

Ю.А. Штирц

ОБЪЕМЫ ВЫБОРОК, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕРХУШКИ И ОСНОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНКИ *POPULUS NIGRA* L. s.l. В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКИХ ЭКОСИСТЕМ

Государственное учреждение «Донецкий ботанический сад»

Проведено определение минимальных объемов выборок, необходимых для информативного сравнения морфологических показателей верхушки и основания листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. в условиях городских экосистем. Минимальные рекомендуемые объемы выборок возрастают в ряду: коэффициент формы основания – коэффициент формы верхушки – коэффициент асимметрии формы верхушки – коэффициент асимметрии формы основания – коэффициент асимметрии верхушки по методу М.В. Андреевой. Показатели формы верхушки и основания листовой пластинки характеризуются существенно большей вариабельностью, чем показатели их асимметрии.

Ключевые слова: *Populus nigra*, листовая пластинка, биоиндикация, выборка, статистическая мощность

Введение

В настоящее время не вызывает сомнения возможность использования морфологической изменчивости листовой пластинки растений с целью индикации состояния окружающей среды. Для получения объективной информации при сравнении морфологических показателей листовых пластинок из различных мест произрастания необходимо учитывать минимальные требуемые размеры выборок для каждого отдельно взятого параметра.

Факторы внешней среды, воздействуя на развивающиеся листья, оказывают существенное влияние на становление особенностей их окончательной структуры и формы [5]. Разные части листовой пластинки характеризуются различной степенью изменчивости. Так, в экосистемах с различной степенью антропогенной трансформации максимальный вклад в общую вариабельность формы листовой пластинки *Betula pendula* Roth вносит изменчивость ее базальной части в месте прикрепления черешка сравнительно с остальной частью листовой пластинки [3]. Лист увеличивается в длину, главным образом, за счет

интеркалярного роста. Первой прекращает рост верхушка листа, а последним – его основание. Соответственно, верхушка листа первой приобретает окончательную структуру, что отражает общую последовательность развития этого органа «сверху вниз» [5]. Значительная изменчивость верхушки и основания листовой пластинки под влиянием техногенного загрязнения отмечена в работе М.В. Андреевой [1] для *Populus tremula* L. в условиях Новгородской области.

Цель и задачи исследований

Целью исследований являлось определение минимальных размеров выборок, необходимых для информативного сравнения морфологических показателей верхушки и основания листовой пластинки *Populus nigra* L. sensu lato с использованием t-критерия Стьюдента с учетом статистической мощности в условиях городских экосистем.

В задачи исследований входило установление средних значений рассматриваемых морфологических показателей верхушки и основания лис-

товой пластинки, оценка степени их вариабельности, сопоставление минимальных объемов выборок, необходимых для сравнения анализируемых показателей.

Объекты и методики исследований

Populus nigra встречается в биотопах различных типов, что, с одной стороны, дает возможность исследовать морфологическую изменчивость листовой пластинки в условиях различных экологических факторов, с другой стороны, предоставляет возможность широкого применения в последующем полученных результатов исследований в целях биоиндикации и биомониторинга состояния окружающей среды, что и послужило основанием для выбора данного вида в качестве объекта исследования.

Материал собран в периоды листопада 2012–2018 гг. на территории города Донецка с древесных растений зрелой стадии генеративного периода, произрастающих в парках, в условиях придорожных насаждений автомагистралей с различной интенсивностью движения транспорта, на придомовых участках многоэтажных домов. Указанные градации участков представлены в каждом городе и в наибольшей степени отражают специфику городских условий. Листовые пластинки, собранные с этих территорий, впоследствии объединяли в одну выборку. Периоды листопада выбраны с целью рандомизации выборки. Определение возрастного состояния деревьев проводилось по системе О.В. Смирновой и др. [6].

Листья были отсканированы при помощи сканера Epson Perfection V33 с разрешением 300 пикселей на дюйм. За указанный период проанализировано более 10000 листовых пластинок. Оценка морфологических параметров верхушки и основания листовой пластинки *P. nigra* проводилась с учетом двух подходов: оценка формы и оценка степени симметричности.

