

УДК 581.4:581.5

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ФОРМЫ ЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНКИ *POPULUS NIGRA* L. S.L. В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТВАЛОВ МЕТОДАМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ

© 2019 С.А. Приходько, Ю.А. Штирц

Донецкий ботанический сад, г. Донецк (Донецкая Народная Республика)

Поступила 25.04.2019

Методами геометрической морфометрии проведена оценка изменчивости формы листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. в условиях промышленных отвалов: породных отвалов угольных шахт и отвалов вскрышных пород. Для выборки территории городского парка, которая рассматривалась в качестве условного контроля, характерно большее сходство основной части листовых пластинок *P. nigra* с их усреднённой конфигурацией, чем для выборок промышленных отвалов соответственно с их усреднёнными конфигурациями, что может быть случаем проявления дивергентной онтогенетической тактики в формировании морфологических признаков листовой пластинки указанного вида в условиях отвалов. Выявлены достоверные различия формы листовой пластинки при попарном сравнении всех анализируемых выборок: территории парка, породных отвалов угольных шахт, отвалов вскрышных пород. Наибольшие отличия формы листовой пластинки *P. nigra* отмечены при сравнении выборок территории парка и породных отвалов угольных шахт. Наиболее изменчивой частью листовой пластинки *P. nigra* является её базальная часть. Для выборки с территории парка следует отметить также существенную вариабельность формы срединной части листовой пластинки. Выявлена связь центроидного размера и формы листовой пластинки *P. nigra* в исследуемых экосистемах. Из числа анализируемых выборок эта связь в большей степени проявляется в условиях отвалов вскрышных пород. Консенсус листовой пластинки выборки породных отвалов угольных шахт имеет максимальную степень отличия от консенсусов двух других выборок. В работе продемонстрированы деформации ортогональной решетки, отражающие динамику формы консенсусов образцов листовой пластинки *P. nigra* анализируемых выборок по градиентам первой и второй относительных деформаций как наиболее значимых.

*Ключевые слова:* геометрическая морфометрия, древесные растения, *Populus nigra*, листовая пластинка, промышленные отвалы.

**Prikhodko S.A., Shtirts Yu.A. Evaluation of variability of leaf blade shape of *Populus nigra* L. s.l. on industrial dumps by methods of geometric morphometry.** – Geometrical morphometry has been used to estimate the variability of the blade shape of the *Populus nigra* L. s.l. in the conditions of industrial dumps: waste dumps of coal mines and overburden dumps. The sample of the territory of the city park, which was considered as conditional control, is characterized by greater similarity of the main part of *P. nigra* leaf blades with their averaged configuration than for samples of industrial dumps, respectively, with their averaged configurations, which may be a case of divergent developmental tactics in the formation of morphological signs of a leaf blade of the specified type in the conditions of dumps. Significant differences in the shape of the leaf blade are revealed when pairwise comparing all analyzed samples: the park territory, rock dumps of coal mines, overburden

dumps. The greatest differences in the shape of *P. nigra* leaf blade are noted when comparing samples of the park and rock heaps of coal mines. The most volatile part of the *P. nigra* leaf blade is its basal part. For sampling from the park, one should also note the significant variability of the shape of the middle part of the leaf blade. The relationship between the centroid size and the shape of *P. nigra* leaf blade in the studied ecosystems was revealed. Among the samples analyzed, this relationship is more pronounced in terms of overburden heaps. The leaf blade consensus of the sample of rock dumps of coal mines has the maximum degree of difference from the consensus of the other two samples. The work demonstrated the deformations of the orthogonal lattice, reflecting the dynamics of the shape of the consensus of *P. nigra* leaf blades of the analyzed samples by the gradients of the first and second relative deformations as the most significant.

*Key words:* geometric morphometry, woody plants, *Populus nigra*, leaf blade, industrial dumps.

## ВВЕДЕНИЕ

Важными базовыми характеристиками растительных организмов являются их форма и размер. Именно эти признаки на протяжении длительного времени использовали исследователи при принятии таксономических решений и оценке онтогенетического и жизненного состояния растений (Злобін и др., 2009). В исследованиях морфологических объектов активно развивается такой подход к изучению разнообразия формы как геометрическая морфометрия (Bookstein, 1986, 1991; Rohlf, 1993; Павлинов, 1995; Adams et al., 2004), представляющая собой особый аналитический инструмент, который позволяет оценивать разнообразие формы, полностью исключая влияние размерного фактора (Павлинов, 2001). Возможность количественного сравнения объектов по их форме независимо от размеров достигается, прежде всего, нетривиальностью способа описания формы с помощью координат точек вместо расстояний между ними (Павлинов, 1999). В основе данного подхода лежит концепция многомерного пространства форм, осями которого являются переменные формы. Каждый отдельный объект (отдельная форма) представляется как точка этого пространства (Павлинов, 2000).

Основной задачей геометрической морфометрии в ботанических исследованиях является объективизация оценки формы органов растений и разработка методов, которые выявляют различия между формами (Злобін и др., 2009).

Листья растений являются наиболее чувствительными к условиям окружающей среды органами растений, под влиянием различных факторов в них происходят морфологические изменения (Стаковецкая и др., 2012). По мнению многих авторов, изменение морфологии листьев одного и того же вида связано именно со сменой условий его произрастания (Givnish, 1978; Исаков и др., 1984; Захаров и др., 2000; Андреева, 2007; Бухарина и др., 2007; Niinemets et al., 2007; Бессонова, 2009; Мигалина и др.,

2009; Vogel, 2009; Нижегородцев, 2010; Хузина, 2010; Жуков и др., 2011; Штирц, 2011, 2012а, 2012б, 2013; Зайцева, 2012). 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).

