

УДК 581.9:581.526.53:502

В.М.Скробала<sup>1</sup>, Р.М.Данилик<sup>1</sup>, І.М.Данилик<sup>2</sup>

### ЕКОЛОГІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОШИРЕННЯ ГІДРОФІТІВ В УМОВАХ ЗЕЛЕНОЇ ЗОНИ МІСТА ЛЬВОВА

*Скробала В.М., Данылык Р.Н., Данылык И.Н. Экологические закономерности распространения гидрофитов в условиях зеленой зоны города Львова // Науч. зап. Гос. природоведч. музея. – Львов, 2005. – Вип. 21. – С. 175-182.*

На основании математического моделирования с использованием методов добычи данных установлена иерархия значимости экологических факторов для распространения гидрофитов в условиях зеленой зоны города Львова.

*Skrobala, V., Danylyk, R., Danylyk, I. Ecological mechanisms of the distribution of hydrophytes in the green zone of Lviv // Proc. of the State Nat. Hist. Museum. – Lviv, 2005. – 21. – P. 175-182.*

Based on the mathematical modeling with the use of data finding methods, a hierarchy of the significance of ecological factors to the distribution of hydrophytes in the green zone of Lviv has been ascertained.

За своїми фізико-хімічними властивостями вода є значно одноріднішим середовищем, аніж найрізноманітніші поєднання наземних умов. Завдяки високій питомій теплоємності води згладжується вплив таких важливих екологічних чинників як температурний режим і континентальність клімату. Екологічні умови формування угруповань водної рослинності майже не залежать від зональних чи регіональних співвідношень вологи і тепла [2]. У зв'язку з цим, водні рослини характеризуються досить широкими географічними ареалами. Таким чином, екологічні закономірності поширення гідрофітів і рослин суходолу істотно відрізняються, що необхідно враховувати в ефективному керуванні водними екосистемами.

#### Матеріал і методика досліджень

Дослідження флори гідрофітів проводили на території зеленої зони м. Львова на прикладі 47 водних екосистем (озера, стави, річки, канали, кар'єри тощо), упродовж 1994-2003 рр. Збір матеріалу проводили згідно із загальноприйнятими методиками досліджень водних рослин [8], назви і автори видів відповідають наведеним в „Определителе...” [13].

Екологічні закономірності поширення водних рослин вивчали методами добування даних [5-7, 9-11, 14]. Дослідження склалися з трьох основних етапів: вивчення структури взаємного розташування видів у багатовимірному просторі екологічних параметрів, математичне моделювання структури та перевірку математичної моделі.

Еколого-ботанічна інформація представлена у вигляді матриці вимірністю  $n \times p$ , де  $n$  – кількість видів,  $p$  – екологічні параметри за фітоіндикаційними шкалами Г. Еленберга (освітленість, термічний режим, континентальність, режим

зволоженості, кислотність, вміст азоту) [17]. Приведення екологічних параметрів до спільного мірила здійснювали в рамках процедури стандартизації [6, 12]. З позицій багатовимірного статистичного аналізу, кожний вид можна представити у вигляді точки у багатовимірному просторі ознак [12]. У цьому випадку подібність видів за сукупністю екологічних параметрів можна визначити на основі відстаней між точками.

Оцінку взаємного розташування точок (видів) здійснювали шляхом багатовимірного масштабування (цілеспрямованої проєкції точок на площину із максимальним збереженням інформації про їх структуру) [1, 3, 6, 15]. Виявлення максимально віддалених об'єктів-видів і комбінації екологічних чинників, яка ділить вибірку на більш-менш однорідні групи, може слугувати основою для визначення максимальної осі варіювання рослинності та прогнозування екологічних закономірностей поширення видів [6]. Основні методи аналізу – кореляційний, кластерний і дискримінантний. В рамках кластерного аналізу, на основі інформації про найбільш віддалені у багатовимірному просторі ознак, сукупність видів розбивали на дві частини. Відмінності між ними, імовірно, визначають механізм формування потенційних фітоценоструктур. Для виявлення комбінації екологічних чинників, які відрізняють дві групи видів, використовували дискримінантний аналіз. Щодо площини поділу, то кожен вид характеризується координатою, яка визначає його положення на осі максимального варіювання. Перевірку математичних моделей здійснювали шляхом оцінки поширення видів залежно від екологічного стану водойм.

