

УДК 581.4 : 581.5 : 582.091

© А. В. Жуков¹, Ю. А. Штирц², С. П. Жуков²

**ОЦЕНКА МЕТОДАМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОРФОМЕТРИИ
МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИНОК
BETULA PENDULA ROTH В ЭКОСИСТЕМАХ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ
АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

¹ Днепропетровский государственный аграрный университет

49600, г. Днепропетровск, ул. Ворошилова, 25; e-mail: zhukov_dnepr@rambler.ru

² Донецкий ботанический сад НАН Украины

83059, г. Донецк, пр. Ильича, 110; e-mail: strelkova@i.ua, ser64luk@yandex.ru

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. – Методами геометрической морфометрии проведена оценка морфологической изменчивости листовой пластинки *Betula pendula* в условиях экосистем с различной степенью антропогенной трансформации. Показатель морфотипического разнообразия листовой пластинки, рассчитанный с помощью индекса Шеннона, имеет наиболее низкие значения в пределах экосистем с более высокой антропогенной нагрузкой. В вариабельность формы листовой пластинки значительно больший вклад вносят метки базальной части по сравнению с метками апикальной части листовой пластинки. Наиболее значителен вклад меток, соответствующих части листовой пластинки в месте прикрепления черешка.

Ключевые слова: геометрическая морфометрия, листовая пластинка, *Betula pendula*, морфотип, относительные деформации.

Введение

Важными базовыми характеристиками растительных организмов являются их форма и размер. Именно эти признаки на протяжении многих столетий используют исследователи при принятии таксономических решений и оценке онтогенетического и жизненного состояния растений [2]. В последнее время в исследованиях морфологических объектов активно развивается существенно новый подход к изучению разнообразия формы морфологических объектов – геометрическая морфометрия [3, 12-15], представляющая собой особый аналитический инструмент, который позволяет оценивать разнообразие формы, полностью исключая влияние размерного фактора [6]. 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 [4]. В основе данного подхода лежит концепция многомерного пространства форм, осями которого являются переменные формы. Каждый отдельный объект (отдельная форма) представляется как точка этого пространства [5].

Основной задачей геометрической морфометрии в ботанических исследованиях является объективизация оценки формы органов растений и разработка методов, которые выявляют различия между формами [2].

Степень антропогенной нагрузки на экосистемы существенно влияет на форму листовой пластинки древесных растений [1, 10]. Цель наших исследований – установить морфологическую изменчивость листовых пластинок *Betula pendula* Roth в условиях экосистем с различной степенью антропогенной трансформации с использованием методов геометрической морфометрии.

Материал и методика исследования

Материал собран в летний период 2010 г. в экосистемах с различной степенью антропогенной трансформации:

– полевая лесополюса (расположена в пригородной зоне, к югу от окраины г. Донецка, окружена сельскохозяйственными угодьями);

– территория Донецкого ботанического сада НАН Украины (ДБС) (находится на периферии г. Донецка, в восточной его части, к территории примыкает автомагистраль);

– придорожні території (розположені в кварталах багатоповерхової житлової застройки г. Донецька, інтенсивність руху автотранспорту на дорогах становить більше 1200 транспортних засобів в годину в світлий час доби);

– відвал шахти № 5/6 (знаходиться в межах г. Донецька, безпосередньо к відвалу примикає автодорога з інтенсивністю руху не більше 800 транспортних засобів в годину, ремонтне підприємство і мебельна фабрика).

Збір листів здійснювали з нижньої частини крони дерев'яних рослин зрілої стадії генеративного періоду. Визначення вікового стану дерев проводили за системою О. В. Смирновій і др. [9]. Листові пластинки були оцифровані, потім на оцифрованих зображеннях за допомогою комп'ютерної програми TPSDig нанесено 17 марок за годинниковою стрілкою. Перша і остання марка були нанесені в місці прикріплення черешка до листової пластинки, відповідно по ліву і праву сторони від черешка, решта марок (2-16) були розташовані по краю листової пластинки в місцях закінчення жилок першого порядку.

Розташування марок і консенсус (усереднена форма) листової пластинки *B. pendula* відображені на рис. 1.

