

Я. Дідух, Г. Лисенко

ПРОБЛЕМИ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ  
СТРУКТУРИ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ ЕКОСИСТЕМ

*Парадигма самоорганізації систем, що ґрунтується на основі законів термодинаміки, синергетики, дає можливість оцінювати такі характеристики, як енергетична ємність, організація, стійкість і розвиток екосистем, кількісною ознакою яких є енергетичні показники. Гадаємо, вона допоможе екологам зрозуміти специфіку самоорганізації екосистем, розкрити механізми теорії прогресивної еволюції, рушійною силою якої є енергетичний потенціал, вектор якого спрямовано на вдосконалення способів накопичення і трансформації енергії через адаптивні властивості видів.*

Єдність матерії і руху стосовно живого проявляється в організованому характері матеріально-енергетичних процесів, де мірою матерії є маса, руху — енергія, організації — інформація [10, 11, 13, 14, 20, 22, 24, 27, 29, 30, 32, 33, 36, 37, 43–46, 48, 49]. Дослідження співвідношення між різними складниками систем — масою (матерією), енергією (рухом) та інформацією (організацією) — розкривають суть їхніх просторово-часових змін, зокрема диференціацію в просторі та розвитку в часі.

Якщо з оцінюванням маси, яка є універсальною характеристикою систем будь-якого типу, жодних проблем не виникає, то з оцінюванням енергії та інформації можливі певні труднощі. Ці питання сьогодні

активно дискутують у науковій літературі, особливо у сфері екології [3, 34, 46, 48, 49]. Проблема полягає в тому, що фізичне поняття енергії, запроваджене в обіг на поч. ХІХ ст. Т. Юнгом як міра виконаної роботи, на якій ґрунтуються закони термодинаміки, втратило свій первинний зміст. Закони термодинаміки, які сформувалися в лоні класичної фізики, стали загальнонауковими, що суттєво розширило і навіть змінило суть поняття «енергія», набуло загальнофілософського значення. З одного боку, вдалося з'ясувати, що сума кінетичної та потенційної енергії навіть в ізольованій (замкнутій) системі не є постійною величиною через розсіювання (дисипацію) енергії, спрямованої на протидію процесам

© ДІДУХ Яків Петрович. Член-кореспондент НАН України. Завідувач відділу екології фітосистем Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного (Київ).

ЛИСЕНКО Геннадій Миколайович. Кандидат біологічних наук. Доцент Ніжинського державного університету ім. Миколи Гоголя. 2010.

невпорядкованості та підтримку внутрішньої організації системи [40]. Що більша невпорядкованість, то більше енергії необхідно витратити на внутрішню організацію і менше її залишається на зовнішню роботу. Така енергія у відкритих системах поповнюється завдяки зовнішнім джерелам. Коли йдеться про відкриті системи, до яких належать й екологічні, то закон збереження енергії діє з урахуванням «внутрішньої» енергії.

$$E_p + E_k + U = \text{const},$$

де  $E_p$  – потенційна енергія,  $E_k$  – кінетична енергія, що разом становлять «зовнішню» енергію,  $U$  – «внутрішня» енергія [40].

Якщо потенційна енергія може трансформуватися в кінетичну і виконувати певну роботу, то внутрішня енергія, спрямована на підтримку системи чи її організацію способом дисипації, виконує роботу частково. Таким чином, енергія відкритих систем уже не визначає величину виконаної роботи, а відображає організацію системи, підтримує її внутрішній стан. Такий стан органічної речовини, порівняно з найскладнішими хімічними сполуками, потребує в кілька разів більше енергії, тобто енергія зв'язку живої речовини характеризується високими показниками і залежить від рівня організації систем [17]. Енергетичні витрати залежать не лише від характеру організації системи, а й від впливу зовнішніх чинників, тобто відображають результат реакції, відповіді системи на вплив зовнішніх факторів. Таким чином, поняття енергії як фізичної категорії не лише не відповідає початковому змісту, а й де в чому навіть змінює його.

У сучасній науковій літературі енергію зазвичай визначають як кількісну міру руху і взаємодії всіх видів матерії [19]. У зв'язку з цим постає завдання розробити відповідну методичку й способи оцінювання показників. Нині відомі різноманітні підходи до відображення форм і характеристик енергії. Зокрема, розробляють її ієрархічну класифіка-

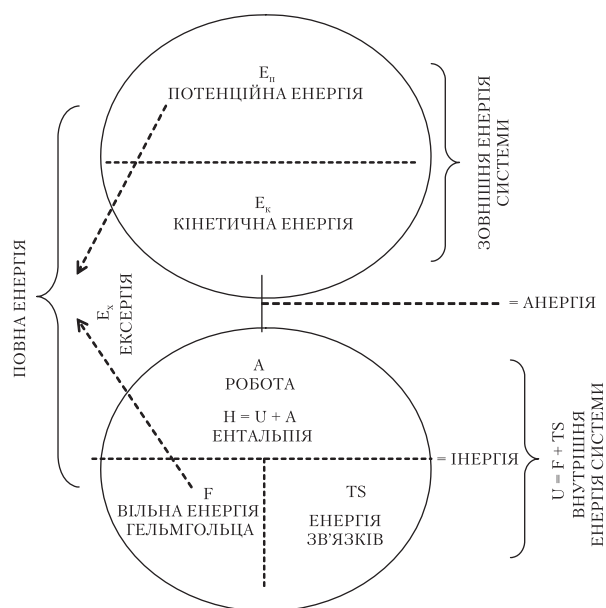


Рис. 1. Співвідношення різних форм енергії та їхніх показників у екосистемах.

цію [15], вводять й деталізують нові поняття (ексергія, інергія, анергія), встановлюють співвідношення між ними (рис. 1).