### Результати досліджень

В результаті маршрутних обстежень на території зеленої зони м. Львова виявлено 39 видів водної флори, які відзначаються великою різноманітністю екологічних параметрів (табл.) Найпоширенішими видами є *Lemna minor*, *L. trisulca*, *Spirodela polyrhiza*, *Elodea canadensis*, *Ceratophyllum demersum*, *Polygonum amphibium*, *Potamogeton natans*, *P. pectinatus*. Окремі види рідше трапляються у водоймах міста та його околиць: *Batrachium aquatile*, *Ceratophyllum submersum*, *Lemna gibba*, *Myriophyllum verticillatum*, *Nymphaea alba*, *Potamogeton pusillus*, *Salvinia natans*, *Utricularia minor*.

Аналіз залежностей між різними екологічними параметрами видів вказує на відсутність тісного зв'язку між змінними (рис. 1). Коефіцієнти кореляції характеризуються низькими значеннями, і тільки для параметрів кислотність – вміст азоту та режим освітленості – водний режим цей показник дещо перевищує 0,5. У більшості випадків зв'язок між змінними носить криволінійний характер. Значні відхилення точок від кривої регресії свідчать про відсутність впорядкованої структури в розташуванні видів у багатовимірному просторі ознак екологічних параметрів. Унаслідок цього двовимірні діаграми розсіювання не дозволили виявити чітких закономірностей, на основі яких можна було б пояснити особливості поширення видів водної флори.

Сучасні уявлення про екологічну нішу видів як гіперпростір, на нашу думку, вимагають перегляду традиційних підходів в еколого-ботанічних дослідженнях [4].

Таблиця

Екологічні параметри видів водної флори, результати кластерного та дискримінантного аналізів

№ з/п	Вид	Екологічні параметри						Кластер	Канонічні відмітки
		L	T	K	F	R	N		
1	<i>Batrachium aquatile</i>	7	5	2	11	6	6	1	-3,42
2	<i>Batrachium foeniculaceum</i>	6	6	5	12	7	8	2	2,31
3	<i>Batrachium trichophyllum</i>	7	5	4	12	8	7	2	1,36
4	<i>Callitriche cophocarpa</i>	8	6	3	10	8	5	1	-3,05
5	<i>Callitriche hermaphroditica</i>	7	6	5	12	4	3	1	-1,78
6	<i>Callitriche verna</i>	6	5	4	11	5	4	1	-2,78
7	<i>Caulinia minor</i>	6	7	4	12	8	4	2	1,48
8	<i>Ceratophyllum demersum</i>	6	7	5	12	8	8	2	3,33
9	<i>Ceratophyllum submersum</i>	5	8	5	12	8	7	2	3,74
10	<i>Elodea canadensis</i>	7	6	5	12	7	7	2	1,61
11	<i>Hippuris lanceolata</i>	7	5	4	10	8	6	1	-1,84
12	<i>Hottonia palustris</i>	7	6	5	12	5	4	1	-0,74
13	<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	7	6	4	11	7	6	1	-0,89
14	<i>Lemna gibba</i>	8	6	3	11	8	8	1	-0,77
15	<i>Lemna minor</i>	7	5	3	11	7	6	1	-1,90
16	<i>Lemna trisulca</i>	7	6	3	12	7	5	1	-0,46
17	<i>Myriophyllum alterniflorum</i>	7	5	2	12	6	3	1	-2,78
18	<i>Myriophyllum spicatum</i>	5	6	4	12	9	7	2	3,24
19	<i>Myriophyllum verticillatum</i>	5	6	5	12	7	8	2	2,74
20	<i>Najas major</i>	5	6	4	12	8	5	2	1,93
21	<i>Nuphar lutea</i>	8	6	4	11	7	6	1	-1,32
22	<i>Nymphaea alba</i>	8	6	3	11	7	5	1	-2,35
23	<i>Nymphaea candida</i>	8	6	6	11	4	4	1	-2,64
24	<i>Polygonum amphibium</i>	7	6	5	11	6	4	1	-1,44
25	<i>Potamogeton acutifolius</i>	7	6	4	11	5	6	1	-2,41
26	<i>Potamogeton berchtoldii</i>	6	5	5	12	6	6	2	0,75
27	<i>Potamogeton compressus</i>	6	5	5	12	8	4	2	1,73
28	<i>Potamogeton crispus</i>	6	5	3	12	7	5	1	-0,28
29	<i>Potamogeton lucens</i>	6	6	4	12	6	7	2	0,51
30	<i>Potamogeton natans</i>	6	5	5	11	7	5	1	-0,22
31	<i>Potamogeton pectinatus</i>	6	5	5	12	8	8	2	2,82
32	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	6	6	5	12	7	6	2	1,76
33	<i>Potamogeton pusillus</i>	6	6	5	12	7	5	2	1,49
34	<i>Salvinia natans</i>	7	8	5	11	7	7	2	0,65
35	<i>Spirodela polyrhiza</i>	7	6	5	11	6	6	1	-0,89
36	<i>Stratiotes aloides</i>	7	6	5	11	8	6	2	0,64
37	<i>Utricularia minor</i>	8	6	3	12	6	2	1	-2,47
38	<i>Utricularia vulgaris</i>	7	6	5	12	5	4	1	-0,74
39	<i>Zannichellia palustris</i>	6	6	5	12	8	8	2	3,07