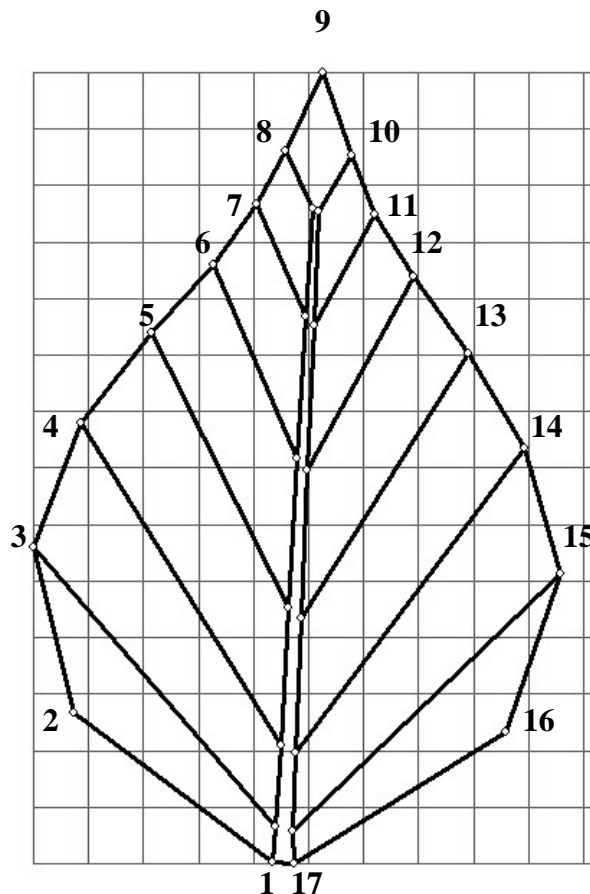


Рис. 1. Розташування марок (1-17) і консенсус (усереднена форма) листової пластинки *Betula pendula* Roth.

Методологічний підхід до виконання досліджень по геометричній морфометрії детально описано в роботах І. Я. Павлинова [5-7].

З метою аналізу морфотипічного різноманіття листових пластинок в умовах екосистем з різною ступенем антропогенної трансформації застосовано кластерний аналіз з використанням середніх арифметичних незважених значень евклідова відстані. По думці Ю. А. Песенко [8], методу приєднання по середньому арифметичному незваженому значенню при проведенні кластерного аналізу віддають перевагу багато авторів. Детальне описання методу і формула розрахунку евклідова відстані наведені в роботі Ю. А. Песенко [8]. Кластерний аналіз проводився з використанням пакета Statistica

6.0. При построении дендрограммы сходства использованы относительные деформации, рассчитанные в программе TPSrelw.

Разнообразие морфотипов было оценено с помощью индекса Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i,$$

где H – индекс Шеннона, p_i – доля i -го морфотипа в выборке, N – общее количество морфотипов, выявленных в выборке.

Результаты и обсуждение

Вариабельность формы листовой пластинки *B. pendula*, определяемая 17 метками контура, может быть представлена с помощью 30 осей относительной кривизны. Степень значимости осей относительной кривизны в динамике формы листовой пластинки убывает от первой оси к последней. Первая ось описывает 32,86% изменчивости формы, вторая – 18,12%, третья – 11,20%, четвертая – 9,64%, пятая – 6,92% и т. д. Суммарно первые пять осей описывают 78,77% изменчивости формы листовой пластинки.

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 [6].

Расположение образцов в пространстве первых двух осей относительной кривизны и тенденции изменения формы листовой пластинки представлены на рис. 2.

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 [5]. Характеристики «нагрузок» меток на первые четыре относительные деформации отражены в табл. 1. «Нагрузки» показывают степень значимости вклада каждой конкретной метки в изменения, которые претерпевает консенсус в пространстве относительных деформаций.

Исходя из данных, приведенных в табл. 1, следует отметить, что наибольшую «нагрузку» среди меток дают следующие: на первую и четвертую относительные деформации – метки 1, 17; на вторую – 1, 10, 17; на третью – в первую очередь, 1, 10, 17, немного ниже вклад меток 2, 3, 7, 8, 15, 16 (имеет смысл сопоставление значений только в пределах каждой отдельной относительной деформации).