Ввиду того, что в рамках данной работы проводится определение размеров выборок для реализации конкретных подходов при исследовании показателей листовой пластинки, представляется целесообразным приведенное ниже детальное описание методик расчета указанных морфологических параметров.

Для количественной оценки формы верхушки и основания листовой пластинки использовали коэффициенты, рассчитанные согласно методике

Т.Н. Гендельс, Л.Ю. Буданцева [2]. Вычисление значений коэффициентов основано на рассмотрении листовой пластинки в виде плоскостной замкнутой фигуры, наложенной на сетку полярных координат с центром в точке, делящей пополам срединную жилку листа. Радиус-векторы проводятся под определенным постоянным углом (выбранная нами угловая мера составила 20°) до пересечения с линией абриса фигуры. Коэффициент формы верхушки представляет собой отношение длин нулевого и последующего за ним первого радиус-векторов, коэффициент формы основания – соответственно восьмого и девятого [2]. В нашей работе применялась указанная методика с незначительными изменениями. Ввиду того, что в ряде случаев срединная жилка листовой пластинки искривлена, по причине чего проведение всех радиус-векторов под углом фиксированной величины не представляется возможным, обязательным условием было проведение нулевого радиус-вектора от центра к верхушке, девятого – от центра к месту прикрепления черешка, первого – под углом 20° к нулевому, восьмого – под углом 20° к девятому. Остальные радиус-векторы не проводились. Принимая во внимание присутствие асимметрии, расчет коэффициентов проведен с левой и правой сторон листовой пластинки, затем проведено вычисление среднего арифметического.

С целью оценки симметричности верхушки и основания листовой пластинки использовали соответствующие коэффициенты. Согласно предложенному нами ранее подходу [8] для оценки степени асимметрии верхушки и основания рассчитывали коэффициент формы по вышеупомянутой методике [2] для левой и правой сторон листовой пластинки. Коэффициент асимметрии формы верхушки (либо основания) листовой пластинки рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{|I_L - I_R|}{(I_L + I_R)},$$

где I_L и I_R – значения коэффициента формы верхушки (либо основания) соответственно с левой и с правой стороны листовой пластинки.

Помимо этого, проведена оценка степени симметрии верхушки листовой пластинки по методике М.В. Андреевой [1]. Согласно данной методике определяется ось листа: соединяются место прикрепления черешка и верхушка листовой

пластинки. В левой верхней части от края листовой пластинки проводится перпендикуляр к оси листа. Длина полученного отрезка должна быть равна 1/3 части максимальной ширины листовой пластинки. По аналогии проводится перпендикуляр в правой верхней стороне листа. Измеряется расстояние между точками соединения указанных перпендикуляров с осью листовой пластинки. Коэффициент асимметрии верхушки листовой пластинки рассчитывается по формуле:

$$Ka = b / X,$$

где b – расстояние между точками соединения перпендикуляров с осью листовой пластинки; X – максимальная ширина листовой пластинки.

Измерения линейных и угловых параметров листовой пластинки проводили в программе TPSDig Version 2.10.

Вычисление коэффициентов вариации проводили по формуле, приведенной в работе Г.Ф. Лакина [4]. Расчет минимальных объемов выборок с целью проведения информативного сравнения с использованием t -критерия Стьюдента осуществлен по формулам, приведенным в работе М. Bland [7]: вычисления выполнены для различий между значениями показателей, составляющих 5 % от средних.

Результаты исследований и их обсуждение

Средние значения анализируемых показателей листовой пластинки *P. nigra* и коэффициенты их вариации в условиях городских экосистем отражены в таблице 1.

Исходя из значений коэффициентов вариации (табл. 1), следует отметить, что показатели формы верхушки и основания листовой пластинки характеризуются большей вариабельностью, чем показатели их асимметрии. Согласно работе Г.Ф. Лакина [4], коэффициенты формы верхушки и основания характеризуются слабым варьированием (коэффициент вариации не превышает 10 %), коэффициенты, характеризующие симметричность верхушки и основания – значительным варьированием (коэффициент вариации составляет более 25 %).

