

С. С. Руденко, О. Я. Буждиган

Застосування мережевого рольового аналізу для побудови та оцінки трофічних мереж пасторальних екосистем

(Представлено членом-кореспондентом НАН України І. Г. Ємельяновим)

A methodological base for using the network role analysis for the building and estimation of trophic networks of pasture ecosystems is developed. General theoretical principles of the structure and performance of the trophic networks of pastures are discovered.

Авторами даного повідомлення вперше розроблено методологічну базу при застосуванні методів мережевого рольового аналізу (“*regular equivalence*” та “*regular role coloration*”) для побудови та оцінки трофічних мереж пасторальних екосистем. Предметом досліджень були трофічні мережі 31-ї пасторальної екосистеми Чернівецької області.

Кожному виду рослин, комах, дощових черв'яків, бактерій, грибів, актиноміцетів, а також виду великої рогатої худоби (ВРХ), мертвих рослин, мертвих тварин та детриту (напіврозкладені органічні рештки) присвоювали порядкові номери, які надалі застосовувались у вхідних матрицях, графіках і схемах.

Матрицю бінарних коефіцієнтів (вид-вид) побудовано таким чином: 0 — при відсутності зв'язку; 1 — при наявності зв'язку. Зв'язки кожного виду з іншими видами оцінювали як у ролі хижака (в колонках матриці), так і в ролі жертви (в рядках матриці). Для аналізу даних використовували REGE алгоритм з комп'ютерного програмного пакету UCINET 6.164 (S. P. Borgatti, M. G. Everett та L. C. Freeman, 2002). Алгоритм перетворював матрицю вид-вид на коефіцієнти R (у межах від 0 до 1), які визначали для кожної пари видів. Надалі проводили ієрархічне кластерування вихідних матриць R з REGE алгоритму та отримували дендрограми з розподілом зв'язків між трофічними елементами. Остаточне групування трофічних елементів базувалося на величині відповідності кластеру. Отже, результуюча регресії R^2 (або η^2 в Anova та в UCINET 6.164) інтерпретувалась як величина відповідності кластеру. Вибирали кластерування з такою кількістю класів, при якому R^2 було максимальним. Для візуалізації моделей подібностей, що впливали з REGE методу, матриці подібностей піддавали неметричному багатовимірному шкалюванню (MDS) в порядку репрезентування їх як відстаней в двох просторах (UCINET 6.164, S. P. Borgatti, M. G. Everett та L. C. Freeman, 2002). Координати з процедури MDS потім використовували як вхідну інформацію для програми Pajek 1.14 (Vladimir Batagelj та Andrej Mrvar, 2006) мережевого графічного програмного забезпечення, за допомогою якої були побудовані схеми трофічних ланцюгів та спрощені їх графи в кольорі.

Вперше було розроблено всі аспекти методології побудови рольових трофічних мереж для пасторальних екосистем. Усі запропоновані показники та підходи є новими, оригінальними для екологічної науки. Згідно з роботами засновників використання методу мережевого рольового аналізу в екології (J. J. Luczkovich, університет Східна Кароліна, США; S. P. Borgatti, школа Менеджменту в Бостоні, США; M. G. Everett, університет Грінвіч