Таким образом, особый вклад в изменение формы листовой пластинки *B. pendula* вносят метки 1 и 17, которые отвечают базальной части листовой пластинки в месте прикрепления черешка. Следует отметить значительно больший вклад в вариабельность формы меток, которые отвечают базальной части листовой пластинки по сравнению с апикальной.

Вклад меток в вариабельность формы отражён на рис. 3.

На основании значений первых 15 относительных деформаций как наиболее значимых проведён кластерный анализ. Дендрограмма морфотипического сходства образцов листовых пластинок отражена на рис. 4.

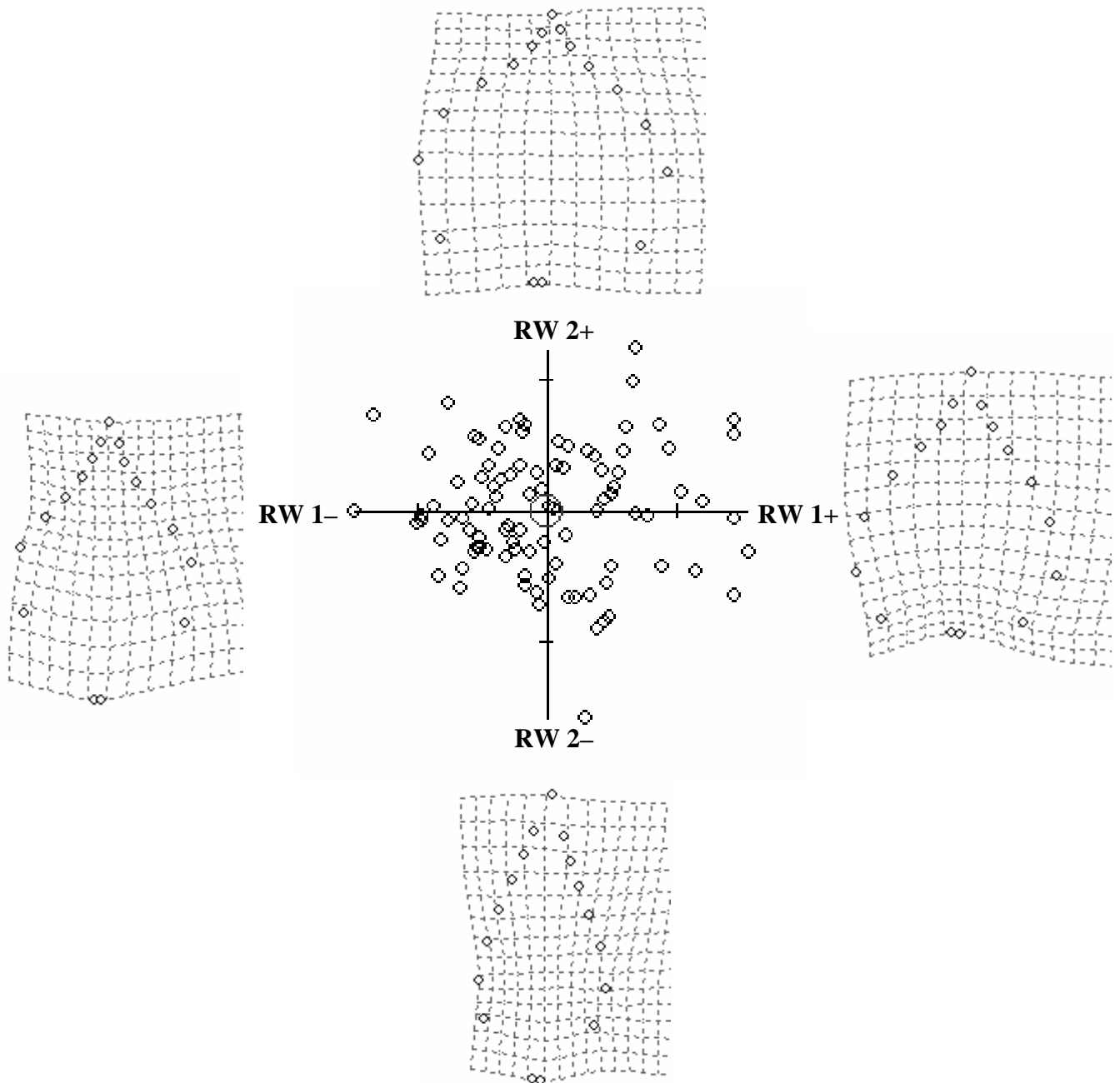


Рис. 2. Графическое представление расхождений формы вдоль градиента первой (RW 1) и второй (RW 2) относительных деформаций.