Минимальные рекомендуемые объемы выборок, необходимые для информативного сравнения показателей, характеризующих верхушку и основание листовой пластинки, с использовани-

Таблица 1. Средние значения анализируемых морфологических показателей верхушки и основания листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. и коэффициенты их вариации в условиях городских экосистем

| Морфологические показатели листовой пластинки | Среднее значение (указан доверительный интервал для $P = 0,05$) | Коэффициент вариации, % |
|--|--|-------------------------|
| Коэффициент формы верхушки | 1,76±0,045 | 7,74 |
| Коэффициент формы основания | 0,89±0,022 | 7,37 |
| Коэффициент асимметрии формы верхушки | 0,044±0,0040 | 75,57 |
| Коэффициент асимметрии формы основания | 0,015±0,0014 | 83,76 |
| Коэффициент асимметрии верхушки по методу М.В. Андреевой | 0,058±0,0055 | 85,47 |

ем t -критерия Стьюдента с учетом статистической мощности отражены в таблице 2.

Исходя из данных таблицы 2, для информативного сравнения различных морфологических показателей листовой пластинки требуются различные объемы выборок.

Наименьшие значения минимальных объемов выборок для пяти анализируемых морфологических показателей требуются при сравнении коэффициентов формы основания, наибольшие – при сравнении коэффициентов асимметрии верхушки по методу М.В. Андреевой. Так, с целью сравнения значений коэффициента формы основания с использованием t -критерия Стьюдента с 95 % мощностью на 5 % уровне значимости рекомендуемый минимальный объем выборки составляет 57 листовых пластинок, на 1 % уровне значимости – 78 листовых пластинок, для сравнения значений коэффициента асимметрии верхушки по методу М.В. Андреевой с 95 % мощностью на 5 % уровне значимости рекомендуемый минимальный объем выборки составляет 7574 листовых пластинок, на 1 % уровне значимости – 10408 листовых пластинок *P. nigra* (табл. 2).

Таблица 2. Минимальные рекомендуемые объемы выборки, необходимые для информативного сравнения морфологических показателей, характеризующих верхушку и основание листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l., с использованием t-критерия Стьюдента с учетом статистической мощности

| Морфологические показатели листовой пластинки | Статистическая мощность, % | | | | | |
|--|----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 80 % | | 90 % | | 95 % | |
| | P=0,05 | P=0,01 | P=0,05 | P=0,01 | P=0,05 | P=0,01 |
| Коэффициент формы верхушки | 37,62 | 56,12 | 50,37 | 71,49 | 62,19 | 85,45 |
| Коэффициент формы основания | 34,11 | 50,89 | 45,67 | 64,82 | 56,38 | 77,48 |
| Коэффициент асимметрии формы верхушки | 3582,19 | 5344,22 | 4796,48 | 6807,80 | 5921,58 | 8136,87 |
| Коэффициент асимметрии формы основания | 4400,72 | 6565,39 | 5892,48 | 8363,39 | 7274,67 | 9996,16 |
| Коэффициент асимметрии верхушки по методу М.В. Андреевой | 4581,64 | 6835,29 | 6134,72 | 8707,21 | 7573,73 | 10407,09 |

Таким образом, минимальные рекомендуемые объемы выборки, необходимые для сравнения морфологических показателей листовой пластинки *P. nigra*, возрастают в ряду: коэффициент формы основания – коэффициент формы верхушки – коэффициент асимметрии формы основания – коэффициент асимметрии верхушки по методу М.В. Андреевой.

Полученные численные данные не следует воспринимать как абсолютную рекомендацию, так как в условиях экосистем с различной степенью антропогенной, в том числе, техногенной нагрузки, рассчитанные минимальные объемы выборки, безусловно, будут отличаться. Вместе с тем, обращает на себя внимания тот факт, что получение достоверной информации при сравнении степени симметричности верхушки и основания листовой пластинки по выбранным параметрам требует значительных объемов выборки. Существенно меньшие объемы выборки требуются для сравнения и нахождения средних значений коэффициентов формы верхушки и основания листовой пластинки указанного вида.

