

ЗВОРОТНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЗВ'ЯЗОК ЯК ФАКТОР СПІВВІДНОШЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТА КОЛЕКТИВНОГО В ПОПУЛЯЦІЙНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Волошин В.С.

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

У роботі запропоновано концептуальний підхід щодо дослідження взаємозв'язку між колективною координацією та індивідуальною автономією в екосистемах на основі біологічних популяцій в сенсі аналізу структури інформаційних потоків і механізмів зворотного інформаційного зв'язку (ЗІЗ). Вихідною передумовою дослідження є положення про те, що адаптивність будь-якої спільноти, як структурної частини екосистеми, що впливає на неї, визначається не лише обсягом інформаційного обміну між її членами, а й характером організації зворотних інформаційних зв'язків. Сформульовано гіпотезу, згідно з якою рівень індивідуалізації визначається не абсолютною інтенсивністю інформаційного обміну, а часткою персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку в популяції. Аналіз відомих досліджень показав, що високий рівень інформаційного обміну може породжувати принципово різні форми організації залежно від ступеня персоналізації комунікації. Показано, що зі зростанням складності інформаційної мережі виникають колективні властивості, які не можуть бути пояснені лише індивідуальними характеристиками окремих членів екосистеми. Особливу увагу приділено так званому «мурашиному парадоксу», відповідно до якого низька індивідуалізація може поєднуватися з високою колективною ефективністю, тоді як в умовах більшості з інших екосистем, висока індивідуалізація забезпечує значні творчі та інноваційні можливості її суб'єктів, але підвищує витрати на координацію спільних дій. Зроблено висновок про існування фундаментального компромісу між колективною ефективністю та індивідуальною автономією, який визначається структурою інформаційних потоків усередині біологічної екосистеми. Практичним результатом роботи є передбачене розділення двох інформаційних контурів: деперсоналізованого контуру колективної координації та персоналізованого контуру індивідуального розвитку, що лягло в основу розробленої соціально-біонічної моделі адаптивності суспільства. Показано, що використання принципів організації мурашиних суперорганізмів у сфері координації спільних дій за одночасного збереження високого рівня людської індивідуалізації створює передумови для підвищення ефективності управління, інноваційності та стійкості екосоціальних систем. *Ключові слова:* соціальність екосистеми, зворотний інформаційний зв'язок, індивідуалізація, колективний інтелект, інформаційні потоки, соціально-біонічна модель, адаптивні екосистеми.

Feedback as a Factor in the Relationship between Individualism and Collectivism in Population Ecosystems. Voloshyn V.

This paper proposes a conceptual approach to investigating the relationship between collective coordination and individual autonomy in ecosystems based on biological populations through the analysis of information-flow structures and feedback mechanisms. The study is founded on the premise that the adaptability of any community, as a structural component of an ecosystem that influences its functioning, is determined not only by the volume of information exchange among its members but also by the way feedback processes are organised.

A hypothesis is formulated according to which the degree of individualisation is determined not by the absolute intensity of information exchange but by the proportion of personalised feedback within a population. An analysis of existing studies demonstrates that a high level of information exchange can give rise to fundamentally different forms of organisation depending on the degree of communication personalisation. It is shown that, as the complexity of an information network increases, collective properties emerge that cannot be explained solely by the individual characteristics of separate members of the ecosystem.

Particular attention is paid to the so-called “ant paradox”, according to which a low level of individualisation may coexist with high collective efficiency, whereas in most other ecosystems a high degree of individualisation provides substantial creative and innovative capacities for their agents but increases the costs of coordinating collective actions.

The study concludes that a fundamental trade-off exists between collective efficiency and individual autonomy, a trade-off determined by the structure of information flows within a biological ecosystem. The practical outcome of the research is the proposed separation of two information circuits: a depersonalised circuit of collective coordination and a personalised circuit of individual development. This distinction forms the basis of the developed socio-bionic model of societal adaptability. It is demonstrated that applying the organisational principles of ant superorganisms to the coordination of collective actions, while simultaneously preserving a high degree of human individualisation, creates conditions for enhancing governance effectiveness, innovativeness, and the resilience of eco-social systems. *Key words:* ecosystem sociality, feedback, individualisation, collective intelligence, information flows, socio-bionic model, adaptive ecosystems.