Умовні позначення: L – освітленість, T – термічний режим, K – континентальність, F – режим зволоженості, R – кислотність, N – вміст азоту, бали [17]

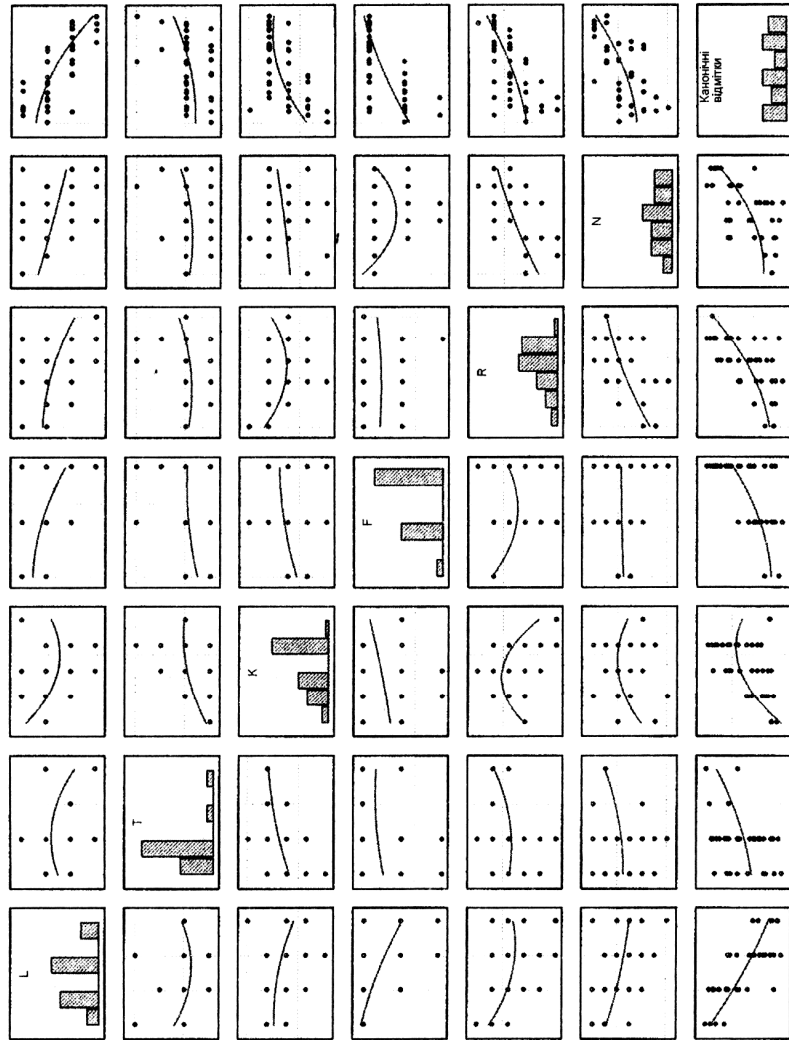


Рис. 1. Діаграма залежності між екологічними параметрами та канонічними відмітками видів водної флори.

