

**АДАПТАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ РОЛЬОВОГО МЕРЕЖЕВОГО
АНАЛІЗУ «REGULAR EQUIVALENCE»
ТА «REGULAR ROLE COLORATION» ДЛЯ ПОБУДОВИ
ТРОФІЧНИХ МЕРЕЖ ПАСТОРАЛЬНИХ ЕКОСИСТЕМ**

С.С. РУДЕНКО, О.Я. БУЖДИГАН

Обґрунтовано використання рольового мережевого аналізу в екології та нове розв'язання проблеми побудови трофічних мереж пасторальних екосистем на його основі. Адаптовано технології регулярної еквівалентності та колорації для моделювання рольових трофічних мереж наземних екосистем пасторального типу із усуненням біологічних несинітниць. Представлено етапи здійснення рольового мережевого аналізу для побудови повних та формалізованих трофічних мереж.

ВСТУП

Упродовж останніх років було висунуто багато ідей, що пов'язані з оцінкою ролі видів у трофічних мережах, використовуючи для цього такі терміни як екологічна гільдія [1], трофічний тип [2], трофовид [3] тощо. Проте до сьогодні це основне питання екосистемології залишається відкритим [4, 5]. Допомогти усунути цю прогалину можуть методи рольового мережевого аналізу, які вже давно застосовуються в суспільних науках. Серед них найбільш привабливими для екологів є методи регулярної еквівалентності («regular equivalence») та колорації («regular role coloration»).

Перші спроби застосувати регулярну еквівалентність та колорацію для побудови трофічних мереж екологічних систем з'явилися лише декілька років тому, і належать групі американських та англійських учених [6–8]. Ці автори застосовуючи інформацію про екологічні системи, що були описані іншими авторами в науковій літературі, продемонстрували можливість застосування таких методів, як «regular equivalence» (REGE-метод) та «regular role coloration» для побудови формалізованих трофічних мереж. Однак їх досвід поки що обмежується лише кількома малочленними водними екосистемами. До наземних екосистем (у тому числі пасовищного типу) зазначені вище методи рольового мережевого аналізу поки що не застосовувалися.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Мета роботи — адаптація технологій регулярної еквівалентності та колорації для побудови рольових трофічних мереж наземних екосистем пасторального типу.

Початковим етапом для здійснення рольового мережевого аналізу є побудова матриці, яка відображає наявність чи відсутність зв'язку між усіма парами елементів досліджуваної системи. Дана матриця слугує вхідною інформацією для REGE-методу рольового мережевого аналізу. При розробці звичайних неформалізованих трофічних схем різні вчені по-різному підходили до добору трофоелементів. Одні — схилилися до думки, що у якості трофоелементів необхідно вибирати всі види, що населяють екосистеми [1, 3, 4, 9–11], інші — до добору таксономічних рангів більш високого рівня (родів, класів і, навіть, царств) [2, 12]. Звичайно, добір трофоелементів на рівнях вищих за вид є простішим у плані практичної реалізації, адже визначення видової приналежності організмів займає багато часу в дослідника. Між іншим, при введенні у вхідну матрицю для побудови рольових трофічних мереж родів та таксонів більш високих рангів, дослідник вже здійснює ручне втручання в процедуру групування, яку від самого початку призначений реалізувати сам метод регулярної еквівалентності. Крім того, об'єднання видів у роди та родини здійснюється з метою систематизації живих організмів не за трофічними ролями, а за зовнішньою подібністю, тому внаслідок такої процедури види з різними трофічними ролями можуть бути об'єднані в одну систематичну, але не трофічну групу.

Отже, застосування в якості трофоелементів надвидових таксономічних рангів, як це мало місце при побудові класичних нерольових трофічних мереж, збіднює можливості самого рольового мережевого аналізу та погіршує його якість.

Аналіз перших прикладів застосування вже рольового мережевого аналізу в екології засвідчує, що дослідники не враховують того факту, що різні онтогенетичні стадії одного і того ж виду (наприклад, яйця, личинки, імаго) можуть займати різні трофічні ніші. По-різному можуть проявляти себе у трофічному ланцюгу й особини різних статей одного виду.

Враховуючи викладені вище міркування, ми поклали в основу створення вхідних матриць такі трофоелементи, як види, а також їх різні онтогенетичні стадії та статі у випадку, коли останні відіграють різну трофічну роль в екосистемі. Результати наших досліджень відображено на прикладі пасторальних екосистем Чернівецької області.

ОПИС ДОСЛІДЖЕНЬ

При дослідженні екосистем пасторального типу в межах Чернівецької області у вхідні матриці мережевого рольового трофічного аналізу нами введено 494 трофоелементи. Для тих комах личинки та імаго яких мають різні трофічні ніші, а також для самців та самок, зазначені стадії та статі вносились у вхідну матрицю як окремі трофоелементи. Крім того, як окремі трофоелементи розглядалися вегетативна маса рослин різних видів та їх пилок і нектар. У якості окремих трофоелементів вносились у вхідну матрицю мертві тварини, мертві рослини, детрит та екскременти великої рогатої худоби (ВРХ).

Загалом у вхідну матрицю було введено 15 різновидів трофоелементів (табл. 1). Кожний трофоелемент було кодовано порядковими номерами, які надалі застосовували у вхідних матрицях, графіках та схемах.