Постановка проблеми. Сучасні дослідження переважно зосереджені на вивченні інтенсивності інформаційного обміну або механізмів колективної поведінки окремих частин біологічних екосистем. Значно менше уваги приділяється ролі персоналізації зворотного інформаційного зв'язку як чинника формування індивідуальної автономності та колективної координації. Актуальним є пошук універсальних підходів до опису взаємозв'язку між колективними та індивідуальними формами організації таких екосистем.

Актуальність дослідження. Стрімке зростання складності сучасних соціальних екосистем потребує нових підходів до поєднання ефективної координації та збереження індивідуальної свободи, як засобів резистивності таких екосистем. Дослідження інформаційних механізмів, які лежать в основі колективної поведінки біологічних популяцій, відкриває можливості для створення більш адаптивних моделей суспільного розвитку екосистем, які їх поєднують.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Результати роботи можуть бути використані для дослідження колективного інтелекту, розвитку адаптивних систем управління, проектування соціальних мережевих структур та вдосконалення моделей суспільної координації в умовах збереження екологічних балансів у сучасному світу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Будь-яка популяція живих організмів, як невід'ємна частина екосистеми, в якій вони існують через обмін інформацією між особинами [1, 2, 3], і завдяки якій вони впливають на зовнішнє середовище. Основні канали передачі інформації серед живих істот можуть включати: хімічні сигнали (феромони); акустичні сигнали; зорові сигнали; тактильні контакти; електромагнітні сигнали; мовні комунікації. Водночас принципово важливим є не лише факт передачі інформації, а й наявність механізмів її повернення до джерела у вигляді реакції адресата [1]. Саме цей процес ми називатимемо зворотним інформаційним зв'язком (ЗІЗ). У технічній кібернетиці зворотний зв'язок є фундаментальною властивістю керованих систем [4]. У біології аналогічний механізм визначає координацію поведінки особин всередині популяції [1, 5, 6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо дослідженим залишається питання впливу ступеня персоналізації зворотного інформаційного зв'язку на співвідношення між колективною ефективністю та індивідуальною автономією серед особин у різних екосистемах.

Наукова новизна. Полягає у висуненні гіпотези про визначальну роль частки персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку у формуванні рівня індивідуалізації, та розробленні концептуальної соціально-біонічної моделі, що поєднує механізми колективної координації й індивідуальної автономії в межах однієї екосистеми.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід створює основу для міжвидового порівняльного аналізу інформаційної організації біологічних екосистем за допомогою єдиної системи концептуальних показників.

Викладення основного матеріалу.

В якості екосистеми, що досліджується, розглядаємо біологічну популяцію в оточенні її інформаційного супроводу, завдяки якому поведінка популяції взаємодіє з навколишнім середовищем шляхом створення зворотного інформаційного зв'язку.

Методика дослідження. Розглянемо соціально-біонічну модель поведінки популяції та окремої її особи через структуру мережі інформаційних взаємодій між особинами (рис. 1). Допустимо, що кожна особина має можливість спілкування з іншими особинами. Тоді популяцію можна представити у вигляді графа, де вершини – це особи, а ребра – активні взаємодії між ними. Чим більше активних зв'язків, тим вище колективність поведінки.

На це в моделі показує коефіцієнт колективності, як відношення поточної кількості активних зв'язків між особинами $L(t)$ до максимально можливої кількості зв'язків для даної популяції L_{max} у часовому вимірі t

$$C(t) = L(t) / L_{max}. \quad (1)$$

Фактичний коефіцієнт колективності вимірюється за станом мережі в діапазоні $0,0 < C(t) < 1,0$. Якщо дві особи регулярно взаємодіють, це вважається за один повний зв'язок.