Примітки: стовпчикові діаграми відображають емпіричні ряди розподілу екологічних параметрів, точки – положення видів; позначення екологічних параметрів наведені в таблиці.

Так, на двовимірній діаграмі розсіювання види можуть займати близьке положення, водночас сильно відрізнятися за набором інших екологічних параметрів. Ідея наших досліджень полягала у математичному моделюванні структури розташування видів у гіперпросторі ознак. Оскільки візуально неможливо розпізнати структуру в багатовимірному просторі, основну увагу приділяли графічному відображенню результатів досліджень на основі критерію [3, 15]:

$$C = \sum (d_{ij} - \delta_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (I_k - J_k)^2}, \quad (2)$$

де  $d_{ij}$  – відстань Евкліда між видами у гіперпросторі  $p$  ознак;  $\delta_{ij}$  – відстань Евкліда між видами у трансформованому двовимірному просторі;  $i, j$  – порядкові номери видів;  $I_k, J_k$  – стандартизовані значення екологічних параметрів видів.

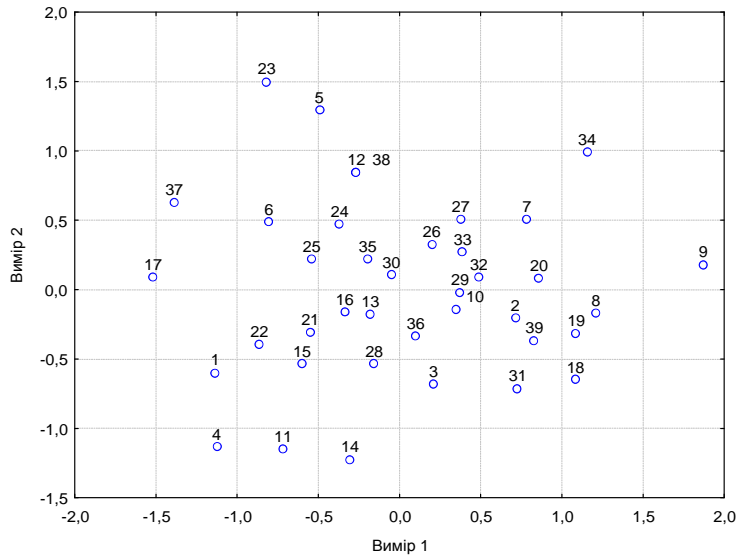


Рис. 2. Двовимірна ординація видів за результатами багатовимірного масштабування.

Примітка: цифрова нумерація видів відповідає їх порядковому номеру у таблиці.

Апроксимація відстаней  $d_{ij}$  значеннями  $\delta_{ij}$  дала змогу графічно відобразити структуру розташування видів у гіперпросторі ознак (рис. 2). Безладний масив чисел замінено на двовимірну діаграму розсіювання, яка виявляє структуру у вигляді кластерів, колінеарностей, трендів та інших характерних властивостей вибірки. Так, великою подібністю екологічних параметрів відзначаються види *Hottonia palustris* і *Utricularia vulgaris* (рис. 2, точки 12, 38). Екологічною специфічністю характеризуються види, яким відповідають точки, віддалені від просторового центру: *Salvinia natans*, *Ceratophyllum submersum*, *Nymphaea candida*, *Utricularia minor*, *Myriophyllum alterniflorum*. Відсутність тісного зв'язку між екологічними параметрами видів водної флори можна пояснити великою неоднорідністю вибірки.

Так, у структурі значень екологічних параметрів досить чітко виділяються дві групи видів, які характеризуються наявністю залежності між їх координатами (колінеарності). Перший напрям задають види *Nymphaea candida* і *Myriophyllum spicatum*, (рис. 2, точки 23→18). Цей напрям є відображенням залежності, коли високим значенням освітленості у ценозі відповідають низькі показники кислотності середовища і вмісту азоту, і навпаки. У цьому випадку роль температурного режиму і континентальності клімату є малозначущою. Другий напрям характеризують види *Callitriche hermaphroditica* і *Salvinia natans* (рис. 2, точки 4→34). Він визначає практично ту саму залежність між екологічними параметрами, за винятком достовірного впливу показника температурного режиму, від'ємно корельованого із фактором освітленості.