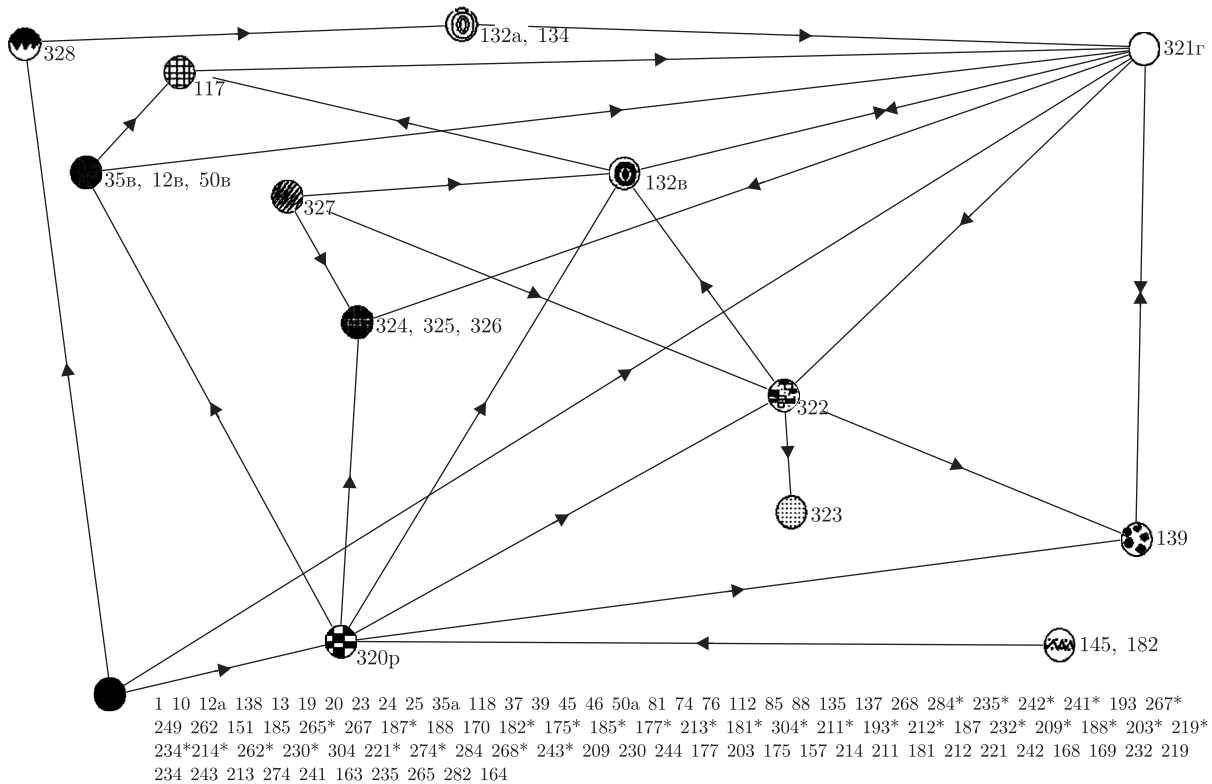


Рис. 1. Приклад формалізованого графа трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Долішній Шепіт, що належить до фізико-географічної області Українських Карпат (Чернівецька область)

у Лондоні), нами розроблено також критерії і способи порівняльного аналізу трофічних мереж. Виявлено низку закономірностей, які стосуються теоретичних аспектів структурно-функціональної організації екосистем.

Шляхом альтернативних пошуків обґрунтовано та доведено доцільність введення у вихідні матриці мережевого рольового трофічного аналізу пасторальних екосистем таких трофоелементів: ВРХ, вегетативна маса рослин, пилок та нектар рослин, комахи: личинки, дорослі особини, самці, самки, дощові черв'яки, гетеротрофні бактерії, гриби (мікроміцети), актиноміцети, екскременти ВРХ, мертві тварини, мертві рослини, детрит.

Обґрунтований з екологічної точки зору добір трофоелементів дозволив побудувати як трофічні мережі для локальних пасторальних екосистем (рис. 1), так і формалізовані трофічні мережі для пасторальних екосистем певної фізико-географічної зони Чернівецької області (рис. 2).

Нами розроблено комплексну систему показників (критеріїв) для оцінки рольових трофічних мереж:

Кількість зв'язків у трофічній мережі — символічне позначення $K_{зв}$.

Питома кількість зв'язків — $PK_{зв}$.

Питома кількість надлишкових зв'язків (кількість зв'язків -1 /кількість трофокласів) — $PKH_{зв}$.

Кількість класів у трофічній мережі (η) — $K_{кл}$.

Показник ієрархічності трофічних мереж (кількість трофокласів/кількість елементів $\cdot 100$) — P_i .

