

# ЕКОЛОГІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>  
УДК 504:001.8; 504:1

Надійшла 8 вересня 2022 р.  
Прийнята 15 листопада 2022 р.

## Термодинамічні аспекти системного підходу в екології

*Віталій Безсонний*<sup>1</sup>,

к. техн. н., доцент, кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти,

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна,

e-mail: [bezsonny@gmail.com](mailto:bezsonny@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>;

*Олег Третьяков*<sup>2</sup>,

д. техн. н., професор, кафедра цивільної та промислової безпеки,

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна,

e-mail: [mega\\_ovtr@ukr.net](mailto:mega_ovtr@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-0457-9553>;

*Микола Шерстюк*<sup>3</sup>,

аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій,

<sup>3</sup>Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна,

e-mail: [l.plyacuk@ecolog.sumdu.edu.ua](mailto:l.plyacuk@ecolog.sumdu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-5090-046X>;

*Алла Некос*<sup>1</sup>,

д. геогр. н., професор, зав. кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти,

e-mail: [alnekos999@gmail.com](mailto:alnekos999@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

Результатом впливу на екосистему антропогенного фактора буде зниження антиентропії компонентів. Реакція екосистеми буде різною залежно від сили та тривалості збурюючого впливу. При сильному і досить тривалому впливі антиентропія компонентів падає при збереженні організації екосистеми до тих пір, поки занадто низький рівень антиентропії компонентів не включає їх власні регуляторні реакції, спрямовані на стримування падіння антиентропії навіть на шкоду організації системи. Організація починає падати. Оскільки вплив досить сильний і він не припиняється, регуляторні механізми компонентів не в змозі стабілізувати антиентропію. Процес падіння антиентропії та організації триває, система необоротно йде до загибелі. При середньому за силою, але тривалому впливі компонентам вдається за рахунок енергетичних резервів стабілізувати свою антиентропію на деякому не оптимальному, але допустимому рівні при збереженні організації. Однак, якщо вплив продовжується і не слабшає, компоненти, не будучи в змозі повернути свою антиентропію до початкового оптимального рівня, рано чи пізно не справляються з безперервним збуренням, та їх антиентропія знову починає падати, тепер вже разом з організацією. При слабкому чи нетривалому впливі компоненти, адаптуючись до нових умов, повертають антиентропію до оптимального рівня (при сильному або середньому за силою впливі це можливо лише після його припинення до незворотних змін в системі). При такому варіанті організація системи залишається постійною, оскільки збурююча дія в цьому випадку не вивела екосистему за рамки ефективної роботи гомеостатичних механізмів. Таким чином, критичним моментом при дії на екосистему антропогенного чинника є початок падіння її організації, коли гомеостаз повністю вичерпав себе у протидії збуренню, та екосистема починає незворотно деградувати. Отже, для контролю стану екосистеми, що піддається дії антропогенного фактора, достатньо стежити за організацією системи: якщо вона не зменшується, можна говорити про відносне благополуччя, якщо ж організація падає, екосистема йде до загибелі, і необхідно вживати заходів для її порятунку. Однак періодичний і досить частий вимір організації екосистеми є задачею, хоча і такою, що не викликає принципових труднощів, але дуже трудомісткою, в першу чергу через знаходження середнього модуля коефіцієнтів кореляції параметрів. Визначення ж складності екосистеми за формулою хоча і пов'язане з певними труднощами, пов'язаними з знаходженням числа зав'язків, проте не вимагає трудомісткої математичної обробки.

**Ключові слова:** екологічна система, термодинамічний підхід, стійкість, організація системи, ентропія, антиентропія.

**Як цитувати:** Безсонний Віталій. Термодинамічні аспекти системного підходу в екології / Віталій Безсонний, Олег Третьяков, Микола Шерстюк, Алла Некос // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2022. – Вип. 57. – С. 268-281. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>

**In cites:** Bezsonnyi Vitalii, Tretyakov Oleg, Sherstyuk Mykola, Nekos Alla (2022). Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (57), 268-281. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20> [in Ukrainian]

### Постановка проблеми.

Системний підхід знаходить все більш широке застосування в аналізі конкретних екологічних проблем, зокрема проблеми стійкості екосис-

тем до зовнішніх збурень, наприклад, до антропогенного фактора. Виникнення глобальних екологічних проблем і стійкість розвитку біосфери можна проаналізувати і якісно інтерпретувати з точ-

ки зору основних законів термодинаміки [1]. Ця галузь фізики не обмежується вивченням теплових процесів лише для опису та оптимізації роботи теплових двигунів, як це було на початковому етапі її формування, а аналізує загальні закономірності перетворення енергії на різних рівнях організації матерії, в тому числі і живих систем. Термодинаміка потрібна для розуміння існування і функціонування живих клітин, популяцій клітин, організмів, популяцій тварин, екосистем і біосфери в цілому. Будь-яка з цих систем знаходиться в термодинамічному дисбалансі з навколишнім середовищем, і її існування з точки зору термодинаміки є абсолютно малоімовірною подією. Необхідність надходження енергії через будь-яку організовану систему в біосфері, чи то індивід, чи популяція тварин або екосистема – є головним висновком термодинаміки, яка регулює принципи і критерії існування таких систем [2]. Термодинаміка нерівноважних процесів є теоретичною основою для вивчення відкритих систем, включаючи клітину, живі організми, їх популяції, екосистеми і біосферу в цілому [3].

Такий біофізичний підхід до проблем екології є актуальним у зв'язку з необхідністю узагальнення накопичених на сьогоднішній день експериментальних і теоретичних даних у сфері забруднення навколишнього середовища і розробки основних принципів і концепцій підтримки сталості і рівноваги у біосфері. Не виключено, що для забезпечення стабільності біосфери людині доведеться змінити деякі стандарти індивідуальної і соціальної поведінки, етику і навіть економічні цілі розвитку [4]. Саме тому екологія здатна об'єднати людей із різними політичними і релігійними поглядами, будучи своєрідним світоглядом і нормою поведінки людини.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Термодинамічні особливості екологічних систем досліджуються з різних позицій. У роботі [5] розглядаються інваріантні властивості термодинамічного виробництва ентропії в її глобальних (інтегральних), локальних (диференціальних), білінійних і макроскопічних формулюваннях, включаючи масштабування розмірів, інваріантність до фіксованих переміщень, обертання або відображення координат, антисиметрію часу, інваріантність Галілея і симетрію точки Лі. За допомогою аналізу різних підсистем зсувного потоку представлено ряд керівних принципів для опису їх ентропійних властивостей сполучення та джерел негентропії. На них не впливають галілейські перетворення, і тому можна зрозуміти, що вони «лежать вище» галілейських інерційних рамок ньютонівської механіки. Аналізи дають новий погляд в область ентропійної механіки, вивчення відносних рухів об'єктів з тертям. Ентро-

пія, зазначається у [6] – це поняття, визначене другим законом термодинаміки. Застосовуючи цю концепцію до світу, в якому ми живемо, виробництво ентропії необхідно звести до мінімуму і прискорити негентропію (негативне вироблення ентропії), щоб створити здорову і стабільну екологічну систему. Нинішнє очищення стічних вод, однак, сприяє виробництву ентропії. Це означає, що звичайне очищення стічних вод, без відновлення ресурсів та енергії, поступово, але неминуче сприятиме погіршенню екологічної рівноваги. Коли здатність до самоочищення природної екологічної системи обмежена, нагальною стає необхідність розвитку стійкого очищення стічних вод з метою затримки вироблення ентропії та прискорення негентропії. Відновлення ресурсів та енергії зі стічних вод має бути першим пріоритетом, оскільки вони можуть суттєво сприяти мінімізації виробництва ентропії та прискоренню негентропії.

Життєво важливою метою екології є визначення механізмів, необхідних для сталості екосистем [7]. Будь-яка шкода біорізноманіттю руйнує функціональність екосистем і за важких обставин призводить до масового вимирання видів і втрати цілих екосистем [8]. Біорізноманіття в його найширшому розумінні визначається як різноманітність форм життя на різних рівнях, починаючи від рівнів організмів і закінчуючи видами [9]. Застосовуючи індекси різноманітності, можна порівнювати різні просторові місця та часові періоди [10]. Таким чином, ці заходи є важливими інструментами для екологічного моніторингу та збереження біорізноманіття [11]. Екологічне домінування та різноманітність є широко використовуваними ознаками спільноти на альфа-, бета- та гамма-рівнях [12], і ці підходи до оцінки різноманітності широко застосовуються в екології з останніх кількох десятиліть [13]. До показників, що використовуються для визначення різноманітності спільнот, відносяться ентропія Шеннона (індекс Шеннона-Вайнера) [14], індекс Сімпсона [15], індекс Бріллюена [16], ентропія Реньї, індекс Бергера-Паркера [17] тощо.