Для математичного моделювання загальних екологічних закономірностей поширення видів водної флори ми вибрали найбільшу відстань між точками (рис. 2, точки 17→9), яка, на нашу думку, є відображенням максимальної осі варіювання рослинності. Подальша процедура математичних обчислень полягала у виділенні двох груп видів, максимально віддалених у багатовимірному просторі ознак (табл.). Цей метод можна розглядати як аналог дисперсійного аналізу в розумінні, що внутрішньогрупова змінюваність об'єктів-видів порівнювалася із міжгруповою, щоб досягти максимально можливої різниці між середніми значеннями екологічних параметрів [6]. Виділені групи видів істотно відрізняються за всіма екологічними параметрами (рис. 3).

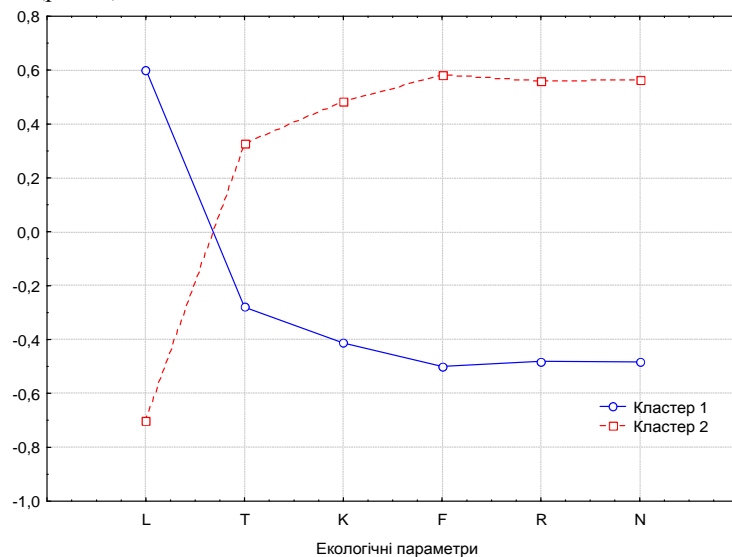


Рис. 3. Відмінності між групами видів за екологічними параметрами.

Для прийняття рішення про те, які екологічні чинники вносять найбільший вклад у відмінність отриманих груп видів, було проведено канонічний дискримінантний аналіз. Основне завдання досліджень полягало у наближеному визначенні положення кожного виду на осі максимального варіювання рослинності. Функція для обчислення координат (канонічних відміток) видів відносно площини поділу в гіперпросторі ознак екологічних параметрів має вигляд:

$$f = -0,377*L + 0,186*T + 0,733*K + 0,878*F + 0,925*R + 0,431*N, \quad (3)$$

де L – освітленість, T – термічний режим, K – континентальність, F – режим зволоженості, R – кислотність, N – вміст азоту (в обчисленнях використовували стандартизовані значення екологічних параметрів).

Результати обчислень канонічних відміток для кожного виду водної флори наведені в таблиці. За положенням на осі максимального варіювання найбільш віддаленими видами є *Batrachium aquatile* і *Ceratophyllum submersum*. Низькими значеннями канонічних відміток характеризуються види, які індикують малий вміст мінерального азоту та високу освітленість: *Utricularia minor*, *Myriophyllum alterniflorum*, *Callitriche cophocarpa*, *Nymphaea candida*. Високі значення канонічних відміток властиві видам із максимальними величинами екологічних індексів R і N: *Ceratophyllum submersum*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum verticillatum*, *Myriophyllum spicatum*, *Zannichellia palustris*, *Batrachium foeniculaceum*. Проте залежність між екологічними параметрами видів і їх положенням на осі максимального варіювання є набагато складнішою (рис. 1). На основі кореляційного аналізу вдалося встановити таку ієрархію значущості екологічних параметрів: освітленість (коефіцієнт кореляції із величинами канонічних відміток становить  $r = -0,75$ ), фактор зволоження ( $r = 0,62$ ), кислотність ( $r = 0,60$ ), вміст мінерального азоту ( $r = 0,60$ ), континентальність ( $r = 0,51$ ), термічний режим ( $r = 0,35$ ).