Загальносвітовою тенденцією сьогодні є народження нових наукових течій із лона класичних напрямів. Саме так свого часу в курсі фізики виникла термодинаміка, а згодом на її платформі сформувалася термокінетика<sup>1</sup>. Тепер набуває розвитку синергетика, започаткована в 1975 р. Г. Хакеном [35]. Галузево суміжні науки, що розробляють проблеми самоорганізації біологічних систем, активно розвиваються, утворюючи нові напрями, які Л. Серторіо [49] називає «екофізикою», І.Р. Кеннеді [46] – «біотермодинамікою». Тож для біологів дедалі актуальнішими стають знання з фізики, адже важливо знати, з якими формами і видами енергії сьогодні стикається людство і як сучасні методи термодинаміки можна за-

<sup>1</sup> Співвідношення між термодинамікою і термокінетикою можна розглядати як відношення статички до динаміки [38].

стосувати для розгляду спільного предмета з різних позицій. Закцентуємо увагу на екотермодинамічних дослідженнях дискусивних проблем оцінювання і трактування енергетичних показників.

Перш ніж приступити до аналізу ще досить недосконалої схеми співвідношення різних форм енергії (рис. 1), відповімо на кілька запитань: чи можемо ми обмежитися оцінкою окремих із них, чи повинні досліджувати різні форми енергії, кваліфікуючи їхню адитивну дію?

Розглядаючи в екологічних дослідженнях загальні, класичні поняття кінетичної ( $E_k$ ) та потенційної ( $E_p$ ) енергій, що формують «зовнішню» енергію системи, ми не можемо знехтувати ними, а, навпаки, маємо приділяти якнайбільше уваги. Визначаючи загальну біомасу та її приріст, первинну продуктивність, біологи зазвичай переводять ці показники маси в енергетичні одиниці, що відображають потенційну енергію екосистеми. Кінетичну енергію встановлюють на основі різниці показників входу (фотосинтезу) та виходу (відпаду), трансформації (розкладу) продуцентами, споживання біомаси консументами та подальшого проходження по трофічних ланцюгах, накопичення органіки в ґрунті, формування гумусу, характеру його розкладу, що, врешті-решт, визначає кінетику, процеси і власне «роботу» екосистеми. Такі оцінки можна отримати, підраховавши показники сполук вуглецю (C) у різних компонентах екосистем, що особливо актуально на сучасному етапі в процесі прогнозування наслідків кліматичних змін.

Ці характеристики завдяки класичним працям Ю. Одума [21] та його послідовників стали предметом екосистемних досліджень, що набули широкого розмаху. На їхній основі отримують цікаві й важливі результати щодо кількісних характеристик функціонування екосистем, швидкості трансформації енергії, оцінюють вплив

екосистем на довкілля (кліматорегулювання, ґрунтоутворення тощо), енергопотоків між складниками екосистеми [5, 6, 9]. Такі енергопотоки Й.Ш. Коган [15] називає енергообміном, під яким розуміє процес перенесення енергії із системи в середовище та із середовища в систему, її перетворення під час взаємодії компонентів системи. На його думку, це одне з основних понять екології, для якого фізика ще не запропонувала адекватного визначення. Вважаємо, що термін «енергообмін» тут недоречний, оскільки «обмін» передбачає й зворотний процес, як це відбувається під час кругообігу речовин та елементів. Насправді, як відомо, енергія трансформується здебільшого в одному напрямку, а зворотні потоки досить мізерні (не більше від 1%) [21]. З огляду на те що ці питання широко висвітлені у фаховій літературі, немає потреби розглядати їх детально.

Набагато складніша проблема оцінювання внутрішньої енергії систем (U), яка забезпечує їхню організацію, структурованість і стійкість. Вона полягає не стільки в її кількісному, власне енергетичному, оцінюванні, скільки в оцінюванні якісних форм, які набувають характеристик інформації, коли стає важко простежити межу між показниками енергії та інформації [30]. Внутрішня енергія (U) може бути зв'язаною (TS) та вільною (F). В.А. Еткін [40] вважає, що класичні уявлення, якими оперують фізики, про «зв'язану енергію» (добуток абсолютної температури (T) і ентропії (S)), «вільну» енергію Гельмгольца ( $\Delta F = \Delta U - T\Delta S$ ), «вільну ентальпію» Дж. Гіббса ( $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ ), для яких розроблено детальні методики розрахунків, а також про роботу взаємодії системи із середовищем ( $A = pV$ ) у відкритих системах, якими є екосистеми, втрачають свою евристичну цінність. На думку цього вченого, «вільна» енергія Гельмгольца та «ентальпія» Гіббса не характеризують запасу перетвореної енергії в екосистемі, тому

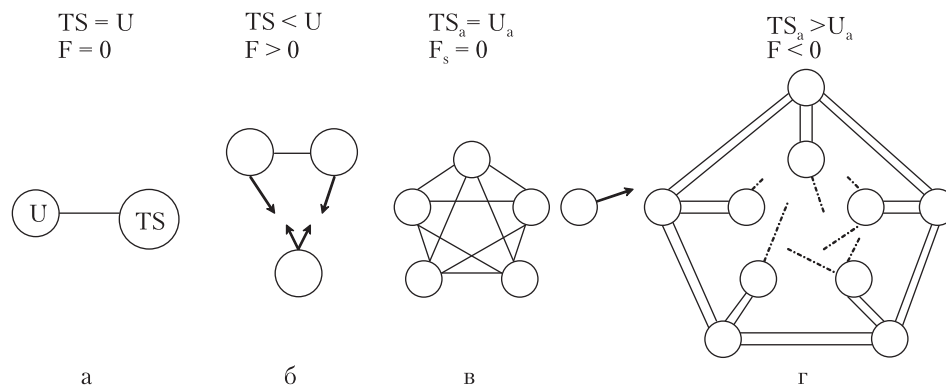


Рис. 2. Стан екосистем залежно від співвідношення TS та U:  $U = TS$  – система перебуває в рівновазі;  $TS < U$  – система зростає, приєднуючи нові елементи;  $TS > U$  – система руйнується і переходить в інший стан.