У роботі [18] автори розширюють поняття негативної ентропії (негентропії) для вимірювання екологічного домінування і різноманітності на трьох ієрархічних рівнях характеристики спільноти. Негентропія є мірою енергії і дає опуклу криву для бінарної функції негентропії, тоді як ентропія Шеннона дає типову увігнуту криву. Аналогічно, було визначено індекси для функцій домінування Сімпсона та Бріллюена на альфа-, бета- та гамма-рівнях. Автори [19] розглядають інтелектуальну історію концепції екодинаміки людини за останні кілька десятиліть, оскільки вона виникла з класичної екології, антропології,

поведінкової екології, теорії стійкості, історичної екології та суміжних областей, особливо щодо вивчення довгострокових соціоекологічних змін. Лише завдяки інтегрованому вивченню поєднання людини та природними систем - соціоеко-систем – ми можемо сподіватися на розуміння динамічних взаємодій людини та навколишнього середовища і можемо керувати ними для досягнення сталих цілей.

Однією з головних проблем антикризового управління є завчасна оцінка стійкості системи до того, як вибухне криза (пандемія, комп'ютерна помилка з масштабними ефектами, каскадні ефекти в критичній інфраструктурі тощо). У роботі [20] пропонується узгодити багатоманітне, а іноді і нечітке визначення стійкості, пояснивши взаємодоповнюваність стабільності та адаптивності, властиву цій концепції. Крім того, інтегровано новий вимір в оцінку стійкості шляхом аналізу динаміки негентропії (порядок, стабільність) та ентропії (розладу, зміни) між факторами. Демонструється, що стійкість базується як на сприятливому порядку, так і на сприятливому хаосі, які створюють різноманітність та відповідність у системі, тоді як вразливість притаманна несприятливому порядку та несприятливому хаосу.

Як зазначають автори [21], екосистема розглядається як складний набір, що складається з різних біотичних і абіотичних частин. Природно, що кожна частина має специфічні функції, пов'язані з масою та енергією, і ці функції взаємодіють між частинами прямо чи опосередковано, та підкорюються основним законам термодинаміки. Якщо кожен частину екосистеми прийняти як термодинамічну систему, то можна оцінити генерацію її ентропії, тоді загальна генерація ентропії екосистеми має бути сумою генерації ентропії в кожній частині, щоб відповідати теоремі Гуї-Стодола. Тому екологічний показник для будь-якого типу екосистем можна визначити як функцію відношення загальної генерації ентропії для еталонного стану. Результати показують, що якщо кількість генерації ентропії невелика, стійкість екосистеми буде більшою.

У дослідженнях [22–24] автор представив нові поняття та інструменти для формалізації та розуміння ролі термодинаміки в теорії екосистем. Особлива увага приділяється цільовим функціям, зв'язку матерії, енергії, простору і часу та міждисциплінарному підходу, що з'єднує термодинаміку та біологію. Ентропія розглядається як фундаментальна цільова функція в рамках, далеких від рівноваги. У світлі ролі інформації наголошується та обговорюється взаємозв'язок між ентропією, як функцією нестану, та енергією функції стану. Теорія ймовірності також обговорюється в світлі нових теоретичних відкриттів, пов'язаних з

роллю подій, також з точки зору ентропії та еволюційної термодинаміки. Обмежені онтичні відкриті системи представляють останню модель, запропоновану професором Тієцці на основі його теорії екодинаміки, еволюційної термодинаміки та онтики Улановича. Модель має широкий спектр застосувань, включаючи екосистеми, екологічну економіку, міську організацію, надмолекулярну структуру води та моделі глобальної біосфери. Модель пояснюється з точки зору еволюційної термодинаміки та теорії екосистем Йоргенсена.

Метою даної роботи є дослідження з термодинамічних позицій властивостей екологічних систем різних типів при впливі антропогенного фактора.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Розглянемо термодинамічні властивості екосистем. У роботі [25] чітко проведено розділову лінію між живою і неживою системами. Слід зазначити, що саме формулювання питання такого роду аналізу екологічних проблем стало можливим тільки завдяки широким аналогіям термодинаміки і теорії інформації, які були проілюстровані в роботі [16].

Основною властивістю, яка відрізняє живі організми від неживих систем, є наявність в них негативної ентропії.

Фізичне значення станів з негативною ентропією, названих на відміну від брілюєнівської негентропії, яка є лише негативним приростом позитивної ентропії ( $-\Delta S$ ), антиентропії, детально розглядалося в роботах Л. Брілюєна. Виходячи з формули Больцмана

$$S = k \ln W,$$

де  $k$  – константа Больцмана, а  $W$  – термодинамічна ймовірність, автор інтерпретував системи з антиентропією як такі, що мають термодинамічну ймовірність  $< 1$ . Прикладами систем такого роду є частково або повністю не алгоритмічні системи, причому відношення не алгоритмічних операцій при побудові або відтворенні цієї системи до алгоритмічних буде тим більшим, чим більше значення антиентропії. Система має антиентропію, коли для неї немає повної процедури відтворення (коли вона неергідна). Постулат про повну відтворюваність макростану з певної кількості мікростанів і процедур в цілому був розроблений в ергодичній гіпотезі в припущенні періодичної самовільної повторюваності молекулярних станів у часі. Для поширення методу комплексів або мікростанів на область негативно-ентропійних явищ необхідно узагальнити поняття термодинамічної ймовірності в двох аспектах: по-перше, розуміти її як число будь-яких процедур, які її реалізують цей макростан, тільки в окремому випадку спів-

падаючих з молекулярними комплексами, а, по-друге – зняти постулат  $W \geq 1$ . Таким чином, оскільки принцип Пастера-Вирова «клітина з клітини» насправді є твердженням про те, що повної процедури її розмноження з фізико-хімічного молекулярного матеріалу не існує, жива система не може виникнути та існувати без негативної ентропії.

Розглядаючи поняття антиентропії, необхідно позначити ознаки, за якими можна відрізнити систему, що характеризується антиентропією, від системи з позитивною ентропією. Однією з головних таких ознак є ентропійна буферність, тобто система, яка має антиентропію при впливі дезорганізуючого, ентропійно-підсилюючого фактора, до якоїсь межі чинить йому опір, не змінюючись адекватно йому. І саме ця властивість є головною відмінною рисою живих систем. Усе це вказує на антиентропійність живих організмів, тобто тих об'єктів, з яких складаються екологічні системи.

У зв'язку з цим можна врахувати антиентропію в термодинамічному аналізі екосистем як фундаментальну характеристику живих організмів.

Отже, для нерівноважних систем ми маємо

$$\sum_i S_i > S_{\text{сист}}$$

де  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – компоненти системи;

$S_i$  – ентропія  $i$ -го компонента,

$S_{\text{сист}}$  – ентропія системи.

Введемо поняття організації системи ( $R_{\text{сист}}$ ), визначивши її наступним чином:

$$R_{\text{сист}} = \sum_j S_j - S_{\text{сист}} \quad (1)$$

Як видно з виразу (1), якщо ентропія системи дорівнює сумі ентропій її складових елементів, у системі відсутня організація ( $R_{\text{сист}} = 0$ ).

Тепер, виходячи з доповнення ентропії, подамо  $S_{\text{сист}}$  у вигляді наступної суми

$$S_{\text{сист}} = \sum_j S_j + \sum_j \Delta S_j \quad (2)$$

де  $j = 1, 2, 3, \dots, n$  – внутрішні зв'язки системи.

