формы листовой пластинки *Populus nigra* L. в условиях придорожных насаждений г. Донецка. – Проведена оценка показателя псевдосимметрии (степени инвариантности) формы листовой пластинки *Populus nigra* L. с использованием программы Biological Pseudosymmetry (BioPs). Материал собран в периоды листопада с 2012 по 2017 гг. в придорожных насаждениях г. Донецка, расположенных вдоль автодорог с различной интенсивностью движения транспорта. Показатель псевдосимметрии формы листовой пластинки *P. nigra* анализируемых выборок варьирует от 0,6108 до 0,9760. Характерно преобладание листовых пластинок с показателем псевдосимметрии не менее 0,9000. Анализируемый показатель характеризуется низкими значениями варьирования – коэффициент вариации составляет менее 10,00%. С целью сравнения значений исследуемого показателя с использованием t-критерия Стьюдента с 95% мощностью на 5% уровне значимости рекомендуемый минимальный размер выборки составляет 36 листовых пластинок, на 1% уровне значимости – 49 листовых пластинок *P. nigra*. Для выборки листьев городского парка и придорожных насаждений города с различной интенсивностью движения автотранспорта статистически достоверных различий показателя псевдосимметрии формы не выявлено.

Ключевые слова: листовая пластинка, псевдосимметрия, форма, *Populus nigra* L., придорожные насаждения

Введение

Листья являются наиболее чувствительными к условиям окружающей среды органами растений, под влиянием различных факторов в них происходят морфологические изменения [17]. По мнению многих авторов, изменение морфологии листьев одного и того же вида связано со сменой условий его произрастания [1, 3-7, 12, 14, 15, 19, 20, 23, 28, 29]. Факторы внешней среды, воздействуя на развивающиеся листья, оказывают существенное влияние на становление особенностей их окончательной структуры и формы [14, 24, 27].

Одной из фундаментальных проблем в современной биологии является проблема симметрии (асимметрии). Симметричным называется объект, который состоит из частей, равных относительно какого-либо признака [18]. Симметрия представляет собой фундаментальную особенность природы, охватывающую все формы движения и организации материи. Она представляет собой понятие, характеризующее переход объектов в самих себя или друг в друга при осуществлении над ними определенных преобразований; в широком плане – свойство неизменности (инвариантности) некоторых сторон, процессов и отношений объектов относительно некоторых преобразований [15]. Симметрия морфологической структуры представляет собой повторение её частей в различных положениях и конфигурациях [25]. В природе чаще всего встречаются лишь приблизительно симметричные объекты, об инвариантности которых относительно операций симметрии также можно говорить лишь приблизительно [18].

Возникновение билатеральной симметрии является важным эволюционным достижением, раскрывающим большие возможности для дифференцировки организма [6]. Согласно описанию типов билатеральной симметрии [26], листовая пластинка большинства древесных представляет собой пример объектной билатеральной симметрии, так как ось симметрии проходит непосредственно через анализируемый объект. При данном типе относительное расположение двух половин является составным аспектом симметрии целой структуры [25]. Билатеральная асимметрия представляет собой комплекс наследующихся и ненаследующихся видов асимметрии [2].

Целью наших исследований являлась оценка показателя псевдосимметрии (степени инвариантности) формы листовой пластинки *Populus nigra* L. в придорожных насаждениях г. Донецка.

P. nigra встречается в биотопах различных типов, что даёт возможность исследовать морфологическую изменчивость его листовой пластинки в условиях различных экологических факторов и в дальнейшем оценить перспективность применения этого вида в качестве биоиндикатора состояния окружающей среды. Данный вид проявляет также высокую степень устойчивости в условиях города [16]. Следует отметить существенную роль *P. nigra* как эдификатора в условиях трансформированных экосистем [21], поэтому изучение различных аспектов его морфологической изменчивости как проявление устойчивости является актуальной задачей.

Материал и методика исследования

Материал собран в периоды листопада с 2012 по 2017 гг. в придорожных насаждениях г. Донецка, расположенных вдоль автодорог с различной интенсивностью движения транспорта. Периоды листопада выбраны с целью рандомизации выборки. Сбор листьев осуществлялся с древесных растений зрелой стадии генеративного периода, находящихся в непосредственной близости от автомобильных дорог: расстояние от проезжей части до ствола дерева не превышало 1,5 м. Определение возрастного состояния деревьев проводилось по системе О. В. Смирновой и др. [11]. Ввиду того, что данный вид обладает высокой склонностью к гибридизации с близкородственными видами, выбирали экземпляры растений с чётко выраженными морфологическими признаками, подтверждающими видовую принадлежность.