що «робота» такої системи виконується не лише на основі її внутрішніх енергетичних запасів, але й завдяки енергії навколишнього середовища. Причому показники зв'язаної енергії (TS), накопиченої протягом тривалого часу ( $\Delta T$ ), можуть бути вищими від показників внутрішньої енергії системи (U). Тоді розв'язок рівняння ( $\Delta F = \Delta U - T\Delta S$ ) має від'ємне значення, тобто вільна енергія не просто відсутня – вона має мінусовий показник. З погляду теоретичної фізики, функціонування таких систем неможливе.

На підставі аналізу В.А. Еткін [40] доходить такого висновку: показники ентропії (S) малоінформативні для екологів, які навіть під час теоретичних розрахунків не можуть оперувати цими поняттями, не кажучи вже про практичні, кількісні оцінки, оскільки у відкритих системах її показники можуть не змінюватися завдяки додатковій енергії із зовнішніх джерел, що забезпечує виконання відповідної роботи. З таким висновком не можемо погодитися. Потрібно чітко усвідомити, що ентропія відображає ті зміни (показники) енергії, які протидіють наростанню неупорядкованості систем, тобто забезпечення енергії зв'язку (TS), а не зв'язані форми, які визначають внутрішню організацію системи (U) (рис. 2). За

умови, що  $TS < U$ , тобто  $F > 0$ , енергія зв'язків нижча від внутрішньої, а вільна енергія (F) спрямовується на приєднання нових елементів (рис. 2, б), що збільшує показник TS завдяки зростанню ентропії (S). Система в такому разі стає стійкішою.

$$\begin{array}{c}
 TS_1 < TS_2 \dots < \dots TS_n \\
 \quad \quad \quad \wedge \quad \quad \quad \vee \\
 U_1 > U_2 \dots > \dots U_n
 \end{array}$$

Вільна енергія, що може бути виділена екосистемою за одиницю часу без істотного порушення її структури і функції, визначає енергоємність системи [16]. Цей процес не безмежний, бо настає момент, коли  $TS_n \geq U_n$  (рис. 2, в), тобто резерви внутрішньої енергії (ємність) вичерпуються, вона не здатна формувати нові зв'язки, тому подальший «ріст» внутрішньої організації припиняється ( $F = U - TS \leq 0$ ) і система, дійшовши до точки біфуркації, розпадається, втрачаючи свою стійкість.

Біфуркацію розглядаємо як такий етап розвитку системи, коли запас внутрішньої енергії стає нижчим від запасу енергетичних зв'язків і система втрачає стійкість (рис. 2, г). Розпад означає якісну зміну, стрибок, коли для підтримки внутрішньої енергії ( $U_a$ ) повинен сформуватися прин-

ципово новий тип зв'язку ( $T_s$ ), що характеризується рівнянням  $F_a < U_a - TS_a$  і забезпечує подальший еволюції системи. Такий емерджентний характер розвитку системи спрямований на збільшення енергії зв'язків, яка забезпечує відповідний рівень накопичення внутрішньої енергії завдяки структуризації елементів у системі. Зазначений висновок підтверджує гіпотезу В.П. Мещерякова та В.Б. Вольцева [17] про те, що верхні ієрархічні рівні організації живих систем характеризуються вищим рівнем складності енергетичних зв'язків, ніж нижчі рівні, розвиток живих систем відбувається і поступово (еволюційно), і раптово (стрибкоподібно), точніше революційно, і саме в цьому напрямку.

Під час дослідження екофізичних процесів виникає багато питань, оскільки форми зв'язаної енергії втрачають суто енергетичні характеристики, які можна оцінювати за допомогою роботи. Вони набувають іншого змісту — інформаційного. Інакше кажучи, у таких випадках у поле зору потрапляють не кількісні показники енергії, а характер їхніх змін, співвідношень, розрахованих за допомогою математичних формул.

Термодинаміці, що вивчає не лише проблеми перетворення енергії, а й організацію структури і функціонування систем, уже бракує енергетичних показників, вона розширює поняттєвий інструментарій. Так, однією з проблем, яку досліджує термодинаміка, є оцінювання міри відхилення систем від стану внутрішньої рівноваги, її здатності виконувати внутрішню і зовнішню роботу, вдосконалювати, впорядковувати свою структуру й організацію [43]. Таке оцінювання досить складне через проблему точки відліку: стійкість можна розрахувати на основі відношення одного стану до іншого, а не взагалі, тобто стійкість — це відносна величина. У зв'язку з цим у теорії термодинаміки за таку точку відліку беруть стан внутрішньої рівноваги системи ( $F=U-$

$TS \leq 0$ ), до якого вона намагається розвинути, але функціонувати в ньому не може, бо рівновага знизила б показник ентропії до 0, коли  $F=U$ , що означає розпад системи і її перехід до якісно іншого стану.