У виразі (2) ентропія  $j$ -го зв'язку позначається  $\Delta S_j$ , а не  $S_j$ , оскільки, на відміну від компонентів зв'язки самі по собі (тобто поза системою) існувати не можуть і не мають ніякої ентропії, в той час як виникаючи у системі вони дають  $S_{\text{сист}}$  той чи інший приріст (зазвичай негативний)  $\Delta S$ . Підставивши тепер (2) в (1), ми отримуємо:

$$R_{\text{сист}} = - \sum_j \Delta S_j \quad (3)$$

Таким чином, для того, щоб у нерівноважній системі була організація, її зв'язки повинні бути негентропійними. Оскільки очевидно, що внутрішні зв'язки системи жодним чином не можуть служити джерелом вільної енергії, так як вони взагалі не здатні змінити загальну енергію системи, в цьому випадку негентропія втрачає прита-

манну їй дуальність і стає чисто інформаційною. Отже

$$\begin{aligned} -\Delta S_j &= \Delta I_j, \\ \text{де } I &\text{ – інформація, а } - \\ &-\sum_j \Delta S_j = \sum_j \Delta I_j; \\ R_{\text{сист}} > 0 &\text{ при } \sum_j \Delta I_j > 0 \end{aligned}$$

Звідси випливає, що система наділена організацією в тому і тільки в тому випадку, якщо її внутрішні зв'язки збільшують обсяг інформації системи, а її організація дорівнює

$$R_{\text{сист}} = \sum_j \Delta I_j \quad (4)$$

Нехай тепер система отримала ззовні порцію ентропії  $\Delta S \gg 0$ . Тоді нова ентропія системи дорівнює

$$S'_{\text{сист}} = S_{\text{сист}} + \Delta S$$

Але в той же час,

$$S'_{\text{сист}} = (\sum_i S_i)' + (\sum_j \Delta S_j)', \quad (5)$$

причому  $(\sum_i S_i)' = \sum_i S_i + \Delta S^*$

де  $\Delta S^*$  – частина  $\Delta S$ , поглинена компонентами системи,

$$(\sum_j \Delta S_j)' = \sum_j \Delta S_j + \Delta(S - S^*).$$

Можливі два граничні випадки.

По-перше,

$$\Delta S^* = \Delta S$$

а значить,

$$\Delta(S - S^*) = 0$$

та

$$(\sum_j \Delta S_j)' = \sum_j \Delta S_j \quad (6)$$

Звідси, враховуючи (3),

$$R'_{\text{сист}} = - \sum_j \Delta S_j = R_{\text{сист}}$$

Отже, організація системи не змінилася.

По-друге,

$$\Delta S^* = 0$$

а значить

$$(\sum_i S_i)' = \sum_i S_i.$$

Тоді

$$R'_{\text{сист}} = - \sum_j \Delta S_j - \Delta S$$

а

$$R'_{\text{сист}} - R_{\text{сист}} = -\Delta S. \quad (7)$$

Як видно із виразу (7), при  $\Delta S > 0$  організація системи зменшиться, а при  $\Delta S < 0$  – зросте.

Обидва розглянуті вище випадки 1 і 2, є граничними, але неважко помітити, що при  $|\Delta S| > |\Delta S^*| > 0$  організація системи зазнає тих же змін, які в другому випадку тільки в меншій мірі. Разом з тим всяка реальна система постійно отримує із зовнішнього по відношенню до неї середовища порції ентропії  $\Delta S$  того чи іншого знаку. Тому,

якщо ми визначимо стабільність параметра системи як міру його зміни в часі, то стабільність такого параметра, як організація системи ( $C_R$ ), ми можемо визначити наступним чином:

$$C_R = \frac{\Delta S^*}{\Delta S}, \quad (8)$$

при цьому  $1 \geq C_R \geq 0$ .

Стабільність організації є деяка функція від  $\Delta S$

$$C_R = F(\Delta S).$$

Якщо ця функція симетрична відносно осі ординат, тобто

$$C_R(\Delta S) = C_R(-\Delta S), \quad (A)$$

причому

$$\left| \int_{t_1}^{t_2} (\Delta S^{(+)}) dt \right| = \left| \int_{t_1}^{t_2} (\Delta S^{(-)}) dt \right|, \quad (9)$$

або, що те ж саме, в даному інтервалі часу ( $t_2 - t_1$ ) позитивні і негативні порції ентропії надходять із зовнішнього середовища в систему відповідно із рівною ймовірністю, то

$$\frac{dR}{dt} = 0.$$

Цей випадок відповідає сталості організації в часі і зворотності усіх флуктуацій в системі при виконанні умови (9) і для величин  $\Delta S$ , які не наближаються до деякого критичного значення  $\Delta S_{кр}$ , що загрожує існуванню самої системи.

Якщо при тих же допущеннях

$$C_R(\Delta S) < C_R(-\Delta S), \quad (B)$$

для усього інтервалу  $|\Delta S_{кр}| > |\Delta S| \geq 0$ , (Б)

то

$$\frac{dR}{dt} < 0.$$

Випадок Б відповідає нестійкості системи за даних умов, вираженої в тому, що її організація незворотно деградує.

І, нарешті, якщо при тих же припущеннях

$$C_R(\Delta S) > C_R(-\Delta S), \quad (B)$$

то

$$\frac{dR}{dt} > 0.$$

тобто система незворотно самоорганізується, причому величину самоорганізації системи ( $Q_{суст}$ ) можна визначити як

$$Q = \frac{dR}{dt}. \quad (10)$$

Як зазначалося вище, усі випадки розглядалися при припущенні дотримання умови (9). В яких ситуаціях воно виконується? По суті, умова (9) – це твердження про те, що зовнішнє середовище впродовж інтервалу часу ( $t_2 - t_1$ ) не вилучає ентропію з системи, підвищуючи її впорядкова-

ність, і не «закачує» її в систему в тому сенсі, що хоча ентропія системи може, звичайно, рости відповідно до другого закону термодинаміки, але не за рахунок зниження ентропії середовища. Протиріччя ж умови (9) із відомим твердженням Шредінгера, про те, що живі організми живляться негативною ентропією (тобто має місце потік ентропії від організму до середовища) не є очевидним. Адже тут ми маємо справу не з характером впливу середовища, а зі здатністю самих організмів вилучати негентропію із навколишнього середовища, здатністю, механізм якої, обумовлений антиентропійним властивостям живих систем, буде показано нижче.

Розглянемо тепер поведінку функції  $C_R(\Delta S)$  в системах різних типів.

**Закриті системи з позитивною ентропією компонентів.**

Для таких систем

$$\sum_i S_i > 0.$$

Система замкнута в тому сенсі, що вона може обмінюватися з зовнішнім середовищем тільки енергією, але не речовиною.

$$C_R(\Delta S) \leq C_R(-\Delta S),$$

Таким чином реалізується випадок Б:

$$\frac{dR}{dt} < 0 \quad \text{і} \quad Q < 0,$$

тобто організація в такого роду системах деградує. Звичайно, останнє твердження вірне тільки в тому випадку, якщо виконується умова (9). Якщо ж ми маємо у зовнішньому середовищі над системний управляючий центр, що вводить в систему негентропію в обсязі, більшому, ніж ентропія, що надходить із середовища, то організація такої системи може залишатися на одному рівні або навіть зростати. Така ситуація реалізується в будь-якому механізмі або автоматі, контрольованому або запрограмованому людиною.

Отже, за відсутності зовнішнього контролю замкнуті системи з позитивною ентропією підтримувати організації, а тим більше самоорганізуватися, не здатні.

**Відкриті системи з позитивною ентропією компонентів.**

Для таких систем, які знаходяться в стаціонарному стані, виконується Принцип І. Пригожина [26], відповідно до якого приріст ентропії всередині системи за одиницю часу є постійним і мінімальним для цих умов, але за рахунок рівного притоку негентропії ззовні

$$S_{суст} = \text{const} \quad (11)$$

З іншого боку, можливий приплив негентропії в систему пов'язаний прямою залежністю з її організацією, оскільки при  $S_i > 0$  компоненти

системи самі по собі не здатні вилучати негентропію з середовища, і, отже, це властивість зв'язків системи, причому, чим більша їх негентропійність (чим вище організація системи), тим більший можливий приплив негентропії із середовища.

Якщо організація системи настільки мала, що забезпечуваний нею можливий приплив негентропії нижче мінімального для даних умов приросту ентропії у системі на одиницю часу, тобто умова (11) не має місця, стаціонарний стан в такій системі недосяжний, вона нестійка і приречена на загибель. Якщо ж організація системи достатня для виконання умови (11), система приходиться в стаціонарний стан, у якому швидкість приросту ентропії в системі, а значить і необхідний приплив негентропії ззовні, будуть постійні і мінімальні. Причому такий стаціонарний стан за І.Пригожиным [26] має стійкість у тому сенсі, що, якщо система буде виведена з нього в результаті якогось зовнішнього збурення, що не перевищує певного порогу (меж стійкості), вона буде прагнути повернутися в стаціонарний стан, мінімізуючи швидкість виробництва ентропії в системі, в результаті чого необхідний приплив негентропії буде зведений до мінімуму, тобто вимоги до величини організації системи будуть знижені.

З усього вищесказаного випливає, що у відкритих системах з позитивною ентропією компонентів відсутні внутрішньосистемні фактори, що забезпечують збільшення організації системи, тобто самоорганізацію. З іншого боку, зниження рівня організації в стаціонарному стані з часом неминуче призведе до зниження можливого припливу негентропії нижче необхідного (рівного швидкості виробництва ентропії всередині системи), що неминуче спричинить незворотний вихід зі стаціонарного стану, з подальшим колапсом системи.