Известно, что степень антропогенной нагрузки на экосистемы оказывает существенное влияние на форму листовой пластинки древесных растений (Андреева, 2007; Хузина, 2010). Определение влияния условий произрастания растений на форму их листовых пластинок крайне трудно поддается непосредственному экспериментальному исследованию, но может быть учтено косвенным путём, посредством сбора материала в местах с различными условиями произрастания (Исаков и др., 1984).

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования был выбран *Populus nigra* L. s.l. Данный вид древесных растений встречается в разнообразных биотопах, включая техногенные экосистемы различных типов, что даёт возможность исследовать морфологическую изменчивость его листовой пластинки в зависимости от влияния тех или иных экологических факторов.

*P. nigra* проявляет высокую степень устойчивости в условиях города (Поляков, 2009).

Цель нашего исследования – установить изменчивость формы листовой пластинки *P. nigra* в условиях промышленных отвалов Донбасса с использованием методов геометрической морфометрии.

Сбор листьев осуществляли в летние периоды с нижней части кроны древесных растений зрелой стадии генеративного периода. Определение возрастного состояния деревьев проводили по системе О.В. Смирновой и др. (1976). Местами сбора листьев являлись породный отвал шахты № 6-14 в г. Макеевке, породный отвал № 1 шахты «Чулковка № 8» в г. Донецке,

ряд отвалов вскрышных пород Докучаевского флюсо-доломитного комбината.

Экотопы породных отвалов угольных шахт характеризуются кислой реакцией субстратов, отвалы Докучаевского флюсо-доломитного комбината – щелочной реакцией. По механическому составу, засолённости эдафотопов для указанных отвалов отмечена высокая степень сходства (Жуков, 2011).

Для сравнения морфологической изменчивости листовой пластинки *P. nigra*, произрастающих в условиях отвалов и в условиях менее трансформированных экосистем, собраны листья на территории Центрального парка культуры и отдыха им. А.С. Щербакова в г. Донецке, которая рассматривалась в качестве условного контроля.

Листовые пластинки были отсканированы, 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. Для более точного нанесения меток оцифрованные изображения визуальным образом совмещали с «сеткой» при помощи программы Vitrite 1.1.1.

Дальнейшая обработка проведена с использованием программ серии TPS.

Построение усреднённых конфигураций, вычисление центроидных размеров, оценка степени значимости осей относительных деформаций, визуализация тенденций изменения формы, вычисление количественных характеристик «нагрузок» меток на относительные деформации, визуализация деформации ортогональных решёток проведены программой TPS Relative Warps 1.49. Коэффициент шкалирования  $\alpha$  принимали равным нулю.

Построение усреднённой конфигурации производится программой TPS Relative Warps 1.49 с использованием метода наименьших квадратов таким образом, чтобы её суммарные отличия от всех экземпляров в выборке были минимальны с учётом положения всех меток (Павлинов, 2001; Павлинов, Микешина, 2002).

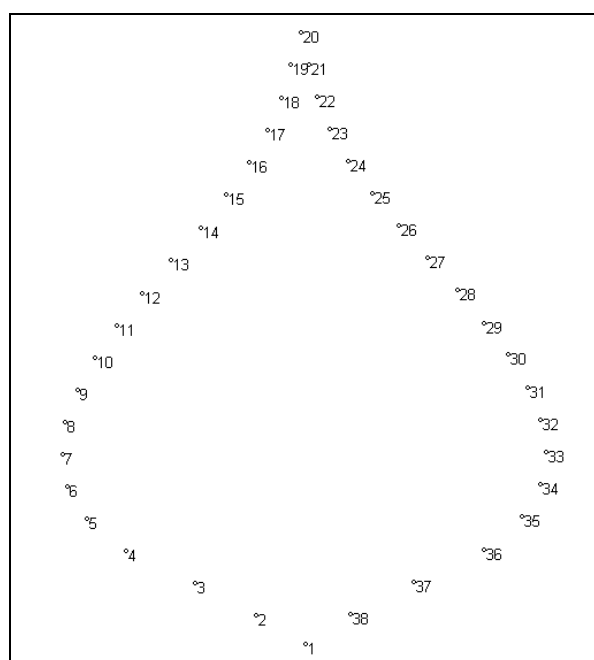
Для оценки различий формы листовой пластинки с учётом внутривыборочной дисперсии использовался F-критерий Гудолла, основанный на анализе прокрустовых расстояний.

Оценка связи формы листовой пластинки с центроидным размером также проведена с использованием F-критерия Гудолла. Вычисление F-критерия Гудолла проведено программой TPSRegr 1.37.

Методологический подход к выполнению исследований по геометрической морфометрии описан в работах И.Я. Павлинова (2000, 2001), И.Я. Павлинова, Н.Г. Микешиной (2002), D.C. Adams et al. (2004), M.L. Zelditch et al. (2004), P. Mitteroecker, P. Gunz (2009).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Консенсус (усреднённая форма) листовой пластинки *P. nigra*, полученный в результате обработки оцифрованных изображений, отражён на рис. 1.