Обозначения на схеме системы координат отвечают оцифрованным изображениям образцов листовой пластинки *B. pendula*. 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.

Количественные характеристики «нагрузок» меток на первые четыре относительные деформации (RW 1-4)

Метка	RW 1		RW 2		RW 3		RW 4	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1	-79,74	28,29	55,44	-8,44	-36,54	143,73	73,01	201,18
2	12,31	-14,43	2,87	-33,72	21,24	-61,12	-17,45	-14,02
3	5,65	-19,20	-10,05	28,03	-29,34	31,29	3,50	25,64
4	-18,88	9,68	-6,96	-9,09	-0,27	-0,57	23,76	-28,92
5	-1,00	3,68	1,97	19,55	17,60	-7,32	-1,62	15,36
6	1,96	16,36	2,74	-12,28	-29,53	19,44	-9,58	-25,33
7	0,81	-16,54	17,54	-0,30	58,58	-7,87	-25,78	44,07
8	2,91	-4,59	38,31	-6,71	-21,42	27,63	-0,37	-53,10
9	9,96	17,71	-2,75	-31,82	5,58	22,28	-12,27	48,00
10	-29,19	-13,63	-32,63	41,20	-5,02	-103,55	3,63	1,32
11	18,65	-7,13	-27,96	1,36	-14,69	45,37	37,69	-53,18
12	-2,64	19,87	4,56	-12,86	-13,63	-15,58	-5,97	24,87
13	8,32	-6,06	6,74	14,87	6,20	20,94	6,20	11,43
14	-0,88	11,19	-3,26	-17,49	-3,99	-1,21	-10,98	-26,22
15	12,16	-15,83	11,23	31,38	47,25	25,88	12,62	31,63
16	-27,41	-14,68	-2,25	-35,47	-54,58	-39,78	-10,73	-5,93
17	87,02	5,32	-55,52	31,80	52,57	-99,54	-65,64	-196,80

Примечание. RW 1-4 – первые четыре относительные деформации; x – «нагрузка» метки по оси абсцисс; y – «нагрузка» метки по оси ординат.

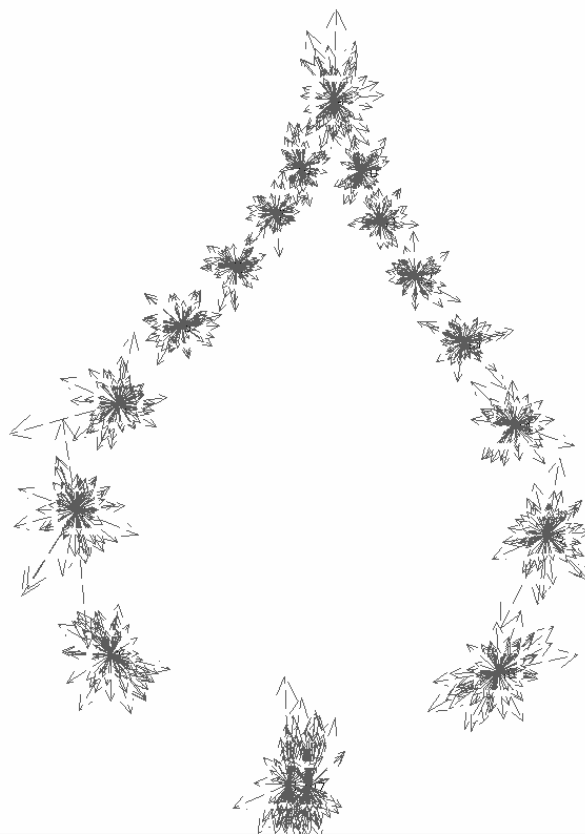


Рис. 3. Вклад меток в вариабельность формы листовой пластинки *Betula pendula* Roth: векторами обозначены направление и степень отклонения расположения меток от усреднённой формы (консенсуса) листовой пластинки.