Отже, в стаціонарному стані при дотриманні умови (9)

$$R_{суст} = \text{const}, \quad (12)$$

тобто реалізується випадок А, а значить

$$Q_{суст} = 0.$$

Якщо система виведена зі стаціонарного стану і умови (11) і (12) не виконуються, вона буде еволюціонувати в бік мінімізації швидкості виробництва ентропії [26], а внаслідок цього і зменшення необхідної організації, що несумісно з

$$Q_{суст} > 0.$$

Таким чином, системи з позитивною ентропією компонентів не здатні до самоорганізації, звичайно ж, при виконанні умов (9).

### Системи з негативною ентропією компонентів (антиентропійні системи).

Для систем такого роду

$$\sum_i S_i < 0.$$

При цьому для позитивних порцій ентропії, що надходять із зовнішнього середовища  $\Delta S > 0$

$$\Delta S^* = \Delta S, \quad (13)$$

оскільки за [16] антиентропія здатна ізотермічно поглинати позитивну ентропію без витрати роботи, тобто являє собою свого роду ентропійний вакуум. В той же час при надходженні із зовнішнього середовища порції негентропії  $\Delta S < 0$  рівність (13) не буде мати місця, так як зв'язки системи, що вже підкреслювалося вище, вилучають ентропію із середовища. Отже, в даному випадку,

$$|\Delta S^*| < |\Delta S| \quad \text{і} \quad |\Delta S - \Delta S^*| > 0.$$

Таким чином

$$|\Delta S^*| > |\Delta S^*|$$

$$\text{при } \Delta S > 0, \quad \text{при } \Delta S < 0,$$

що означає

$$C_R(\Delta S) > C_R(-\Delta S),$$

тобто реалізується випадок В, в якому

$$Q_{суст} > 0. \quad (14)$$

Тут слід зазначити, що при розгляді антиентропійних систем ми істотно не обумовили, чи вивчаємо ми відкриті чи закриті системи, а значить, отримані висновки дійсні для будь-яких антиентропійних систем (живий організм), екосистема, біосфера, людське суспільство і т.д.). Нагадаємо ще раз, що нерівність (14) справедлива тільки при дотриманні умови (9), і розглянемо в зв'язку з цим клімактичний стан в екосистемах.

Кожна реальна екосистема в тій чи іншій мірі сукцесіонує, і стан клімаксу, як вважає Маргалєф [27] є, по суті, ідеальний і ніколи повністю не реалізується. Разом з тим, поняття клімаксу екосистеми виявилось досить продуктивним для екології, оскільки будь яка сукцесія має своєю метою за можливістю більше наближення до клімаксу.

Сталість (хоча часто періодична) зовнішніх умов при ідеальному клімаксі відповідає відсутності надходження інформації в систему ззовні. Значить

$$\Delta I^* = -\Delta S = 0, \quad (15)$$

Звідси  $\Delta S > 0$  завжди, і, отже, для екосистеми як антиентропійної системи  $\Delta S^* = \Delta S$

$$\text{і} \quad C_R = \frac{\Delta S^*}{\Delta S} \equiv 1,$$

звідки випливає, що

$$R_{сист} = \text{const}, \quad \frac{dR}{dt} = 0 \quad \text{і} \quad Q_{сист} = 0. \quad (16)$$

Зауважимо, однак, що це не випадок А оскільки

$$C_R(\Delta S) = C_R(-\Delta S),$$

Хоча порівнюючи вираз (12) для стаціонарного стану і вираз (16) для ідеального клімаксу, ми переконуємося в їх ідентичності, подібність в даному випадку чисто зовнішня. Адже насправді вираз (16) для екосистеми ми отримали, замінивши умову (9) умовою (15). Досить порушити умову (15) і екосистема почне самоорганізовуватися.

$$\frac{dR_{\text{сист}}}{dt} > 0.$$

Вираз же (12) для стаціонарного стану звичайних відкритих систем отримано при істотному дотриманні умови (9) і за умови (15) зовсім не має місця. А крім того, як ми бачили вище, звичайні відкриті системи до самоорганізації не здатні і, будучи виведеними із стаціонарного стану, розвиваються у напрямку зменшення необхідної організації.

Отже, вираз (16), за умови (15), може мати місце тільки для антиентропійних систем.

Перейдемо тепер до розгляду характеру стійкості замкнених і відкритих систем з позитивною і негативною ентропією компонентів. Під стійкістю ( $V$ ) ми будемо розуміти діапазон змін ключового параметра системи під дією зовнішніх збурень, в рамках якого система зберігає свої відмінні властивості.

#### **Закриті системи з позитивною ентропією компонентів.**

Такі системи, будучи нерівноважними (рівноважні системи, як було зазначено на початку, ми не розглядаємо), за другим законом термодинаміки нестійкі і для них

$$V_{\text{сист}} < 0,$$

при цьому стійкість в даному випадку пов'язана з ентропією системи наступним співвідношенням:

$$V_{\text{сист}} = S - S_{\text{max}}.$$

де  $S$  – фактична ентропія системи, а  $S_{\text{max}}$  – максимальна ентропія системи при термодинамічній рівновазі.

Але з (2) і (3) випливає, що

$$V_{\text{сист}} = \sum_i S_i - R_{\text{сист}} - S_{\text{max}} \quad (17)$$

Якщо зараз приймемо, що

$$\sum_i S_i = \text{const}$$

і врахуємо, що

$$\frac{dS_{\text{max}}}{dt},$$

то, диференціюючи (17) за часом, отрима-

ємо:

$$\frac{dV_{\text{сист}}}{dt} = - \frac{dR_{\text{сист}}}{dt}. \quad (18)$$

З виразу (18) випливає, що з ростом організації стабільність закритих систем з позитивною ентропією компонентів буде знижуватися.

#### **Відкриті системи з позитивною ентропією компонентів.**

Стабільність для таких систем в рамках прийнятого нами вище загального визначення можна охарактеризувати наступним чином. Ми вносимо в систему однократне разове дезорганізуюче збурення

$$\Delta S > 0.$$

При цьому, якщо  $\Delta S > \Delta S_{\text{кр}}$ , система повертається до стаціонарного стану. Для  $\Delta S = 0$   $\left(\frac{dS}{dt}\right)_0$  в системі за принципом І.Пригожина [26] мінімальна. В той же час для  $\Delta S = \Delta S_{\text{кр}}$   $\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{кр}}$  за даних умов максимальна.

Звідси визначимо стійкість системи

$$V_{\text{сист}} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{кр}} - \frac{dS}{dt} \quad (19)$$

де  $\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{кр}}$  – швидкість приросту ентропії в системі за критичного зовнішнього впливу

$$\Delta S = \Delta S_{\text{кр}}.$$

а  $\frac{dS}{dt}$  – фактична швидкість приросту ентропії у системі.

Звідси за стаціонарного стану, коли

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_0 = \text{min},$$

$V_{\text{сист}} = \text{max}.$

Крім того, для усього діапазону

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_0 \leq \frac{dS}{dt} \leq \left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{кр}}$$

Якщо ми тепер продиференціюємо рівняння (19) за часом, враховуючи, що

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{кр}} = \text{const},$$

то отримаємо

$$\frac{dV_{\text{сист}}}{dt} = - \frac{d^2S}{dt^2}. \quad (20)$$

З рівності (20) випливає, що стабільність відкритих систем з позитивною ентропією росте зі зниженням швидкості приросту в них ентропії, а отже, як згадувалося вище, зі зменшенням припливу негентропії ззовні і, отже, зі зменшенням необхідної організації системи. Таким чином, для збільшення стійкості систем, що розглядаються,

зовсім не вимагається збільшення їх організації, але в той же час зміна організаційності в той чи інший бік безпосередньо не впливає на стабільність,

#### Антиентропійні закриті системи.

Стійкість для таких систем, як і в попередньому випадку, визначається через  $\Delta S_{кр}$ , причому під останнім будемо розуміти таке дезорганізуюче збурення, яке повністю знищує анти ентропію системи, тобто при

$$\Delta S = \Delta S_{кр}, S_{сист.} = 0.$$

а потім

$$\frac{dS}{dt} > 0,$$

і система переходить в область позитивної ентропії, гублячи свої відмінні властивості.

Звідси

$$\begin{aligned} V_{сист} &= \Delta S_{кр} \\ \Delta S_{кр} &= A_{сист}, \end{aligned} \quad (21)$$

де  $A_{сист}$  – антиентропія системи.