Согласно С. В. Капанову [8], интенсивность автомобильного движения на участке автомагистрали – это количество автомобильных средств, прошедших данный участок за единицу времени в обоих направлениях. Принимая это во внимание, мерой интенсивности движения автотранспорта послужила средняя величина количества транспортных средств, проходящих через поперечное сечение дороги за 1 час в светлое время суток в обоих направлениях. Выделены две градации интенсивности движения транспорта на дорогах, вдоль которых располагались исследуемые участки насаждений: 1) свыше 1200 авт./час; 2) 600-800 авт./час (приведенные показатели автотранспортной нагрузки отражают средние круглогодичные показатели). Автомагистрали, в придорожных насаждениях которых осуществлялся сбор материала, располагались в кварталах многоэтажной жилой застройки города и имели асфальтобетонное покрытие. Для сравнения анализируемых параметров листовых пластинок *P. nigra* в придорожных насаждениях города с параметрами листовых пластинок данного вида из менее трансформированных экосистем, собраны листья на территории Центрального парка культуры и отдыха им. А. С. Щербакова. Данная территория принята нами в качестве условного контроля.

Листья были отсканированы при помощи сканера Epson Perfection V33 с разрешением 300 пикселей на дюйм.

С целью оценки симметричности листовой пластинки использована программа для расчета степени псевдосимметрии относительно зеркального отражения для плоских билатерально симметричных объектов – Biological Pseudosymmetry (BioPs) – биологическая псевдосимметрия. Оценка псевдосимметрии в этом случае основана на выражении интегральной свёртки:

$$\eta = \frac{\sum_{i,j} A_{i,j} \cdot B_{i,j}}{\sum_{i,j} A_{i,j}^2},$$

где η – степень симметричности, A – матрица яркостей исходного изображения, B – матрица яркостей, полученная в результате отражения матрицы A относительно выбранной плоскости. Так как мы имеем дело с суммой положительных чисел, задающих яркости пикселей, то диапазон изменения степени симметрии лежит в пределах от нуля (для полностью несимметричного объекта) до единицы (для абсолютно симметричного). При расчёте степени псевдосимметрии реализован подход без учёта яркостей пикселей, при этом

неоднородности внутри объекта не учитываются. Яркость пикселей фона равна 0, а яркость пикселей объекта равна 255. Другими словами, для программы объект выглядит как белое пятно на чёрном фоне, с проведенной через него (объект) плоскостью симметрии [10, 15]. Таким образом, учитывалась степень инвариантности формы без учёта степени яркости окраски листа. Выбор плоскости отражения осуществлялся по нескольким точкам средней жилки методом наименьших квадратов.

Размеры выборок при проведении исследований значительно превышали рекомендуемые минимальные объёмы, установленные соответствующими вычислениями. Минимальные размеры выборок для определения информативных средних показателей рассчитывали согласно рекомендациям, приведенным в работе М. В. Козлова [9], в частности с использованием формулы вычисления объёма выборки из бесконечной генеральной совокупности. Оценка достоверности различий сравниваемых параметров проведена с использованием t-критерия Стьюдента. Минимальные размеры выборок для проведения информативного сравнения с учётом статистической мощности проведены по формулам, приведенным в работе М. Bland [22]. Расчёт значений коэффициента и размаха вариации проводили по формулам, приведенным в работе Г. Ф. Лакина [13]. Статистическая обработка данных проведена с применением пакета Statistica 6.0.

Результаты и обсуждение

Показатель псевдосимметрии (степени инвариантности) формы листовой пластинки *P. nigra* анализируемых выборок варьирует от 0,6108 до 0,9760, коэффициент вариации составляет 5,81%, размах вариации – 0,3652.

Для визуального восприятия диапазона изменчивости псевдосимметрии на рис. 1 отражены листовые пластинки с минимальным и максимальным значениями показателя.