У цій роботі наведено наступне кодування трофоелементів для спрощення матриць та рисунків на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області (при визначенні рослин автори користувались джерелом [18], а тварин [19]): 19 — *Aphrophora alni* Fall. (Афрофора альні), 20 — *Stenodema laevigatum* L. (Сліпняк гладенький), 21 — *Athous niger* L. (Ковалик чорний), 24 — *Adelphocoris lineolatus* Gz. (Сліпняк люцерновий), 25 — *Decticus verrucivorus* L. (Стрибун сірий), 35a — *Lacon murinus* L. (Ковалик сірий (імаго)), 35в — *L. murinus* (личинка), 37 — *Polymerus cognatus* Fieb. (Клоп буряковий бурий), 48 — *Syritta pipiens* L. (Джюрчалка сирита), 76 — *Philaenus spumarius* L. (Пінявка звичайна), 78a — *Potosia lugubris* Hbst. (Бронзівка мармурова (імаго)), 78в — *P. lugubris* (личинка), 81 — *Dolycoris baccarum* L. (Щитник ягідний), 118 — *Cantharis rustica* Fall. (М'якотілка червононога), 121a — *Coccinella septempunctata* L. (Сонечко семикрапкове (імаго)), 121в — *C. septempunctata* (личинка), 126 — *Sympycna fusca* V. d. Lind. (Лютка тьмяна), 132a — *Musca domestica* L. (Муха кімнатна (імаго)), 132в — *M. Domestica* (личинка), 138 — *Tettigoniidae* (Коники справжні), 145 — *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott (Щитник чоловічий), 146 — *Equisetum arvense* L. (Хвощ польовий), 149 — *Carex leporina* L. (Осока заяча) 168 — *Cynosurus cristatus* L. (Гребінник звичайний), 169 — *Elytrogia repens* (L.) Nevski (Пирій повзучий), 181 — *Prunella vulgaris* L. (Суховершки звичайні (вегетативна маса)), 181* — *P. vulgaris* (пиллок та нектар), 182 — *Mentha arvensis* L. (М'ята польова (вегетативна маса)), 182* — *M. arvensis* (пиллок та нектар), 185 — *Thymus serpyllum* L. (Чебрець звичайний (вегетативна маса)), 185* — *T. serpyllum* (пиллок та нектар), 198 — *Trollius europaeus* L. (Купальниця європейська (вегетативна маса)), 198* — *T. europaeus* (пиллок та нектар), 206 — *Potentilla anserina* L. (Перстач гусячий (вегетативна маса)), 206* — *P. anserina* (пиллок та нектар), 208 — *Agrimonia grandis* Andr. ex. C.A. Mey. (Парило велике (вегетативна маса)), 208* — *A. grandis* (пиллок та нектар), 212 — *Filipendula vulgaris* Moench. (Гадючник звичайний (вегетативна маса)), 212* — *F. vulgaris* (пиллок та нектар), 213 — *Lotus arvensis* Pers. (Лядвенець польовий (вегетативна маса)), 213* — *L. arvensis* (пиллок та нектар), 220 — *Achillea millefolium* Klok. et Krytzka (Деревій звичайний (вегетативна маса)), 220* — *A. millefolium* (пиллок та нектар), 230 — *Leontodon hispidus* L. (Любочки шафранові (вегетативна маса)), 230* — *L. hispidus* (пиллок та нектар), 232 — *Leucanthemum vulgare* Lam. (Королиця звичайна (вегетативна маса)), 232* — *L. vulgare* (пиллок та нектар), 235 — *Ranunculus acris* L. (Жовтець їдкий (вегетативна маса)), 235* — *R. acris* (пиллок та нектар), 236 — *Euphorbia cyparissias* L. (Молочай кипарисовидний (вегетативна маса)), 236* — *E. cyparissias* (пиллок та нектар), 242 — *Trifolium pratense* L. (Конюшина лучна (вегетативна маса)), 242* — *T. pratense* (пиллок та нектар), 249 — *Plantago media* L. (Подорожник середній), 250 — *Plantago lanceolata* L. (Подорожник ланцетолистий), 252 — *Lysimachia nummularia* L. (Вербозілля лучне (вегетативна маса)), 252* — *L. nummularia* (пиллок та нектар), 268 — *Campanula patula* L. (Дзвоники розлогі (вегетативна маса)), 268* — *C. patula* (пиллок та нектар), 270 — *Carduus crispus* L. (Будяк курчавий (вегетативна маса)), 270* — *C. crispus* (пиллок та нектар), 283 — *Juncus bufonius* L. (Ситник жаб'ячий), 284 — *Bellis perennis* L. (Стокротки багаторічні (вегетативна маса)), 284* — *B. perennis* (пиллок та нектар), 304 — *Rhinanthus minor* L. (Дзвінець малий (вегетативна маса)), 304* — *R. minor* (пиллок та нектар), 311 — *Viola arvensis* Murr. (Фіалка польова), 320р — мертві рослини, 321т — мертві тварини (трупі комах та черв'яків), 322 — Детрит (напіврозкладені рештки рослин та комах), 323 — До-

щові черв'яки, 324 — Гетеротрофні бактерії, 325 — Мікроміцети, 326 — Актиноміцети, 327 — екскременти ВРХ, 328 — ВРХ.

Згідно із патентом [17] авторами було розроблено наступну систему позначень: **а** — імаго комах; **в** — личинка комах; * — пилок і нектар рослин; **т** — мертві тварини; **р** — мертві рослини.