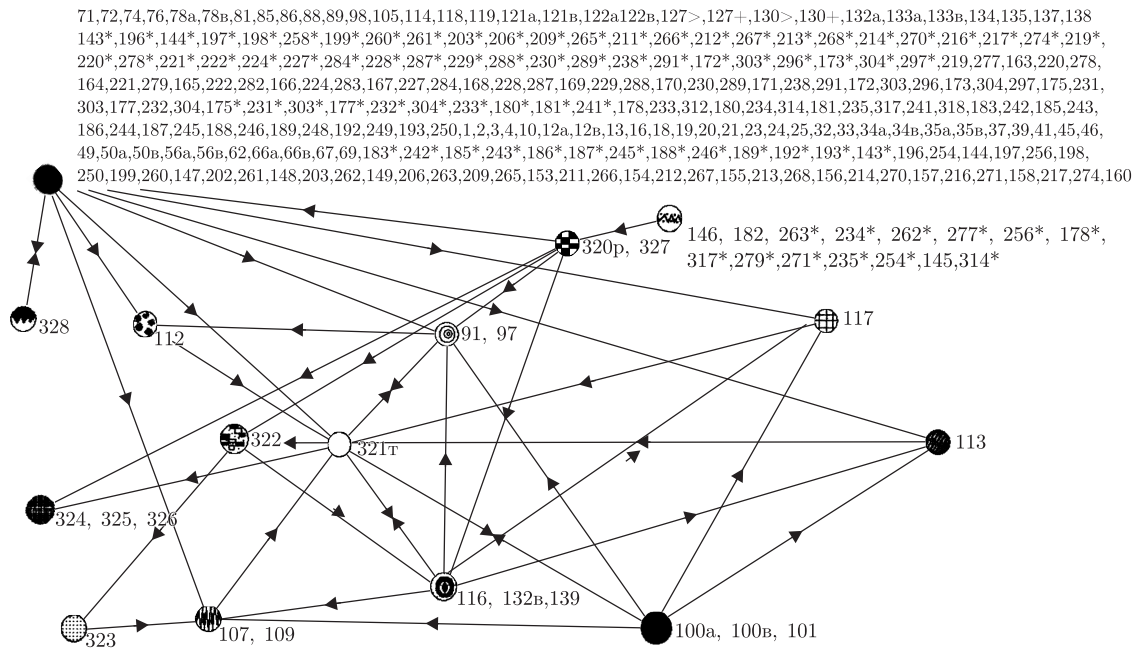


Рис. 2. Приклад формалізованого графа узагальненої трофічної мережі пасторальних екосистем фізико-географічної області Українських Карпат (Чернівецька область)

Відсоток трофокласів виключно з вихідними зв'язками — $ZV_{\text{вих}}$.

Відсоток трофокласів виключно з вхідними зв'язками — $ZV_{\text{вхід}}$.

Відсоток трофокласів з вихідними та вхідними зв'язками — $ZV_{\text{вих/вхід}}$.

Індекс структурної різноманітності трофічної мережі — (H_c) .

Індекс функціональної різноманітності трофічної мережі — (H_f) .

Індекс структурно-функціональної складності трофічної мережі: $(H_c \times H_f)^{1/2} - H_{c-f}$.

Показник відносної зв'язаності трофічної мережі — $P_{в.з}$.

Окремий напрям досліджень — розробка інтегрального показника сприятливості трофічних мереж ($ПС_{\text{тр.м}}$) для певних імперативних характеристик пасторальних екосистем, у тому числі для показників сільськогосподарської якості пасовищ (сухої маси рослин, відсотка кормових рослин, пасовищної дигресії), показників біологічної якості пасовищ (різноманіття рослин, комах, мікроорганізмів), а також для такого показника екологічної якості пасовищ, як стійкість відповідних екосистем.

На основі рівнянь регресії було відібрано тільки ті показники трофічних мереж, які достовірно впливають на ту або іншу досліджувану імперативну характеристику пасовищ. Відповідні показники проаналізовано на предмет того, яку залежність (пряму чи обернену) вони виявляють від зазначених вище імперативних характеристик пасовищ. Рейтинг пасовищ по показниках першої групи визначали за формулою $[(i - \min)I_{zn}]/(\max - \min)$, а по показниках другої групи за формулою $[(i - \max)I_{zn}]/(\min - \max)$. При цьому I_{zn} (індекс значущості) визначали як відношення кількості абіотичних/біотичних факторів, які пов'язані з відповідним показником у рівнянні регресії, до загальної кількості факторів, прийнятих до уваги (у нашому випадку 35).

Реальну суму рейтингів, оцінених за відібраними показниками трофічних мереж, які віднесені до максимально можливої (у відсотках), розраховували за допомогою $ПС_{\text{тр.м}}$ для тієї чи іншої імперативної характеристики пасовищ.