Для визначення альтернативного коефіцієнту індивідуалізації особи запропонуємо інший умовний параметр (I) такий, що його діапазон також обирається в межах $0,0 \leq I \leq 1,0$, де $I = 0$ означає, що особина практично не здатна діяти автономно, а значення $I = 1,0$ показує на те, що особина здатна приймати складні незалежні рішення та може діяти всупереч груповій поведінці. Показник I може оцінюватися, зокрема, через такі властивості, як автономність прийняття рішень (A), поведінкову варіабельність (V), здатність до навчання (L), рівень соціальної незалежності і когнітивної складності (Q)

$$I = \frac{A + V + L + Q}{4}. \quad (2)$$

Для біологічних систем важливим є механізми поведінкової синхронізації, як основа для прояви колективних дій, оскільки колонія мурах, зграя птахів, косяк риб або людська спільнота можуть мати однакову кількість зв'язків, але принципово різний рівень синхронізації поведінки. Тому третім базовим параметром вважаємо коефіцієнт синхронізації $S(t)$ ($S = 0$ – повна неузгодженість дій, $S = 1$ – повна синхронізація). У цілому, для популяції з N особин

$$S(t) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (3)$$

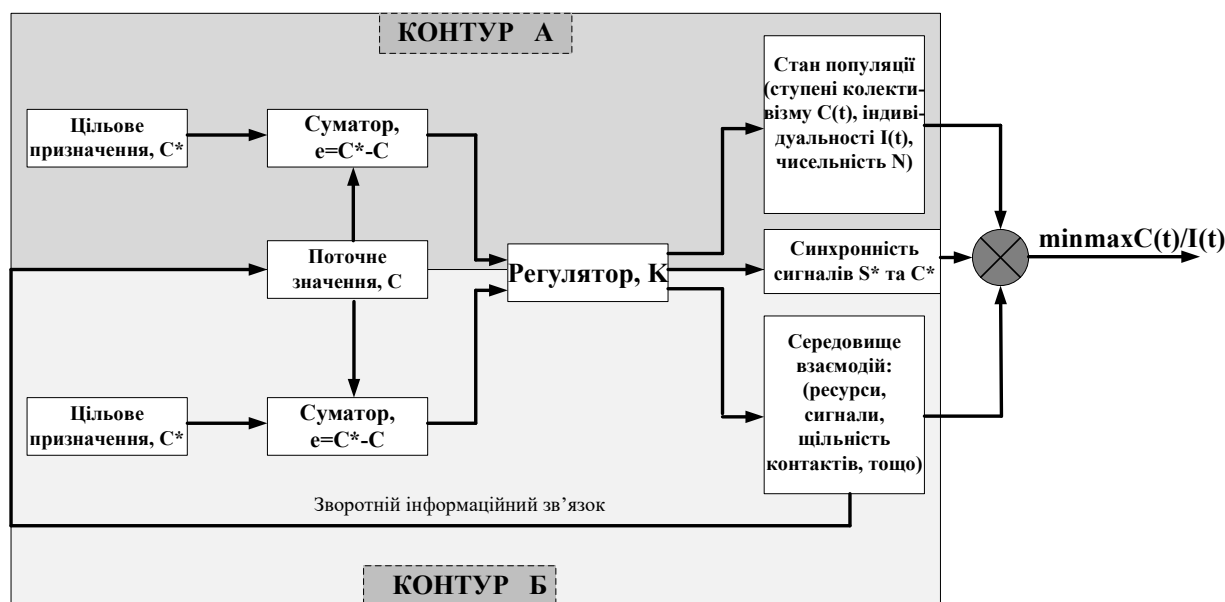


Рис. 1. Типова схема соціально-біонічної моделі взаємодій всередині біологічної екосистеми з урахуванням зворотного інформаційного зв'язку

де ϕ – фаза поведінкового стану, відповідно i – i та j – j особин.

Для оцінки узгодженості автономних рішень особин потрібний показник синхронізації $S_i = 1 - \sigma_i$, де $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_N (I_i - \bar{I})^2}$, а I_i – індивідуальність особини, $\bar{I}$ – середня індивідуальність популяції. Значення $S_i = 1$ відповідає узгодженості індивідуального рішення в групі, $S_i = 0$ – це хаотичні рішення.

На підставі досвіду досліджень лабораторії *Ofer Feineman* Інституту Вайцмана [5], для визначення показника зворотного інформаційного зв'язку (ЗІЗ) пропонується умовний коефіцієнт (F_S), що має синхронізовану комплексну залежність:

$$F_S = C \cdot R \cdot D \cdot S. \quad (4)$$

Він може оцінюватися як ефективність ЗІЗ з урахуванням синхронізації через кількість синхронізованих каналів комунікації ($S = 0,0 - 1,0$), так і швидкість синхронізованої передачі сигналу ($R = 0,0 - 1,0$), індивідуальну адресність повідомлень ($D = 0,0 - 1,0$), складність змісту повідомлень ($C = 0,0 - 1,0$).