Таблиця 1. Кількість трофоелементів у вхідній матриці для рольового мережевого аналізу трофічної структури пасторальних екосистем

№	Трофоелементи	Кількість трофоелементів
1.	Личинки комах	28
2.	Імаго комах	136
3.	Самці комах	4
4.	Самки комах	4
5.	Вегетативна маса рослин	179
6.	Пилок та нектар рослин	134
7.	Мертві рослини	1
8.	Мертві тварини	1
9.	Детрит	1
10.	Дощові черв'яки	1
11.	Гетеротрофні бактерії	1
12.	Мікроміцети	1
13.	Актиноміцети	1
14.	Екскременти ВРХ	1
15.	ВРХ	1
	Σ	494

При позначенні наявності чи відсутності зв'язків між зазначеними елементами у вхідній матриці для рольового мережевого аналізу трофічної структури екосистем пасторального типу постали такі дискусійні питання:

1. Чи пов'язано пилок вихідними зв'язками із мертвими рослинами?
2. Чи рослини, які поїдаються хоча б одним видом комах чи ВРХ, пов'язані вихідними зв'язками із мертвими рослинами?
3. Чи комах, які поїдаються іншими комахами, пов'язані вихідними зв'язками із мертвими комахами?

Відповіді на ці питання є важливими, оскільки відомо, що непродумане математичне моделювання нерідко призводить до біологічних несинітниць.

Усі зазначені вище питання з'ясовано на прикладі побудови вхідної матриці однієї із пасторальних екосистем, а саме, для пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області. При пошуку відповідей на досліджувані питання ми дійшли висновку, що їх не можливо розглянути відокремлено одне від одного. Тому було досліджено чотири можливих комбінації:

- коли види рослин і види комах при поїданні іншими трофоелементами, а також пилок, не мають вихідного зв'язку з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно;

- коли види рослин та види комах при поїданні іншими видами не мають вихідного зв'язку з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно, а пилкок в будь-якому випадку пов'язаний вихідними зв'язками з мертвими рослинами;

- коли пилкок не має вихідного зв'язку з мертвими рослинами, а види рослин чи комах у будь-якому випадку (незалежно від того чи поїдаються вони іншими трофоелементами) пов'язано вихідними зв'язками з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно;

- коли види рослин чи комах в будь-якому випадку (не залежно від того чи поїдаються вони іншими трофоелементами) та пилкок пов'язані вихідними зв'язками з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно.

Три перших комбінації призводили до біологічних несинітниць у трофічних мережах, які виявлялися в об'єднанні алгоритму REGE-методу в один трофоклас наступних трофоелементів:

- ВРХ (328), мертвих комах (321т), мертвих рослин (320р), детриту (322) та комах (рис. 1);

- гетеротрофних бактерій (324), мікроміцет (325), актиноміцет (326), екскрементів ВРХ (327), пилку рослин, вегетативної маси рослин, дощових черв'яків (323) та деяких комах (рис. 1);

- ВРХ (328), пилку та вегетативної маси деяких рослин (рис. 2);

- мертвих рослин та екскрементів ВРХ (рис. 2).

Матриця з комбінацією, коли види рослин та комах в будь-якому випадку (незалежно від того чи поїдаються вони іншими трофоелементами) та пилкок пов'язані вихідними зв'язками з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно виявилась найбільш біологічно правильною, оскільки REGE-алгоритм з одного боку зберіг інформацію про цінні трофічні ролі для пасторальних екосистем, а з іншого — не спричинив будь-яких біологічних несинітниць (рис. 5). Крім того, ця комбінація виправдала себе й на інших досліджуваних екосистемах.

Отже, аргументований добір трофоелементів дозволив розробити базову матрицю для рольового мережевого аналізу трофічних мереж пасторальних екосистем помірних широт, яка від тепер може бути використана будь-яким дослідником, що працює в даному напрямку.

Подальша технологія побудови рольових трофічних мереж обіймала чотири етапи, які розглянемо на прикладі обраної пасторальної екосистеми.

Спочатку будували матрицю бінарних коефіцієнтів (вид-вид) керуючись наступним принципом: 0 — при відсутності зв'язку, 1 — при наявності зв'язку. Зв'язки кожного трофоелементу з іншими трофоелементами оцінювали як у ролі хижака (в колонках матриці), так і в ролі жертви (в рядках матриці) (рис. 3).

Далі для аналізу даних застосовано REGE-алгоритм методу «regular equivalence» з комп'ютерного програмного пакету UCINET 6.164 (S. Borgatti, M. Everett, L. Freeman) [13].

Суть алгоритму REGE-методу регулярної еквівалентності рольового мережевого аналізу зводиться до наступних операцій, які виконує UCINET 6.164.

Нехай $r_{ij} = 1$ для всіх « i » та « j » (види є 100% еквівалентними до перших), тоді:

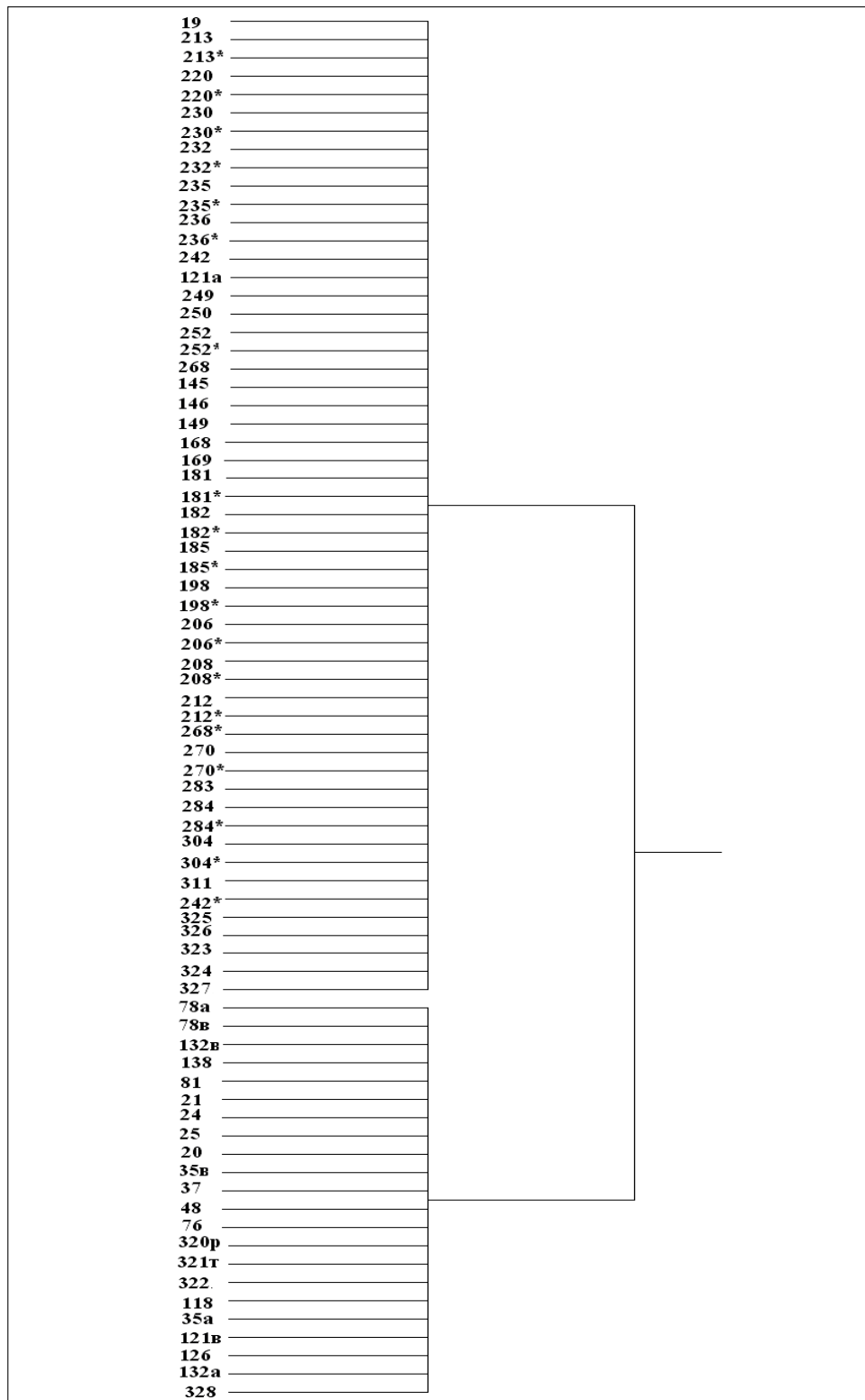


Рис. 1. Дендрограма невдалого ієрархічного кластерування, яку було одержано із застосуванням програмного пакету UCINET 6.164 на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області

