

ХРОНОМЕТРИЧНА АСИМЕТРІЯ ЯК ФУНДАМЕНТАЛЬНЕ ОБМЕЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ У ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

Волошин В.С., Кленін О.В.

Приазовський державний технічний університет
вул. Гоголя, 29, 49044 м. Дніпро
vsvlshn52@gmail.com

У роботі досліджується фундаментальна проблема хронометричної асиметрії у системі «машина–людина–геосистема», яка визначає обмеження взаємодії між її складовими. Актуальність теми зумовлена стрімким розвитком техносфери та штучного інтелекту, що функціонують у надшвидких часових масштабах, тоді як геосистеми природньо змінюються надзвичайно повільно. Людина при цьому займає проміжне положення, що робить її єдиною ланкою, здатною узгоджувати ці принципово різні за темпами процеси. Ігнорування цієї асиметрії призводить до ризиків втрати керованості та виникнення як швидких технологічних, так і повільних екологічних криз. Наукова новизна роботи пов'язана з формалізацією багаточасової моделі системи, в якій доведено відсутність прямого відображення між станами машин і геосистем та обґрунтовано існування єдиного допустимого та раціонального каналу взаємодії через людину. Запропоновано термодинамічний підхід до опису такої системи через динаміку ентропії, де людина виступає як оператор пам'яті та транслятор між масштабами часу. Введено функціонал стійкості та показано, що стабільність системи залежить від наявності проміжного часового шару. Доведено, що усунення людської складової або зростання автономності штучного інтелекту призводить до втрати динамічної стійкості. Показано, що людина, з одного боку, може стати нездатною стабілізувати машинну підсистему, в особливості при наявності там конкуруючого AI, а з другого – явно не здатна до “стабілізації” планетарної системи. Вона здатна лише підтримувати її в режимі критичної нестійкості. Це означає, що підсистему «людина» можна розглядати тільки як умовно опосередковану ланку, коли її стабілізуюче існування можливе лише в режимі далекому від рівноваги, або система спрощується (втрата керування). В іншому випадку, на біфуркаційній межі такий суб'єкт може втрачати свої можливості, делегуючи їх іншій підсистемі, наприклад AI або самій Природі. Практичні результати роботи полягають у можливості застосування запропонованої моделі для аналізу ризиків у складних техно-природних системах, оцінки наслідків впровадження автономних технологій та розробки підходів до їх безпечної інтеграції. Отримані результати можуть бути використані у системному аналізі, екологічному прогнозуванні та дослідженнях взаємодії людини і штучного інтелекту, зокрема для запобігання втраті узгодженості між швидкими та повільними процесами розвитку. *Ключові слова:* екологічні системи, хронометрія, асиметрія, людина, машина, геосистема, ентропія, стійкість.

Chronometric Asymmetry as a Fundamental Constraint on Interaction in Ecological Systems. Voloshyn V., Klenin O.

The paper examines the fundamental problem of chronometric asymmetry in the "machine-human-geosystem" system, which determines the limitations of interaction between its components. The relevance of the topic is due to the rapid development of the technosphere and artificial intelligence, which operate on ultra-fast time scales, while geosystems naturally change extremely slowly. At the same time, a person occupies an intermediate position, which makes him the only link capable of coordinating these fundamentally different processes. Asymmetry leads to risks of loss of controllability and the occurrence of both rapid technological and slow environmental crises. The scientific novelty of the work is associated with the formalization of a multitemporal model of the system, in which the absence of a direct reflection between the states of machines and geosystems is proved and the existence of a single permissible and rational channel of interaction through a person is substantiated. A thermodynamic approach to describing a system through the dynamics of entropy is proposed, where the human being acts as a memory operator and a translator between time scales. The stability functionality is introduced and it is shown that the stability of the system depends on the presence of an intermediate time layer. It has been proven that the elimination of the human component or the increase in the autonomy of artificial intelligence leads to a loss of dynamic stability. It is shown that a person, on the one hand, can become unable to stabilize a machine subsystem, especially in the presence of competing AI there, and on the other hand, he is clearly incapable of "stabilizing" a planetary system. It is only able to maintain it in critical instability mode. This means that the subsystem "man" can be considered only as a conditionally mediated link, when its stabilizing existence is possible only in a mode far from equilibrium, or the system is simplified (loss of control). Otherwise, at the bifurcation boundary, such an entity may lose its capabilities, delegating them to another subsystem, such as AI or Nature itself. The practical results of the work are the possibility of applying the proposed model for risk analysis in complex techno-natural systems, assessing the consequences of the introduction of autonomous technologies and developing approaches to their safe integration. The results obtained can be used in system analysis, environmental forecasting and human-artificial intelligence interaction studies, in particular to prevent the loss of coherence between fast and slow development processes. *Key words:* ecological systems, chronometry, asymmetry, man, machine, geosystem, entropy, stability.



