

# СТІЙКІСТЬ ЕКОСИСТЕМИ ЯК ФУНКЦІЯ ГЕТЕРОГЕННОСТІ (РІЗНОМАНІТТЯ) ТА ПРОДУКТИВНОСТІ

**Грубінко В.В.**

*Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка,*

*v.grubinko2@yahoo.com*

«Alles war gesagt, doch alles bleibt zu sagen!»  
(«Все було сказано, однак все ще треба сказати!»)

*Йоган Гете*

Згідно з математичними викладками фон Неймана існує певний поріг складності машини, нижче якого вона не може відтворювати собі подібних. Природньо виникає питання: “Як об’єктивно виміряти ступінь складності системи?”

Одним з найпоширеніших способів оцінки стану природного середовища прийнято вважати видове різноманітність (відображає структуру біоценозу, генетичну різноманітність, співвідношення і функціональну роль в ньому представників окремих популяцій в їх ектопах), і біопродуктивність як наслідок кількісного і якісного розвитку угруповань [12]. Згідно з цим підходом вивчення угруповань при оцінці якості середовища дає досить надійні результати. Проте, для цього потрібно систематично проводити аналіз їх складу і структури, що досить трудомістко. Разом з тим про ступінь деградації екосистем, а відповідно, і про порушення умов природного середовища загалом, роблять висновок на основі низьких для цього угруповання величин чисельності і біомаси домінантного виду (видів). Антропогенний вплив на екосистеми призводить, як правило, до зниження показників видового різноманіття в результаті елімінації видів, чутливих до несприятливих змін середовища і до збільшення чисельності толерантних видів. Проте, показник видової різноманітності не завжди характеризує стан екосистем, оскільки його низькі значення типові не лише для забруднених районів, але і для територій, де домінує один вид. Тобто при погіршенні умов середовища частина домінуючого виду в угрупованні зменшується, що призводить до зростання величини видового різноманіття [8].

Виходячи з відміченого, видове різноманіття для оцінки трансформації середовища, включно токсичного, важливо не само по собі як показник, оскільки немає його ідеальної величини (остання визначається як наслідок довготривалого розвитку структурного стану біоценозу в середовищі, де комплексно реалізується дія усіх значущих чинників – зовнішніх і внутрішніх (результат внутрішньопопуляційних і біоценотичних взаємодій), а з точки зору швидкості (флуктуаційної) зміни. Як стверджують автори роботи [2]: “... методи біоіндикації, які базуються на оцінці видового складу біоти..., виправдали себе під час визначення нетоксичних забруднень (органічних, сапробних). Проте, у разі токсичних забруднень вони недостатньо придатні до застосування, оскільки не забезпечують адекватних показників. У забрудненому ценозі відбуваються істотні зміни видового складу, чисельності і біомаси популяцій, порушуються їх життєві цикли, окремі види повністю зникають, проте інтерпретувати такі зміни надзвичайно важко, оскільки вони можуть бути викликані метеорологічними чинниками, природними коливаннями чисельності тощо”.

Зважаючи на величезну кількість чинників, які визначають якість середовища (тільки кількість речовин, віднесених до полютантів, становить близько 150 тис.),

найперспективнішою (можливо єдино можливою) є оцінка її якості за станом самих біосистем, а зміни стану середовища повинні оцінюватися за функцією відклику біосистем. У цьому аспекті пріоритет, безперечно, належить структурно-функціональним параметрам живих систем, які можуть однаково успішно застосовуватися як до будь-яких організмів, незалежно від їх систематичного положення, так і до їх угруповань.

*Загальні принципи реакції біологічних систем на дію шкідливих чинників.* Дію чинників, яка призводить до порушення функцій біологічних систем, називають несприятливою дією. У її основі лежить взаємодія фізичних, хімічних і біологічних структур з живим об'єктом. Формування і розвиток реакцій біосистеми на дію, яка призводить до її ушкодження (порушення її функцій і життєздатності) або загибелі, називають патологічним процесом. Наслідком несприятливої дії на біологічні системи є розвиток патологічного процесу [1].