Саме тому В.А. Еткін [39] пропонує відмовитися від загальноприйнятої концепції рівноваги в нестатичних умовах і відображати кількісні та якісні характеристики енергії таким чином, щоб можна було оцінювати здатність системи виконувати роботу чи накопичувати енергію в умовах відсутності рівноваги з навколишнім середовищем, яке час від часу змінюється, що зумовлює подальшу внутрішню зміну стану системи, спрямованої до рівноваги (релаксації), якої неможливо досягти. Такий підхід потребує перегляду понять і показників, які перебували поза межами традиційних енергетичних характеристик класичної термодинаміки. Аналізуючи введені З. Рантом поняття ексергії — перетворюваної енергії, яка забезпечує приріст ( $E_x$ ), тобто якісну зміну системи після переходу її через точку біфуркації, В.А. Еткін стверджує, що розрахунки цих показників досить складні, а вихідні дані, які характеризують параметри зовнішнього середовища, не уніфіковані. Отже, якщо величина не відображає функції стану системи, то екологі не повинні нею нехтувати.

Натомість дослідник пропонує власні підходи до кількісного оцінювання процесів, які пов'язані з протидією сил, що відхиляють систему від рівноважного стану. Така величина виражається через силу і тривалість (час) її дії. Сила залежить від маси, об'єму чи поверхні, тому може відображати кількісне відхилення системи від певного стану. У геоботаніці, яка досліджує процеси просторово-часових змін фітоценозів, це може бути оцінювання сукцесійних ланок щодо клімаксового стану [2, 31, 41, 42, 47]. Сукцесійні тренди в напрямку клімаксових угруповань можна

розглядати як певну роботу, що має векторний характер (її оцінюють за показниками енергії).

Крім цього, кожна відкрита система намагається зберегти свою організацію, внутрішній стан, який через розсіювання потребує певних енергетичних затрат. Цей процес також проявляється у виконаній роботі в напрямку впорядкування організації проти сил розсіювання. Функціонування, адаптація кожної екосистеми чи її складника (певного виду організмів, представленого відповідною біоморфою) спрямовані на протидію зовнішнім чинникам. Рослини, які ростуть на пісках чи рухливому субстраті, мають довгі кореневища, а на скелястих ґрунтах — потужні вертикальні каудекси, щоб протидіяти руху піску чи проникати в кам'янисті тріщини, сприяти їх розширенню та руйнації порід, що проявляється в специфіці механізмів адаптації до тих чи інших зовнішніх умов.

Результат функціонування будь-якої системи залежить від максимального ефективного використання енергії, спрямованої на збереження структури та способу функціонування системи, що проявляється в імовірних комбінаціях елементів на рівні популяції, виду, фітоценозу, біоценозу, тобто будь-якої біотичної системи.

Результат функціонування екосистем можна оцінити за його корисною роботою, спрямованою на максимальне використання зовнішнього середовища, і роботою задля збереження стану організації системи, входження її елементів у еконішу. Однією з найважливіших кількісних характеристик еконіші є її енергетична ємність, яку оцінюють на основі засвоєння, трансформації та віддачі енергії (енергетичного балансу), зміна якої визначає енергетичний потенціал — рушійну силу, що визначає вектор розвитку живих систем — синеволюцію [6]. Відповідно потенціал, що здатний виконати роботу, розділяють

на *впорядковану* та *невпорядковану* енергію. Процес дисипації, розсіювання, енергії для збереження системи означає перехід енергії з упорядкованого в неупорядкований стан, який не здатний виконувати роботу і трансформується в іншу форму — *анергію*. Її оцінювання в екосистемах дуже важливе. З одного боку, вона відображає вплив екосистеми на довкілля, тобто її значення для навколишнього середовища (наприклад, дихання, виділення  $\text{CO}_2$ , и фотосинтез, утворення  $\text{O}_2$ ). Сума анергії та енергії (у вузькому розумінні) — це загальна кількісна міра впорядкованих і неупорядкованих, перетворюваних і неперетворюваних форм руху матерії.

Одне з центральних місць в організації систем посідають поняття їхньої *стійкості* та *розвитку*, що потребує відповідних методів оцінювання. У передмові до однієї зі своїх монографій Ю.М. Свіріжев [28, 9] зазначає: «Класична фізика привчила нас до думки про стійкість, постійність навколишнього світу. Класична біологія після появи дарвінівської теорії еволюції показала, що стійкість — це, скоріше, виняток, ніж правило, що характеризує критичний стан системи. І якщо є сенс говорити про стійкість, то при цьому завжди потрібно говорити про масштаби часу, про часові інтервали, у яких спостерігаємо цю властивість».

У термодинаміці стійкість розглядають через урівноважений стан, порядок, а в екології — через теорію клімаксу. Розвиток усіх систем спрямовано до стійкого, урівноваженого стану [11, 12, 26, 41, 46, 47]. Щоб відбувалися зміни, «рух» системи, повинен існувати градієнт, який формується завдяки невідповідності стану системи стосовно до зовнішнього середовища, його неоднорідності. Якщо у фізиці показниками такого градієнта є температура, тиск, електричні та інші потенціали, а взаємовідношення між ними та об'ємом, масою дають можливість вийти на показники енергії, ентропії, якими оперу-

ють у термодинаміці, то в екології виникає проблема вибору таких одиниць оцінювання екологічних факторів (наприклад, кліматичних, орографічних) і встановлення відповідних екстенсивних змінних (коефіцієнтів) щодо основних одиниць та методики їх розрахунків.

Відхилення системи від рівноваги виражає добуток певної величини фактора ( $K$ ) на віддаль відхилення ( $\Delta k$ ), що характеризує його як вектор ( $K\Delta k$ ). Увівши змінну часу ( $\Delta t$ ), потрібного для формування системи відповідного типу, можемо визначити швидкість її формування  $K\Delta k/\Delta t = w$ . Хоча насправді такий процес не є лінійним, і швидкість знижується в міру наближення системи до рівноважного стану.