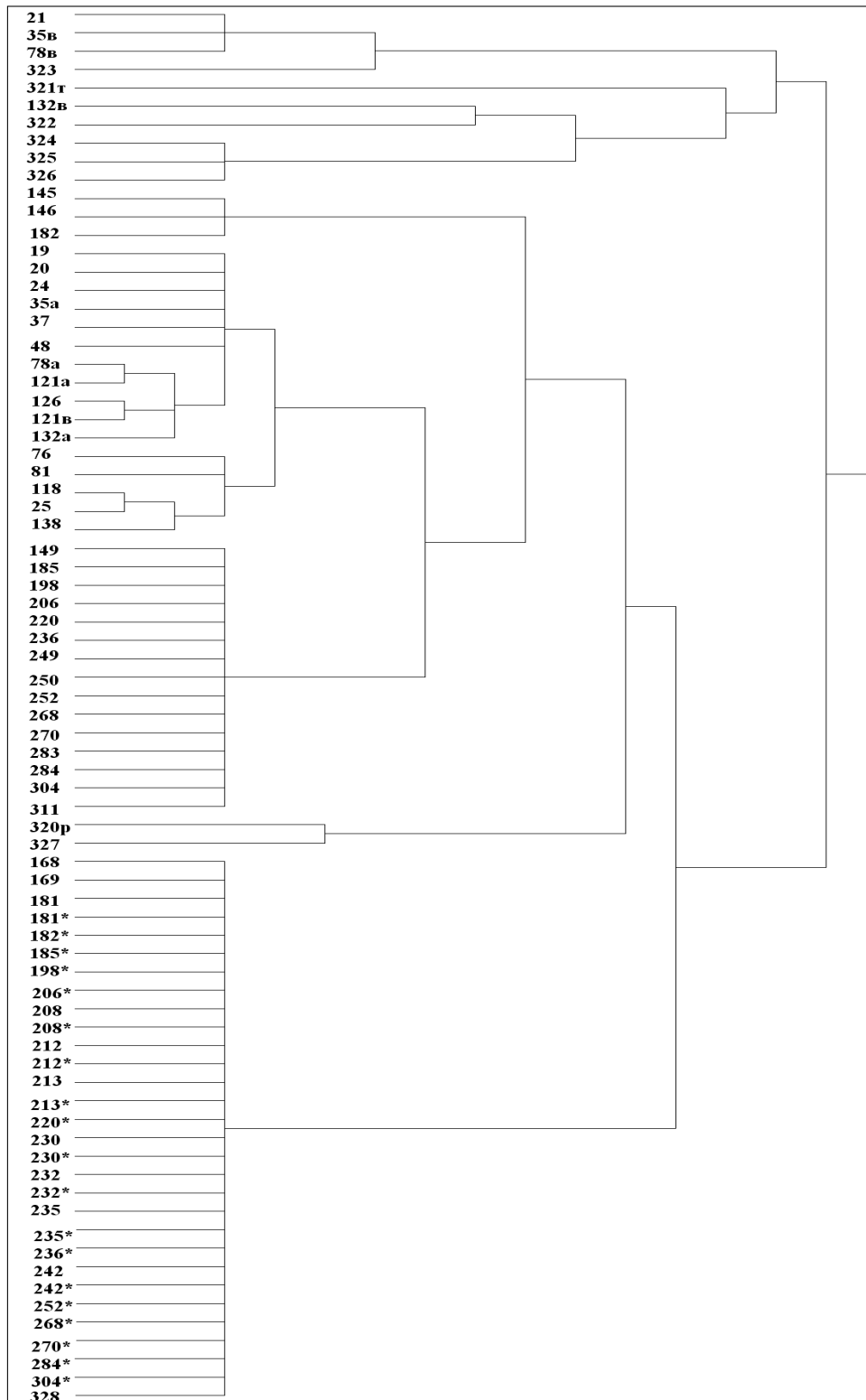


Рис. 2. Дендрограма успішного ієрархічного кластерування, яку було одержано із застосуванням програмного пакету UCINET 6.164 на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області

	19	20	21	24	25	35a	35в	37	48	7
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
121a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
121в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
132a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
132в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
138	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
149	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
168	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0

Рис. 3. Вхідна матриця бінарних коефіцієнтів (при 1 — існує трофічний зв'язок між трофоелементами, при 0 — трофічний зв'язок відсутній) для здійснення рольового мережевого аналізу трофічної структури на прикладі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області (в рядках трофоелементи виступають у ролі ресурсу (жертв), а в колонках — у ролі споживачів (хижаків))

1. Якщо всі види — жертви (« n » та « m » відповідно), які поїдаються видами « i » та « j » збігаються на 100%, тобто це максимальна еквівалентність, а коефіцієнт еквівалентності дорівнює одиниці, то для кожного виду k , які є жертвами для « i » програма шукає види « m », які є жертвами для « j » водночас є повністю еквівалентними до k . Звісно, що кількість видів « n », які поїдаються « j » та дорівнює кількості видів « m », які з'їдаються « i ».

2. Програма повторює крок 1 до того випадку, коли зміни вже не відбуваються у r_{ij} або якщо досягається максимум повторностей. Максимум повторностей дорівнює N видів або груп. Деталі алгоритму описані S. Borgatti та M. Everett [14, 15].

Алгоритм перетворює матрицю «вид-вид» на матрицю REGE із коефіцієнтами R (у межах від нуля до одиниці), які реєструються для кожної пари трофоелементів (рис. 4).

Для візуалізації моделей подібності, одержаних за допомогою REGE-методу, матриці подібностей піддавали неметричному багатовимірному шкалюванню (MDS — неметричне багатовимірне шкалювання) у порядку репрезентування подібностей як відстаней у двох просторах. Координати з процедури MDS потім використовували як вхідну інформацію для програми Rajek 1.14 (V. Batagelj, A. Mrvar) [16] мережевого графічного програмного забезпечення, за допомогою якої будували графічні схеми повних трофічних (рис. 7).

Надалі проведено ієрархічне кластерування вихідних матриць R із REGE-алгоритму методу «regular equivalence» та отримано дендрограми з розподілом зв'язків між трофічними елементами (рис. 5).