Ушкодження біологічних систем залежно від механізму їх дії різноваріантні. В першу чергу, різними є механізми дії чинників. У процесах, що розвиваються за пороговим принципом, причинно-наслідковий зв'язок між фактом дії і розвитком процесу носить безумовний характер: при дії чинника в дозах, нижчих певних рівнів, патологічний процес не розвивається, а досягнувши певного розвитку, процес розвивається неодмінно. Залежність "доза↔ефект" простежується на рівні кожної окремої системи. У процесах, які розвиваються за безпороговим принципом, причинно-наслідкові зв'язки між фактом дії і розвитком процесу мають ймовірнісний характер: достовірність формування ефекту проявляється при дії на біосистему навіть однієї елементарної структурної одиниці (фізичного або хімічного носія чинника), одночасно в окремих системах процес може і не розвинути, не зважаючи на значне збільшення дози (близькі до летальних).

Тому ушкодження, залежно від механізму їх дії, багатоваріантне (флуктуаційне). Розвиток ушкодження і патології, що формуються за ним, носить ланцюговий, взаємозалежний, підлеглий, пролонгований, у результаті – цілісний (системний) характер [1]. Крім того, існують різні варіанти прояву дозозалежності, пов'язані з величиною (сила і частота дії) чинника в середовищі і екосистемі: дозонечутлива; концентраційна, концентраційна з насиченням; кумулятивна.

У зв'язку з виявленими ефектами у кожному конкретному випадку дії і реакції на неї молекулярних структур, метаболічних систем або надорганізмових утворень необхідно враховувати концентраційно-часові відгуки і не допускати автоматичного (без експериментального підтвердження) перенесення виявлених ефектів з одних експериментальних систем на інші.

Загальним принципом ушкодження є їх разноспрямованість, рівневість і каскадність розвитку патологічного процесу [3, 4]. Зміни, що викликаються дією несприятливого чинника, можуть виявлятися в: порушеннях метаболізму в клітинах (генетична або модифікаційна детерміація); структурних ушкодженнях молекул і надмолекулярних структур певного рівня і сили, які призводять до незворотних функціональних змін і збільшення кількості неповноцінних молекулярних і надмолекулярних новоутворень; недостатньому утворенні і постачанні клітини енергетичними еквівалентами, в першу чергу АТФ, відновними еквівалентами і попередниками біосинтезу; порушенні систем, які регулюють швидкість і спрямованість метаболічних процесів відповідно до потреб системи; порушенні взаємодії макромолекул, клітин, тканин і органів, збільшенні кількості випадкових і нерегульованих взаємодій;

порушенні фізіологічних функцій органів і систем, гомеостазу (постійність складу) і енантіостазу (постійність стану, підтримання рівня функцій – є твердження, що для біосистеми важливішим є не стільки збереження постійності складу, скільки – постійність функцій (стану) [13]; відхиленні поведінкових і психо-фізіологічних функцій біосистеми і модифікація адекватної реакції на зміну значущих чинників.

Відхилення на екосистемному рівні виявляються у: зниженні чисельності популяцій аж до повного зникнення видів; порушенні фізіологічних ритмів і поведінки організмів; зміні меж (ареалу) і щільності популяцій; появі інвазивних видів і розвиток екотонізації територій; зміна в структурі угруповань – зростання частки пацієнтів і експлерентів, зниження частки віолентів, зміні співвідношення фіто- і зоофагів; зміні домінування; зменшенні біорізноманіття; зниженні ефективності трансформації речовини і енергії; зміні продукції і прискоренні клімаксу екосистем; порушенні інформаційної структури екосистем; розбалансуванні біогеохімічних циклів.