Для оцінювання загально визначених фізичних характеристик в екології не вистачає одиниць такої оцінки. В.А. Еткін [41] запропонував увести єдину міру впорядкованості термодинамічної системи — *інергію* ( $Y$ ), суть якої полягає в оцінюванні перетворюваної, невірноваженої, частини енергії, здатної виконувати роботу, у неперетворювану, що характеризується врівноваженим станом (анергією). Визначити  $Y$  можна на основі різниці показників енергії систем у невірноваженому ( $E$ ) та врівноваженому ( $U$ ) станах.

Якщо  $Y = F - U$ , а  $F = U - TS$ , то  $Y/F = 1 - U/F$ , що характеризує ступінь упорядкованості (віддаленості від рівноважного стану) системи. У разі, коли  $Y=0$ ,  $TS=0$ , а  $F=U$ , уся енергія концентрується на внутрішній організації. Для розвитку й формування нових енергетичних зв'язків необхідне збільшення енергії  $TS$ . Якщо  $Y=1$ , то  $1=1-U/F$ ;  $U/F=0$  або  $U/(TS-U)=0$ , то  $TS=U$ . Така система досягла межі стійкості, але вона не може розвиватися, оскільки вся внутрішня енергія дорівнює енергії зв'язків, а вільної енергії, щоб приєднувати нові елементи, немає. Стійкість забезпечується завдяки зворотному зв'язку. Щоб система

продовжувала функціонувати, необхідно нарощувати  $TS$ . Що більша різниця між  $TS$  і  $U$ , то більші резерви системи і її розвиток швидший.

Отриманими показниками інергії ( $Y$ ) можна оперувати під час оцінювання екосистем. В.А. Еткін [40] вважає, що такий підхід дає змогу оцінити внутрішні перетворення енергії одних форм в інші ( $i \rightarrow j$ ), ступінь віддаленості показників різних факторів (аналогічно принципу гетеробатмії в систематиці) від рівноважного стану системи, ступінь «зрілості» системи щодо стану рівноваги ( $dY = 0$ ). Показник інергії, як ми зазначали вище, може слугувати мірою неоднорідності структури і навіть критерієм еволюції. Якщо швидкість зміни зовнішніх чинників перевищує швидкість релаксації системи щодо рівноважного стану, то система дедалі більше віддаляється від нього; якщо швидкість релаксації вища від зовнішніх змін, то система здатна досягнути рівноважного стану. Поняття анергії та інергії — це не енергетичні одиниці, а їхнє співвідношення. Вони є тим містком, який поєднує енергію та інформацію, відображає організацію системи.

Оцінювання зміни системи здійснюють щодо рівноважного стану, який в екології ототожнюють із клімаксовим станом екосистем. Проте В.А. Еткін [38] пропонує відмовитися від концепції рівноваги, бо екосистема весь час змінюється відносно зміни зовнішніх факторів. Однак, відкинувши стан рівноваги, ми втрачаємо точку відліку і масштаб виміру. Тому гіпотетично він (стан) має бути і характеризуватися таким ступенем упорядкованості, який визначає наближення до точки біфуркації. Таким чином, розвиток можна уявити як послідовні зміни системи від одного біфуркаційного стану до наступного.

Поняття стійкості тісно пов'язане з поняттям розвитку, який відбувається в різних формах, але, врешті-решт, виходить на

процеси еволюції. Специфіка синергетичного підходу полягає в тому, що ідея самоорганізації, яка характеризується певною спрямованістю і щораз складнішою організацією систем для оптимальнішого засвоєння та організації енергії, пояснює теорію прогресивної еволюції екосистем (синеволюції), суть якої полягає не лише в поступових, кількісних змінах, а й у якісних стрибках. Як було вже зазначено, енергетичний потенціал є рушійною силою, що визначає вектор синеволюції, спрямований на вдосконалення механізмів накопичення і трансформації енергії через адаптивні властивості видів [7, 8]. У результаті відбувається забезпечення функцій перетворення і накопичення енергії в системі, що має певні межі.

У процесі прогресивної еволюції в системі відбуваються переходи між різними режимами, що тісно пов'язано з поняттями незворотності та біфуркації, яка визначає критичний стан системи, після якого вона руйнується і переходить до якісно іншого стану. Таким чином, процес розвитку системи уявляємо як незворотний рух від однієї точки біфуркації до іншої. Вивчаючи формування зародка, К.Х. Уоддінгтон [32] зробив висновок, що цей процес характеризується певною стійкістю траєкторії розвитку, яку він назвав гомеорезом, а найстійкіші траєкторії — креодами. Такий підхід до еволюції дає можливість показати, як живі організми чи інші надорганізмові системи (популяції, біоценози і, можливо, екосистеми) можуть самоорганізуватися, створюючи стійкий у певній фазі розвитку порядок.

Р.Є. Ровінський [26] зазначає, що в 70-х рр. ХХ ст. з'явилося розуміння такого природного явища, як самоорганізація матерії. Воно ґрунтується на незворотності більшості відомих науці процесів, що відбуваються і в мікро-, і в макросвіті. Отже, самоорганізація — найважливіший чинник утворення

нових властивостей речовини, наростання ступеня впорядкованості в певних системах, що розвиваються.

Поняття «самоорганізації» різні дослідники також трактують неоднозначно. У словнику-довіднику М.Ф. Реймерса [25, 468] знаходимо таке його визначення: «самоорганізація — чітка послідовність («порядок») фізико-хімічних і біологічних явищ у природних системах, що зумовлена зовнішніми і внутрішніми чинниками, вона приводить до виникнення фізіономічно однорідного і/чи функціонально єдиного цілого». Однак формування такої однорідності означає досягнення рівноважного стану, що визначається точкою біфуркації і призводить до руйнування системи відповідного типу, перехід її до іншого стану.