Постановка проблеми. Машини, людина та геосистеми функціонують у принципово різних хронометричних режимах, що унеможливує їх безпосередню узгодженість. Сучасні дослідження взаємодії у системі «людина–машина–навколишнє середовище» недостатньо враховують неявну, але фундаментальну нерівність часових масштабів її складових, а відсутність формалізованого підходу до цієї асиметрії призводить до помилок у прогнозуванні стійкості складних систем. Проблема загострюється в умовах розвитку автономних машинних систем та штучного інтелекту. Тому необхідним є створення узагальненої моделі, яка враховує багаточасову природу взаємодії «машина–людина–геосистема».

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Результати роботи зв'язані з актуальними науковими напрямками: еволюційною та хронобіологією, управлінням кліматичними ризиками та управлінням великими екосистемами.

Актуальність дослідження. Сучасний етап розвитку техносфери характеризується стрімким зростанням швидкості обчислювальних процесів і впровадженням автономних машинних систем і, зокрема, штучного інтелекту. Людина опиняється у специфічному часовому інтервалі між масштабами двох неорганічних систем – штучного машинного світу та природних геосистем, як сумісного ареалу існування людини, що робить її роль критичною для узгодження систем. Одночасно глобальні екологічні зміни демонструють накопичувальний ефект повільних процесів, які не сприймаються безпосередньо. Ігнорування цієї асиметрії може призвести до втрати керованості системою. Тому дослідження хронометричної асиметрії є актуальним як для фундаментальної екологічної науки, так і для практики управління складними системами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Органічний світ існує на планеті $\sim 3,5$ млрд років (умовні $1,10376 \cdot 10^{17}$ с), що складає 77% від часу існування неорганічного світу у вигляді самої планети (4,54 млрд років, або $1,4317344 \cdot 10^{17}$ с) [1, 2]. Існуванню ссавців на планеті – 225 млн років ($7,0956 \cdot 10^{15}$ с), а людини – 300 тис. років ($9,4608 \cdot 10^{12}$ с) [3]. Існуванню фізичних машин, як автономних енергетичних систем (починаючи з водяних млинів), що створені людиною – всього $\sim 2,3$ тис. років ($7,1072 \cdot 10^{10}$ с) [4]. Це автомати та механізми античної Греції, наприклад, пристрої Герона Александрійського, водяні та парові механізми тощо. Тому актуальним є дослідження, що стосуються сукупних екосистем, які можна поділити на неорганічний світ («NonOrg») та органічний світ («Org») [5], які, в свою чергу, структуровані по тим складовим, що означені вище. Позначимо їх як систему «NonOrg–Org». Предмет цього дослідження буде принципово сильнішим, ніж класичні системи «людина–машина–навколишнє середовище» [6].

Виділення невирішених раніше частин проблеми. У класичних моделях відсутній строгий опис неможливості прямого відображення між станами машин і геосистем. Недостатньо досліджено роль людини як єдиного оператора між різними часовими масштабами, а також відсутня узагальнена термодинамічна інтерпретація взаємодії «машина–людина–геосистема» через ентропію. Це не дозволяло сформулювати критерії стійкості багаточасових систем з урахуванням асиметрії масштабів.

Наукова новизна. Вперше запропоновано багаточасову термодинамічну модель системи «машина–людина–геосистема», у якій людина формалізована як єдиний ентропійний оператор пам'яті, що забезпечує узгодження між несумісними часовими масштабами у складових неорганічного світу.

Методологічне та загальнонаукове значення. Робота формує новий підхід до аналізу складних систем через призму хронометричної асиметрії та багаточасових процесів. Запропонована модель може бути використана як універсальна методологічна основа для дослідження систем, де поєднуються різні масштаби часу та рівні організації.

Викладення основного матеріалу. Пропонуються до розгляду системи, в яких, окрім людини, як органічної істоти «Org», співіснують природні та штучні неорганічні «NonOrg» системи, а саме система «машина–людина–геосистема», така що дозволяє наочно розглядати конкурентні та структурні співвідношення, які задані самою фізикою часу. Формалізація часових масштабів тут відбувається згідно з ієрархією характерних часів для їх динамічних змін:

$$\tau_m \ll \tau_{ch} \ll \tau_G \quad (1)$$

де: $\tau_m \sim 10^{-9} \div 10^{-3}$ с – машини (електроніка, ШІ, автоматика); $\tau_{ch} \sim 10^7 \div 10^{12}$ с – людина (життєві цикли, прийняття рішень тощо); $\tau_G \sim 10^{10} \div 10^{17}$ с – геосистеми (клімат, тектоніка, біогеохімія тощо). Всі дані умовні і лише підкреслюють асиметричність часових властивостей системи.