Комплексною реакцією біологічної системи в умовах ушкодження є втрата достатнього рівня енергетичного (термодинамічного) і трофічного статусу (продуктивності), біологічної різноманітності, цілісності і збалансованості її функціонування (втрата “організованої впорядкованості”), а також здатності до самовідтворення.

Як впливає з відміченого, ієрархічна залежність і системність (комплексність) дії токсичного чинника і реакції на нього біологічної системи відбивається на її стані в цілому, що, в першу чергу, передбачає зміну енергетичного (термодинамічного) статусу.

**Термодинамічні особливості біо-, еко- систем в токсичному середовищі.** Згідно з другим законом термодинаміки в природі існує постійна тенденція до збільшення хаосу у вигляді вирівнювання температур, розсіювання енергії, руйнування біологічних структур. Ці процеси кількісно описуються за допомогою ентропії – міри неупорядкованості [5]. Кількість теплоти ( $dQ$ ), поглинута системою із зовнішнього середовища, використовується на збільшення її внутрішньої енергії ( $dU$ ) і виконання роботи ( $dA$ ), що включає роботу проти сил зовнішнього тиску ( $P$ ) по зміні об’єму ( $dV$ ) системи і максимальну корисну роботу ( $dA_{max}$ ), що супроводжує хімічні перетворення :

$$dQ = dU + dA, \text{ де } dA = p dV + dA_{max}. \quad (1)$$

$$\text{або } dQ = dU + p dV + dA_{max}. \quad (2)$$

Виділена організмом в процесах метаболізму, при випаровуванні, а також разом з продуктами виділення теплота повністю відповідає енергії, поглиненій разом з поживними речовинами.

Другий закон термодинаміки розкриває критерій спрямованості довільних незворотних процесів. Будь-яка зміна стану системи описується відповідною зміною особливої функції стану – ентропії ( $S$ ), яка визначається сумарною величиною поглинених системою приведених теплот ( $Q/T$ ). Рівноважна термодинаміка розглядає початковий і кінцевий стан системи, а спрямування процесу визначається за різницею параметрів системи в цих межах –  $\Delta T$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta S$  ( $\Delta S = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$ ).

Збільшення ентропії означає зменшення міри впорядкованості і організованості в системі, її хаотизацію. Застосування другого закону до біологічних систем в його класичному формулюванні приводить, на перший погляд, до парадоксального висновку, що процеси життєдіяльності відбуваються з порушенням принципів термодинаміки. Насправді, ускладнення і збільшення впорядкованості біологічних структур в період їх

росту і формування супроводжуються зменшенням, а не збільшенням ентропії, як повинно було б виходити з другого закону. Як приклад можна розглянути потік речовини і енергії, відомий як матеріально-енергетичний баланс екосистеми [1].

Відомо, що зовнішня енергія, яка надходить в екосистему, розподіляється щонайменше на три частини: частина фіксується продуцентами; частина витрачається на підтримку функціонування (метаболізм і виконання механічної роботи в просторі) системи. Обидва відмічені резервування енергії забезпечують стійкість, гомеостаз, відтворюваність носіїв “явища життя як форми існування матерії”. Третина потоку енергії в екосистемах не засвоюється (коефіцієнт корисної дії системи). Енергія, яка фіксується продуцентами і розподіляється в результаті матеріально-енергетичного перетворення в трофічному ланцюзі, представляє ту її частину, яка сприяє підтримці життєдіяльності організмів (формування компонентів – складових елементів екосистеми) і цілісності екосистеми як стійкої структурно-функціональної макроструктури (формування системи як цілісного утворення). На перший погляд фіксація енергії призводить до зростання порядку в екосистемі (функціонування досить впорядкованого за структурою трофічного ланцюга і просторової організації в екосистемі), а отже зменшення ентропії системи. Проте, згідно з положеннями І. Р. Пригожина [10, 11], ця енергія формування ( $\sigma$ ) якраз і є фіксованою (“внутрішньою”) ентропією, що “прихована” у вигляді функціональної організації біологічних структур на усіх рівнях організації екосистеми: від молекул, через організми, до екосистемного рівня організації:  $\Delta S = \sigma + \frac{\Delta Q}{\Delta T}$ . Тому ентропія системи насправді зростає, проте в класичному (рівноважному) варіанті трактування термодинамічних процесів ця ентропія не проявляється (не вимірюється), тому що є “прихованою” (“зв’язаною”). Отже, при описі енергетичного статусу біологічних систем як відкритих структур проблема полягає в тому, щоб, по-перше, зрозуміти, як пов’язана зміна ентропії з параметрами процесів, по-друге, з’ясувати, чи можна передбачити загальний напрям незворотніх процесів.