М.М. Моїсеєв [18], пояснюючи основні положення концепції універсального еволюціонізму, зазначає, що нові квазістабільні утворення, безперервно народжуючись із хаосу, знову перетворюються в матеріал для формування нових структур, оскільки такі процеси завжди ґрунтуються на трьох емпіричних узагальненнях: мінливість (стохастичність і невизначеність органічно властиві природі), спадковість (залежність сьогодення і майбутнього від минулого) і відбір (система правил та подій, які відбирають із певної сукупності, реальні підмножини). Одним із способів розв'язання цієї проблеми, на думку вченого, є використання механізмів біфуркаційного типу. Втім зазначені механізми в біології виявляються не в такому рафінованому вигляді, як у фізиці, вони зберігають свою основну особливість — непередбачуваність результату. М.М. Моїсеєв [18] указував на специфічну роль так званих «механізмів складки», які провокують появу абсолютно нових властивостей в еволюційних системах. Він стверджував, що «... природі властива кооперативність — об'єднання окремих елементів у системи. У результаті в новоствореній системі можуть



виникати нові властивості». І далі: «Зовсім інше — виникнення властивостей великих сукупностей об'єктів: якщо кількість елементів і складність зв'язків між ними досягають деякого критичного рівня, то ця сукупність набуває якісно нових системних характеристик. З цією особливістю пов'язані, можливо, найглибші властивості «макросвіту».

Формування впорядкованості відкритих неврівноважених систем, якими за своєю суттю є екосистеми, відбувається під впливом внутрішніх причин і залежить від енергетичної ємності системи. Разом із тим на тривалість її буття в стані рівноваги впливають здебільшого зовнішні чинники, що за певних умов можуть «регламентувати» поведінку систем як певну їхню реакцію на зовнішню інформацію, знижуючи рівень упорядкованості на основі зростання флуктуаційних процесів, що характеризують відхилення показників за межі допустимих відхилень від середніх значень.

Для пояснення механізмів самоорганізації застосовують термодинамічний підхід, розроблений і запропонований главою Брюссельської «термодинамічної» школи І.Р. Пригожиним, який так сформулював основне завдання неврівноваженої термодинаміки: «Щоб розробити термодинаміку структур, що самоорганізуються, необхідно показати, що неврівноваженість може бути причиною порядку. Виявилось, що незворотні процеси призводять до виникнення нового типу динамічних станів матерії, названих мною «дисипативними структурами» [22]. Розв'язанню цього завдання передувало створення нової неврівноваженої термодинаміки, основні положення якої викладені в низці досліджень [20, 22–24]. Проте в усіх випадках самоорганізація виявляється в критичних точках розвитку — точках біфуркації. Розвиток у напрямку врівноваженого стану означає зниження показників ентропії, що

викликає збурення, турбулентність — нелінійні, неупорядковані зміни, а отже, посилення коливальних процесів (флуктуацій) [4, 37, 43]. Флуктуації — це такі механізми, що зумовлюють елімінацію одних елементів і появу інших, установа нових зв'язків між ними. Паралельно відбувається зниження ентропії, що може тривати до певного критичного рівня, унаслідок чого система досягає точки біфуркації, яка визначається таким внутрішнім станом системи, коли вона вже не може зберігати свою організацію у відповідь на зміну зовнішнього середовища, бо в системі в результаті появи інноваторів — нових елементів — та організації нових зв'язків відбуваються якісні зміни, які спричинюють руйнування, розпад старої системи і формування нової. Стрибокподібні якісні зміни викликають перехід на інший рівень організації з одночасним порушенням рівноваги, що підвищує неупорядкованість [7]. Саме з таких станів у певних критичних умовах відбуваються стрибкоподібні переходи в якісно нові стани, зокрема з вищим рівнем упорядкованості. Ще 1944 р. Е. Шредінгер [36] писав, що, окрім руйнівної тенденції, життю властива тенденція до стійкої підтримки впорядкованих станів високого рівня складності. У цьому контексті системи, що самоорганізуються, повинні відповідати таким вимогам: 1) відкритості, що забезпечує надходження енергії ззовні; 2) досягненню системою сильно неврівноваженого стану (перебування в діапазоні критичних параметрів) — точки біфуркації; 3) виходу з критичної ситуації стрибком, коли елементи виявляють здатність змінити організацію системи, перевести її в інший стан.

Подальше вивчення феномену самоорганізації свідчить, що всі системи такого типу переходять із критичного стану в якісно новий за єдиним алгоритмом. Це нелінійний стрибок, турбулентний про-

цес, що супроводжується розривом функції, описати який вдалося лише після створення Г. Хакеном [35] системи нелінійних диференціальних рівнянь, що враховують зовнішні фактори, які штовхають систему до переходу в новий стан, а також випадкові непередбачувані чинники, що визначають «вибір» одного з можливих кінцевих станів.

Розглянуті положення також можна пояснити на основі дефініцій теорії катастроф. Розвиваючи цю теорію, В.І. Арнольд [1] під катастрофами розуміє стрибкоподібні переходи, що виникають у вигляді раптової відповіді системи на плавну чи різку зміну зовнішніх умов. Отже, теорія катастроф пропонує універсальний метод дослідження будь-яких стрибкоподібних переходів, одним із типових проявів яких є зміни, що відбуваються в процесі самоорганізації. Утім необхідно відзначити серйозні труднощі в разі намагання поширити цю теорію на біологічні об'єкти [4, 11, 26, 27, 29].

Таким чином, парадигма самоорганізації поступово набуває характеру загальнонаукового принципу, з позицій якого еволюцію систем можна визначити як спрямований процес виникнення нових структур у результаті організації їхніх елементів. Неодмінним початковим пунктом для еволюційних процесів є наявність старої системи, що характеризується відкритістю, тобто здатністю обмінюватися з навколишнім середовищем речовиною, енергією та інформацією. Адже замкнута система, згідно з другим законом термодинаміки, еволюціонує лише в напрямі зростання її ентропії, що посилює хаос і дезорганізацію.

