

**Оценка изменчивости формы листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. методами геометрической морфометрии при выращивании на почвенных субстратах техногенных территорий**  
**Assessment of leaf blade shape variability of *Polygonum monspeliense* Thiebaut ex Pers. by geometric morphometry methods at growing on soil substrates of technogenic territories**

Штирц Ю. А.

Shtirts Yu. A.

ГУ «Донецкий ботанический сад», г. Донецк, ДНР. E-mail: strelkova@i.ua  
Public Institution «Donetsk Botanical Garden», Donetsk, DPR

**Реферат.** Методами геометрической морфометрии проанализирована изменчивость формы листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers., выращенных на различных почвенных субстратах. Установлено, что почвенные характеристики влияют на формирование листовой пластинки *P. monspeliense*: листовые пластинки растений, выращенных на почвах преобразованных в результате техногенных воздействий территорий, отличны по форме от листовых пластинок экземпляров, выращенных на черноземе. Последующее накопление данных позволит проверить наличие или отсутствие корреляции формы листовой пластинки *P. monspeliense* с конкретными эдафическими характеристиками. Целесообразен дальнейший поиск информативных дескрипторов формы в их численном выражении с целью создания биоиндикационной шкалы.

**Ключевые слова.** Геометрическая морфометрия, изменчивость, листовая пластинка, относительные деформации, усредненная конфигурация, форма, *Polygonum monspeliense*.

**Summary.** Using geometric morphometry methods, we analyzed the variability of the shape of the leaf blade of *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers., grown on various soil substrates. It was established that soil characteristics affect the formation of the leaf blade of *P. monspeliense*: leaf blades of plants grown on soils transformed as a result of technogenic impacts of the territories are different in form from leaf blades of specimens grown on soil. Subsequent accumulation of data will verify the presence or absence of a correlation of the shape of the leaf blade of *P. monspeliense* with specific edaphic characteristics. It is advisable to further search for informative descriptors of the form in their numerical expression in order to create a bioindication scale.

**Key words.** Averaged configuration, geometric morphometry, leaf blade, *Polygonum monspeliense*, relative deformations, shape, variability.

**Введение.** Анализ формы играет важную роль во многих биологических исследованиях (Zelditch et al., 2012). В геометрической морфометрии форма представляет собой геометрическое свойство конфигурации точек, инвариантное относительно перемещений, поворотов и изменений масштаба (Kendall, 1977; Павлинов, 2001). Форма объекта представляет собой конфигурацию меток, которой соответствует единственная точка в пространстве форм, заданном набором переменных форм (Павлинов, 2001). Изменение формы может быть важным показателем, превосходящим по информативности типичные метрические характеристики, такие как линейные размеры, площадь или объем (Глухов и др., 2017).

Факторы внешней среды, воздействуя на развивающиеся листья, оказывают существенное влияние на становление особенностей их окончательной структуры и формы (Givnish, 1984; Niinemets et al., 1999; Мигалина и др., 2009).

Целью исследования являлась оценка изменчивости формы листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. методами геометрической морфометрии при выращивании на почвенных субстратах техногенных территорий.

**Материалы и методы.** Посадка экземпляров *P. monspeliense* осуществлялась в апреле 2019 г. в емкости из пищевого пластика объемом 460 мл, заполненными образцами почвы. Проанализирована изменчивость формы листовой пластинки пяти выборок. Выборка № 1 сформирована из листовых пластинок растений, выращенных на черноземе в условиях открытого грунта территории ГУ «Донецкий ботанический сад» (ДБС), выборки № 2–5 – в условиях лаборатории на почвенных образцах участков, различающихся по степени антропогенного воздействия: № 2 – выведенный из эксплуатации карьер по добыче строительного камня (балка Калиновая, г. Макеевка), № 3 – склон отвала шахты им. Ленина (г. Макеевка), № 4 – основание этого отвала, № 5 (принята нами в качестве условного контроля в лабораторных условиях) – место произрастания растений выборки № 1 на территории ДБС. Указанная нумерация выборок сохраняется на протяжении всего излагаемого в работе материала. Опытные экземпляры растений были пересажены с незначительного по площади локального участка (место произрастания растений выборки № 1), что позволило в определенной степени снизить генетическую разнородность опытных экземпляров. В одну емкость высаживали по 7–8 экземпляров растений. Густота посадки соответствовала плотности популяции *P. monspeliense*, из которой были взяты экспериментальные экземпляры растений. Дальнейший рост растений происходил в лабораторных условиях. Полив осуществлялся дистиллированной водой, периодичность полива варьировала в зависимости от степени подсыхания поверхностного слоя почвы. С периодичностью один раз в два дня осуществлялся поворот емкостей на 180° вокруг оси с целью более равномерного освещения экспериментальных растений. Сбор листовых пластинок осуществлялся в начале второй декады июля. Учитывая, что видовой особенностью *P. monspeliense* является значительное отличие листьев, сформировавшихся на побегах первого и второго порядков (Определитель..., 1987), анализу подвергались листовые пластинки, собранные с побегов первого порядка. Объем каждой из выборок составил более 200 листьев.