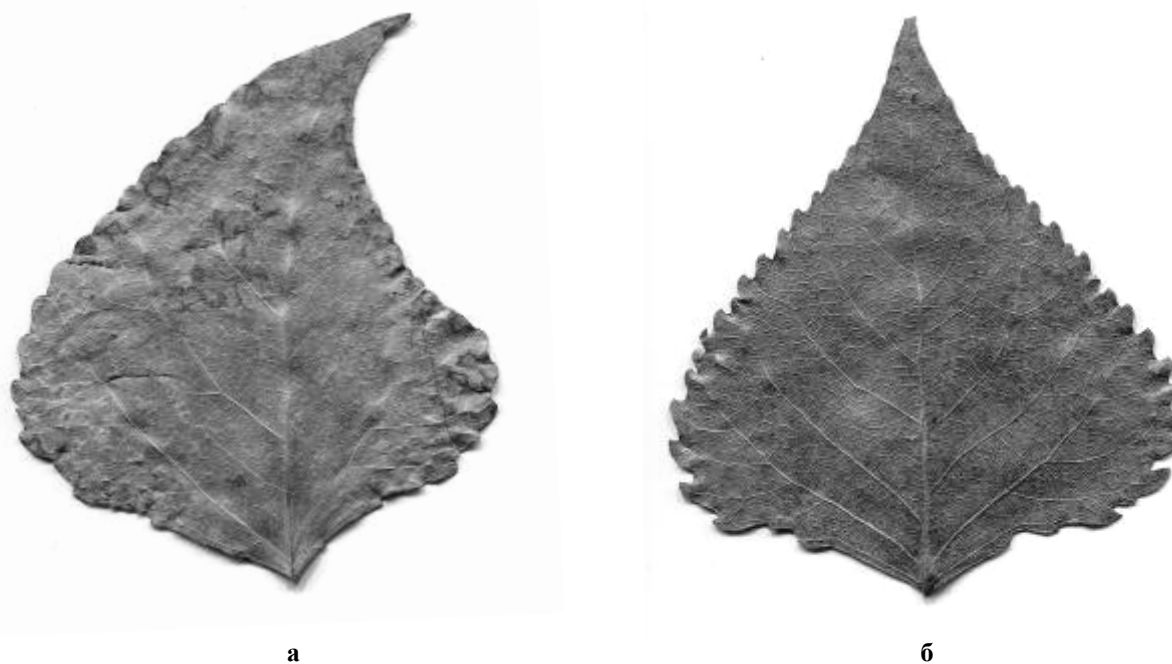


Рис. 1. Листовые пластинки *Populus nigra* L. с минимальным и максимальным значениями показателя псевдосимметрии формы: а) с минимальным значением (0,6108); б) с максимальным значением (0,9760)

Согласно расчётам, проведенным в соответствии с рекомендациями М. В. Козлова [9], минимальный размер выборки для определения информативных средних показателей псевдосимметрии формы листовой пластинки составляет 15 листьев.

Минимальные размеры выборок, необходимые для информативного сравнения показателя псевдосимметрии листовой пластики с использованием t-критерия Стьюдента с учётом статистической мощности отражены в табл. 1.

Минимальные размеры выборок, необходимые для информативного сравнения показателя псевдосимметрии (степени инвариантности) формы листовой пластинки *Populus nigra* L. с использованием t-критерия Стьюдента с учётом различной статистической мощности

Статистическая мощность, %	80%		90%		95%	
	Уровень значимости		Уровень значимости		Уровень значимости	
	P = 0,05	P = 0,01	P = 0,05	P = 0,01	P = 0,05	P = 0,01
Минимальный размер выборки	21,19	31,61	28,37	40,26	35,02	48,12

Таким образом, с целью сравнения значений показателя псевдосимметрии листовой пластинки с использованием t-критерия Стьюдента с 80% мощностью на 5% уровне значимости рекомендуемый минимальный размер выборки должен составить 22 листовые пластинки, в то время как размер выборки в 49 листьев позволяет выявить различия в значениях псевдосимметрии с 95% мощностью на 1% уровне значимости.

Придорожные насаждения автодорог с интенсивностью движения свыше 1200 авт./час.

Показатель псевдосимметрии листовой пластинки варьирует от 0,7375 до 0,9734, размах вариации составляет 0,2359, коэффициент вариации – 6,91%, среднее значение – $0,9112 \pm 0,02087$ (здесь и далее указан доверительный интервал для $P = 0,05$).

Придорожные насаждения автодорог с интенсивностью движения 600-800 авт./час.