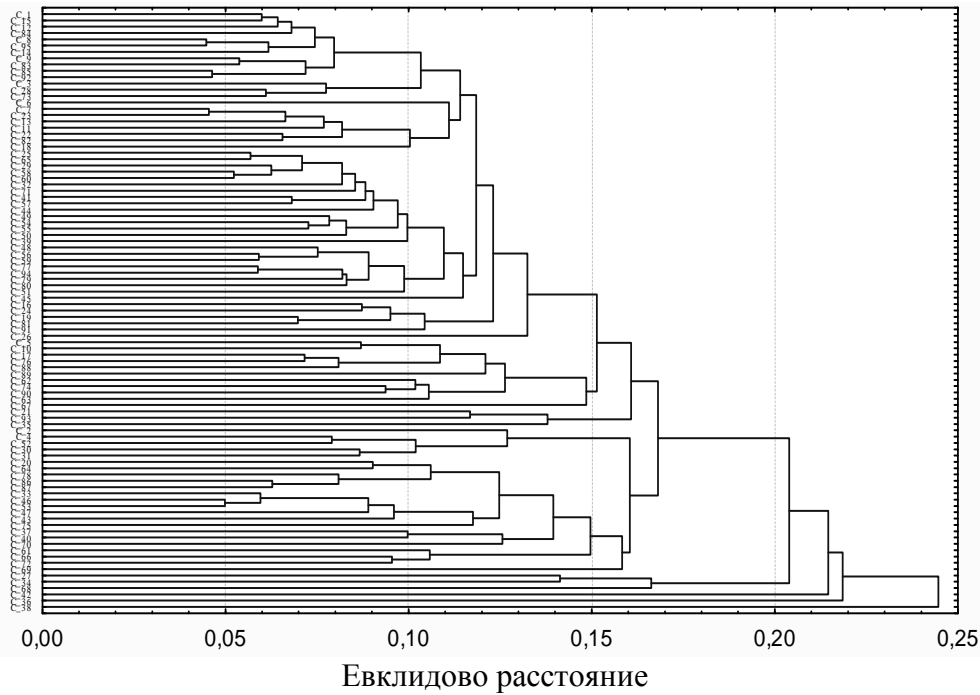


Рис. 4. Дендрограмма сходства образцов листовых пластинок *Betula pendula* Roth: числа на оси ординат соответствуют номерам образцов.

Для исследуемых экосистем сопоставлены выделенные при кластерном анализе морфотипы листовой пластинки. Значение индекса Шеннона, рассчитанное на основании разнообразия морфотипов, снижается в ряду экосистем: полевая лесополоса в пригородной зоне (2,523) – ДБС (2,480) – отвал (2,280) – придорожные территории (2,056). Таким образом, увеличение степени антропогенного прессинга сопровождается уменьшением морфотипического разнообразия листовой пластинки *B. pendula*.

Рассчитанные значения индекса Шеннона могут быть использованы только в сравнительном аспекте и имеют значимую информативность при рассмотрении всей выборки в совокупности [11].

Результаты детальной разработки данного подхода могут в дальнейшем пополнить перечень применяемых методов биоиндикации.

Выводы

Показатель морфотипического разнообразия листовой пластинки *Betula pendula*, рассчитанный с помощью индекса Шеннона, имеет наиболее низкие значения в пределах экосистем с более высокой антропогенной нагрузкой: увеличение степени антропогенного прессинга сопровождается уменьшением морфотипического разнообразия листовой пластинки. В вариативность формы листовой пластинки *B. pendula* значительно больший вклад вносят метки базальной части по сравнению с метками апикальной части листовой пластинки. Наиболее значителен вклад меток, соответствующих части листовой пластинки в месте прикрепления черешка.

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 / М. В. Андреева. – СПб., 2007. – 18 с.
2. Злобін Ю. А. Концепція морфометрії у сучасній ботаніці / Ю. А. Злобін, В. Г. Скляр, Л. М. Бондарєва, К. С. Кирильчук // Чорноморський ботан. журн. – 2009. – Т. 5, № 1. – С. 5–22.
3. Павлинов И. Я. Разнообразие формы: новые подходы / И. Я. Павлинов // Стратегия изучения биоразнообразия наземных животных. – М., 1995. – С. 44–50.