Наприклад, складність повідомлення (C) оцінюється кількістю різних типів сигналів: для мурах це приблизно 25–50 феромонних сигналів, для людини – десятки тисяч слів, граматики, абстракції. Тому у мурах умовно $C \approx 3,3 - 4,0$, а для людини приймаємо $C \approx 0,9 - 1,0$. Швидкість відповіді (R), це час між сигналом і реакцією. Наприклад, для мурах швидкість зворотного зв'язку складає секунди або хвилини [3], а для людини – частки секунди [7]. Адресність повідомлення (D) пока-

зує рівень спрямованості повідомлення до конкретної особини.

Якщо в популяції N особин і кожна може взаємодіяти з будь-якою іншою, то $L_{max} = \frac{N(N-1)}{2}$. У схемі зворотного інформаційного зв'язку, що показана на рис. 1: C^* – задане цільове значення колективності, наприклад, $C^* = 0,7$ означає, що бажано мати 70 % від максимально можливої кількості зв'язків. Помилка управління для популяції в моделі визначається, як

$$e(t) = C^* - C(t). \quad (5)$$

Якщо $e(t) > 0$, це означає недостатність колективності для популяції, а $e(t) < 0$ означає надто велику колективність. Позначимо коефіцієнт посилення для регулятора співвідношення $e(t)/C(t)$ як K . Він визначає, наскільки міцно система реагує на помилку. Показник керуючого впливу від K в моделі означимо як $u(t)$. Це може бути збільшення кількості загального інформаційного ресурсу, посилення інформаційного обміну або радіусу комунікації, введення кооперативних стимулів. Таке управління безпосередньо впливає на кількість інформаційних зв'язків. Тоді у загальному вигляді рівняння

$$\frac{dL}{dt} = \gamma u - \delta L \quad (6)$$

визначимо, як швидкість зміни кількості зв'язків, де γ – ефективність керуючого впливу, δ – швидкість руйнування зв'язків, u – керуючий сигнал.

Замикання зворотного зв'язку формує регулятор K і керуючий сигнал для впливу синхронізації на зворотній інформаційний зв'язок показує на спів-

відношення базового рівня синхронізації і колективності ($S^* i C^*$) з поточними їх рівнями. Запишемо $u = K(C^* - C) + K_S(S^* - S)$, де K_S – коефіцієнт посилення синхронізації. Тоді (6) перетворюється у

$$\frac{dL}{dt} = \gamma \left[K \left(C^* - \frac{L}{L_{max}} \right) + K_S (S^* - S) \right] - \delta L \quad (7)$$

і відображає повне рівняння для замкнутої екосистеми з синхронізованим негативним зворотним інформаційним зв'язком, як вплив на зовнішнє середовище. Тут γ – здатність популяції реагувати на стимули (велике γ – зв'язки виникають швидко, малі значення γ – популяція інертна). δ – характеризує забування і розпад взаємодій (велике значення δ – це зв'язки нестабільні, обмаль δ – взаємодії довгогострокові). K – характеризує міцність управління. Якщо K занадто велике, можливі коливання в системі управління (рис. 2, поз 1), якщо K – помірне, система плавно виходить на результат (рис. 2, поз 2).

Результати дослідження.

Припустимо, що система бажає підтримувати 80% можливих зв'язків ($C^* = 0,8$).

Випадок 1. Реальне значення для системи $C = 0,5$. Тоді помилка $e = 0,8 - 0,5 = 0,3$ – позитивна. Регулятор K збільшує $u > 0$ і кількість зв'язків починає зростати. Рівень колективності L починає зростати.

Випадок 2. Реальне значення для системи $C = 0,95$. Помилка $e = 0,8 - 0,95 = -0,15$ негативна. Отримуємо $u < 0$ – це показує, що створення нових зв'язків пригнічується, а старі зв'язки поступово зникають через член δL . Колективність поведінки зменшується, але підвищується ступінь індивідуальності кожної особини.