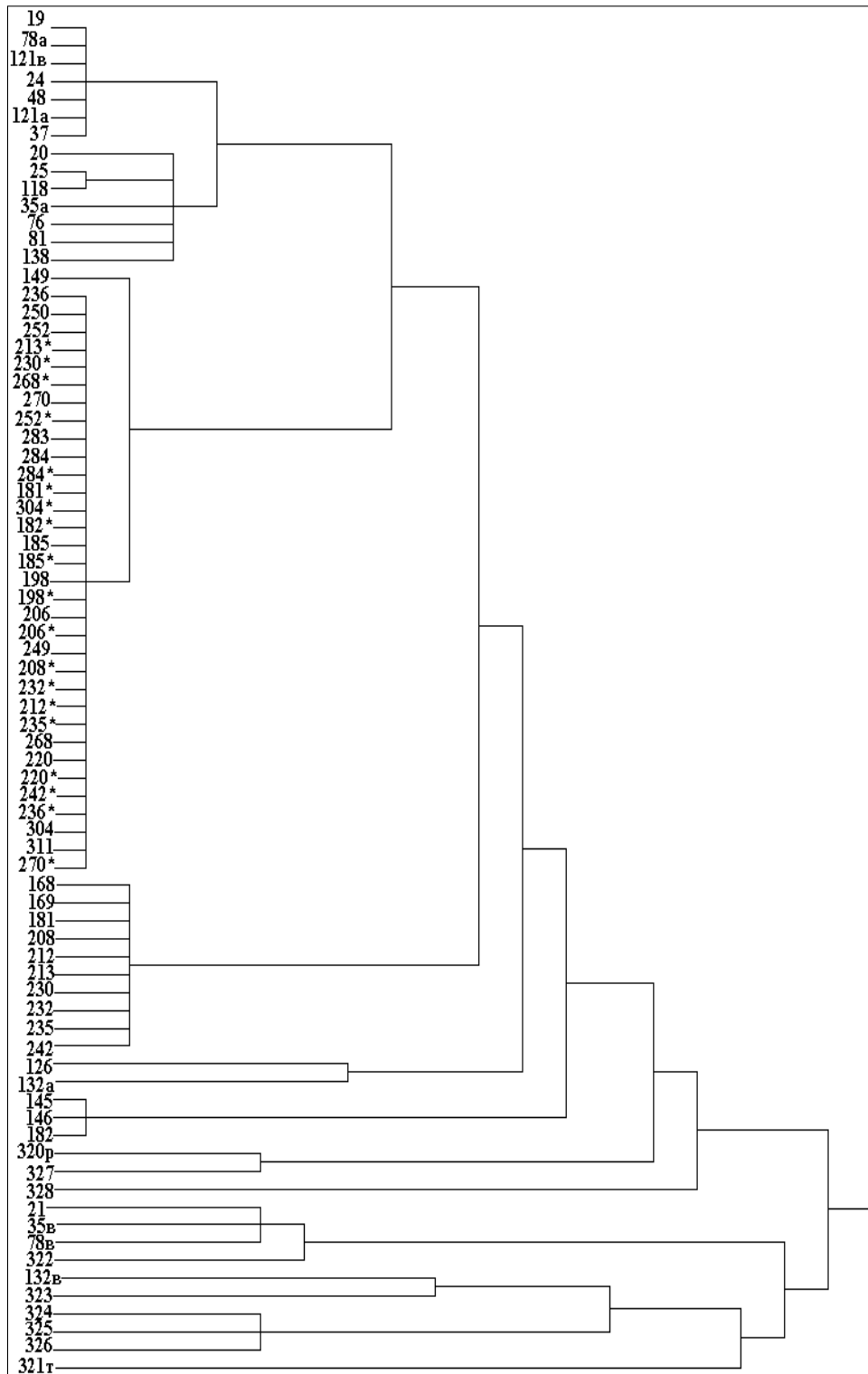


Рис. 5. Дендрограма ієрархічного кластерування із застосуванням регулярної еквіваленції рольового мережевого аналізу на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області, що свідчить про відсутність біологічних несинітниць при побудові трофічної мережі

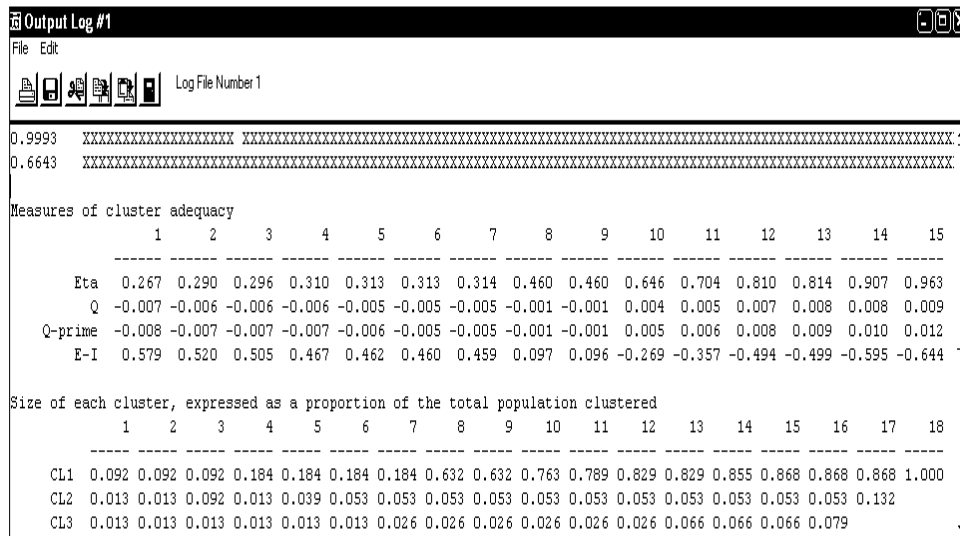


Рис. 6. Фрагмент вікна UCINET 6.164 із показниками величини відповідності кластеру (коефіцієнт детермінації R^2 або Eta)

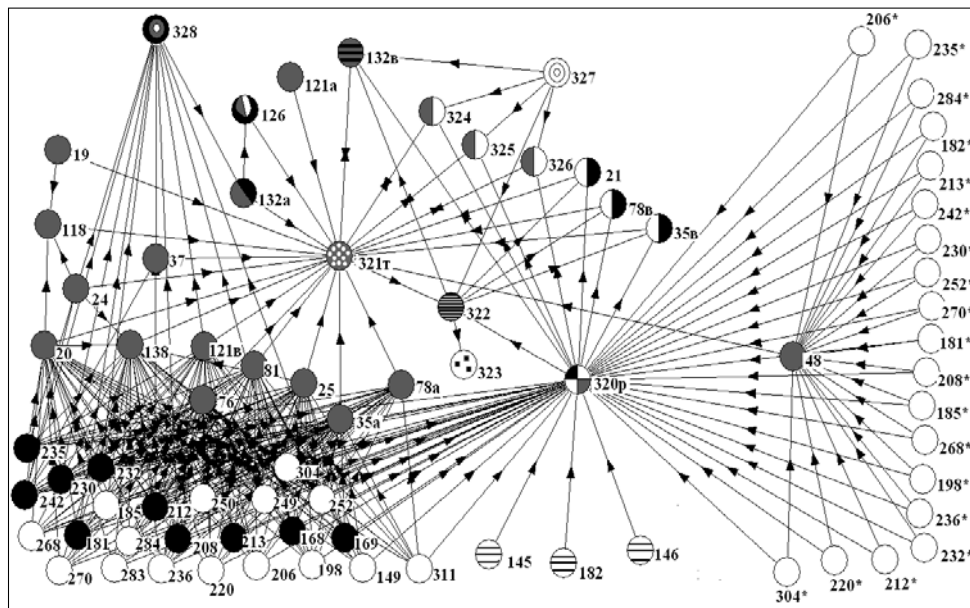


Рис. 7. Граф повної трофічної мережі, побудований із застосуванням методу «regular equivalence» рольового мережевого аналізу на прикладі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області