4. Павлинов И. Я. Анализ изменчивости формы третьего верхнего коренного у скальных полевок рода *Alticola* (Cricetidae) методами геометрической морфометрии / И. Я. Павлинов // Зоол. журн. – 1999. – Т. 78, № 1. – С. 78–83.

5. Павлинов И. Я. Геометрическая морфометрия черепа мышевидных грызунов (Mammalia, Rodentia): связь формы черепа с пищевой специализацией / И. Я. Павлинов // Журн. общ. биол. – 2000. – Т. 61, № 6. – С. 583–600.

6. Павлинов И. Я. Геометрическая морфометрия – новый аналитический подход к сравнению компьютерных образов / И. Я. Павлинов // Информационные и телекоммуникационные ресурсы в зоологии и ботанике. – СПб., 2001. – С. 65–90.

7. Павлинов И. Я. Принципы и методы геометрической морфометрии / И. Я. Павлинов, Н. Г. Микешина // Журн. общ. биол. – 2002. – Т. 63, № 6. – С. 473–493.

8. Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях / Юрий Андреевич Песенко. – М.: Наука, 1982. – 287 с.

9. Смирнова О. В. 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.

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

11. Штірц Ю. О. До питання морфотипової різноманітності листкових пластинок *Betula pendula* Roth в умовах антропогенно трансформованого середовища (м. Донецьк) / Ю. О. Штірц // Матеріали XIII з'їзду Українського ботанічного товариства (Львів, 19–23 вересня 2011 р.). – Львів, 2011. – С. 179.

12. Adams D. C. Geometric morphometrics: ten years of progress following the «revolution» / D. C. Adams, F. J. Rohlf, D. E. Slice. – 2002. – [Electronic resource]. Mode of access: <http://life.bio.sunysb.edu/morph/review/review.html>

13. Bookstein F. L. Size and shape spaces for landmark data in two dimensions / F. L. Bookstein // Stat. Sci. – 1986. – Vol. 1, N 1. – P. 181–242.

14. Bookstein F. L. Morphometric tools for landmarks data / F. L. Bookstein. – New York, 1991. – 435 p.

15. Rohlf F. J. Relative warps analysis and example of its application to mosquito wings / F. J. Rohlf. – Contributions to morphometrics. – Madrid: C.S.C.I., 1993. – P. 131–160.

Жуков О. В., Штірц Ю. О., Жуков С. П. Оцінка методами геометричної морфометрії морфологічної мінливості листкових пластинок *Betula pendula* Roth в екосистемах з різним ступенем антропогенної трансформації. – Методами геометричної морфометрії проведено оцінку морфологічної мінливості листової пластинки *Betula pendula* в умовах екосистем з різним ступенем антропогенної трансформації. Показник морфотипової різноманітності листової пластинки, розрахований за допомогою індексу Шеннона, має найбільш низькі значення в межах екосистем з більш високим антропогенним навантаженням. У варіабельність форми листової пластинки значно більший внесок вносять мітки базальної частини в порівнянні з мітками апікальної частини листової пластинки. Найбільш значний внесок мають мітки, що відповідають частини листової пластинки в місці прикріплення черешка.

Ключові слова: геометрична морфометрія, листовка пластинка, *Betula pendula*, морфотип, відносні деформації.

Zhukov A. V., Shtirts Yu. A., Zhukov S. P. The estimation by methods of a geometrical morphometry of morphological variability of leaf blade *Betula pendula* Roth in ecosystems with a different degree of anthropogenous transformation. – The methods of a geometrical morphometry conduct an estimation of morphological variability leaf blade *Betula pendula* in conditions of ecosystems with a different degree of anthropogenous transformation. The metric morphotyps of variety leaf of a plate calculated with the help of an index of the Shannon, has the lowest values in limits of ecosystems with higher anthropogenous load. In variability of the form leaf blade the much greater contribution is brought in with landmarks of a basal part as contrasted to by landmarks of apical part leaf of a plate. The contribution of landmarks appropriate part leaf of a plate in a place of an attachment of leafstalk is most appreciable.

Key words: geometrical morphometry, leaf blade, *Betula pendula*, morphotyp, relative warps.