Еволюцію відкритих систем І. Пригожин та І. Стенгерс [24] характеризують як «порядок через флуктуації», оскільки саме завдяки таким випадковим відхиленням від певного сталого режиму функціонування у

відкритій неврівноваженій системі, якими, зокрема, є більшість екологічних систем, поступово «розхитується» колишній порядок і виникає новий режим функціонування, відмінний від попереднього. Отже, самоорганізація стає загальною основою будь-якої теорії еволюції.

Аналізуючи активну роль інформації в процесах розвитку в природі, ґрунтуючись на відкритті тонкоорганізованого механізму передавання спадкових ознак, І.М. Фейгенберг та Р.Є. Ровінський [33] пропонують екстраполювати ці положення і на глобальні системи, наприклад на біосферу. Вони стверджують, що в основі процесу розвитку простежуються дві протилежні тенденції: 1) руйнівна (формується в результаті властивого матерії прагнення до досягнення рівноважних станів, що в ізольованих системах призводить до руйнування будь-якої впорядкованості); 2) стримувальна (спирається на прагнення матерії до створення та підтримки нерівноважних станів навіть через стрибкоподібні переходи системи в якісно нові стани, що характеризуються вищим рівнем упорядкованості й гарантують її збереження). Дослідники відзначають, що ця тенденція характеризує лише відкриті системи, функціонування яких можливе завдяки надходженню енергії, речовини та інформації ззовні.

По суті, зазначені положення стосуються майже всіх рівнів організації живої матерії. Якщо біофізики вже давно проводять такі дослідження на внутрішньоорганізмівому рівні в лабораторних умовах, то на екосистемному рівні науковці роблять лише перші кроки. Проблема полягає в тому, як застосувати теоретичні уявлення, підходи термодинаміки й синергетики та спеціальні методики для оцінювання такого складного об'єкта, як екосистема, що дасть змогу схарактеризувати її кількісні та якісні зміни в просторі й часі. Адже екологічні системи — це результат трива-

лої взаємодії біоти і квазістабільного середовища, що узгоджується з низкою як біологічних, так і загальнонаукових законів, одним із яких є другий закон термодинаміки. На цій підставі традиційні поняття біології, зокрема геоботаніки, та екосистем вимагають нового осмислення, перегляду з урахуванням тих наукових підходів, теоретичним підґрунтям яких є термодинаміка, що в перспективі виведе цей науковий напрям на новий рівень розвитку — еко-термодинаміку.

1. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. — 3-е издание. — М.: Наука, 1990. — 128 с.
2. *Василевич В.И.* Очерки теоретической фитоценологии. — Л.: Наука, 1983. — 248 с.
3. *Голубець М.А.* Екосистемологія. — Львів: Поллі, 2000. — 316 с.
4. *Горшков В.Г., Макарьева А.М.* К вопросу о возможности физической самоорганизации биологических и экологических систем // Доклады РАН. — 2001. — Вып. 378 (4). — С. 570–573.
5. *Дідух Я.П.* Еколого-енергетичні аспекти у співвідношенні лісових та степових екосистем // Український ботанічний журнал. — 2005. — Вип. 62. — №4. — С. 455–467.
6. *Дідух Я.П.* Системний та синергетичний підходи в сучасній ботаніці // Етюди фітоєкології — К.: Арістей, 2008а. — С. 4–26.
7. *Дідух Я.П.* Теоретичні проблеми еволюції рослинного покриву — К.: Арістей, 2008б. — С. 152–177.
8. *Дідух Я.П.* Что такое лесостепь? // Етюди фітоєкології — К.: Арістей, 2008. — С. 211–230.
9. *Дідух Я.П., Расевич В.В., Гаврилов С.О., Альошкіна У.А.* Оцінка екологічних збитків екосистем на основі енергетичних показників // Наука та інновації. — 2009. — Т. 5. — С. 62–75.
10. *Жерихин В.В.* Природа и история травяных биомов // Степи Евразии: проблемы сохранения и восстановления. — Санкт-Петербург — Москва: Институт географии РАН, 1993. — С. 29–49.
11. *Жерихин В.В.* Самоорганизация и распад сложных систем // Избранные труды по палеоэкологии и фитоценогенетике. — М.: Т-во научных изданий КМК, 2003. — С. 374–382.
12. *Иосс Ж., Джозеф Д.* Элементарная теория устойчивости и бифуркаций / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 300 с.
13. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994. — 236 с.
14. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика как новое мировидение: диалог с И. Пригожиным // Вопросы философии. — 1992. — № 12. — С. 3–20.
15. *Коган И.Ш.* Систематизация и классификация определенных и дополнений к понятию «энергия» 2007: <http://www.sclteclibrary.ru/rus/catalog/pages/8784.html>.
16. *Лаврик В.И.* Екологічна ємність і самоочисна здатність водних екосистем; питання їхньої кількісної оцінки // Ойкумена. — 1991. — №4. — С. 44–55.
17. *Мещеряков В.П., Волыцев В.Б.* Эволюционная теория систем // Эволюция. — 2005. — №12. — С. 21–23.
18. *Моисеев Н.Н.* Универсальный эволюционизм // Вопросы философии. — 1991. — №3. — С. 3–28.
19. *Мякишев Г.Я.* Энергия // Большая советская энциклопедия / Ред. А.М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1978. — Т. 30. — С. 191.
20. *Николис Т., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах / Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
21. *Одум Ю.* Экология. В 2-х т. — М.: Мир, 1986. — Т. 1. — 328 с.
22. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. — М.: Наука, 1985. — 327 с.
23. *Пригожин И.* Философия нестабильности // Вопросы философии. — 1991. — № 6. — С. 46–52.
24. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. — М.: Прогресс, 1986. — 431 с.
25. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование: Словарь-справочник. — М.: Мысль, 1990. — 637 с.
26. *Ровинский Р.Е.* Самоорганизация как фактор направленного развития // Вопросы философии. — 2002. — № 5. — С. 67–77.
27. *Рузавин Г.И.* Эволюционная эпистемология и самоорганизация // Вопросы философии. — 1999. — № 11. — С. 90–101.
28. *Свирижев Ю.М.* Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. — М.: Наука, 1987. — 368 с.
29. *Свирижев Ю.М., Логофет Д.О.* Устойчивость биологических сообществ. — М.: Наука, 1978. — С. 170–216.
30. *Стров М.И.* Информационные процессы в биологических системах. — Л.: Наука, 1975. — 155 с.
31. *Сукачев В.Н.* Идеи развития в фитоценологии // Советская ботаника. — 1942. — №1–3. — С. 5–17.
32. *Уоддингтон К.Х.* Основные биологические концепции // На пути к теоретической биологии. I. Прологомены. — М.: Мир, 1970. — С. 11–38.
33. *Фейгенберг И.М., Ровинский Р.Е.* Информационная модель будущего как программа развития // Вопросы философии. — 2000. — № 5. — С. 76–87.