Выводы

Коэффициенты формы верхушки и основания листовой пластинки *P. nigra* характеризуются слабым варьированием (коэффициент вариации не превышает 10 %), коэффициенты, характеризующие симметричность верхушки и основания – значительным варьированием (коэффициент вариации составляет более 25 %).

Получение достоверной информации при сравнении степени симметричности верхушки и основания листовой пластинки *P. nigra* требует значительных объемов выборки, существенно меньшие объемы выборки требуются для сравнения значений коэффициентов формы верхушки и основания листовой пластинки указанного вида. Минимальные рекомендуемые объемы выборки, необходимые для сравнения морфологических показателей листовой пластинки *P. nigra* с использованием t-критерия Стьюдента с 95 % мощностью на 5 % уровне значимости, возрастают в ряду: коэффициент формы основания (57 листовых пластинок) – коэффициент формы верхушки (63) – коэффициент асимметрии формы верхушки (5922) – коэффициент асимметрии формы основания (7275) – коэффициент асимметрии верхушки по методу М.В. Андреевой (7574).

1. Андреева М.В. Оценка состояния окружающей среды в насаждениях в зонах промышленных выбросов с помощью растений-индикаторов: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2007. 20 с.
2. Гендельс Т.В., Буданцев Л.Ю. Изучение изменчивости формы листовой пластинки *Populus deltoides* (Salicaceae) с помощью числового индекса // Ботан. журн. 1991. Т. 76, N 5. С. 747–752.
3. Жуков А.В., Штирц Ю.А., Жуков С.П. Оценка методами геометрической морфометрии морфологической изменчивости листовых пластинок *Betula pendula* Roth в экосистемах с различной степенью антропогенной трансформации // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2011. N 1(11). С. 128–134.
4. Лакин Г.Ф. Биометрия: уч. пос. для биол. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1990. 352 с.
5. Нижнегородцев А.А. Псевдосимметрия растительных объектов как биоиндикационный показатель: теоретическое обоснование, автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: МГУ, 2019. 20 с.

- матизация оценок, апробация: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2010. 24 с.
6. Смирнова О.В., Заугольнова Л.Б., Таронова Н.А., Фаликов Л.Д. Критерии выделения возрастных состояний и особенности хода онтогенеза у растений различных биоморф // Ценопопуляции растений (основные понятия и структура). М.: Наука, 1976. Ч. I. С. 14–43.
7. Bland M. An introduction to medical statistics / 3rd ed. Oxford: Oxford University Press, 2000. 405 p.
8. Glukhov A.Z., Shtirts Yu.A. Characteristics of the shape asymmetry of leaf tip and base in *Populus nigra* L. under industrial dump conditions // Applied ecology and environmental research. 2015. Vol. 13(3). P. 819–831. http://dx.doi.org/10.15666/aer/1303_819831_.

Поступила в редакцию: 18.10.2019

UDC 58.087:581.45:674.031.623.234.4

VOLUMES OF SAMPLES NECESSARY FOR COMPARING THE MORPHOLOGICAL INDICES OF TOP AND BASE LEAF BLADE OF *POPULUS NIGRA* L. s.l. IN THE CONDITIONS OF CITY ECOSYSTEMS

Yu.A. Shtirts

Public Institution «Donetsk Botanical Garden»

The determination of minimum sample sizes necessary for an informative comparison of morphological parameters of top and base leaf blade of *Populus nigra* L. s.l. in urban ecosystems. The minimum recommended sample sizes increase in the series: base shape coefficient – top shape coefficient – top shape asymmetry coefficient – base shape asymmetry coefficient – top asymmetry coefficient according to M.V. Andreeva method. The indicators of shape of top and base leaf blade are characterized by significantly greater variability than the indicators of their asymmetry.

Key words: *Populus nigra*, leaf blade, bioindication, sampling, statistical power