Показатель псевдосимметрии листовой пластинки варьирует от 0,6108 до 0,9685, размах вариации составляет 0,3577, коэффициент вариации – 7,09%, среднее значение – $0,9127 \pm 0,02146$.

Городской парк (Центральный парк культуры и отдыха им. А. С. Щербакова).

Показатель псевдосимметрии листовой пластинки варьирует от 0,7792 до 0,9760, размах вариации составляет 0,1968, коэффициент вариации – 4,22%, среднее значение – $0,9262 \pm 0,00949$.

В результате сравнения показателя псевдосимметрии выборок листьев *P. nigra* городского парка и придорожных насаждений города с различной интенсивностью движения автотранспорта статистически достоверных различий не выявлено (табл. 2).

Отсутствие достоверных различий между показателями псевдосимметрии выборок листовых пластинок городского парка и придорожных насаждений автодорог с различной интенсивностью движения автотранспорта может быть связано, с одной стороны, с относительной степенью устойчивости *P. nigra* к влиянию комплекса факторов, связанных с автотранспортным потоком, с другой стороны, с низкой чувствительностью анализируемого показателя применительно к данным условиям либо данному виду (следует отметить, что нет оснований утверждать о низкой информативности данного показателя в целом, речь идёт об его применении в конкретной ситуации и к конкретному виду).

Анализ распределения значений показателя псевдосимметрии листовой пластинки всей совокупности выборок показал следующее: листовые пластинки со значением показателя псевдосимметрии менее 0,7000 составляют менее 1,0%, 0,7000-0,7999 составляют 3,7%, со значениями 0,8000-0,8999 – 17,8%, 0,9000 и более – 77,8% объединённой выборки. Распределение листовых пластинок *P. nigra* соответственно значению показателя псевдосимметрии (степени инвариантности) формы отражено на рис. 2.

**Оценка достоверности различий показателя псевдосимметрии
(степени инвариантности) формы листовой пластинки *Populus nigra* L.**

Места сбора листьев	Придорожные насаждения автодорог с интенсивностью движения свыше 1200 авт./час	Придорожные насаждения автодорог с интенсивностью движения 600-800 авт./час	Городской парк
Придорожные насаждения автодорог с интенсивностью движения свыше 1200 авт./час	0,9112 ± 0,02087**	0,924125*	0,145848*
Придорожные насаждения автодорог с интенсивностью движения 600-800 авт./час	различия статистически недостоверны***	0,9127 ± 0,02146**	0,196084*
Городской парк	различия статистически недостоверны***	различия статистически недостоверны***	0,9262 ± 0,00949**

Примечание. * – значение Р, при котором может быть отвергнута нулевая гипотеза; ** – среднее значение псевдосимметрии листовой пластинки (доверительный интервал указан для Р = 0,05); *** – оценка достоверности различий.

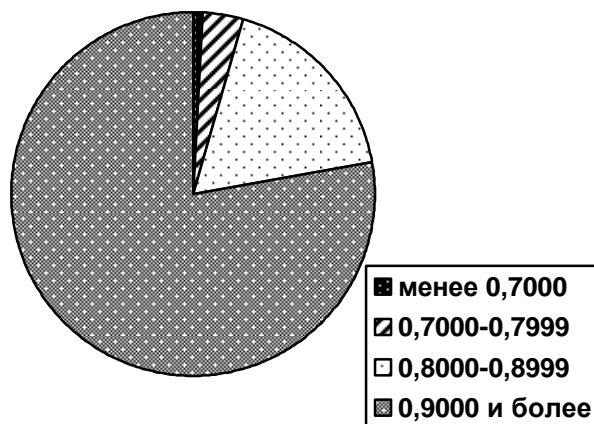


Рис. 2. Распределение листовых пластинок *Populus nigra* L. соответственно значению показателя псевдосимметрии (степени инвариантности) формы

Выводы

Показатель псевдосимметрии (степени инвариантности) формы листовой пластинки *P. nigra* анализируемых выборок варьирует от 0,6108 до 0,9760. Характерно преобладание листовых пластинок с показателями псевдосимметрии не менее 0,9000.

Показатель псевдосимметрии формы листовой пластинки характеризуется низкими значениями варьирования – коэффициент вариации составляет менее 10,00%.