Таблиця 1. Коефіцієнти кореляції між інтегральними показниками сприятливості трофічних мереж та імперативними характеристиками пасторальних екосистем Чернівецької області

Показники	ІПС _{тр.м} пасовищної дигресії	ІПС _{тр.м} індексу видової різноманітності		ІПС _{тр.м} індексу групової різноманітності мікроорганізмів	ІПС _{тр.м} сухої маси рослин/м ²	ІПС _{тр.м} відсотка кормових рослин
		рослин	комах			
ІПС _{тр.м} стійкості екосистем	0,15	-0,95*	0,90*	0,75*	-0,85*	-0,24
ІПС _{тр.м} пасовищної дигресії	—	-0,08	0,01	-0,32	-0,22	-0,32
ІПС _{тр.м} індексу видової різноманітності рослин	—	—	-0,84*	-0,76*	0,79*	0,09
ІПС _{тр.м} індексу видової різноманітності комах	—	—	—	0,69*	-0,77*	-0,24
ІПС _{тр.м} індексу групової різноманітності мікроорганізмів	—	—	—	—	-0,75*	-0,35
ІПС _{тр.м} сухої маси рослин/м ²	—	—	—	—	—	0,66*

* Значення достовірне при $p < 0,05$.

Особливість оцінки ІПС_{тр.м} стійкості пасторальних систем полягала в тому, що показники трофічних мереж, за якими оцінювався рейтинг пасовищ, були підібрані за даними літератури, зокрема $K_{кл}$, $K_{зв}$, $PKH_{зв}$ та $P_{в.з}$. Отже, ми керувались інформацією про те, що в мінливих умовах зв'язаність (ступінь впливу змін одного елемента на другий) між видами нижча, ніж у постійних [1], і функціональна складність більшою мірою, а структурна — меншою підвищують стійкість системи, оскільки збільшується потенціально можлива кількість петель зворотного зв'язку [2]. І нарешті, згідно з даними J. J. Luczkovich та співавторів статей [3, 4], якщо трофічна мережа розвивається в умовах стійкого оточення, то її ієрархічність ускладнюється (зростає кількість трофічних класів і трофічних зв'язків) та зменшується число надлишкових зв'язків.

Кореляційний (табл. 1) та кластерний аналізи ІПС_{тр.м} для імперативних характеристик пасторальних екосистем дозволив виявити достовірно високу пряму кореляцію між ІПС_{тр.м} стійкості пасовищ та ІПС_{тр.м} індексу видової різноманітності комах. Деяко менший, але високий рівень прямої кореляції встановлено між ІПС_{тр.м} стійкості пасовищ та ІПС_{тр.м} індексу видової різноманітності мікроорганізмів. Отже, коли показники трофічної мережі є сприятливими для стійкості пасовищ, вони є одночасно сприятливими і для різноманітності комах та мікроорганізмів ґрунту. Інший характер зв'язку встановлено між ІПС_{тр.м} стійкості пасовищ та ІПС_{тр.м} індексу видової різноманітності рослин, а також між ІПС_{тр.м} стійкості пасовищ та ІПС_{тр.м} сухої маси рослин. У даному випадку кореляція висока, проте обернена, а саме, якщо трофічна мережа є сприятливою для стійкості пасовищ, то вона водночас є несприятливою для видової різноманітності та сухої маси рослин. Більшість виявлених вище закономірностей підтверджено результатами кластерного аналізу.

Отже, наші дослідження свідчать про перспективність використання мережевого рольового аналізу для побудови трофічних мереж екологічних систем. Запропоновані нами методичні підходи дозволяють виявити як важливі загальнотеоретичні закономірності, так і надати рекомендації щодо відновлення (оптимізації) трофічних мереж окремих пасторальних екосистем.

1. *Бигон М., Харпер Дж, Таунсенд К.* Экология. Особи, популяції и сообщества : В 2 т. Т. 1. – Москва: Мир, 1989. – 278 с.
2. *Одум Ю.* Экология. Т. 1. / Пер. с англ. – Москва: Мир, 1986. – 328 с.
3. *Luczkovich J. J., Borgatti S. P., Johnson J. C., Everett M. G.* Defining and Measuring Trophic Role Similarity in Food Webs Using Regular Coloration // *J. Theor. Biol.* – 2003. – No 220. – P. 303–321.
4. *Johnson J. C., Borgatti S. P., Luczkovich J. J., Everett M. G.* Network Role Analysis in the Study of Food Webs: An Application of Regular Role Coloration // *J. Social Struct.* – 2001. – **2**, No 3. – P. 241–253.

*Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича*

Надійшло до редакції 05.03.2008