Але, враховуючи (2), (3) і (21),

$$A_{сист} = \sum_i A_i + R_{сист}$$

де  $\sum_i A_i = -\sum_i S_i$  – антиентропія компонентів, звідки

$$V_{сист} = A_{сист} = \sum_i A_i + R_{сист} \quad (22)$$

Поклавши тепер

$$\sum A_i = \text{const}$$

і диференціюючи (22) за часом, отримуємо

$$\frac{dV_{сист}}{dt} = \frac{dR_{сист}}{dt}. \quad (23)$$

З рівності (23) випливає, що для закритих антиентропійних систем підвищення стійкості вимагає збільшення організації, при чому зі збільшенням останньої в міру з необхідністю зростає стійкість.

#### Антиентропійні відкриті системи.

Для такого роду систем визначимо стабільність: знову ж таки з рівняння (19), підставивши в нього замість позитивної ентропії – антиентропію:

$$V_{сист} = -\left(\frac{dA}{dt}\right)_{кр} + \frac{dA}{dt}, \quad (24)$$

для таких систем визначається стійкість наступним чином: стійкі у даних умовах ті системи, які ростуть і розмножуються, тобто перетворюють в даний вид стану нові кількості матерії, енергії і психіки. З такого визначення випливає, що стійкість пропорційна швидкості приросту антиентропії, при чому при

$$\frac{dA}{dt} = 0, \quad V_{сист} = 0 \quad (26)$$

Оскільки умови (25) відповідають критич-

ним, природно припустити в рівнянні (24)

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_{кр} = 0.$$

Тоді

$$V_{сист} = \frac{dA_{сист}}{dt}$$

Цікаво відзначити, що вираз (26) фактично є прямим наслідком принципу стійкості нерівності Бауера, а з іншого боку, цей же вираз є розширенням принципу І. Пригожина на область негативної ентропії.

Однак повернемося до виразу (26). Оскільки

$$\begin{aligned} A_{сист} &= \sum_i A_i + R_{сист} \\ V &= \frac{d(\sum_i A_i)}{dt} + \frac{dR_{сист}}{dt}, \end{aligned}$$

і припустивши

$$\frac{d(\sum_i A_i)}{dt} = 0,$$

а потім диференціюючи за часом, отримуємо

$$\frac{dV_{сист}}{dt} = \frac{d^2 R_{сист}}{dt^2}$$

або

$$\frac{dV_{сист}}{dt} = \frac{dQ_{сист}}{dt} \quad (27)$$

З виразу (27) випливає, що для відкритих антиентропійних систем стійкість збільшується тоді і тільки тоді, коли збільшується їх самоорганізація.

Таким чином, якщо ми порівнюємо вирази (18), (20), (23) і (27), то побачимо, що в той час як для систем з позитивною ентропією компонентів збільшення організації призводить до зниження стабільності (18) або, принаймні, не має прямого впливу на останню (20), для антиентропійних систем збільшення організації є, хоча необхідною умовою для підвищення стійкості (23), але недостатньою, оскільки у відкритих антиентропійних системах для збільшення стійкості необхідно збільшення самоорганізації (27). Приклади відкритих антиентропійних систем включають живу клітину, організм або популяцію. Закритими антиентропійними системами є екосистеми, біосфера, біосфера+людське суспільство. Звичайно, немає повністю закритих систем в тому сенсі, що постійно відбувається обмін матерією з навколишніми системами. Ми, однак, будемо розуміти під закритими системами такі, в яких цей обмін необхідний для функціонування системи, в той час як відкриті системи без такого обміну існувати не можуть.

Отже, умовою збереження стійкості відкритих антиентропійних систем (клітин, організмів, популяцій) є постійність їх самоорганізації. Як тільки самоорганізація падає до нуля, система втрачає стійкість і подальше за цим падіння організації призводить до смерті, тобто розпаду сис-



тем. Клітини і організми прагнуть уникнути цього неминучого (через обмеження доступних запасів матерії у зовнішньому середовищі) процесу за допомогою розмноження. Популяції, будучи стійкими на стадії сукцесії, при досягненні клімаксу в екосистемі стійкість втрачають ( $Q_{\text{попул}} = 0$ ), і таким чином екосистема в клімаксі є стійкою системою, що складається з нестійких елементів. Стійкість же екосистеми, як і будь-якої іншої закритої антиентропійної системи, пропорційна її організації ( $\sum A_i = \text{const}$ ) і може мати скільки завгодно велику вагу при  $Q_{\text{екосист}} = 0$ . Отже, якщо ми хочемо знати стійкість екосистеми до зовнішніх збурень, нам потрібно визначити її організацію.

Як визначено в рівнянні (4)

$$R_{\text{сист}} = \sum_j \Delta I_j.$$

Якщо записати це ж рівняння в такому вигляді:

$$R_{\text{сист}} = \frac{\sum_j \Delta I_j}{N} N,$$

де  $N$  – кількість зв'язків системи, або шляхом введення

$$\phi = \frac{\sum_j \Delta I_j}{N},$$

Отримаємо

$$R_{\text{сист}} = \phi N. \quad (28)$$

Тоді  $\phi$  являє середню силу зв'язків в системі.

Тепер нормуємо всі величини в рівнянні (28). Нормалізоване значення сили зв'язування між  $i$ -тим і  $i+\xi$ -тим компонентами системи можна визначити як середній модуль коефіцієнтів кореляції ( $r$ ) між незалежними параметрами компонентів. Причому із статистики відомо, що

$$r = \frac{\sum_1^k \left| \frac{\sum_1^{v+1} x_i x_{i+\xi}}{v} \right|}{k}$$

де  $k$  – число параметрів,

$x$  – нормовані відхилення,

$v$  – число порівнюються пар без однієї.

На практиці ми вимірюємо  $k$ -й параметр відразу для великого числа компонентів (наприклад, для всіх популяцій фітопланктону) і тим самим усереднюємо його за цими компонентами. Тому, оскільки нормоване значення  $\phi$ , визначене наступним чином

$$\phi^{\text{норм}} = |\bar{r}| = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} \sum_{\xi \neq 0}^n \frac{\sum_1^k \left| \frac{\sum_1^{v+1} x_i x_{i+\xi}}{v} \right|}{k}}{C_n^2},$$

де  $n_2$  – число компонентів,  $C_n^2$  – максимальна кількість зв'язків, дорівнює кількості комбінацій  $n$  елементів по 2, еквівалентна тій, що визначається

за допомогою кореляцій між параметрами  $\phi$ -тим і  $\phi+\xi$ -тими параметрами усієї системи

$$\phi^{\text{норм}} = |\bar{r}| = \frac{\sum_{\phi=1}^n \sum_{\xi \neq 0}^n \left| \frac{\sum_1^{v+1} x_{\phi} x_{\phi+\xi}}{v} \right|}{C_m^2},$$

де  $m$  – кількість вимірюваних параметрів системи, для практичних розрахунків зручніше використовувати рівняння (29). Звичайно, нормалізоване значення  $\phi$ , отримане з (29), є наближеним, але воно прямує до істинного значення  $\phi$  при  $m \rightarrow \infty$ . Тому в кожному конкретному випадку корисно визначити хід залежності  $\phi$  від  $m$ , щоб оцінити можливу похибку, а також визначити мінімальну кількість параметрів  $m$ , що надає величини для  $\phi$ , які не виходять за межі зазначеного поля похибки.

Тепер, щоб перейти від нормованої середньої сили зв'язку до нормованої організації, потрібно ввести ще один коефіцієнт.

$$\sigma = \frac{R_{\text{сист}}^{\text{норм}}}{\phi^{\text{норм}}}.$$

Оскільки при постійній середній силі зв'язку збільшення цього коефіцієнта збільшує організацію системи, а його зниження призводить до падіння організації, значення цього коефіцієнта, як здається, збігається з інтуїтивним уявленням про складність системи. Оскільки на сьогодні не існує загальноприйнятого визначення складності системи, в майбутньому під складністю будемо розуміти саме коефіцієнт  $\sigma$ , який, як ми побачимо нижче, можна досить просто виразити через число зв'язків і компонентів системи.

Отже

$$R_{\text{сист}}^{\text{норм}} = \sigma \cdot \phi^{\text{норм}}, \quad (30)$$

і, оскільки ми знаємо нормалізовану середню силу зв'язку із (29), для отримання величини організації нам залишається тільки визначити складність системи. Знайдемо вираз для складності із умов нормування організації системи:

- а)  $R_{\text{мин}} = 0$  (для будь-якого  $\phi^{\text{норм}}$ )  
при  $n = 0$   
або тільки  $N = 0$
- б)  $R_{\text{макс}} = 1$  (для будь-якого  $\phi^{\text{норм}}=1$ )  
при  $N = N_{\text{макс}} = \frac{n(n-1)}{2}$   
 $n = \infty$ .