Можна припустити, що динамічний розвиток геосистеми (умовно «G») і техносфери («M»), як частин «NonOrg» системи визначається хронометричною асиметрією їх складових, а саме, співіснуванням процесів, що відбуваються на принципово різних часових масштабах, які не редукуються один до одного. Ці масштаби не є довільними – вони термодинамічно зумовлені і між ними не існує коректного оператора прямої редукції. Формально $\mathcal{R}_{MG}: X_M \rightarrow X_G$ та $\mathcal{R}_{GM}: X_G \rightarrow X_M$, (тут «G» – індекс геосистеми, «M» – індекс «машини», X_i – термодинамічні стани, притаманні відповідним підсистемам, \mathcal{R} – відповідний оператор динамічних змін) оскільки будь-яке таке відображення потребує усереднення або екстраполяції на інтервалах часу, що перевищують або недосяжні для сусідньої підсистеми. Натомість, завдяки людині (біологічній

системі – індекс «ch»), як похідної від геосистеми, з одного боку, і джерела виникнення техносфери «машин», з другого боку, існує єдиний емпірично допустимий ланцюг миттєвих станів системи (X_i), такий що:

$$X_M \xrightarrow{\mathcal{R}_{Mch}} X_{ch} \xrightarrow{\mathcal{R}_{chG}} X_G \quad (2)$$

який показує на топологічне твердження: *фазові динамічні простори машин і геосистем не є безпосередньо сумісними, але обидва мають проєкції в людський фазовий динамічний простір.*

Для аналізу асиметричності, що певно складає сутність динамічних взаємодій в такій системі розглянемо багаточасову математична модель, у вигляді системи станів $X(t) = \{x_M(t), x_{ch}(t), x_G(t)\}$ з типовими еволюційними рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{dx_M}{dt} = \frac{1}{\tau_M} F_M(x_M, x_{ch}) \\ \frac{dx_{ch}}{dt} = \frac{1}{\tau_{ch}} F_{ch}(x_{ch}, x_M, x_G) \\ \frac{dx_G}{dt} = \frac{1}{\tau_G} F_G(x_G, x_{ch}) \end{cases} \quad (3)$$

Ключове визначення такої системи наступне: *«машини хронометрично напряду не “бачать” динамічних змін у геосистемі (перше рівняння), а, в свою чергу, геосистеми напряду не реагують на динамічні зміни у станах «машин» (третє рівняння) і людина тут – єдиний зв’язуючий канал між цими представниками неорганічного світу» (друге рівняння).* Але ж при цьому вона – представник світу органічного.

Загально обізнана система (3) схожа на математичне визначення ролі людини як опосередкованої значимої ланки між штучно створеними машинами («NonOrg») і глобальними природними геосистемами (також «NonOrg»), серед яких існує тільки вона сама, як «Org». Ця система рівнянь дає можливості для аналізу динамічної стійкості багаточасових систем, виявленню критичних режимів, коли «машина» виходить з-під людського масштабу або геосистемні наслідки стають незворотними. Окрім того, поява деяких актуальних підсистем, наприклад, із штучним інтелектом (AI), провокує можливості формалізації ризиків їх автономності, як втрати масштабу узгодження (1).

Нас цікавить сингулярне збурення через сильну нерівність масштабів початкових підсистем, яке запишемо через відношення їх масштабного часу існування або динамічної активності

$$\varepsilon = \frac{\tau_M}{\tau_{ch}} \ll 1; \delta = \frac{\tau_{ch}}{\tau_G} \ll 1. \quad (4)$$

Такі відношення мають вираз системи з сингулярною збуреністю, наслідками якої очікувано можуть бути, наприклад, миттєвими релаксаціями машинної системи

$$F_M(x_M, x_{ch}) = 0 \Rightarrow x_M = \phi(x_{ch}) \quad (5)$$

У свою чергу, геосистема становиться квазістабою для людини: $\tau_{ch} \approx const$, виходячи з часових масштабів x_G . При цьому людина отримала нішу між двома “нескінченностями”: занадто швидкою та занадто повільною. Фізичний сенс такого співіснування лежить в середині, – це саме людина, як похідна природних систем і, водночас, творець техносвіту. Її хронометричне вікно у динаміці існування вкрай вузьке між штучною «машиною» та природною «геосистемою» (1). В супереч тому, що «машина» *надто швидка*, а «геосистема» *надто повільна*, з’явилися можливості для появи саме в цьому вікні таких властивостей мозку людини, як усвідомлення, цілепокладання, узагальнення, відповідальність та ін., які узгоджують ці системи в їх динаміці.

Виступаючи як потенційна управлінська ланка, людина тим не менш, не може керувати наносекундною динамікою «машини» без автоматів. Але ж людина не може керовано спостерігати і динаміку геосистемних змін без історичних моделей. Тому, людський контроль завжди опосередкований.

Розглянемо цю систему з позицій її термодинаміки. Будь-які зміни в цих трьох системах, незалежно від їх часового наповнення, мають одну спільну особливість. Їх зміни мають місто тільки при умовах впливу зовнішньої енергії (як варіант – енергія може бути внутрішньою). Тому цікавим стає термодинамічний метод аналізу таких систем у їх взаємовідношеннях, на підставі динаміки ентропії цих систем.