Особливістю живих систем, як вже зазначалося, є їх здатність до самоорганізації, тобто спонтанного утворення і розвитку складних впорядкованих структур [7]. Усі системи і їх підсистеми безперервно флюктують [11]. Goldberger A.L. (1986) висловив припущення про те, що нормальна динаміка в здорових біосистемах має “хаотичну” природу, а патологія пов’язана з періодичною поведінкою [14]. Князеві Є.Н. і Курдюмов С. П. вказують на те, що “... якби нестійкість була головною властивістю в усіх системах світу, тоді усе було б хаотичним, усе розпадалося, не було б можливості ні контролювати, ні передбачати майбутнє” [6]. Стійкість системи – енергія формування, ріст різноманіття елементів, динаміка дискретно-континуального переходу. Стійкість стаціонарних станів, далеких від рівноваги, полягає в тому, що при відхиленні системи від стаціонарного стану в ній повинні з’явитися сили, які намагаються її повернути в початковий стан. Отже, структурна складність (гетерогенність, різноманіття) і динамічність біосистем є основою їх успішності і тривалості структурно-функціональної цілісності. Чим складніше динамічні структури, тим більше циклів їх діяльності, тим більше енергії залишається в системі, і менша її кількість розсіюється. Біосистема складається з внутрішньо збалансованих циклічних процесів, пов’язаних з потоком енергії. Життєві цикли підсистем формують цикл біосистеми.

Збільшення просторово-часової диференціації призводить до збільшення енергії, яка зберігається в системі. Заснована на накопиченні енергії система намагається

збільшити продуктивність і складність. Остання досягається за рахунок гетерогенності (різноманіття): чим складніші і чим довше існує просторово-часова диференціація, тим більший їх запас енергії [9]. Звідси відповідь на питання: “Чому так багато видів?” Харчові ланцюги не генерують великого біологічного різноманіття. Частина відповіді полягає в тому, що замість лінійних ланцюгів живлення природа створила їх розгалуження. Проте, різноманіття в кінцевому вимірі визначається кількістю енергії для екосистем. Різноманіття як правило збільшується з продуктивністю. Отже енергія продукції і екологічної гетерогенності відіграють основну роль у формуванні біологічного різноманіття.

З усього вищенаведеного впливає загальна проблема, яка нині не має свого вирішення: встановлення на терені кількісних співвідношень взаємопереходу (взаємопов'язаність, причинно-наслідкові зв'язки і тому подібне) прояву негативних ефектів на різних рівнях біологічних і екологічних систем з одного боку, і якісна і кількісна оцінка загального патологічного ефекту дії шкідливого чинника на системи – зміна або повна втрата еквіфінальності системи (тобто йдеться не про якісну або кількісну зміну окремого параметра або функції, а про системну втрату біологічної або екологічної якості системи в цілому, що можна виразити в завданій їй шкоді).

Оскільки ушкодження живих систем ми вважаємо наслідком системних порушень, то її діагностика повинна встановлюватися за результатами (проявами) інтегральних змін:

1. Порушення енергетичних і інформаційних процесів системи в цілому (зменшення "організованої взаємодії").
2. Порушення енергетичного і субстратного балансу на метаболічному рівні (порушення гомеостазу системи).
3. Неадекватність фізіолого-біохімічних реакцій і прояв основних біологічних функцій – порушення реакції і зворотніх зв'язків в системі і її еквіфінальності (ріст, розмноження, гетерогенність, продукція, розвиток, еволюція).
4. Порушення здатності живих систем до адаптацій в змінених умовах – трансформація дисипативно-континуальної динаміки систем (як наслідок попередніх) і міжсистемної взаємодії.