**Рис. 1. Консенсус (усреднённая форма) листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. для всех анализируемых экосистем**

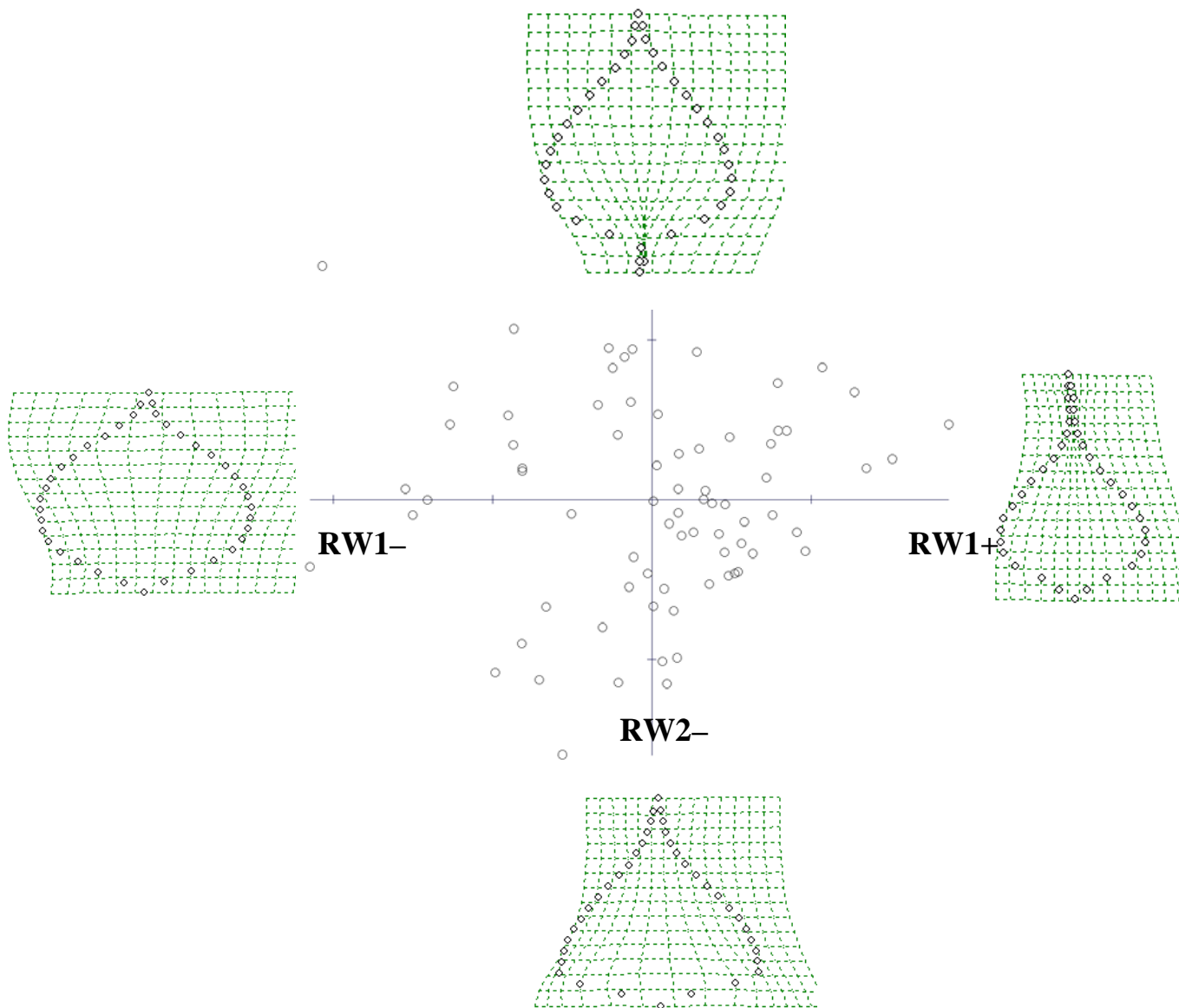
Примечание: числами отмечено расположение меток

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).

Степень значимости осей относительной деформации в динамике формы листовой пластинки убывает от первой оси к последней. Первая ось описывает 47,27% изменчивости формы, вторая – 31,19%. Вклад остальных осей значительно ниже: третья ось описывает 5,18%

изменчивости, четвертая – 3,38%, пятая – 2,58%, шестая – 2,29%, седьмая – 1,92%, восьмая – 1,20% и т.д. Суммарно первые восемь осей описывают 95,01% вариальности формы листовой пластинки *P. nigra*, определяемой 38 метками контура. Одной из задач геометриче-

ской морфометрии является визуализация различий и изменений формы (Mitteroecker, Gunz, 2009). Расположение образцов в пространстве первых двух осей относительной деформации и тенденции изменения формы листовой пластинки представлены на рис. 2 и 3.



**Рис. 2. Графическое представление расхождений формы вдоль градиента первой (RW 1) и второй (RW 2) относительных деформаций для листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. всех анализируемых экосистем**