34. Философские мысли натуралиста / В.И. Вернадский. — М.: Наука, 1988. — 520 с.
35. Хакен Г. Синергетика / Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 404 с.
36. Шредингер Э. Что такое жизнь? (С точки зрения физика). — М.: Атомиздат, 1972. — 88 с.
37. Яковленко С.И. Об организующем и разрушающем (стохастизирующем) воздействиях в природе // Вопросы философии. — 1992. — № 2. — С. 141–144.
38. Эткин В.А. Термокинетика (термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии): Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., переработ. и дополн. — Тольятти, 1999. — 216 с.
39. Эткин В.А. Мера упорядоченности гетерогенных систем. — 2004: [http://zhurnal.lib.ru/e/etkin\\_w\\_a/merauporjadachennostigeteterogennyxsistem.shtml](http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/merauporjadachennostigeteterogennyxsistem.shtml).
40. Эткин В.А. Энергия и анергия. — 2006: [http://zhurnal.lib.ru/e/etkin\\_w\\_a/energijajaenergija.shtml](http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/energijajaenergija.shtml).
41. Clements F.E. Plant succession and indicators. — N.Y.: Hafner press, 1973. — P. 453.
42. Eliot C. Method and Metaphysics in Clements's and Gleason's Ecological Explanation // Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences. — 2007. — Vol. 38 (1). — P. 85–109.
43. Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuation. — Wiley-Interscience a division of John Wiley and Sons, Ltd. — London, New York, Sydney, Toronto, 1971. — P. 301.
44. Gleick J. Chaos. Making a New Science. — Penguin Books, 1988. — P. 354.
45. Holman J.P. Thermodynamics of irreversible processes // Thermodynamics. — McGraw-hill book company. — New York ets., 1969. — P. 367–381.
46. Kennedy I.R. Action in Ecosystems: Biothermodynamics for Sustainability. — Research Studies Press Ltd. — Baldock, Hertfordshire, England, 2001. — P. 251.
47. Pidwirny M. Plant successions. Fundamentals of Physical Geography. — 2nd Edition. — 2007: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/9i.html>.
48. Rifkin J., Howard T. Entropy into the Greenhouse World. — Bantam Books. — New York, Toronto, London, Sydney, Auckland, 1989. — P. 355.
49. Sertorio L. Thermodynamics of complex systems (An Introduction to Ecophysics). — World Scientific. — Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, 1991. — P. 208.

*Я. Дідух, Г. Лисенко*

#### ПРОБЛЕМИ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ ЕКОСИСТЕМ

Резюме

Парадигма самоорганізації систем, що ґрунтується на основі законів термодинаміки, синергетики, дає можливість оцінювати такі характеристики, як енергетична ємність, організація, стійкість і розвиток екосистем, кількісною мірою яких є енергетичні показники. Автори статті переконані, що класичні фізичні закони термодинаміки допоможуть екологам зрозуміти специфіку самоорганізації екосистем; розкрити механізми теорії прогресивної синеволуції, рушійною силою якої є енергетичний потенціал, вектор якого спрямовано на вдосконалення способів накопичення і трансформації енергії через адаптивні властивості видів; розробити методи кількісного оцінювання показників енергії на рівні екосистем, що в перспективі приведе до появи нового наукового напрямку — еко-термодинаміки.

*Ключові слова:* термодинаміка, синергетика, самоорганізація, стійкість екосистем, точка біфуркації, провірна еволюція.

*Ya. Didukh, G. Lysenko*

#### PROBLEMS OF THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF ECOLOGICAL SYSTEM STRUCTURE AND ARRANGEMENT

Abstract

Paradigm of the systems self-organization based on the thermodynamic laws, synergetics makes it possible to assess such features as energy capacity, arrangement, stability and development of ecological systems, quantitative measure of which are energy rates. Authors of the article are sure that classical physical laws of thermodynamics will help ecologists to understand the peculiarity of ecological system self-organization, disclose the mechanisms of progressive synevolution theory, driving force of which is energy potential, vector of which is directed on improvement of the methods for energy accumulation and transformation through adaptive properties of its types, develop the methods for quantitative assessment of energy rates at the level of ecological systems that will result in appearance of such new scientific trend as eco-thermodynamics.

*Keywords:* thermodynamics, synergetics, self-organization, stability of ecological systems, point of bifurcation, break-through evolution.