Для кожної підсистеми загальним буде вираз що відображає зміну її ентропії

$$\sigma_i = \frac{dS_i}{dt}, i \in \{M, ch, G\} \quad (6)$$

і загалом:

$$\sigma_{total} = \sigma_M + \sigma_{ch} + \sigma_G = \frac{dS_M}{dt} + \frac{dS_{ch}}{dt} + \frac{dS_G}{dt} \geq 0 \quad (7)$$

Але ж за умовами системи маємо миттєве $\sigma_M \gg \sigma_{ch} \gg \sigma_G$, де σ_M – висока миттєва зміна ентропії для «машин», вона суто локальна; σ_G – низька миттєва, але накопичувальна зміна ентропії «геосистеми»; σ_{ch} – умовний керуючий параметр. Вочевидь, що людина за допомогою σ_{ch} не максимізує ентропію – вона здатна лише перерозподіляти її між масштабами часу. Це дозволяє строго записати головну ідею співвідношення в системі, як

$$S_{ch}(t) = \mathcal{T}[S_M(t), S_G(t)], \quad (8)$$

де \mathcal{T} – суцільний часовий оператор відкладеного впливу, масштабного перетворення, соціальної пам’яті. Він не є миттєвим, а має певну пам’ять, на протязі поточного інтервалу часу ($t - \tau$), у вигляді

$$\mathcal{T} = \int_{-\infty}^t K(t - \tau)(\cdot) d\tau. \quad (9)$$

Тобто, людина тут виконує обов'язки не як джерело мінімізації чи максимізації ентропії, а є носієм ядра динамічної пам'яті $K(\tau)$, яка зв'язує швидку дисипацію з повільними наслідками. Таку властивість людини було досліджено й доведено в роботі [7]. Згідно з цими та іншими дослідженнями, наприклад, [8], людина, машина і геосистема описуються однією математичною мовою ентропії, але належать до різних онтологічних рівнів: людина – ентропійний трансформатор смислу, машина – ентропійний процесор, а геосистема – ентропійне середовище-двор і акумулятор.

Якщо б всі процеси в системі мали один масштаб часу, то система була б або застиглою, або хаотичною. Цьому перешкоджає хронометрична ієрархія завдяки якій виникає *напрям «історії»*. Причина сучасного динамічного розвитку Природи виникає не попри, а завдяки такій асинхронності. Саме асиметрія причинності та незворотність стріли часу обґрунтовують роль людини, як термодинамічної ланки в ланцюгу різних підсистем.

Розглянемо причинно-часовий напрямок в системі «геосистема→людина→машина» (але не навпаки), в повному обсязі. Без участі людини (без X_{ch}) в цій системі він означає, що $\frac{\partial X_G}{\partial X_M} \approx 0$. Тільки через інтегральні людські дії маємо взаємопов'язаність опосередковано через динамічний оператор людської взаємодії \mathcal{R}

$$X_G(t_G + \Delta\tau) = X_G(t_G) + \int_{t_G}^{t_G + \Delta\tau} \mathcal{R}(X_{ch}(\tau)) d\tau \quad (10)$$

$$X_M(t_M + \Delta\tau) = X_M(t_M) - \int_{t_M}^{t_M + \Delta\tau} \mathcal{R}(X_{ch}(\tau)) d\tau \quad (11)$$

Це є ключовим моментом, коли «Людина, як оператор \mathcal{R} , – єдина підсистема, яка здатна створювати причинні ланцюги, довші за власний час існування». Саме це і є не стільки етичне, скільки фізичне визначення відповідальності та послідовності, як прояв людської когнітивності.

В такому сенсі можна розглядати і ризики автономного штучного інтелекту (AI). Тут автономний AI – це x_M для умови, коли оператор $\mathcal{R}_{M, ch} \rightarrow 0$ показує на відсутність ефективного зворотного зв'язку через x_{ch} . Тобто машина перестає бути вписаною в людський часовий масштаб, коли σ_M стає локально мінімізованою, а величина $\int \sigma_G dt$ максимізована. Математично це означає що зникає посередник (людина) у системі, визначається порушення масштабної узгодженості, виникає нестійкість. Це є строгий сенс фрази «Автономний AI оптимізує швидке, але руйнує повільне».

Умови стійкості всієї системи поставимо в залежності від критерію багаточасової стійкості. Для цього запишемо узагальнений функціонал:

$$\mathcal{F} = \alpha_M S_M + \alpha_{ch} S_{ch} + \alpha_G S_G \quad (12)$$

де ваги $\alpha_i \sim 1/\tau_i$. Тоді умова динамічної стійкості це

$$\frac{d\mathcal{F}}{dt} \geq 0 \text{ та } \frac{d^2\mathcal{F}}{dt^2} < \infty. \quad (13)$$

І втрата людського шару означає різке зростання другої похідної від функціоналу, тобто появу або швидких нестійкостей (AI runaway), або повільних нестійкостей (екологічний колапс). Рольова ієрархія тут представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Узагальнююча схема ролей в системі «M-ch-G»

Системна складова	Порядок часу	Роль підсистеми в часі
Машина	наносекунди	Локальна ефективність, швидка ентропія
Людина	десятиліття	Масштабний транслятор, відповідальність
Геосистема	тисячоліття	Накопичувач наслідків

Згідно цим даним можна сформулювати узагальнене ієрархічне твердження: «У відкритих багаточасових дисипативних системах стійке співіснування можливе лише за наявності підсистеми з проміжним часовим масштабом, здатної акумулювати ентропійну пам'ять і транслявати її між швидкими та повільними процесами». У системі «природа–техносфера» такою підсистемою може бути тільки людина.