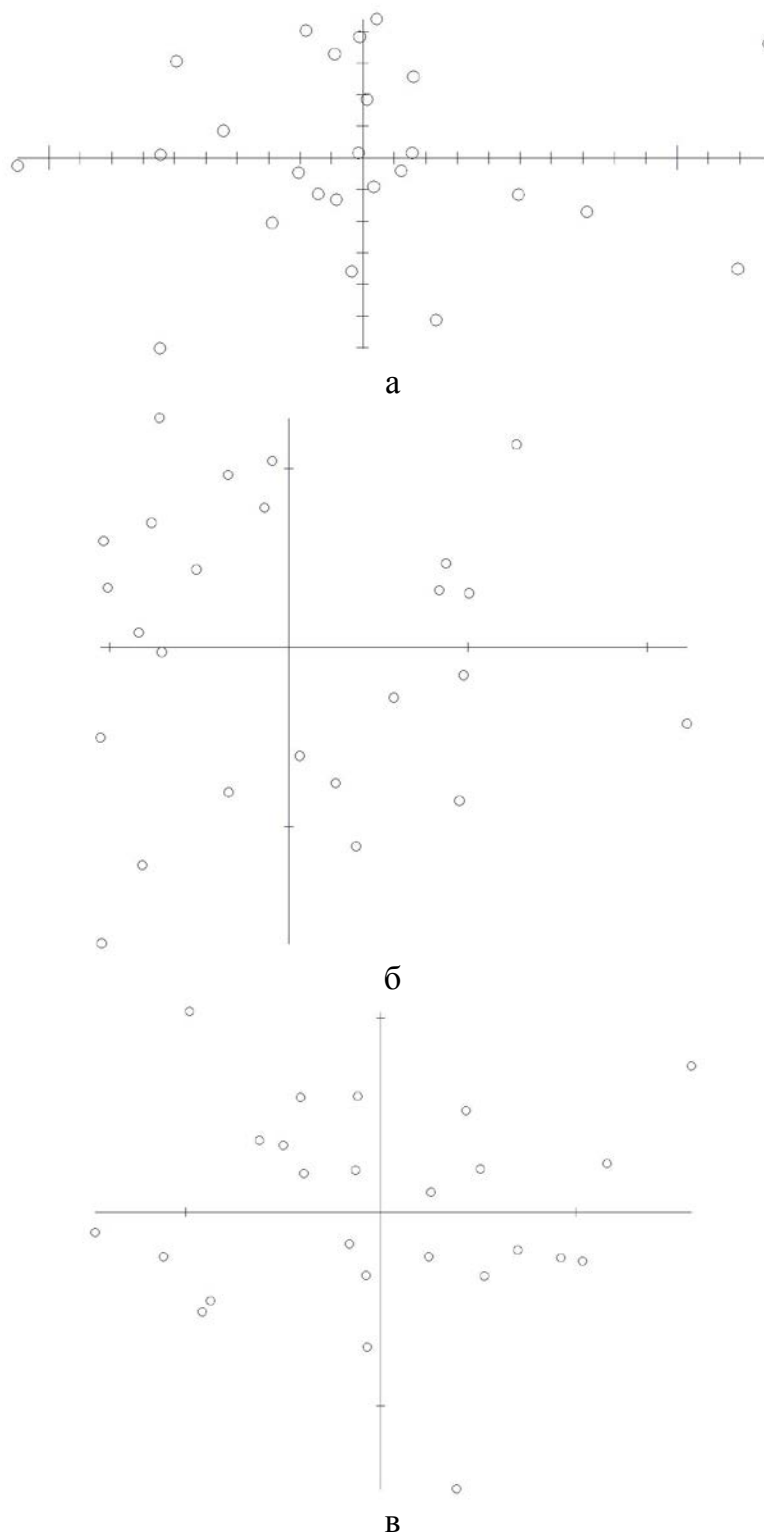
Примечание: обозначения на схеме системы координат отвечают оцифрованным изображениям образцов листовой пластинки *P. nigra*; точка пересечения осей задаётся положением усреднённой конфигурации; деформации ортогональной решетки показывают изменения формы листовой пластинки по градиентам первой и второй относительных деформаций; знаки при обозначениях деформаций («+» и «-») указывают на направление изменений относительно консенсуса.

Принимая во внимание максимальную степень значимости первой оси относительной деформации в динамике формы листовой пластинки и расположение на схеме системы ко-

ординат оцифрованных изображений образцов вдоль оси абсцисс (см. рис. 3), которая соответствует первой оси относительной деформации, следует отметить, что для выборки территории

парка характерно большее сходство основной части листовых пластинок с их усреднённой конфигурацией, чем для выборок промышлен-

ных отвалов. Данный факт свидетельствует о большей изменчивости формы листовой пластинки в условиях промышленных отвалов.