Водночас, ефективність синхронізованого зворотного інформаційного зв'язку напряму залежить від кількості синхронізованих каналів комунікацій між особинами (рис. 3).

У такій системі зворотний зв'язок передає інформацію про стан популяційної мережі ланцюжком

$$L(t) \rightarrow C(t) \rightarrow e(t) \rightarrow u(t) \rightarrow L(t) \quad (8)$$

Тобто система постійно вимірює ступінь зв'язності популяції, порівнює її з потрібним рівнем завдяки ЗІЗ і змінює умови взаємодії таким чином, щоб їх мережа самоналагоджувалася до потрібного рівня організації. Саме такі умови існування зворотного інформаційного зв'язку в популяції. При цьому коефіцієнт індивідуальної поведінки будь якої особини вимірюється як $I = 1 - C$. У контурі зворотного інформаційного зв'язку управління фактично змінює число зв'язків L . Через це автоматично змінюються обидва коефіцієнти за формулами

$$L \uparrow \Rightarrow C \uparrow \Rightarrow I \downarrow \text{ та } L \downarrow \Rightarrow C \downarrow \Rightarrow I \uparrow. \quad (9)$$

Тому систему можна регулювати за одним з цих коефіцієнтів, як взаємопов'язаних один до одного й того ж самого процесу – ступені включеності особин у спільну мережу взаємодій.

Максимальна адаптивність в популяції (див. рис. 3) виникає не при максимальному колективізмі чи індивідуалізмі, а поблизу їхнього балансу за наявності високої синхронізації та якісного зворотного інформаційного зв'язку. Саме цей висновок логічно розширює вихідну соціально-біонічну модель до наступної первинної гіпотези щодо взаємодії індивідуального та колективного в поведінці як єдиної особини, так і в поведінці групи таких же особистостей, з урахуванням специфіки зворотного інформаційного зв'язку між особинами, чи групами. Тут вочевидь коректною може стати така формула:

«Індивідуалізація визначається не величиною загального зворотного інформаційного зв'язку, а часткою індивідуально адресованого ЗІЗ».

Таким чином, високий ЗІЗ може існувати як у мурашнику, так і в людському суспільстві. Різниця полягає у характері його розподілу. У мурах ЗІЗ

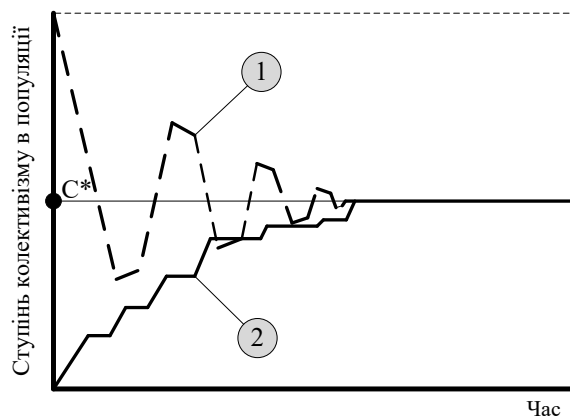


Рис. 2. Динаміка впливу ступеня колективізму за міцністю усвідомленого та неусвідомленого управління

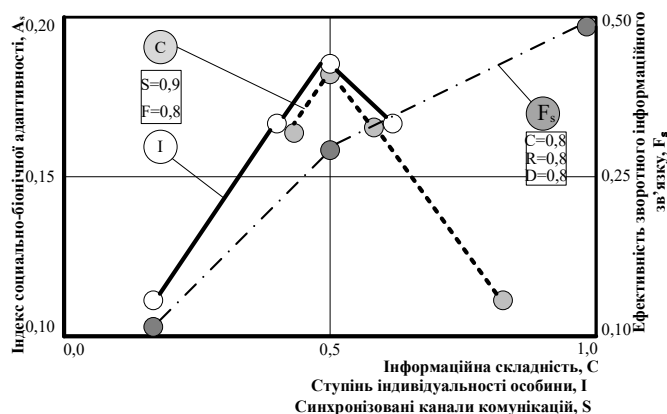


Рис. 3. Узагальнений індекс соціально-біонічної адаптивності популяції зі ЗІЗ у екосистемі

переважно колективний, а у людей *ЗІЗ* переважно індивідуальний та відокремлений.