Таким чином, людина не є найшвидшою або найпотужнішою складовою системи “природа–техносфера”, але вона є єдиною складовою, що існує в масштабі часу, придатному для узгодження надшвидких штучних машинних процесів з надповільними природними геосистемними наслідками. Можливо, саме ця хронометрична позиція, що виникла, а не інтелект чи сила, визначає унікальність ролі людини в сучасній еволюції. Її існування у проміжному масштабі часу, достатньо повільне для усвідомлення і, водночас, достатньо швидке для втручання. Саме тому, людина забезпечує термодинамічне узгодження швидкої ентропійної дисипації «машин» із повільною, але незворотною ентропійною акумуляцією «геосистем». Усунення цієї ланки неминуче призводить до втрати стійкості всієї системи – незалежно від рівня технологічної або природної досконалості.

Це нескладно показати за числовими прикладами. «Людина», «машина» і «геосистема» описуються однією математичною мовою ентропії, але належать до різних онтологічних рівнів. Загальна форма визначення ентропії це

$$S_k = -\sum_i^N p_i \cdot \log(p_i) \quad (14)$$

При ентропійних розрахунках приймаємо специфічні умови, які стосуються особливостей кожної з підсистем (табл. 2)

Початкові вихідні дані для розрахунків як фізично обґрунтовані у типовому термодинамічному масштабі наведені в таблиці 3.

На згенерованому графіку (рис. 1), за логарифмічною шкалою часу, видно, що машини знаходяться на дні шкали часу, людина – у центральному інтервалі,

а геосистеми – у верхній області повільної еволюції. Між масштабами існують провали в 10^8 – 10^{12} разів. Жодна підсистема не може безпосередньо “бачити” іншу без посередника. При цьому людина – єдина система, що одночасно реагує на «машини» і усвідомлює «геосистемні» наслідки.

Ключовий кількісний результат такого аналізу наступний. Машини мають максимальну миттєву ентропію, але майже нульовий інтегральний внесок.

Таблиця 2

Особливості розрахунків термодинамічних показників системи «машина-людина-геосистема»*

Тип підсистеми		Інтерпретація показників		Індивідуальна формула загального виду
		P_i	N	
Машина	Фізична	-	-	$\frac{dS_M}{dt} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sigma_{diss}$
	Інформаційна	Ймовірності внутрішніх інформаційних станів (параметри, реєстри)	Кількість інформаційних станів	-
Людина	Когнітивна S	Ймовірність активації когнітивного стану (повідомлення, гіпотези, стратегії, концепти)	Кількість альтернативних когнітивних станів	-
	Семантична S	Ймовірність реалізації семантичного значення i	Кількість можливих значень (інтерпретацій смислу)	$P_i = \sum_i P(s_i x_i) P(x_i)$
Геосистема загального виду		-	-	$\frac{dS_G}{dt} = \sigma_{int} + \Phi_{ext}$
Геосистема хімічного чи екологічного вмісту		Частка фаз, компонентів, режимів процесу	Кількість врахованих часток	-

* - \dot{Q}_k – теплові потоки; σ_{diss} – незворотні втрати; x_i – символи (сигнали); s_i – значення символів; $\sigma_{int} \geq 0$ – внутрішнє виробництво ентропії; Φ_{ext} – ентропійні потоки (тепло, маса, інформація).

Таблиця 3

Характерні вихідні дані щодо системи «машина-людина-геосистема» (типовий термодинамічний масштаб)

Підсистема	Характерний Процес	Часовий масштаб, с	Швидкість виробництва ентропії, Дж/(К · с)
Машина	такт процесора, логічна операція	$10^{-9} \div 10^{-6}$	10^3
Машина з AI	цикл навчання/реакції	$10^{-6} \div 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^3$
Людина	Реакція	$\sim 10^0$	$1 \cdot 10^1$
	прийняття рішень	$10^4 \div 10^5$	$0,33 \cdot 10^1$
	активне життя	$\sim 10^9$	$1,5 \cdot 10^2$
Геосистема	кліматичні цикли	$10^9 \div 10^{10}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$
	біогеохімічні цикли	$10^{11} \div 10^{12}$	$1 \cdot 10^{-2}$
	Тектоніка	$10^{12} \div 10^{13}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$

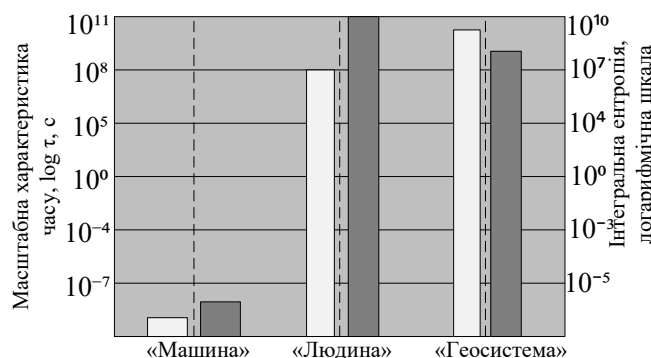


Рис. 1. Хронометрична асиметрія підсистем у співставленні з інтегральною ентропією по характерному часу. Тут білим кольором означена характеристика часу, темним – інтегральна ентропія)

Геосистеми, навпаки, мають малу миттєву ентропію, але величезний накопичений ефект. Середина ланка, людина – єдина система, де миттєва і інтегральна ентропія мають один порядок.