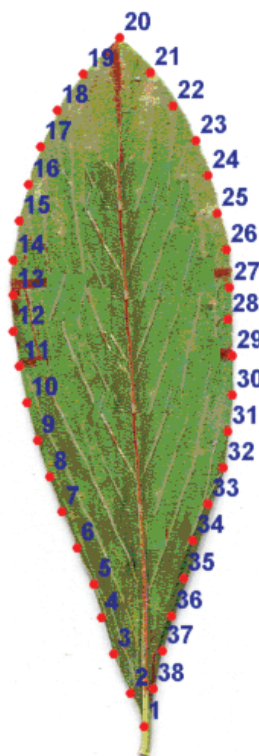


Рис. 1. Расположение меток (1–38) на оцифрованном изображении листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers.

Листовые пластинки были отсканированы при помощи сканера Epson Perfection V33. Листовую пластинку при сканировании размещали таким образом, чтобы линия, соединяющая место прикрепления черешка и верхушку листовой пластинки, располагалась вертикально. Затем на оцифрованных изображениях с помощью компьютерной программы TPSDig 2.10 нанесены 38 меток по часовой стрелке. Первая метка была нанесена в месте прикрепления черешка, двадцатая – на верхушке листовой пластинки. Остальные метки (2–19, 21–38) были расположены по краю листовой пластинки таким образом, что образованные отрезки 2–38, 3–37, 4–36, 5–35 ... 19–21 оказались параллельными и расположенными на равном расстоянии от соседних отрезков. Расположение меток на оцифрованном изображении листовой пластинки *P. monspeliense* отражено на рис. 1. Для более точного нанесения меток оцифрованные изображения визуальнo совмещали с «сеткой» при помощи программы Vitrite 1.1.1.

Дальнейшая обработка проведена с использованием программ серии TPS. Построение усредненных конфигураций, оценка степени значимости осей относительных деформаций, визуализация тенденций изменения формы проведены с использованием программы TPS Relative Warps 1.49. Коэффициент шкалирования  $\alpha$  принимали равным нулю. Построение усредненных конфигураций прове-

дено в программе TPS Relative Warps 1.49 с использованием метода наименьших квадратов таким образом, чтобы их суммарные отличия от всех экземпляров в выборке были минимальны с учетом положения всех меток (Павлинов, 2001).

Для оценки различий формы листовой пластинки с учетом внутривыборочной дисперсии использовался F-критерий Гудолла, основанный на анализе прокрустовых расстояний. Вычисление F-критерия Гудолла проведено с использованием программы TPSRegr 1.37.

Методологический подход к выполнению исследований по геометрической морфометрии описан в работах И. Я. Павлинова (2000, 2001), D. C. Adams et al. (2004) и др.

**Результаты и обсуждение.** Относительные деформации – главные компоненты распределения форм в тангенциальном пространстве. Каждая относительная деформация соответствует некоторому направлению изменения формы относительно эталонной конфигурации, графическим представлением которого может служить деформация тонкой пластины (Павлинов, 2001).

Вариабельность формы консенсусов пяти анализируемых выборок, определяемая 38 метками контура, может быть представлена с помощью четырех осей относительных деформаций. Первая ось описывает 64,08 % изменчивости формы, вторая – 27,86 %, третья – 5,25 %, четвертая – 2,81 %. Расположение консенсусов в пространстве первых двух осей относительных деформаций, как наиболее значимых в динамике формы, представлено на рис. 2.

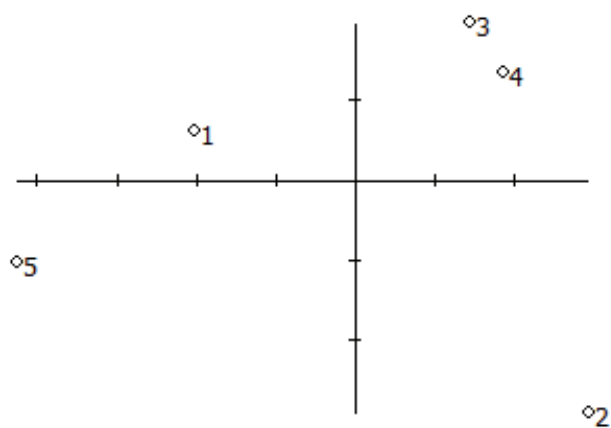


Рис. 2. Графическое представление расхождений консенсусов образцов листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. вдоль градиента первой (ось абсцисс) и второй (ось ординат) относительных деформаций.

Примечание: обозначения на схеме системы координат отвечают консенсусам анализируемых выборок, точка пересечения осей задается положением усредненной конфигурации для пяти консенсусов.

Исходя из взаимного расположения обозначений консенсусов на рис. 2, следует отметить, что первая и вторая оси относительных деформаций, являющиеся наиболее значимыми, в определенной мере разделяют усредненные конфигурации листовой пластинки на три группы: первая группа – консенсусы выборок № 1 и 5, вторая – выборок № 3 и 4, третья – консенсус выборки № 2. Принимая во внимание расположение обозначений консенсусов вдоль оси ординат, следует отметить разнонаправленные изменения усредненных конфигураций выборки № 2 и выборок № 3–4 по второй оси деформаций как относительно принятой в качестве условного контроля выборки № 5, так и относительно усредненной конфигурации для всех пяти выборок, местоположение которой соответствует точке пересечения осей (рис. 2).