Початково позначимо: P – частка персоналізованого *ЗІЗ*. Тоді можна показати, що коефіцієнт індивідуалізації може виникати і через механізми *ЗІЗ*

$$I = k \cdot P \cdot F \quad (10)$$

де: k – нормувальний показник.

Для порівняльного аналізу запропонуємо евристичну спрощену формальну модель поведінки, яка отримана емпіричним шляхом на підставі досліджень [8, 9]

$$I = 10^{1-\alpha} \cdot P \cdot (F)^\alpha \quad (11)$$

де вже F – відображає загальний рівень *ЗІЗ*, а P – частка індивідуалізованої комунікації при ньому, показник $\alpha \approx 1,0 - 1,5$ прийнятий таким чином, щоб підкреслити сильніший вплив соціальної складності за лінійної залежності.

Ми звернемося до так званого мурашиного парадоксу. Саме тут міститься найбільш цікава частина концепції, що викладається в роботі.

Мурахи в межах колонії (або навіть у суперорганізми) мають низьку індивідуалізацію, високу колективну ефективність. Навпаки, люди забезпечені високим рівнем індивідуалізації та індивідуальної ефективності.

Дослідження лабораторії *Ofer Feinerman* Інституту Вайцмана [5] показали, що за умов обмеженої комунікації (≈ 50 сигналів) великі групи мурах

можуть ефективніше вирішувати окремі задачі колективної навігації, ніж людські групи аналогічного масштабу зі значно ширшими комунікаційними можливостями. Проте окремі люди перевершують окремих мурах на індивідуальному рівні.

Це підтверджує, що еволюція створила два різних шляхи досягнення адаптивності: через колективний «інтелект» (на прикладі мурах) і через індивідуальний інтелект (на прикладі людської спільноти). Тому об'єктивність твердження, що «Еволюційна історія живих систем може бути описана як безперервний пошук балансу між колективною координацією та індивідуальною автономією» не підлягає сумніву. Але ж рівень цього балансу визначається структурою інформаційних потоків у будь якій біологічній популяції та характером зворотного інформаційного зв'язку між її складовими, заради впливу на зовнішнє середовище.

Для визначення міста та ролі *ЗІЗ* у моделях розвитку біологічних популяцій розглянемо деякі експериментальні результати, що наведені в науковій літературі, які стосуються предмету нашого дослідження (табл. 1). Дані цих досліджень здатні ілюструвати не тільки головну мету цих експериментів, але й надати деякі побічні результати, щодо співвідношення колективного та індивідуального в інформаційних контактах найбільш відомих популяцій.

За експериментом [10], автори показали, що колективне «поле зору» групи збільшується з числом учасників і навіть логарифмічне збільшення радіуса колективного зондування дає різке прискорення про-

Таблиця 1

Вихідні дані щодо деяких поведінкових експериментів, згідно літературних джерел

Назва експерименту і адреса публікації	Початкові дані для експерименту
«Навігаційний лабіринт» [10]	Штучний лабіринт із випадково розміщених перешкод площі 70×50 см; випадково розташовані кубічні перешкоди; мурахи виду: <i>Paratrechina longicornis</i> транспортували вантаж до гнізда. Вимірювані параметри швидкість знаходження маршруту, ефективність навігації, кількість помилкових маневрів, вплив комунікації між особинами, залежність успіху від складності середовища. Основні результати: час проходження лабіринту; щільність перешкод; довжину маршруту; ефективність навігації.
«Лідер без авторитету» [11]	Модель: мала частина зі 100 особин знає правильний напрямок, але більшість особин не «поінформована». Поінформовані особини знали правильний напрямок, решта не знали напрямку і просто підтримували згуртованість групи. У групі ніхто не знає, хто саме володіє інформацією, тому немає явного авторитету. Вовки, примати, люди
«Конфлікт сигналів» [12]	Модель: риба пропонувала альтернативні напрями руху. У групі були особини з інформацією та особини без інформації. Вивчався механізм кворуму. Риба одночасно отримувала: власну інформацію про напрямок; соціальний сигнал від косяка. Сигнал А: «пливи сюди», сигнал Б: «група рухається туди». Вимір: наскільки часто виникає нестандартна поведінка. Саме це буде одним із індикаторів індивідуалізації.
«Примати і люди – конфлікт соціального та особистого сигналів» [13]	Умови експерименту: людина бачить правильну відповідь. Група людей демонструє неправильну відповідь. Отже сигнал А: власне сприйняття; сигнал Б: соціальний консенсус.
«Конфлікт сигналів + колективне рішення» [14]	Умови експерименту: кожній рибі демонстрували різну якість інформації. Вивчалася: чи буде рішення групи відповідати середньому значенню індивідуальних оцінок.