Система характеризується швидкою оптимізацією та напрямком до повільної «катастрофи» у відсутності людини ($\sigma_M \rightarrow \max$ та $S_G \rightarrow \max$, $\sigma_{ch} = 0$). Якщо існує $\sim \tau_{ch}$ то виникає можливість для узгодження, з'являються стійкість системи і відповідальність, як фізична компонента. Але це не абсолютність. Наприклад, при наявності автономного $AI (S_{AI} \ll S_{ch})$ виникає розрив середнього масштабу і відповідна термодинамічна нестійкість.

Треба відзначити, що функціонал стійкості \mathcal{F} , обчислений за (12), багаточасової системи «машина–людина–геосистема» визначається зваженою сумою інтегральної ентропії, де ваги обернено пропорційні характерним часам. Хоча миттєвий внесок «машин» домінує у величині функціоналу, саме людський часовий масштаб забезпечує скінченність його похідних і, отже, динамічну стійкість системи. Усунення людського шару призводить до термодинамічної нестійкості незалежно від технічної оптимальності машинних процесів. Термодинамічна стійкість, розрахована за функціоналом (12) показує (табл. 4) що за загальним значенням $\mathcal{F}_{total} \leq 1 \cdot 10^3$ суттєво відрізняється для різних підсистем: «машина» домінує за стійкістю через її швидкість функціонування, «геосистема» майже не впливає миттєво на стійкість, а «людина» дає малий

внесок у величину стійкісного функціоналу, але він може бути критичним у його похідних.

Графік внесків у функціонал стійкості наочно показує на рольову напругу в системі. Рольова значність окремих підсистем (табл. 5) за критерієм швидкості виробництва ентропії показує на принципову відмінність для ентропійних коливань: для машини – ентропія швидко і локально змінюється; для геосистеми – ентропія змінюється повільно, але невідворотно, а для людини здійснюється її перерозподіл у часі.

Тому динамічне співіснування органічних і неорганічних об'єднань в системі, як причина розвитку, дозволяє прогнозувати, що розвиток у природі виникає не стільки через оптимальність, скільки через асинхронність процесів. Якщо б всі ці компоненти мали синхронний час, то може й не було б історії. Формується основна теза: «якщо масштаби в системі розділені, це одна з головних причин появи пам'яті, відповідальності, як факторів еволюція».

Для того, щоб довести структурну нестійкість хронометрично-асиметричного суб'єкта, сформулюємо і обґрунтуємо тезу про неможливість його асимптотично стійкого існування з математичною аргументацією.

Розглянемо систему станів системи «машина–людина–геосистема» $x(t) = (G(t), ch(t), M(t))$ із характерними масштабами часу $\tau_G \gg \tau_{ch} \gg \tau_M$, та рівняннями (усередненими за швидкими змінними):

Таблиця 4

Функціонал стійкості системи за умовними вихідними даними

Підсистема	A_c	σ , Дж/(К·с)	S, Дж/К	$\alpha = 1 / \tau$, 1/с	$\alpha \cdot S$
Машина	10 ⁻⁹	10 ³	10 ⁻⁶	10 ⁹	10 ³
Людина	3,15 · 10 ⁸	10 ¹	3,15 · 10 ⁹	3,17 · 10 ⁻⁹	≈ 10 ¹
Геосистема	3,15 · 10 ¹⁰	10 ⁻²	3,15 · 10 ⁸	3,17 · 10 ⁻¹¹	≈ 10 ⁻²

Критеріальна приналежність у системі «людина–машина–геосистема»

Критерій	Машини	Людина	Геосистеми
Часовий масштаб	наносекунди	роки–десятиліття	Тисячоліття
Тип динаміки	надшвидка, жорстка	Адаптивна	Інерційна
Зворотний зв'язок	миттєвий	Усвідомлений	Запізнілий
Пам'ять	Технічна	культурна, соціальна	Геологічна
Ентропія	висока миттєва	Керована	Накопичувальна
Контроль	автоматичний	Цілепокладання	Відсутній
Вразливість	до помилок алгоритму	до перевантаження	до повільних катастроф

$$\begin{cases} G = F(G, M) \\ \dot{CH} = \frac{1}{\tau_{ch}} \Phi(G, CH, T_{ext}) \\ \dot{M} = \frac{1}{\tau_M} \Psi(CH, M) \end{cases} \quad (15)$$

де: T_{ext} – екстерналізований часовий ресурс; F, Φ, Ψ – гладкі нелінійні оператори для відкритої системи (потік енергії та ентропії ненульовий) з фізичним змістом, послідовно: еволюція геосистеми (ресурси, забруднення навколишнього середовища, біосфера); еволюція людини, як когнітивної системи; еволюція техносфери, зокрема, приклад AI .