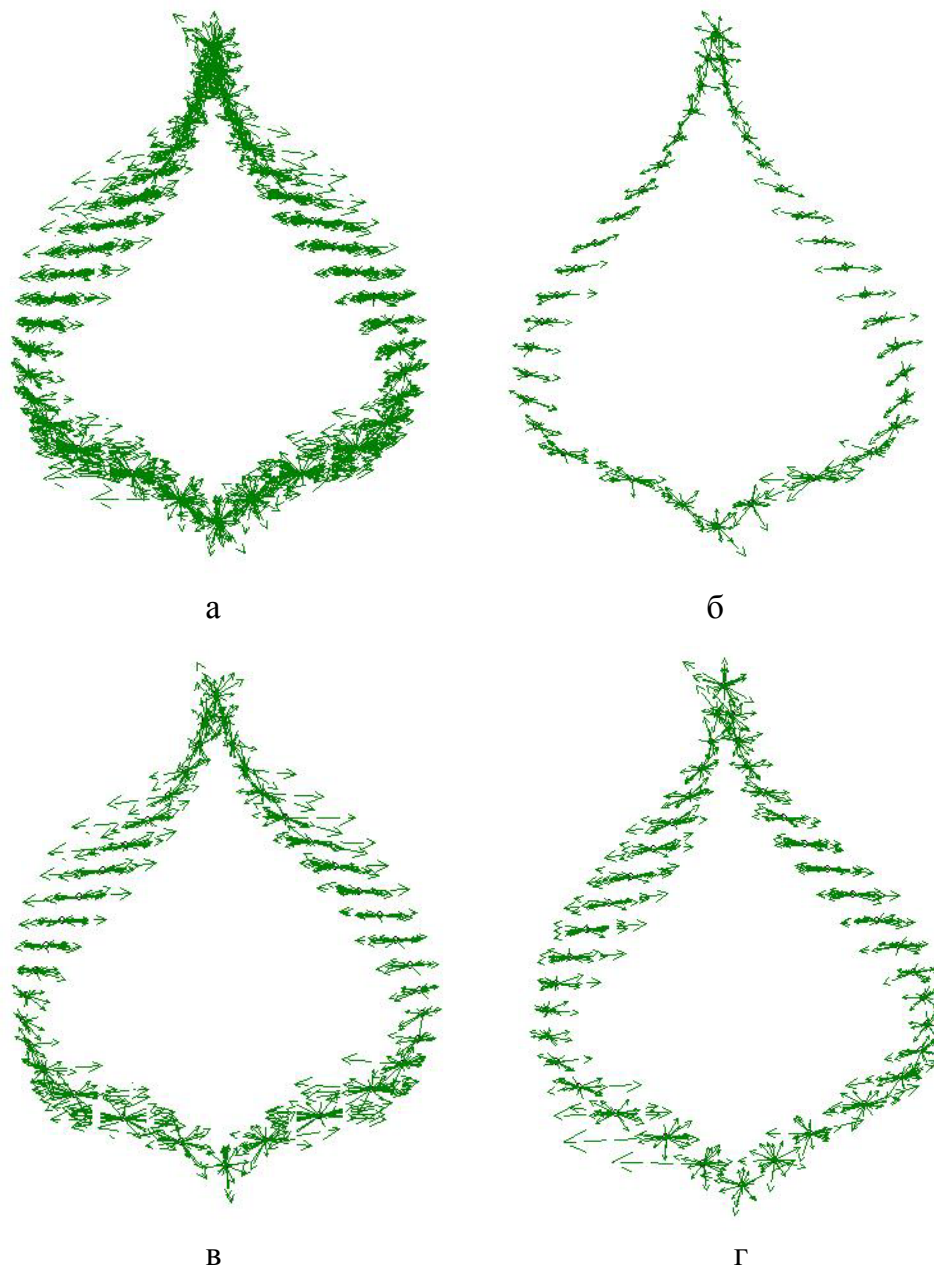


**Рис. 3. Графическое представление расхождений формы вдоль градиента первой и второй относительных деформаций: а) для листовых пластинок *Populus nigra* L. s.l. выборки территории парка; б) для листовых пластинок выборки породных отвалов угольных шахт; в) для листовых пластинок выборки отвалов вскрышных пород**

Примечание: обозначения на схеме системы координат отвечают оцифрованным изображениям образцов листовой пластинки. Точка пересечения осей задаётся положением усреднённой конфигурации.

Возрастание общей изменчивости признака при ухудшении экологических условий является случаем проявления дивергентной онтогенетической тактики. Также возрастание общей изменчивости признака в менее благоприятных условиях можно трактовать как поиск путей

морфологической адаптации. Дальнейшая стабилизация признака будет свидетельствовать о нахождении пути адаптивного морфогенеза и направлении энергии на поддержание стабильности важного адаптивного признака (Сафаргалина и др., 2011).



**Рис. 4. Вклад меток в вариабельность формы листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l.:**  
 а) для всей совокупности выборок; б) для выборки территории парка;  
 в) для выборки породных отвалов угольных шахт; г) для выборки отвалов вскрышных пород.  
 Примечание: векторами обозначены направление и степень отклонения расположения меток от усреднённой формы листовой пластинки.

Ранее была установлена дестабилизация ряда других морфологических признаков листовой пластинки *P. nigra* в условиях промышленных отвалов (Штирц, 2013). С целью «локали-

зации» отдельных относительных деформаций их соотносят с конкретными метками. Определяемые для каждой метки «нагрузки» на относительные деформации позволяют связать ком-

поненты изменений формы с определёнными частями исследуемых объектов. «Нагрузки» показывают степень значимости вклада каждой конкретной метки в изменения, которые преобладает консенсус в пространстве относительных деформаций (Павлинов, 2001).

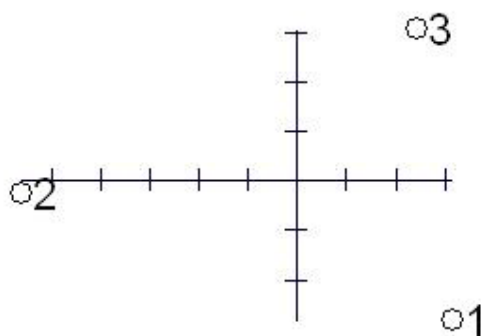
Исходя из данных, полученных в результате обработки данных программой TPS Relative Warps 1.49, следует отметить, что наибольшую «нагрузку» среди меток на первую и вторую относительные деформации, как наиболее значимые, дают следующие: для всей совокупности выборок – метки 3, 4, 6, 7, 8, 33, 35, 36, 37; для листовых пластинок выборки территории парка – метки 5, 6, 27, 28, 29, 30, 31, 37; для выборки породных отвалов угольных шахт – метки 3, 4, 5, 7, 35, 37; для выборки отвалов вскрышных пород – метки 1, 2, 6, 7, 8, 33 (см. рис.1). Таким образом, особый вклад в измене-

ние формы листовой пластинки *P. nigra* вносят метки её базальной части. Для выборки территории парка следует отметить также определённый вклад в вариабельность формы меток срединной части.