Виходячи з зазначеного, виділяємо біорізноманіття і продукцію як необхідну умову структурно-функціональної успішності (стійкість в цих конкретних умовах існування і просторово-часовому вимірі), яка визначає функціональною і гомеостатичною еквіфінальністю і енергетичний статус систем (мал.). При цьому під поняттям “різноманітність (різноманіття)” розуміємо комплексну гетерогенність (генетична, морфологічна, функціональна з фізіологічної і біоценотичної точок зору різноякісність, внутрішньопопуляційна мінливість, видове різноманіття, екологічна різноякісність та ін.), а в поняття “продуктивність” – здатність системи за рахунок забезпечення функціонування якомога більшої кількості і швидкості внутрішніх циклів, які формують в ній потік енергії певної ємності і швидкості, фіксувати внутрішню енергію як результат різноманіття форм певної кількості і складності (формування як наслідок кількісного і якісного розвитку системи). Тому при оцінці стану живих систем доцільно говорити про оцінку її гетерогенності.



Щодо проблеми “норми” і “патології” живих систем, то її вдається вивести на кількісний рівень. За основу кількісної оцінки пропонуємо узяти як міру відхилення показників системи від властивого їй нативного стану, так і можливість повернення цього стану до початкового. Обираються ті головні показники, які характеризують дискретний стан системи, її здатність здійснювати (підтримувати в часі) зворотній зв’язок і критичні для формування результату дії системи (формують еквіфінальність) структури і функціональні механізми. У разі резистентної стійкості “норму” визначити дещо простіше, оскільки вона близька поняттю “стійкість”. У разі динамічної стійкості ситуація складніша, оскільки система істотно змінюється, одночасно залишаючись “сама собою”. Але і в цьому випадку “патологічний” стан можна діагностувати як перехід системою межі, за якою стає неможливим її повернення до початкового стану (кардинальна зміна еквіфінальності системи).

У агроєкології, сільськогосподарському виробництві і екології в цілому останнім часом широко користуються поняттям “шкідливість” (“шкодочинність”, “harmfulness”) [1]. Під ним розуміють певний рівень негативного впливу певного чинника на ту або іншу систему, що викликає зниження її продуктивності. Як правило шкідливість встановлюють в агроєкосистемах, коли йдеться про вплив на врожайність (її зниження) с/г культур різноманітних шкідників, бур’янів, агротехнічних заходів і засобів (мінеральні добрива, пестициди тощо), несприятливих кліматичних умов тощо. Кількісним виміром шкідливості в цьому випадку є втрати урожаю. Останнім часом до таких втрат почали відносити і ті, які отримані унаслідок дії будь-яких токсичних речовин, які знижують кількість або якість сільгосппродукції. Тому виникло поняття “еколого-токсикологічна шкідливість”, під якою розуміють будь-які втрати врожайності і зниження якості продукції, викликані забрудненням середовища вирощування культур (в першу чергу ґрунтів). Отже, відмічений підхід щодо трактування шкідливості, не зважаючи на те, що в її основі все ж лежить визначення кількості біологічної продукції (екологічна категорія), базується на економічній категорії – кількість і якість продукції сільськогосподарського виробництва, а в кінцевому випадку – в зниженні прибутку(збитковість).