Результаты оценки различий формы листовой пластинки *P. monspeliense* исследуемых выборок с учетом внутривыборочной дисперсии приведены в табл.

При попарном сравнении анализируемых выборок статистически достоверные различия формы листовой пластинки выявлены в большинстве случаев сравнения. Исходя из значений F-критерия Гудолла (табл.), наибольшие отличия формы листовой пластинки *P. monspeliense* отмечены при сравнении выборок № 4 и 5. Минимальные отличия выявлены при сравнении выборок № 1 и 5, что, по всей видимости, связано с одинаковыми почвенными условиями выращивания *P. monspeliense*. Минимальная степень отличия между выборками № 1 и 5 в сравнении с другими выборками дает основание полагать, что различающиеся условия произрастания, обусловленные выращиванием в лаборатории и в открытом грунте (температурный режим, освещенность, влажность воздуха и др.), в меньшей степени воздействуют на форму листовой пластинки, чем эдафические факторы. Статистически достоверных различий не выявлено при сравнении выборок № 3 и 4: обе выращены на почвенных образцах, взятых с отвала шахты им. Ленина (г. Макеевка).

Таблица

Оценка различий формы листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. анализируемых выборок с учетом внутривыборочной дисперсии

| № выборки | 1      | 2      | 3      | 4      | 5       |
|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1         |        | 4,0273 | 2,1433 | 2,8854 | 1,9229  |
| 2         | 0,0000 |        | 2,8488 | 2,6073 | 8,5584  |
| 3         | 0,0000 | 0,0000 |        | 0,6270 | 7,8773  |
| 4         | 0,0000 | 0,0000 | 0,9942 |        | 11,4971 |
| 5         | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |         |

Примеч.: над диагональю приведены значения F-критерия Гудолла, под диагональю – уровень значимости P.

Таким образом, можно отметить, что почвенные характеристики влияют на формирование листовой пластинки *P. monspeliense*: листовые пластинки растений, выращенных на почвах, преобразованных в результате техногенных воздействий территорий, отличны по форме от листовых пластинок экземпляров, выращенных на черноземе. Последующее накопление данных позволит проверить наличие или отсутствие корреляции формы листовой пластинки *P. monspeliense* с конкретными эдафическими характеристиками. Целесообразен дальнейший поиск информативных дескрипторов формы в их численном выражении с целью создания биоиндикационной шкалы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Глухов А. З., Николаева А. В., Стрельников И. И.** Опыт компьютеризированной обработки изображений листовых пластинок при изучении экологической пластичности // Роль ботанических садов и дендрариев в сохранении, изучении и устойчивом использовании разнообразия растительного мира: Материалы междунар. науч. конф., посв. 85-летию Центрального ботсада НАН Беларуси (6–8 июня 2017 г., г. Минск). – Минск, 2017. – С. 59–62.
- Мигалина С. В., Иванова Л. А., Махнев А. К.** Размеры листа березы как индикатор ее продуктивности вдали от климатического оптимума // Физиология растений, 2009. – Т. 56, № 6. – С. 948–953.
- Определитель** высших растений Украины / Д. Н. Доброчаева, М. И. Котов, Ю. Н. Прокудин и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 548 с.
- Павлинов И. Я.** Геометрическая морфометрия черепа мышевидных грызунов (Mammalia, Rodentia): связь формы черепа с пищевой специализацией // Журнал общей биологии, 2000. – Т. 61, № 6. – С. 583–600.
- Павлинов И. Я.** Геометрическая морфометрия – новый аналитический подход к сравнению компьютерных образов // Информационные и телекоммуникационные ресурсы в зоологии и ботанике. – СПб., 2001. – С. 65–90.
- Adams D. C., Rohlf F. J., Slice D. E.** Geometric morphometrics: ten years of progress following the ‘Revolution’ // *Italian Journal of Zoology*, 2004. – Vol. 71. – Pp. 5–16.
- Givnish T. J.** Leaf and canopy adaptations in tropical forests // *Physiological ecology of plants of the wet tropics. Tasks for vegetation Science*, 1984. – Vol. 12. – Pp. 51–84. DOI: 10.1007/978-94-009-7299-5\_6
- Kendall D.** The diffusion of shape // *Advances in Applied Probability*, 1977. – Vol. 9. – Pp. 428–430.
- Niinemets Ü., Kull O., Tenhunen J. D.** Variability in leaf morphology and chemical composition as a function of canopy light environment in coexisting deciduous trees // *Int. J. of Plant Sciences*, 1999. – Vol. 160. – Pp. 837–848.
- Zelditch M. L., Swiderski D. L., Sheets H. D.** Geometric morphometrics for biologists: a primer. – New York, London: Elsevier Academic Press, 2012. – 488 pp. DOI: 10.1016/C2010-0-66209-2