Вклад меток в вариабельность формы показан на рис. 4.

Проведено сравнение полученных консенсусов образцов листовой пластинки. Вариабельность формы консенсусов трёх анализируемых выборок, определяемая 38 метками контура, может быть представлена с помощью двух осей относительной деформации. Первая ось описывает 73,03% изменчивости формы, вторая – 26,97%.

Расположение консенсусов в пространстве осей относительной деформации представлено на рис. 5.



**Рис. 5. Графическое представление расхождений консенсусов образцов листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. вдоль градиента первой (ось абсцисс) и второй (ось ординат) относительных деформаций**  
Примечание: обозначения на схеме системы координат отвечают консенсусам трёх анализируемых выборок: 1 – выборки территории парка, 2 – выборки породных отвалов угольных шахт, 3 – выборки отвалов вскрышных пород; точка пересечения осей задаётся положением усреднённой конфигурации для трёх консенсусов.

Исходя из взаимного расположения обозначений консенсусов на рис. 5, следует отметить, что первая ось относительной деформации, являющаяся наиболее значимой, в существенной мере отделяет усреднённую конфигурацию листовой пластинки выборки породных отва-

лов угольных шахт от двух других полученных усреднённых конфигураций.

Результаты оценки различий формы листовой пластинки *P. nigra* исследуемых выборок с учётом внутривыборочной дисперсии приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Оценка различий формы листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. исследуемых выборок с учётом внутривыборочной дисперсии**

Анализируемые выборки	Территория парка	Породные отвалы угольных шахт	Отвалы вскрышных пород
Территория парка		8,2540	3,8034
Породные отвалы угольных шахт	0,0000		6,6308
Отвалы вскрышных пород	0,0000	0,0000	

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

Выявлены статистически достоверные различия формы листовой пластинки при попарном сравнении анализируемых выборок. Исходя из значений F-критерия Гудолла (см. табл. 1), наибольшие отличия формы листовой пластинки *P. nigra* отмечены при сравнении выборок территории парка и породных отвалов угольных шахт.

Оценкой размера в геометрической морфометрии является центроидный размер (Павлинов, 2001; Zelditch et al., 2004), математически

независимый от формы. Вычисляется как квадратный корень суммы квадратов расстояний меток от их центроида. Центроидный размер биологических объектов может коррелировать с их формой по причине того, что большие по размеру организмы (органы) часто формируются иначе, чем меньшие (Zelditch et al., 2004).

Оценка связи центроидного размера и формы листовой пластинки *P. nigra* показана в табл. 2.

Таблица 2

Оценка связи центроидного размера и формы листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l.

Территория парка		Породные отвалы угольных шахт		Отвалы вскрышных пород	
значения F-критерия Гудолла	уровень значимости P	значения F-критерия Гудолла	уровень значимости P	значения F-критерия Гудолла	уровень значимости P
2,5920	0,0000	1,9135	0,0000	3,6663	0,0000

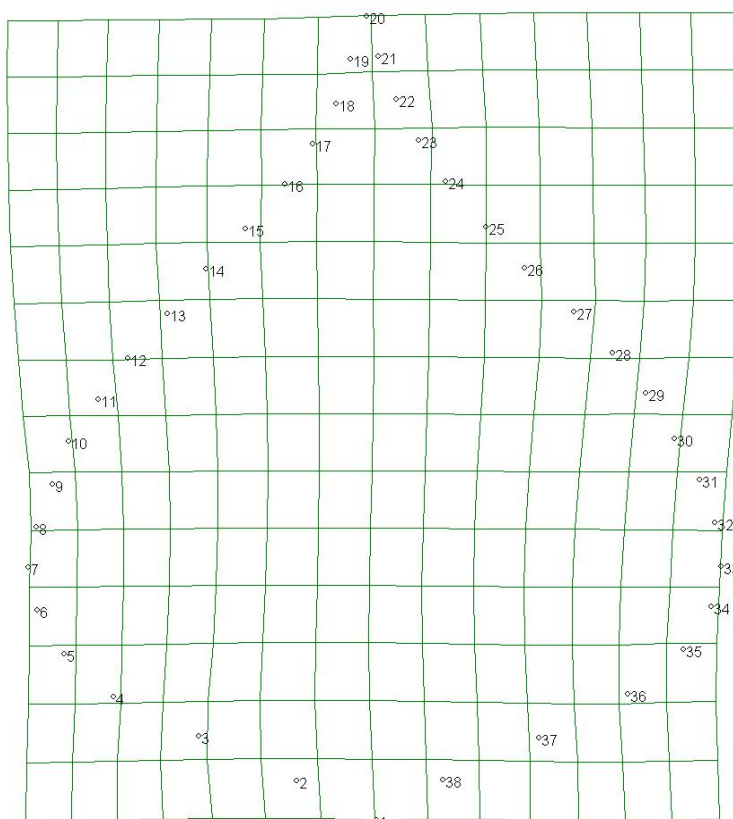
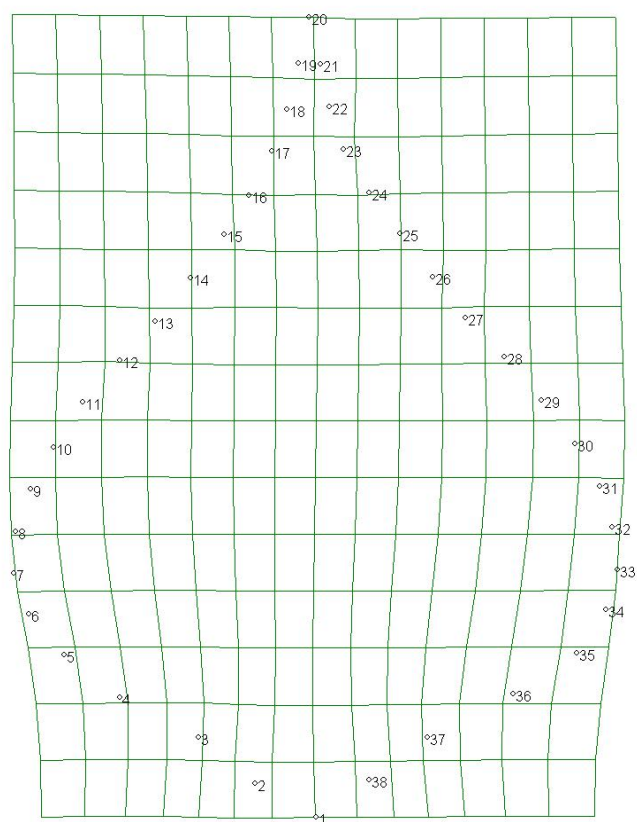