З умови (а) і формули (30) випливає, що складність повинна бути нульовою при рівності нулю числа компонентів чи тільки зв'язків, а із умови (б) і формули (30) – що складність повинна дорівнювати одиниці при нескінченному числі компонентів та максимальному числу зв'язків між ними. В усіх проміжних випадках

$$0 < \sigma_{\text{сист}} < 1.$$

Якщо тепер ми можемо визначити складність системи, як

$$\sigma_{\text{сист}} = \frac{2N}{n(n-1)}(1 - e^{-n}), \quad (31)$$

то легко бачити, що вираз (31) задовольняє усім поставленим умовам. Із (31) видно, що якщо

$$N = 0,$$

то

$$\sigma_{\text{сист}} = 0.$$

Однак цей випадок ніколи не реалізується в реальності, оскільки в реальних системах кількість зв'язків ( $N$ ) має мінімальне значення, рівне  $n - 1$ , оскільки при

$$N < n - 1$$

система фактично складається з менш ніж  $n$  компонентів. Таким чином, для заданої кількості компонентів складність системи має мінімальне значення, при

$$N = n - 1$$

Дорівнює

$$\sigma_{\text{сист}} = \frac{2}{n}(1 - e^{-n}). \quad (32)$$

З іншого боку, з (31) видно, що складність системи зростає зі збільшенням числа компонентів у тому випадку, якщо нові компоненти утворюють зі старими компонентами і між собою нові зв'язки в таких кількостях, що відносна насиченість зв'язками принаймні зберігається.

Отже

$$R_{\text{сист}}^{\text{норм}} = \frac{2|\bar{r}|N}{n(n-1)}(1 - e^{-n}),$$

де  $|\bar{r}|$  визначається із (29).

Однак, знання організації системи, хоча і необхідне, але недостатнє для визначення її стійкості. Остання для екосистем як закритих антиентропійних систем відповідно до (22) дорівнює

$$V_{\text{сист}} = \sum_i A_i + R_{\text{сист}}.$$

Організація відома з (32). Залишилося визначити антиентропію компонентів. Подамо її в наступній формі:

$$\sum_i A_i = \alpha \cdot B.$$

де  $\alpha$  – середня питома антиентропія компонентів, а  $B$  – загальна біомаса.

Тоді

$$V_{\text{сист}} = \alpha \cdot B + R_{\text{сист}} \quad (33)$$

і оскільки в (32) організація у нас нормована, аналогічно нормуємо і першу складову термін в (33), отримуючи

$$(\sum_i A_i)^{\text{норм}} = 1 - e^{-\alpha B}.$$

Тоді нормоване значення стійкості для екосистеми можна визначити наступним чином:

$$V_{\text{сист}}^{\text{норм}} = \frac{1 - e^{-\alpha B + \frac{2|\bar{r}|N}{n(n-1)} - \frac{2|\bar{r}|N}{n(n-1)}e^{-n}}}{2}. \quad (34)$$

При цьому стійкість може варіюватися в діапазоні від нуля до одиниці.

У правій частині рівності (34) зміні чи розрахунку піддаються усі змінні, за винятком середньої питомої антиентропії  $\alpha$ . Вимірювання цієї останньої величини є досить складним завданням, яке донині повністю не вирішене. Проблема, однак, сильно спрощується, якщо прийняти, що будь-яка екосистема, за умови, що вона близька до клімаксу, характеризується одним і тим же значенням середньої питомої антиентропії, яке можна прийняти рівним одиниці.

Такого роду припущення видається нам хоч і не безспірним, але, мабуть, таким, що не відводить нас далеко від істини, оскільки, з одного боку, при клімаксі всі компоненти екосистем перебувають у стані, близькому до оптимального, а з іншого боку, дані по вимірюванню  $\alpha$  за амплітудою деградаційного спалаху надслабкої біохемілюмінесценції показує, що для популяцій, що знаходяться в оптимальних умовах існування, цей параметр не має вираженої видової специфічності.

Отже, при прийнятому нами припущенні замість (34) отримуємо

$$V_{\text{сист}}^{\text{норм}} = \frac{1 - e^{-B + \frac{2|\bar{r}|N}{n(n-1)} - \frac{2|\bar{r}|N}{n(n-1)}e^{-n}}}{2}. \quad (35)$$

Формула (35) разом з формулою (29) дозволяють розраховувати стійкість будь-якої незбуреної екосистеми в стані, близькому до клімаксу, і тим самим порівнювати стійкості різних екосистем між собою. Однак, враховуючи деяку довільність прийнятого припущення ( $\alpha = 1$ ), таке порівняння буде тим строгішим, чим ближче порівнювані екосистеми за географічним положенням та видовим складом. Хоча формула (35) є, можливо, наближеною, вона допускає всебічну експериментальну перевірку, оскільки стійкість екосистем у ряді випадків можна оцінити незалежно, за результатами впливу антропогенного фактора. Під останнім тут і надалі розуміється, як і прийнято у літературі, присвяченій цьому питанню, не будь-який вплив людської цивілізації на природу, а лише дезорганізуючий. Втім, як правило, дія людини на природу зрештою зводиться саме до цього типу.

До цих пір ми розглядали лише незбурені, близькі до клімаксу екосистеми і показали, як можна оцінити стійкість таких систем до можливого подальшого дії антропогенного чинника. А як же бути з екосистемами збуреними, які вже зазнали

дії антропогенного фактора? До яких меж дія цього фактора (наприклад, надходження в екосистему забруднень) не є згубною для системи і, отже, з ним ще можна в якійсь мірі миритися? Який критерій може бути покладено в основу контролю за станом таких екосистем? Розглянемо це питання.

Для екосистем, як і для будь-яких закритих антиентропійних систем, при дезорганізуючих впливах, що не наближаються до критичних, справедлива рівність (13) і закономірності, що впливають з неї. З цього витікає, що першою реакцією екосистеми на дію антропогенного фактора буде падіння антиентропії компонентів ( $\alpha B$ ) при збереженні організації системи; екосистеми прагнуть підтримувати сталість своїх функціональних характеристик за допомогою зміни структурних параметрів [28].

### Висновки.

Отже, першим результатом впливу на екосистему антропогенного фактора буде зниження антиентропії компонентів (причому у добутку  $\alpha B$  можна очікувати не тільки, а можливо і не тільки, падіння тотальної біомаси, скільки зменшення питомої антиентропії). Однак надалі реакція екосистеми буде різною залежно від сили та тривалості збурюючого впливу. Тут можливі три основні варіанти.

При сильному і досить тривалому впливі антиентропія компонентів падає при збереженні організації екосистеми до тих пір, поки занадто низький рівень антиентропії компонентів не включає їх власні регуляторні реакції, спрямовані на стримування падіння антиентропії навіть на шкоду організації системи. Організація починає падати. Оскільки вплив досить сильний і він не припиняється, регуляторні механізми компонентів не в змозі стабілізувати антиентропію. Процес падіння антиентропії та організації триває, система необоротно йде до загибелі.

При середньому за силою, але тривалому впливі компонентам вдається за рахунок енергетичних резервів стабілізувати свою антиентропію на деякому не оптимальному, але допустимому рівні при збереженні організації. Однак, якщо вплив продовжується і не слабшає, компоненти, не будучи в змозі повернути свою антиентропію до початкового оптимального рівня, рано чи пізно не справляються з безперервним збуренням, та їх антиентропія знову починає падати, тепер вже разом з організацією.

І, нарешті, при слабкому чи нетривалому впливі компоненти, адаптуючись до нових умов, повертають антиентропію до оптимального рівня (при сильному або середньому за силою впливі це можливо лише після його припинення до незворотних змін в системі). При такому варіанті орга-

нізація системи залишається постійною, оскільки збурююча дія в цьому випадку не вивела екосистему за рамки ефективної роботи гомеостатичних механізмів.

Таким чином, із трьох перелічених вище випадків впливає, що критичним моментом при дії на екосистему антропогенного чинника є початок падіння її організації, коли гомеостаз повністю вичерпав себе у протидії збуренню, та екосистема починає незворотно деградувати. Отже, для контролю стану екосистеми, що піддається дії антропогенного фактора, достатньо стежити за організацією системи: якщо вона не зменшується, тобто

$$Q_{\text{сист}} \geq 0,$$

можна говорити про відносне благополуччя, якщо ж

$$Q_{\text{сист}} < 0,$$

тобто організація падає, екосистема йде до загибелі, і необхідно вживати заходів для її порятунку.