Введемо безрозмірний параметр керованості системи: $\lambda = \frac{T_{ext}}{\tau_{ch}}$, такий що $\lambda \ll 1$ віднесемо до типової біологічної системи (примат); $\lambda \sim 1$ – це перехідна область, а $\lambda \gg 1$ віднесемо до хронометрично-асиметричного суб'єкту (людині). Параметр λ масштабує матриці взаємодій з часовим сегментом людини.

Припустимо, що існує стаціонарний керований стан (G^*, CH^*, M^*) для лінеаризованої системи $u = J(\lambda)u$ де J – якобіан.

Враховуючи, що масштаби станів розділені, якобіан має блокову форму

$$J(\lambda) = \begin{vmatrix} A_G(\lambda) & 0 & B_D \\ C(\lambda) & A_{ch}(\lambda) & D \\ 0 & E & A_M(\lambda) \end{vmatrix} \quad (16)$$

де: A_G – матриця внутрішньої динаміки геосистеми, $A_{ch}(\lambda)$ – вплив геосистеми на людину; E – одинична матриця, як складова інерційної когнітивної динаміці; B_D – матриця параметрів впливу «машини» на «людину» у вигляді, наприклад, інформаційного навантаження, високочастотні обчислювання; $A_M(\lambda)$ – внутрішня динаміка «машини» (автономія, навчання, алгоритмічні процедури). Далі, маємо дійсні частини власних значень матриць: $Re(\sigma(A_G)) \approx 0$ – означає повільну еволюцію; $Re(\sigma(A_G)) \ll 0$ відповідає умовам швидкої стабільності, а критичний блок має вираз $A_{ch}(\lambda) \neq 0$. Умові $Re(\sigma(A_G)) > 0$ відповідає стан екологічної нестійкості. Якщо $Re(\sigma(A_M)) < 0$ це показує на

стійкість підсистеми «машина», а $Re(\sigma(A_M)) > 0$ визначає певний стрибок в розвитку цієї підсистеми. Результати аналізу наведені на рис. 2.

Фундаментальна нестійкість при $\lambda \rightarrow \infty$, для когнітивного агента з екстерналізованим станом $A_{ch}(\lambda) = A_0 + \lambda \cdot A_1$, де A_1 – будемо вважати відповідною за керування «машиною».

Не може визивати суперечність наступне твердження: «Якщо керування здійснюється через підсистему з $\tau_{ch} \gg \tau_M$, то $\exists \lambda_c : \mathcal{R}(\sigma(J(\lambda_c))) \approx 0$ », де J – якобіан. Логіка аргументів тут включає наступне. Зростання λ підсилює зворотний зв'язок; при цьому більш швидка в розвитку підсистема « M » створює ефективне запізнення таким чином, що в спектрі виникає комплексна пара власних значень, а при $\lambda < \lambda_c$ виникає біфуркація Гопфа (див. рис. 3). При $\lambda < \lambda_c$ стаціонарний режим системи втрачає стійкість і виникає квазіперіодична або хаотична динаміка. Фізично це означає надмірну екстерналізацію часу і втрату фазової синхронізації між людиною та «машиною». З появою в ланці «машина» нового учасника – штучного інтелекту (AI), процес втрати стійкості зростає.

Існує і інший незалежний доказ, за участю ентропійного аргумента. Він складає наступне. Швидкість виробництва ентропії $\dot{S} = \sigma_G + \sigma_{ch} + \sigma_M$. Для забезпечення стійкості системи необхідні умови $\frac{d\dot{S}}{dt} \leq 0$. Але $\frac{d\dot{\sigma}_M}{d\lambda} < 0$ означає, що для $\exists \lambda_c : \dot{S}$ зростає. Тим самим порушується умова мінімальної дисипації Пригожина. Втрата людського шару означає різке зростання другої похідної $\frac{d^2\dot{\sigma}_M}{d\lambda^2}$, тобто появу нестійкості. Це може бути швидкі причини (наприклад, поява та розвиток AI) або повільні (наприклад, екологічний колапс).