Рис. 7. Деформации ортогональной решетки, отражающие отличия формы консенсуса образцов листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. выборки породных отвалов угольных шахт от консенсуса всей совокупности выборок по градиентам первой и второй относительных деформаций

Примечание: цифрами (1–38) показано расположение меток.





**Рис. 8. Деформации ортогональной решетки, отражающие отличия формы консенсуса образцов листовой пластинки *Populus nigra* L. s.l. выборки отвалов вскрышных пород от консенсуса всей совокупности выборок по градиентам первой и второй относительных деформаций**

Примечание: цифрами (1–38) показано расположение меток.

Таким образом, можно говорить о наличии связи центроидного размера и формы листовой пластинки *P. nigra* в исследуемых экосистемах. Из числа анализируемых выборок эта связь в большей степени проявляется в условиях отвалов вскрышных пород (см. табл. 2).

Особенностью геометрической морфометрии является возможность представления ее результатов в специфической графической форме – деформационной решетки, или «решетки д'Арси Томпсона». Суть метода состоит в том, что на эталонный экземпляр накладывается ортогональная решетка, а изменения формы сравниваемых экземпляров отображаются как деформации этой решетки. Конфигурация последней в окрестности некоторой метки указывает на локализацию и степень различий между сравниваемыми экземплярами (Павлинов, 2000). Деформации ортогональной решетки, отражающие динамику формы консенсусов образцов листовой пластинки *P. nigra* анализируемых выборок

по градиентам первой и второй относительных деформаций, показаны на рис. 6–8.

Ранее была установлена дестабилизация ряда других морфологических признаков листовой пластинки *P. nigra* в условиях промышленных отвалов (Штирц, 2013). С целью «локализации» отдельных относительных деформаций их соотносят с конкретными метками. Определяемые для каждой метки «нагрузки» на относительные деформации позволяют связать компоненты изменений формы с определёнными частями исследуемых объектов. «Нагрузки» показывают степень значимости вклада каждой конкретной метки в изменения, которые претерпевает консенсус в пространстве относительных деформаций (Павлинов, 2001).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Базальная часть листовой пластинки *P. nigra* является наиболее изменчивой. Также существенная вариабельность формы отмечена для срединной части листовой пластинки.

2. Для выборки территории парка характерна большая степень сходства основной части листовых пластинок *P. nigra* с их усреднённой конфигурацией, чем для выборок листовых пластинок промышленных отвалов соответственно с их усреднёнными конфигурациями, что может быть случаем проявления дивергентной онтогенетической тактики в формировании морфологических признаков листовой пластинки указанного вида в условиях отвалов.

3. Выявлены достоверные различия формы листовой пластинки при попарном сравнении всех анализируемых выборок: территории парка, породных отвалов угольных шахт, отвалов вскрышных пород. Наиболь-

шие отличия формы листовой пластинки *P. nigra* отмечены при сравнении выборок территории парка и породных отвалов угольных шахт.

4. Консенсус (усреднённая форма) листовой пластинки *P. nigra* выборки породных отвалов угольных шахт имеет максимальную степень отличия от консенсусов двух других выборок (территории городского парка и отвалов вскрышных пород).