С целью сравнения значений исследуемого показателя с использованием t-критерия Стьюдента с 95% мощностью на 5% уровне значимости рекомендуемый минимальный размер выборки составляет 36 листовых пластинок, на 1% уровне значимости – 49 листовых пластинок *P. nigra*.

Для выборок листьев *P. nigra* городского парка и придорожных насаждений города с различной интенсивностью движения автотранспорта статистически достоверных различий показателя псевдосимметрии формы не выявлено.

Список литературы

1. Андреева М. В. Оценка состояния окружающей среды в насаждениях в зонах промышленных выбросов с помощью растений-индикаторов : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : спец. 06.03.03 «Лесоведение и лесоводство, лесные пожары и борьба с ними» / М. В. Андреева. – СПб., 2007. – 20 с.
2. Баранов С. Г. К вопросу об использовании гармонического анализа в феногенетических исследованиях / С. Г. Баранов, А. В. Малеев // Математическая морфология. – 2009. – Т. 8, вып. 3. – С. 1-10.
3. Бессонова Н. В. Использование метода биоиндикации для оценки экологического состояния различных районов в г. Хабаровске / Н. В. Бессонова // Леса России в XXI веке : матер. I Междунар. науч.-практ. конф. (июль 2009 г.). – СПб. : ЛТА, 2009. – С. 11-13.
4. Бухарина И. Л. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде / И. Л. Бухарина, Т. М. Поварничина, К. Е. Ведерников. – Ижевск : ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007. – 216 с.
5. Зайцева И. О. Біоекологічні механізми адаптації деревних інтродуцентів у степовій зоні України : автореф. дис. ... д-ра біол. наук : спец. 03.00.16 «Екологія» / И. О. Зайцева. – Дніпропетровськ, 2012. – 40 с.
6. Здоровье среды : методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методологическое руководство для заповедников / [В. М. Захаров, А. С. Баранов, В. И. Борисов и др.]. – М. : Центр экол. политики России, 2000. – 66 с.
7. Исаков В. Н. Исследование морфологии листа древесных средствами автоматизации / В. Н. Исаков, Л. И. Висковатова, Я. Я. Лейшовник. – Рига : Зинатне, 1984. – 196 с.
8. Капранов С. В. Автотранспорт, воздух и здоровье / С. В. Капранов. – Луганск : ИПЦ «Ладо», 1998. – 200 с.
9. Козлов М. В. Планирование экологических исследований : теория и практические рекомендации / М. В. Козлов. – М. : Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 171 с.
10. Комплекс программных продуктов BioPS для автоматической количественной оценки степени псевдосимметрии растительных объектов). – [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://ecograde.belozersky.msu.ru/links/index.html>
11. Критерии выделения возрастных состояний и особенности хода онтогенеза у растений различных биоморф / [О. В. Смирнова, Л. Б. Заугольнова, Н. А. Таронова, Л. Д. Фаликов] // Ценопопуляции растений (основные понятия и структура). – М. : Наука, 1976. – Ч. I. – С. 14-43.
12. Крохмаль І. І. Еколого-біологічні детермінанти успішності інтродукції трав'янистих багаторічників в степовій зоні України : автореф. дис. ... д-ра біол. наук / І. І. Крохмаль. – К., 2016. – 53 с.
13. Лакин Г. Ф. Биометрия : уч. пос. для биол. спец. вузов / Г. Ф. Лакин. – М. : Высш. шк., 1990. – 352 с.
14. Мигалина С. В. Размеры листа берёзы как индикатор её продуктивности вдали от климатического оптимума / С. В. Мигалина, Л. А. Иванова, А. К. Махнев // Физиология растений. – 2009. – Т. 56, № 6. – С. 948-953.
15. Нижегородцев А. А. Псевдосимметрия растительных объектов как биоиндикационный показатель : теоретическое обоснование, автоматизация оценок, апробация : автореф. дис. ... канд. биол. наук : спец. 03.02.08 «Экология» / А. А. Нижегородцев. – Нижний Новгород, 2010. – 24 с.
16. Поляков А. К. Интродукция древесных растений в условиях техногенной среды / А. К. Поляков. – Донецк : Ноулидж (Донецкое отделение), 2009. – 269 с.