Таким чином обумовлюється неможливість асимптотичної стійкості для хронометрично-асиметричного керуючого суб'єкта (людини). Дисипативні процеси існують на межі співіснування людини і машини. Як хронометрично-асиметричний керуючий суб'єкт, «людина» не може існувати як асимптотично стійка стаціонарна структура, оскільки, при зменшенні екстерналізованого часу $\lambda < T_{ext} / \tau_{ch}$

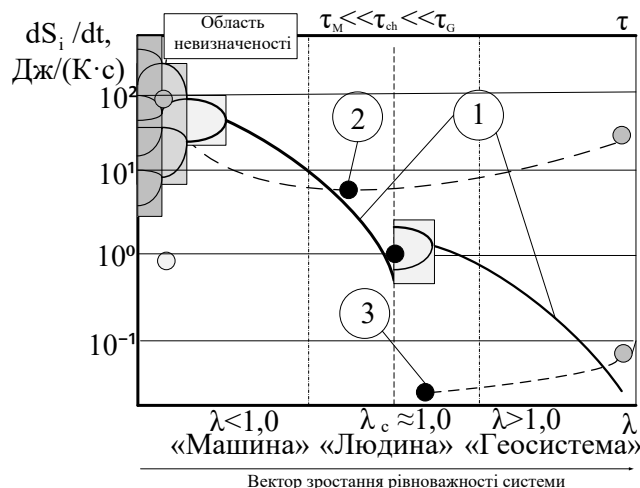


Рис. 2. Умови існування системи «машина-людина-геосистема» за термодинамічними показниками стійкості та визначеності зв'язків: 1 – система за участю людини; 2 – система за участю умовного штучного інтелекту; 3 – система за участю іншої умовної біологічної підсистеми (примати)

, неминуче виникає біфуркація Гопфа і стаціонарний режим керування втрачає стійкість. Система послідовно переходить у режим автоколивань, хаосу або розпаду керуючого контуру (див. рис. 3). І навпаки, реакція цієї ланки на глобальні збуджуючі процеси від «геосистеми» майже ніяк не впливає на зворотні зв'язки ($T_{ext} \gg \tau_{ch}$) і людина, або будь-яка інша біологічна субстанція, спроможна лише підстроюватися під ці збудження. Це може знайти пояснення для участі умовного примату, як типового представника підсистеми «людина», але вже без впливу на підсистему «машина».

Висновки.

1. Система «машина–людина–геосистема» є принципово асиметричною за часовими масштабами, що визначає її поведінку.

2. Прямий часовий зв'язок між «машинами» та «геосистемами» відсутній – він можливий лише через людину. Людина виконує роль ентропійного трансформатора та носія пам'яті, який узгоджує швидкі та повільні процеси.

3. З точки зору еволюційного розвитку, людина, з одного боку, може поступово стати нездатною стабілізувати машинну підсистему, в особливості при наявності там конкуруючого AI, а з другого – явно не

здатна до «стабілізації» планетарної системи. Вона здатна лише підтримувати ці складові в режимі критичної нестійкості.

4. Це означає, що підсистему «людина» можна розглядати тільки як умовно опосередковану ланку, коли її стабілізуюче існування можливе лише в режимі далекому від рівноваги, або система спрощується (втрата керування). В іншому випадку, на біфуркаційній межі такий суб'єкт може втрачати свої можливості, делегуючи їх іншій підсистемі, наприклад AI або самій Природі.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати можуть бути використані для розробки нових підходів до управління складними техно-природними системами, зокрема в екологічному прогнозуванні та оцінці ризиків. Вони відкривають можливості для створення моделей безпечної інтеграції штучного інтелекту з урахуванням часової узгодженості. Також підхід може бути застосований у системному аналізі, кібернетиці та теорії складних адаптивних систем. Окрім того, результати мають потенціал для міждисциплінарних досліджень у фізиці, біології та когнітивних науках, де важливу роль відіграє взаємодія процесів різної тривалості.

Література

1. Nédélec A. Earth and Life: A History of Four Billion Years, *Oxford University Press*, Oxford, 2025, 272 p.
2. Smith E., Morowitz H. J. The Origin and Nature of Life on Earth: The Emergence of the Fourth Geosphere, *Cambridge University Press*, Cambridge 2016. 660 p. DOI: 10.1017/CBO9781316348772
3. Kielan-Jaworowska Z., Cifelli R., Luo Z.-X. Mammals from the Age of Dinosaurs: Origins, Evolution, and Structure. *Columbia University Press*, New York, 2004. 630 p. DOI: 10.7312/kiel11918
4. Rose E.D. The Beginning of the Age of Mammals, *Johns Hopkins University Press*, Baltimore, 2006. 46 p. DOI: 10.56021/9780801884726
5. Lunine J. I. Earth: Evolution of a Habitable World, *Cambridge University Press*, Cambridge 2013. 301 p. DOI: 10.1017/CBO9781139050418.021

6. McCormick E. J., Sanders M. S. Human Factors in Engineering and Design. *McGraw-Hill*, New York, 1987. 327 p. https://en.wikipedia.org/wiki/Human_Factors_in_Engineering_and_Design
7. Волошин В. С. Азархов О. Ю. Конкуренція та перспективи білково-вуглецевих та специфічних неорганічних екосистем на Землі. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Вип. 48. Сер. Технічні науки. 2024. С. 111-120. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2024. Вип. 48. Сер. Технічні науки. С. 111-120
8. Grandpierre A. Entropy and Information of Human Organisms and the Nature of Life. *Frontier Perspectives*, Budapest, Vol. 13, 2004. P.16-21

Дата першого надходження статті до видання: 08.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026