Розглядаючи проблему з принципів, зміни стану середовища можна оцінювати за змінами благополуччя системи. Тому будь-який чинник, який знижує благополуччя

біосистеми в конкретних умовах можна вважати шкідливим (“шкочочинним”, “harmfuln”). Це досить зручний спосіб оцінки, оскільки розмірність благополуччя може варіювати в межах від 1 або 100% (максимальне значення благополуччя) до 0 (припинення існування системи). Отже, “шкочочинність” (“harmfulness”) – здатність певного чинника, окремих груп або усього комплексу в цілому знижувати стан благополуччя системи (функціональної ефективності – еквіфінальності). Ранжируючи функцію благополуччя системи у відсотках референційного (природного) стану системи (приймається за 100%), можна кількісно оцінити шкочочинність (“шкочочинність”, “harmfulness”) за зниженням благополуччя системи:  $H_f = 1 - D_f$  (determining function).

У результаті приходимо до висновку: якість середовища життя – це міра відповідності (адекватності) його потребам (особливостям) системи (екосистема, біоценоз, популяція тощо), яка сприяє стабільності системи, що, у свою чергу, є динамічною, але характеризується однією постійною величиною – функціональною результативністю (еквіфінальністю). При цьому найвища якість середовища – цей такий її стан, за якого якість середовища характеризується максимальним значенням стану благополуччя. Під останнім з точки зору функціональної теорії систем слід мати на увазі їх функціональну ефективність – еквіфінальність.

1. *Гандзюра В.П.* Концепція шкочочинності в екології / В.П. Гандзюра, В.В. Грубінко. – Київ-Тернопіль: Вид-во ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2008. – 144 с.
2. *Гідроекологічна токсикометрія та біоіндикація забруднень. Теорія, методи, практика використання* / ред. І.Т. Олексів, Л.П. Брагінський. – Львів: Світ, 1995. – 440 с.
3. *Грубінко В.В.* Концепция адаптации в контексте современной экологической ситуации / В.В. Грубінко / Проблемы экології культуры и духоунасці. – Минск: ISK, 1997. – С. 23–28.
4. *Грубінко В.В.* Системна оцінка метаболічних адаптацій у гідробіонтів / В.В. Грубінко // *Наук. зап. Терноп. держ. пед. ун-ту ім. В. Гнатюка. Сер. Біологія. Спец. вип. “Гідроекологія”.* – 2001. – №4(15). – С. 36–39.
5. *Дульнев Г.Н.* От Ньютона и термодинамики к биоэнергоинформатике / Г.Н. Дульнев. [Электронный ресурс]: <http://www.outsider.ru/lib/index.php>
6. *Князева Е.Н.* Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным / Е.Н. Князева, С.Н. Курдюмов // *Вопросы философии.* – 1992. – № 12. – С. 3–20.
7. *Лоскутов А.* Нелинейная динамика, теория динамического хаоса и синергетика (перспективы и приложения) / А. Лоскутов. [Электронный ресурс]: <http://www.cplire.ru/win/InformChaosLab/chaoscomputerra/Loskutov.html>
8. *Лосовская Г.В.* Мониторинг качества воды Черного моря по макрозообентосу (обзор) / Г.В. Лосовская // *Гидробиол. журн.* – 2002. – Т.38, №1. – С. 50–61.
9. *Почему организмы настолько сложны?* / No System in Systems Biology. [Электронный ресурс]: [www.i-sis.org.uk](http://www.i-sis.org.uk)
10. *Пригожин И.* Философия нестабильности / И. Пригожин // *Вопросы философии.* – 1991. – № 6. – С. 46–52.
11. *Пригожин И.* Порядок из хаоса: новый диалог с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
12. *Протасов А.А.* Биоразнообразиие и его оценка. Концептуальная диверсикология / А.А. Протасов. – Киев, 2002. – 105 с.
13. *Уголев А.М.* Принципы организации и эволюции биологических систем / А.М. Уголев // *Журн. эвол. биох. и физиол.* – 1989. – Т. 25, № 2. – С. 215–233.
14. *Goldberger A.L.* Some observations on the question: Is ventricular fibrillation "chaos"? / A.L. Goldberger // *Physica.* – 1986. – Vol.190. – P. 282–289.