5. Выявлена связь центроидного размера и формы листовой пластинки *P. nigra* в исследуемых экосистемах. Из числа анализируемых выборок эта связь в большей степени проявляется в условиях отвалов вскрышных пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Бессонова Н.В.** Использование метода биоиндикации для оценки экологического состояния различных районов в г. Хабаровске // Леса России в XXI веке: материалы I междунар. науч.-практ. конф. (июль 2009 г.). СПб.: ЛТА, 2009. С. 11-13.
- Бухарина И.Л., Поварничина Т.М., Ведерников К.Е.** Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007. 216 с.
- 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. № 1 (11). С. 128-134.
- Жуков С.П.** Растения, устойчивые к повышенной кислотности почв, в фитоценозах отвалов Донбасса // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2011. № 1 (11). С. 230-234.
- Зайцева І.О.** Біоекологічні механізми адаптації деревних інтродуцентів у степовій зоні України: автореф. дис. ... д-ра біол. наук. Дніпропетровськ, 2012. 40 с.
- Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И. и др.** Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методологическое руководство для заповедников. М.: Центр экологической политики России, 2000. 66 с.
- Злобін Ю.А., Скляр В.Г., Бондарєва Л.М., Кирильчук К.С.** Концепція морфометрії у сучасній ботаніці // Чорноморський ботанічний журнал. 2009. Т. 5, № 1. С. 5-22.
- Исаков В.Н., Висковатова Л.И., Лейшовник Я.Я.** Исследование морфологии листа древесных средствами автоматизации. Рига: Зинатне, 1984. 196 с.
- Мигалина С.В., Иванова Л.А., Махнев А.К.** Размеры листа берёзы как индикатор её продуктивности вдали от климатического оптимума // Физиол. растений. 2009. Т. 56, № 6. С. 948-953.
- Нижегородцев А.А.** Псевдосимметрия растительных объектов как биоиндикационный показатель: теоретическое обоснование, автоматизация оценок, апробация: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2010. 24 с.
- Павлинов И.Я.** Разнообразие формы: новые подходы // Стратегия изучения биоразнообразия наземных животных. М., 1995. С. 44-50.
- Павлинов И.Я.** Анализ изменчивости формы третьего верхнего коренного у скальных полевок рода *Alticola* (Cricetidae) методами геометрической морфометрии // Зоол. журн. 1999. Т. 78, № 1. С. 78-83.
- Павлинов И.Я.** Геометрическая морфометрия черепа мышевидных грызунов (Mammalia, Rodentia): связь формы черепа с пищевой специализацией // Журн. общ. 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.
- Павлинов И.Я., Микешина Н.Г.** Принципы и методы геометрической морфометрии // Журн. общ. биол. 2002. Т. 63, № 6. С. 473-493.
- Поляков А.К.** Интродукция древесных растений в условиях техногенной среды. Донецк: Ноулидж, 2009. 269 с.
- Сафаргалина А.Т., Хусаинова С.А., Ишбирдин А.Р.** Проявления стратегий жизни *Atriplex patula* L. в онтогенезе // Изв. Самар. НЦ РАН. 2011. Т. 13, № 5 (2). С. 112-114.
- 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 рас-

тений (основные понятия и структура). М.: Наука, 1976. Ч. I. С. 14-43.

**Стаковецкая О.К., Куликова Н.А., Советова Е.С.** Оценка экологического состояния воздушной среды методами биоиндикации. 2012. URL: [http://www.rusnauka.com/10\\_DN\\_2012/Ecologia/6\\_10\\_6476.doc.htm](http://www.rusnauka.com/10_DN_2012/Ecologia/6_10_6476.doc.htm)

**Хузина Г.Р.** Влияние урбаноcреды на морфометрические показатели листа березы повислой (*Betula pendula* Roth) // Вестн. Удм. ун-та. Сер. биол. 2010. Вып. 3. С. 53-57.

**Штирц Ю.А.** Варьирование размера листовой пластинки *Acer pseudoplatanus* L. в условиях природных экосистем города Донецка // Регуляция роста, развития и продуктивности растений: матер. VII Междунар. науч. конф. (Минск, 26-28 октября 2011 г.). Минск: Право и экономика, 2011. С. 228.

**Штирц Ю.А.** Варьирование размеров листовой пластинки *Populus nigra* L. в условиях промышленных отвалов Донецкой области // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: матер. IX Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Екатеринбург, 20-25 августа 2012 г.). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та ИПЦ УрФУ, 2012а. С. 305-310.

**Штирц Ю.А.** Оценка изменчивости верхушки и основания листовой пластинки *Populus nigra* L. в условиях промышленных отвалов // Промышленная ботаника: сб. науч. тр. Донецк: Донецкий ботанический сад, 2012б. Вып. 12. С. 31-36.

**Штирц Ю.А.** Морфологическое разнообразие листовых пластинок *Populus nigra* L. в условиях промышленных отвалов // Промышленная ботаника: сб. науч. тр. Донецк: Донецкий ботанический сад, 2013. Вып. 13. С. 116-124.

**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. P. 5-16. URL: <http://life.bio.sunysb.edu/morph/review/review.html>

**Bookstein F.L.** Size and shape spaces for landmark data in two dimensions // Statistical Science. 1986. Vol. 1(1). P. 181-242.

**Bookstein F.L.** Morphometric tools for landmarks data. Cambridge University Press, New York, 1991. 435 p.

**Givnish T.J.** Ecological aspects of plant morphology: Leaf form in relation to environment // Acta Biotheoretica (Supplement: Folia Biotheoretica N 7). 1978. Vol. 27. P. 83-142.

**Givnish T.J.** Leaf and canopy adaptations in tropical forests // Physiological ecology of plants of the wet tropics. 1984. P. 51-84. DOI: 10.1007/978-94-009-7299-5\_6

**Mitteroecker P., Gunz P.** Advances in Geometric Morphometrics // Evol. Biol. 2009. Vol. 36, N 2. P. 235-247.

**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 // International Journal of Plant Sciences. 1999. Vol. 160. P. 837-848.

**Niinemets Ü., Portsmouth A., Tobias M.** Leaf shape and venation pattern alter the support investments within leaf lamina in temperate species: a neglected source of leaf physiological differentiation? // Functional Ecology. 2007. Vol. 21. P. 28-40. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2006.01221.x

**Rohlf F.J.** Relative warps analysis and example of its application to mosquito wings. Contributions to morphometrics. Madrid, 1993. P. 131-160.

**Vogel S.** Leaves in the lowest and highest winds: temperature, force and shape // New Phytologist. 2009. Vol. 183. P. 13-26. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2009.02854.x

**Zelditch M.L., Swiderski D.L., Sheets H.D., Fink W.L.** Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer. Elsevier Academic Press, New York and London, 2004. 443 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-778460-1.X5000-5