Однак періодичний і досить частий вимір організації екосистеми є задачею, хоча і такою, що не викликає принципових труднощів, але дуже трудомісткою, в першу чергу через знаходження середнього модуля коефіцієнтів кореляції параметрів. Водночас у добутку

$$\sigma_{\text{сист}} \cdot \varphi$$

рівному організації (30) і, безумовно, являючим собою функціональну характеристику екосистеми, лише другий співмножник ( $\varphi$ ) є суто функціональним, у той час як складність ( $\sigma_{\text{сист}}$ ), будучи функцією лише числа зв'язків і компонентів (31), можна у відомому сенсі розглядати і як структурну характеристику. Тоді при зміні організації в першу чергу повинна змінюватися складність екосистеми при збереженні середньої сили зв'язків. Але навіть якщо це й не матиме місця, то напевно чи можна очікувати зворотного явища: збереження складності при падінні організації. Тоді контроль за організацією екосистеми можна замінити контролем за її складністю в тому сенсі, що достатньо фіксувати зменшення складності, щоб говорити про критичний стан екосистеми. Визначення ж складності екосистеми за формулою (31) хоча і пов'язане з певними труднощами, пов'язаними з знаходженням числа зв'язків ( $N$ ), проте не вимагає трудомісткої математичної обробки і, очевидно, під силу будь-якому фахівцю-екологу.

Розглянуті критерії контролю за станом екосистем на відміну від методів визначення стійкості застосовні не тільки до екосистем, близьких до клімаксу, але і до таких на будь-якій стадії суцесії, оскільки суцесія в нормі (при дотримання

умови (9)) характеризується позитивним значенням самоорганізації, отже падіння самоорганізації нижче нуля, як і при клімаксі, служить показником критичного стану.

#### Список використаної літератури

1. *Forecasting with maximum entropy: The interface between physics, biology, economics and information theory*. *Forecasting with maximum entropy: The interface between physics, biology, economics and information theory* / H. Fort // 2022. – 221 с. DOI: <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3931-5>
2. Freitas J.N. Emergent second law for non-equilibrium steady states / J.N. Freitas, M. Esposito // *Nat Commun*, 2022. – №13 – С.5084. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32700-7>
3. Lucia U. Thermal Resonance and Cell Behavior / U. Lucia, G. Grisolia // *Entropy*, 2020. – №22(7) – С. 774 DOI: <https://doi.org/10.3390/e22070774>
4. Zhao Y. Economic measures for biodiversity conservation / Y. Zhao, H. Li // *Biodiversity Science*, 2022, – №30(11). DOI: <https://doi.org/10.17520/biods.2022177>
5. Niven R. K. Invariance properties of the entropy production, and the entropic pairing of inertial frames of reference by shear-flow systems / R. K. Niven // *Entropy*, 2021. – №23(11) – С. 1515. DOI: <https://doi.org/10.3390/e23111515>
6. Hao X. Making waves: A sea change in treating wastewater – why thermodynamics supports resource recovery and recycling / X. Hao, D. Wu, J. Li, R. Liu, M. van Loosdrecht // *Water Research*, 2022. – №218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118516>
7. Tilman D. Biodiversity and ecosystem functioning / D. Tilman, F. Isbell, J. M. Cowles // *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 2014. – №45 – С. 471–493. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>
8. Dunne J. A. Cascading extinctions and community collapse in model food webs / J. A. Dunne, R. J. Williams // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009. – №364(1524) – С.1711–1723. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0219>
9. Pandita S. Environmental variables vis-a-vis distribution of herbaceous tracheophytes on northern sub-slopes in western himalayan ecotone / S. Pandita, V. Kumar, H. C. Dutt // *Ecological Processes*, – 2019. – №8(1) DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0200-x>
10. Daly A. J. Ecological diversity: Measuring the unmeasurable / A. J. Daly, J. M. Baetens, B. de Baets // *Mathematics*, 2018. – №6(7) DOI: <https://doi.org/10.3390/math6070119>
11. Morris E. K. Choosing and using diversity indices: Insights for ecological applications from the german biodiversity exploratories / E. K. Morris, T. Caruso, F. Buscot, M. Fischer, C. Hancock, T.S. Maier, M.C. Rillig // *Ecology and Evolution*, 2014. – №4(18) – С. 3514–3524. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.1155>
12. Thukral A. K. New indices regarding the dominance and diversity of communities, derived from sample variance and standard deviation / A. K. Thukral, R. Bhardwaj, V. Kumar, A. Sharma // *Heliyon*, 2019. – №5(10) – С. e02606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02606>
13. Semeniuk V. A proposed revision of diversity measures / V. Semeniuk, I. D. Cresswell // *Diversity*, 2013. – №5(3) – С. 613–626; DOI: <https://doi.org/10.3390/d5030613>
14. Shannon C. E. A mathematical theory of communication / C. E. Shannon // *Bell System Technical Journal*, 1948. – №27(3) – С. 379–423. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
15. Simpson E. H. Measurement of diversity / E. H. Simpson // *Nature*, 1949. – №163(4148) – С. 688. DOI: <https://doi.org/10.1038/163688a0>
16. Brillouin L. The negentropy principle of information / L. Brillouin // *Journal of Applied Physics*, 1953. – №9(9) – С. 1152–1163. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1721463>
17. Berger W. H. Diversity of planktonic foraminifera in deep-sea sediments. / W.H. Berger, F.L. Parker // *Science*, 1970. – №168(3937) – С.1345–1347. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.168.3937.1345>
18. Kumar V. Extending the concept of entropy-negentropy for the assessment of ecological dominance and diversity at alpha, beta and gamma levels / V. Kumar, A.K. Thukral, A. Sharma, R. Bhardwaj // *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1923270>
19. Fitzhugh B. Human ecodynamics: A perspective for the study of long-term change in socioecological systems / B. Fitzhugh, V.L. Butler, K.M. Bovy, M.A. Etnier // *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2019. – №23 – С.1077–1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.03.016>
20. Normandin J. Resilience factors reconciled with complexity: The dynamics of order and disorder / J. Normandin, M. Therrien // *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 2016. – №24(2), С. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1111/1468-5973.12107>
21. Diaz-Mendez S. E. Entropy generation as an environmental impact indicator and a sample application to freshwater ecosystems eutrophication / S.E. Diaz-Mendez, J. M. T. Sierra-Grajeda, A. Hernandez-Guerrero, J. M. Rodriguez-Lelis // *Energy*, 2013. – №61, С.234–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.042>
22. Tiezzi E. Ecodynamics: Towards an evolutionary thermodynamics of ecosystems / E. Tiezzi // *Ecological Modelling*, 2011. – №222(16) – С.2897–2902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.014>
23. Tiezzi, E., Ceconi, G., & Marchettini, N. (2010). Confined ontic open systems. / Tiezzi, E., Ceconi, G., & Marchettini, N. // *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 5(1), 3–9. DOI: <https://doi.org/10.2495/DNE-V5-N1-3-9>
24. Tiezzi E. Is entropy far from equilibrium a state function? / E. Tiezzi // *International Journal of Ecodynamics*, 2006. – №1(1) – С.44–54. DOI: <https://doi.org/10.2495/ECO-V1-N1-44-54>
25. Mistriotis A. A universal model describing the structure and functions of living systems / Antonis Mistriotis // *Communicative & Integrative Biology*, 2021. – №14:1, С.27–36. DOI: <https://doi.org/10.1080/19420889.2021.1887549>
26. Malek-Mansour M. Nonequilibrium phase transitions in chemical systems / M. Malek-Mansour, G. Nicolis, I.

Prigogine // *Thermodynamics and kinetics of biological processes*, 2019. – 104 p. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110845914-008>

27. Margalef R. *Information and uncertainty in living systems, a view from ecology*. / R. Margalef // *BioSystems*, 1996. – №38(2-3) – С.141–146. DOI: [https://doi.org/10.1016/0303-2647\(95\)01584-1](https://doi.org/10.1016/0303-2647(95)01584-1)

28. Безсонний В. Л. Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку / В. Л. Безсонний, О. В. Третьяков, Л. Д. Пляцук, А. Н. Некос // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*, 2022. – Вип. 28. С.6–19. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01>

**Внесок авторів:** всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

## Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology

*Vitalii Bezsonnyi*<sup>1</sup>,

PhD (Technics), Associate Professor, Department of Environmental Safety and Environmental Education,  
<sup>1</sup>V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine;

*Oleg Tretiyakov*<sup>2</sup>,

DSc (Technics), Professor, Department of Civil and Industrial Safety,

<sup>2</sup>National Aviation University, 1 Liubomyra Huzara Av., Kyiv, 03058, Ukraine;

*Mykola Sherstyuk*<sup>3</sup>,

PhD Student of the Department of Ecology and  
Environmental Protection Technologies, <sup>3</sup>Sumy State University,  
2 Rymyskogo-Korsakova St., Sumy, 40007, Ukraine;

*Alla Nekos*<sup>1</sup>,

DSc (Geography), Professor, Head of the Department of  
Environmental Safety and Environmental Education

### ABSTRACT

**Purpose.** research from thermodynamic positions of the properties of ecological systems of various types under the influence of anthropogenic factors.