Остаточне групування трофічних елементів базується на величині відповідності кластеру (рис. 6). Коефіцієнт детермінації R^2 (або Eta в Apova та в UCINET 6.164) розглянуто як величину відповідності кластеру. Вибрано кластерування з такою кількістю класів, при якому R^2 є максимальним. Якщо для кількох кластерів R^2 максимальне й приблизно однакове, то дослідник має право самостійно обрати оптимальну кількість класів. Так у розглянутому нами випадку, максимальне значення Eta було зареєстроване при кількості кластерів 15 (рис. 6). Оскільки показник Eta

виявився максимальним лише для такої кількості кластерів і немає підстав для їх об'єднань, то кількість трофічних класів також повинна дорівнювати 15.

За результатами ієрархічного кластерування було об'єднано відповідні трофоелементи у відповідну кількість трофокласів у формалізованій матриці (рис. 8), яка слугувала вхідною інформацією для Рајек 1.14 для побудови формалізованих трофічних мереж (рис. 9).

	21, 35в, 78в	19, 20, 24, 25, 35а, 37, 48, 76, 78а, 81, 118, 121а, 121в, 138	126	132а	132в	145, 146, 182	149, 181*, 182*, 185, 185*, 198, 198*, 206, 206*, 208*, 212*, 213*, 220, 220*, 230*, 232*, 235*, 236, 236*, 242*, 249, 250, 252, 252*, 268, 268*, 270, 270*, 283, 284, 284*, 304, 304*, 311	168, 169, 181, 208, 212, 213, 230, 232, 235, 242	320р	321т	322	323	324, 325, 326	327	328
21, 35в, 78в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19, 20, 24, 25, 35а, 37, 48, 76, 78а, 81, 118, 121а, 121в, 138	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
132а	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
132в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
145, 146, 182	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
149, 181*, 182*, 185, 185*, 198, 198*, 206, 206*, 208*, 212*, 213*, 220, 220*, 230*, 232*, 235*, 236, 236*, 242*, 249, 250, 252, 252*, 268, 268*, 270, 270*, 283, 284, 284*, 304, 304*, 311	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
168, 169, 181, 208, 212, 213, 230, 232, 235, 242	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
320р	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
321т	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
322	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
324, 325, 326	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
327	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
328	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 8. Матриця бінарних коефіцієнтів (при 1 — існує трофічний зв'язок між трофокласами, при 0 — трофічний зв'язок відсутній) для побудови графу формалізованої трофічної мережі на прикладі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області за результатами ієрархічного кластерування матриці REGE подібності при застосуванні регулярної еквівалентії рольового мережевого аналізу. Кількість трофокласів відповідає величині відповідності кластеру ($\text{Eta} = 15$)

Згідно із формалізованою матрицею, трофоелементи, що відносяться до одного трофокласу зафарбовано ідентичним кольором у графах як повної, так і формалізованої трофічних мереж. Метод позначення ідентичним кольором трофоелементів одного трофокласу у рольовому мережевому аналізі має назву метод регулярної рольової колорації «regular role coloration» (рис. 7, 9). У нашому випадку, якщо до застосування рольового мережевого аналізу трофічна мережа (як і вхідна матриця) нараховувала 76 трофічних елементів (рис. 7), то після застосування регулярної еквівалентії вони об'єдналися у 15 трофокласів.

Забарвлення куль в ідентичний колір на рис. 7 зроблено вже після одержання формалізованого графу. При цьому елементи, що ввійшли в один трофоклас у формалізованому графі (рис. 9) були зафарбовані одним кольором у неформалізованому (рис. 7).

Кожна куля у неформалізованому графі відповідає відповідному трофоелементу у трофічній мережі. Напрямки стрілок показують напрямок взаємодії між відповідними трофоелементами у трофічній мережі. Номери біля куль відповідають порядковим номерам при кодуванні трофоелементів досліджуваної екосистеми.

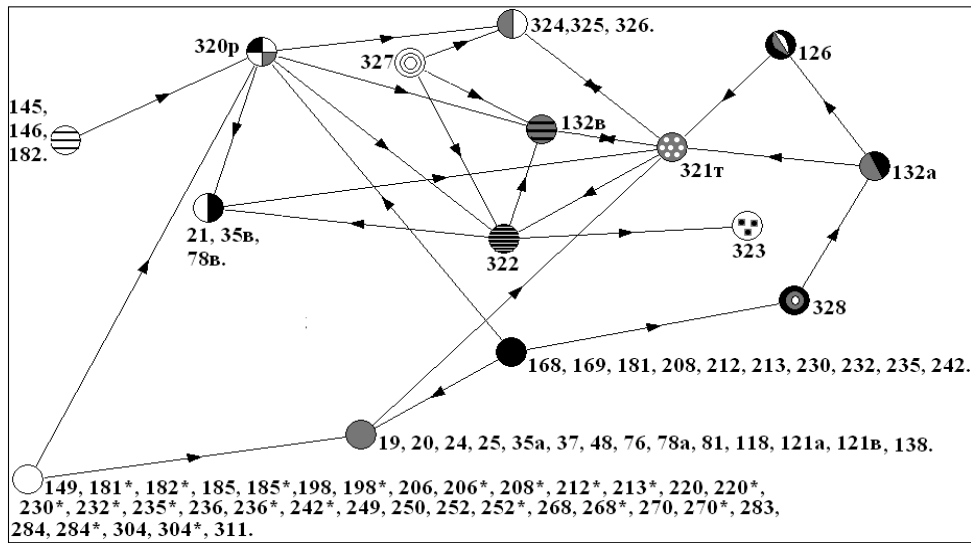


Рис. 9. Граф формалізованої трофічної мережі, побудований із застосуванням методу «regular equivalence» рольового мережевого аналізу на прикладі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області