Аналіз літературних джерел свідчить, що поширення рослин суходільних місцезростань у першу чергу визначається кліматичними чинниками (термічний режим і континентальність) [16]. Едафічні чинники, які більшою мірою пов'язані із геоморфологічними, гідрологічними умовами регіонального характеру, займають друге місце за своєю значущістю. Найменш значущим екологічним чинником у тричленній ієрархії (після кліматопу і едафотопу) є режим освітленості, центрично обумовлений складом, структурою і станом рослинного покриву конкретної ділянки місцевості. Для видів водної флори нами отримана протилежна ієрархія значущості екологічних чинників. Саме тому рослинні угруповання і екотопи водойм часто не враховуються у дослідженнях зональних екологічних градієнтів [4].

Відсутність розвинутої методології оцінювання різноманітних форм антропогенного впливу не дозволила використати цей чинник у процесі математичного моделювання. Проте аналіз екологічної еквівалентності чинників виробничої діяльності щодо їх впливу на природні процеси дає змогу прогнозувати наслідки антропогенного впливу. Так, режим освітленості у водних угрупованнях значною мірою залежить від прозорості води. В умовах евтрофікації водойм зростає фітоценотична значущість видів, менш вибагливих до освітленості: *Ceratophyllum submersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Najas major* та ін.

Істотну роль у поширенні гідрофітів відіграють показники кислотності й азотного режиму. У водоймах з відносно задовільним екологічним станом (Янівський Став, Глинна Наварія, Піщані озера та ін.) трапляються *Batrachium aquatile*, *Callitriche verna*, *Nymphaea alba*, *N. candida*, *Potamogeton acutifolius*, *Utricularia minor*. Згідно з математичним моделюванням, ці види характеризуються від'ємними значеннями канонічних відміток (табл.). Незадовільний екологічний стан водойм (озера в районі вул. Зелена, Дж. Вашингтона, с. Сокільники, с. Дубляни та ін.)

індикують такі види: *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton pectinatus*, *Zannichellia palustris*.

### Висновки

Отримані результати свідчать про значну відмінність екологічних закономірностей поширення видів водної флори в порівнянні із представниками зонального рослинного покриву суходільних екосистем. Залежність між положенням виду на осі максимального варіювання (значення канонічних відміток) і екологічними параметрами дозволяє сформулювати таку гіпотезу: у порівнянні з суходільними видами закономірності поширення видів водної флори характеризуються протилежною ієрархією значущості екологічних чинників: ценотичні → едафічні → кліматичні.

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
2. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / Под ред. Р. Шуберта. – М.: Мир, 1988. – 348 с.
3. Дейвисон М. Многомерное шкалирование: Методы наглядного представления данных. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 254 с.
4. Дідух Я.П., Плюта П.Г. Фітоіндикація екологічних чинників. – К.: Наук. думка, 1994. – 280 с.
5. Дюк В., Самойленко А. Data Mining: учебный курс. – СПб: Питер, 2001. – 368 с.
6. Енюков И.С. Методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 232 с.
7. Зайцев Г.Н. Математика в экспериментальной ботанике. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
8. Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. – Л.: Наука, 1981. – 187 с.
9. Киселев М., Соломатин Е. Средства добычи знаний в бизнесе и финансах // Открытые системы. – 1997. – № 4. – С. 41-44.
10. Лапач С.Н., Чубенко А.В., Бабич П.Н. Статистика в науке и бизнесе. – К.: Морион, 2002. – 640 с.
11. Методы добычи данных // Электронный учебник по статистике. – Москва, StatSoft. WEB: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>. (2001).
12. Миркин Б.Г. Анализ качественных признаков и структур. – М.: Статистика, 1980. – 349с.
13. Определитель высших растений Украины / Доброчаева Д.Н., Котов М. И., Прокудин Ю.Н. и др. – Киев: Наук. думка, 1987. – 548 с.
14. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.
15. Терехина А.Ю. Анализ данных методами многомерного шкалирования. – М.: Наука, 1986. – 168 с.
16. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических факторов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. – М.: Наука, 1983. – 198 с.
17. Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., et al. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa // Scripta Geobot. – 1992. – Vol. 18. – 258 S.

<sup>1</sup> Український державний лісотехнічний університет, Львів;

<sup>2</sup> Інститут екології Карпат НАН України, Львів