**Methods.** Analytical-synthetic method, analysis of information sources, entropy analysis.

**Results.** The effect of an anthropogenic factor on the ecosystem will result in a decrease in the antientropy of the components. The response of the ecosystem will be different depending on the strength and duration of the disturbance. With a strong and sufficiently long impact, the antientropy of the components falls while preserving the organization of the ecosystem until the too low level of the antientropy of the components does not include their own regulatory reactions aimed at restraining the fall of the antientropy even to the detriment of the organization of the system. The organization begins to fall. Since the influence is strong enough and does not stop, the regulatory mechanisms of the components are not able to stabilize the antientropy. The process of falling anti-entropy and organization continues, the system is irreversibly going to its demise. With an average strength, but long-term impact, the components manage to stabilize their antientropy at some sub-optimal, but acceptable level at the expense of energy reserves while preserving the organization. However, if the influence continues and does not weaken, the components, not being able to return their antientropy to the original optimal level, sooner or later cannot cope with the continuous perturbation, and their antientropy begins to fall again, now together with the organization. With a weak or short-term impact, the components, adapting to new conditions, return the antientropy to the optimal level (with a strong or medium impact, this is possible only after its termination before irreversible changes in the system). In this case, the organization of the system remains constant, since the disturbing action in this case did not lead the ecosystem beyond the effective operation of homeostatic mechanisms.

Thus, the critical moment when an anthropogenic factor acts on an ecosystem is the beginning of the fall of its organization, when homeostasis has completely exhausted itself in countering the disturbance, and the ecosystem begins to irreversibly degrade. So, to control the state of the ecosystem exposed to the anthropogenic factor, it is enough to monitor the organization of the system: if it does not decrease, we can talk about relative well-being, but if the organization falls, the ecosystem is on the verge of death, and it is necessary to take measures to save it.

However, the periodic and fairly frequent measurement of the organization of the ecosystem is a task, although one that does not cause fundamental difficulties, but is very time-consuming, primarily due to finding the average module of the correlation coefficients of the parameters.

Determining the complexity of the ecosystem according to the formula, although associated with certain difficulties associated with finding the number of connections, does not require time-consuming mathematical processing.

**Keywords:** *ecological system, thermodynamic approach, sustainability, system organization, entropy, anti-entropy.*

### Reference

1. Fort, H. (2022). *Forecasting with maximum entropy: The interface between physics, biology, economics and information theory. Forecasting with maximum entropy: The interface between physics, biology, economics and information theory (1-221)* DOI: <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3931-5>



2. Freitas, J.N., Esposito, M. Emergent second law for non-equilibrium steady states. *Nat Commun* 13, 5084 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32700-7>
3. Lucia, U.; Grisolia, G. (2020) Thermal Resonance and Cell Behavior. *Entropy*, 22(7), 774. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22070774>
4. Zhao, Y., & Li, H. (2022). Economic measures for biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 30(11) DOI: <https://doi.org/10.17520/biods.2022177>
5. Niven, R. K. (2021). Invariance properties of the entropy production, and the entropic pairing of inertial frames of reference by shear-flow systems. *Entropy*, 23(11), 1515; DOI: <https://doi.org/10.3390/e23111515>
6. Hao, X., Wu, D., Li, J., Liu, R., & van Loosdrecht, M. (2022). Making waves: A sea change in treating wastewater – why thermodynamics supports resource recovery and recycling. *Water Research*, 218 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118516>
7. Tilman, D., Isbell, F., & Cowles, J. M. (2014). Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 45, 471–493 DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>
8. Dunne, J. A., & Williams, R. J. (2009). Cascading extinctions and community collapse in model food webs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1524), 1711–1723. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0219>
9. Pandita, S., Kumar, V., & Dutt, H. C. (2019). Environmental variables vis-a-vis distribution of herbaceous tracheophytes on northern sub-slopes in western himalayan ecotone. *Ecological Processes*, 8(1) DOI: <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0200-x>
10. Daly, A. J., Baetens, J. M., & De Baets, B. (2018). Ecological diversity: Measuring the unmeasurable. *Mathematics*, 6(7) DOI: <https://doi.org/10.3390/math6070119>
11. Morris, E. K., Caruso, T., Buscot, F., Fischer, M., Hancock, C., Maier, T. S., . . . Rillig, M. C. (2014). Choosing and using diversity indices: Insights for ecological applications from the german biodiversity exploratories. *Ecology and Evolution*, 4(18), 3514–3524. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.1155>
12. Thukral, A. K., Bhardwaj, R., Kumar, V., & Sharma, A. (2019). New indices regarding the dominance and diversity of communities, derived from sample variance and standard deviation. *Heliyon*, 5(10), e02606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02606>
13. Semeniuk, V., & Cresswell, I. D. (2013). A proposed revision of diversity measures. *Diversity*, 5(3), 613–626; DOI: <https://doi.org/10.3390/d5030613>
14. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379–423. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
15. Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163(4148), 688. DOI: <https://doi.org/10.1038/163688a0>
16. Brillouin, L. (1953). The negentropy principle of information. *Journal of Applied Physics*, 9(9), 1152–1163. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1721463>
17. Berger, W. H., & Parker, F. L. (1970). Diversity of planktonic foraminifera in deep-sea sediments. *Science*, 168(3937), 1345–1347. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.168.3937.1345>
18. Kumar, V., Thukral, A. K., Sharma, A., & Bhardwaj, R. (2021). Extending the concept of entropy-negentropy for the assessment of ecological dominance and diversity at alpha, beta and gamma levels. *Geology, Ecology, and Landscapes*, DOI: <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1923270>
19. Fitzhugh, B., Butler, V. L., Bovy, K. M., & Etnier, M. A. (2019). Human ecodynamics: A perspective for the study of long-term change in socioecological systems. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 23, 1077–1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.03.016>
20. Normandin, J., & Therrien, M. (2016). Resilience factors reconciled with complexity: The dynamics of order and disorder. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 24(2), 107–118. DOI: <https://doi.org/10.1111/1468-5973.12107>
21. Diaz-Mendez, S. E., Sierra-Grajeda, J. M. T., Hernandez-Guerrero, A., & Rodriguez-Lelis, J. M. (2013). Entropy generation as an environmental impact indicator and asample application to freshwater ecosystems eutrophication. *Energy*, 61, 234–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.042>
22. Tiezzi, E. (2011). Ecodynamics: Towards an evolutionary thermodynamics of ecosystems. *Ecological Modelling*, 222(16), 2897–2902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.014>
23. Tiezzi, E., Cecconi, G., & Marchettini, N. (2010). Confined ontic open systems. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 5(1), 3–9. doi:10.2495/DNE-V5-N1-3-9 DOI: <https://doi.org/10.2495/DNE-V5-N1-3-9>
24. Tiezzi, E. (2006). Is entropy far from equilibrium a state function? *International Journal of Ecodynamics*, 1(1), 44–54. DOI: <https://doi.org/10.2495/ECO-V1-N1-44-54>
25. Antonis Mistriotis (2021). A universal model describing the structure and functions of living systems, *Communicative & Integrative Biology*, 14:1, 27–36, DOI: <https://doi.org/10.1080/19420889.2021.1887549>
26. Malek-Mansour, M., Nicolis, G., & Prigogine, I. (2019). Nonequilibrium phase transitions in chemical systems. *Thermodynamics and kinetics of biological processes* (pp. 75–104) DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110845914-008>
27. Margalef, R. (1996). Information and uncertainty in living systems, a view from ecology. *BioSystems*, 38(2-3), 141–146. DOI: [https://doi.org/10.1016/0303-2647\(95\)01584-1](https://doi.org/10.1016/0303-2647(95)01584-1)
28. Bezsonnyi, V.L., Tretyakov, O.V., Plyatsuk, L.D., & Nekos, A.N. (2022). Entropy approach to assessment of the ecological state of a water course. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Ecology»*, (27), 6–19. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01> [in Ukrainian].

**Authors Contribution:** All authors have contributed equally to this work

Received 8 September 2022

Accepted 15 November 2022