Кожна куля у формалізованому графі відповідає окремому трофокласу в який віднесено відповідні трофоелементи (номери біля куль відповідають порядковим номерам при кодуванні трофоелементів досліджуваної екосистеми). Напрямки стрілок показують напрямок взаємодії між відповідними трофокласами у трофічній мережі. Забарвлення куль в ідентичний колір («regular role coloration») свідчить про окремі трофокласи, куди REGE-алгоритм згрупував відповідні трофоелементи за подібністю їх трофічних ролей у трофічній мережі досліджуваної екосистеми.

ВИСНОВКИ

1. Уперше на прикладі тридцять однієї пасторальної екосистеми Чернівецької області було доведено можливість застосування рольового мережевого аналізу для побудови формалізованих рольових трофічних мереж екосистем відповідного типу.

2. Відпрацьовано цілий ряд технологічних моментів, які дозволяють широко використовувати такі відомі методи суспільних наук як «regular equivalence» та «regular role coloration» у пасторальній екосистемології.

3. Інноваційна технологія завдяки формалізації відкриває нові можливості для розвитку фундаментальної екології.

Перспективи: сьогодні в екологічній науці рольовий мережевий аналіз переживає період становлення. Є надія, що найближчим часом за його допомогою будуть відкриті нові екологічні закономірності, зокрема ті, що стосуються імперативної ролі трофічної структури у підтриманні стійкості екосистем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Root R. The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher // Ecology Monographs. — 1967. — № 37. — P. 317–350.

2. *Beaver R.* Geographical variation in food web structure in *Nepenthes* pitcher plants // *Ecological Entomology*. — 1985. — № 10. — P. 241–248.
3. *Yodzis P.* The indeterminacy of ecological interactions as perceived through perturbation experiments // *Ecology*. — 1988. — № 69. — P. 508–515.
4. *Perrson L.* Productivity and consumer regulation — concepts, patterns, and mechanisms // *Food webs: integration of patterns and dynamics*. — NY: Chapman and Hall, 1996. — P. 96–434.
5. *Cousins S.* The decline of the trophic level concept // *Trends Ecology & Evolution*. — 1987. — № 2. — P. 312–316.
6. *Johnson J.* Network role analysis in the study of food webs. An application of regular role coloration // *Journal of Social Structure*. — 2001. — № 3. — <http://www.cmu.edu/joss/content/articles/volume2/JohnsonBorgatti.html>.
7. *Luczkovich J.* Defining and measuring trophic role similarity in food webs using regular equivalence // *Journal of Theoretical Biology*. — 2003. — № 220. — P. 303–321. — <http://www.idealibrary.com>.
8. *Luczkovich J.* Determining the trophic guilds of fishes and macroinvertebrates in a seagrass food web // *Estuaries*. — 2002. — № 25 (6). — P. 1143–1164.
9. *Pimm S.* Food web patterns and their consequences // *Nature*. — 1991. — № 350. — P. 669–674.
10. *Goldwasser L.* Construction and analysis of a large Caribbean food web // *Ecology*. — 1993. — № 74. — P. 1216–1233.
11. *Гандзюра В.П.* Екологія. Головні поняття з позицій системного підходу. — Київ: Вид-во КНУ, 2002. — 85 с.
12. *Lindeman R.* The trophic-dynamic aspect of ecology // *Ecology*. — 1942. — № 23. — P. 399–418.
13. *Borgatti S.* The program Ucinet 6 for Windows runs on Windows 95/98/NT/2000/XP platforms with a minimum of 8 mb of RAM: Software for Social Network Analysis. — Harvard: Analytic Technologies, 2002. — <http://www.analytictech.com>.
14. *Borgatti S.* Two algorithms for computing regular equivalence // *Social Networks*. — 1993. — № 15. — С. 361–376.
15. *Borgatti S.* The class of all regular equivalences: algebraic structure and computation // *Social Networks*. — 1989. — № 11. — P. 65–88.
16. *Batagelj V.* The program Pajek. — 1996. — <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/pajek>.
17. *Патент* на корисну модель 43962 України, МПК (2009) А 99Z 99/00G01N 33/00. «Спосіб побудови трофічної мережі пасторальної екосистеми» / Руденко С.С. (UA), Буждиган О.Я. (UA); заявник та патентовласник Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. — № u 200903519. — Заявл. 13.04.2009; опублік. 10.09.2009, Бюл. № 17. — 24 с.
18. *Определитель* высших растений Украины / Сост.: Д.Н. Доброчаева, М.И. Котов, Ю.Н. Прокудин и др. — 2-е изд. стереот. — Киев: Фитоцентр, 1999. — 548 с.
19. *Фасулати К.К.* Полевое изучение наземных беспозвоночных. — М.: Высш. шк., 1971. — 424 с.

Надійшла 26.03.2009