17. Стаковецкая О. К. Оценка экологического состояния воздушной среды методами биоиндикации / О. К. Стаковецкая, Н. А. Куликова, Е. С. Советова. – [Электронный ресурс]. Режим доступа : http://www.rusnauka.com/10_DN_2012/Ecologia/6_106476.doc.htm

18. Статистический анализ флуктуирующей асимметрии билатеральных признаков разноцветной ящурки *Eremias arguta* / [Д. Б. Гелашвили, В. Н. Якимов, В. В. Логинов, Г. В. Епланова] // Актуальные проблемы герпетологии и токсикологии : сб. науч. тр. – Тольятти, 2004. – Вып. 7. – С. 45-59.

19. Трубина Л. К. Компьютерный анализ изображений листовых пластин *Potentilla fruticosa* для биоиндикации урбанизированных территорий / Л. К. Трубина, Е. П. Храмова, А. Ю. Луговская // Экол. и природопользование. Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 263-273.

20. Хузина Г. Р. Влияние урбаноcреды на морфометрические показатели листа березы повислой (*Betula pendula* Roth) / Г. Р. Хузина // Вестник Удмурдского университета. Сер. Биол. – 2010. – Вып. 3. – С. 53-57.

21. Штирц Ю. А. Консортивные связи птиц с древесными автотрофами в условиях урбанизированного ландшафта Донбасса / Ю. А. Штирц, А. Д. Штирц // Вісник Донецького університету. Сер. А. : Природн. науки. – 2004. – Вип. 1, ч. 2. – С. 411-416.

22. Bland M. An introduction to medical statistics / M. Bland. – Oxford : Oxford University Press, 2000. – 405 p.

23. Givnish T. J. Ecological aspects of plant morphology : leaf form in relation to environment / T. J. Givnish // Acta Biotheor. – 1978. – Vol. 27. – P. 83-142.

24. Givnish T. J. Leaf and canopy adaptations in tropical forests / T. J. Givnish // Physiological ecology of plants of the wet tropics. Tasks for vegetation Science 12. – 1984. – P. 51-84. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-7299-5_6.

25. Klingenberg C. P. Analyzing fluctuating asymmetry with geometric morphometrics : concepts, methods and applications / C. P. Klingenberg. // Symmetry. – 2015. – Vol. 7. – P. 843-934. <http://dx.doi.org/10.3390/sym7020843>

26. Mardia K. V. Statistical assessment of bilateral symmetry of shapes / K. V. Mardia, F. L. Bookstein, I. J. Moreton // Biometrika. – 2000. – Vol. 87, Iss. 2. – P. 285-300. <https://doi.org/10.1093/biomet/87.2.285>

27. Niinemets Ü. Variability in leaf morphology and chemical composition as a function of canopy light environment in coexisting deciduous trees / Ü. Niinemets, O. Kull, J. D. Tenhunen // Int. J. of Plant Sciences. – 1999. – Vol. 160. – P. 837-848.

28. Niinemets Ü. Leaf shape and venation pattern alter the support investments within leaf lamina in temperate species: a neglected source of leaf physiological differentiation / Ü. Niinemets, A. Portsmouth, M. Tobias // Funct. Ecol. – 2007. – Vol. 21. – P. 28-40. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2435.2006.01221.x>

29. Vogel S. Leaves in the lowest and highest winds : temperature, force and shape / S. Vogel // New Phytologist. – 2009. – Vol. 183. – P. 13-26. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02854.x>

Shtirts Yu. A. Pseudosymmetry index of leaf blade shape of *Populus nigra* L. in conditions of roadside plantations in Donetsk. – An estimation of pseudosymmetry index (degree of invariance) of leaf blade shape of *Populus nigra* L. using the Biological Pseudosymmetry (BioPs) program was carried out. The material was collected during the fall periods from 2012 to 2017 in roadside plantations of Donetsk, located along roads with different traffic intensity. The pseudosymmetry index of the *P. nigra* leaf shape of the samples analyzed varies from 0,6108 to 0,9760. Preval of leaf blades with pseudosymmetry index of at least 0,9000. The analyzed indicator is characterized by low values of variation – the coefficient of variation is less than 10,00%. In order to compare the values of indicator under study using Student's t-test with 95% power at 5% significance level, the recommended minimum sample size is 36 leaf blades, at 1% level of significance – 49 *P. nigra* leaf blades. For samples of leaf blades of city park and roadside plantings with different traffic intensity, there were no statistically significant differences in the pseudosymmetry index of leaf blade shape.

Key words: leaf blade, pseudosymmetry, shape, *Populus nigra* L., roadside plantations.