ходження лабіринту (високий F – інтенсивний обмін інформацією, при дуже низькому P – майже відсутня адресність сигналів пояснюється низькою індивідуалізацією всередині колонії).

За експериментом [11] встановлено, що 5–10 % поінформованих особин здатні цільовим образом переорієнтувати 90–95 % неінформованих. Це показує, що високий інформаційний потік сам по собі не гарантує конформізм. Важливою стає структура передачі інформації, зокрема, механізми ЗІЗ.

За експериментом [12] автори виявили деякі порогові значення між F та I . Для наших оцінок це означає, що між індивідуальним та соціальним сигналами існує нелінійна точка переключення, що можна інтерпретувати як перехід між низьким та високим I .

Розглянемо систему «примати – люди» [13]. Формальний результат експерименту показує, що приблизно третина рішень була конформною, ще дві третини залишалися незалежними. Саме це можна умовно трактувати як емпіричний вимір визнаного показника індивідуалізації I для людської системи.

У експерименті типу «Конфлікт сигналів + колективне рішення» [14] автори встановили, що точність колективного рішення зростала з розміром групи. Для великих груп консенсусне рішення було суттєво точнішим за рішення окремої особини, або обмежених груп. Особливо важливо, що група не просто голосувала більшістю. Виникав процес суцільної інтеграції інформації між особинами, але без ЗІЗ.

Таким чином, вже існуючі окремі експерименти показують на результати, які не суперечать запропонованій гіпотезі, де вирішальним фактором для колективності/індивідуальності може бути не абсолютний обсяг інформаційного обміну, а ступінь його

персоналізації. Саме таких даних сьогодні бракує в єдиному міжвидовому дослідженні. Інтегральний результат цих та інших досліджень, що ілюструють це, показано в таблиці 2.

З цього випливає конкретний результат, що стосується запропонованої гіпотези (табл. 3).

Зростання чисельності мурах в 100 разів підвищує функціональність майже у 1000 разів (рис. 4). Саме тому, великі мурашині колонії здатні будувати дороги, вирощувати грибні ферми, підтримувати складний поділ праці. При такому ж зростанні чисельності риб у косяку їх колективний інтелект підвищується у 150 разів, його вистачає для уникнення хижаків, синхронних рухів, пошуку їжі, але без накопичення знань. У приматів, за рахунок появи соціального навчання і передачі знань між поколіннями рівень індивідуалізму вищий – зростання більш ніж 250 разів, при зростанні чисельності зграї у 1000 разів. З урахуванням здатності до накопичення знань попередніх поколінь, інтелект окремої людини майже не змінюється у короткому історичному часі, але змінюється мережа. Навіть опосередкований вимір інтелекту людини (див. рис. 4) показує на добрий проксі для колективної когнітивної продуктивності, навіть незважаючи на певну невизначеність індивідуалізму в межах малих груп ($\alpha \approx 1,15$). Але зі збільшенням населення у 1000 разів це дає розрахункове майже 4000-кратне зростання колективної інтелектуальної потужності.

Але ж це тільки концептуальна модель: для різних видів особин значення I визначатиметься у ширших діапазонах і по-різному (успішність полювання, швидкість пошуку їжі, інновації, обсяг знань тощо). Найбільш перспективна форма гіпотези, що нада-

Таблиця 2

Опосередковані результати експериментів які описані в роботах [1-5] і стосуються проблеми ЗІЗ

Система	Загальний інформаційний обмін F	Рівень персоналізації, P	Рівень автономності, I
Мурахи	Високий	дуже низький	Низька
косякові риби	Середній	Низький	Середня
вовки/примати	Високий	Середній	Висока
Люди	дуже високий	дуже високий	дуже висока

Таблиця 3

Підсумок деяких експериментів із цільовим призначенням до мети даної роботи

Вид популяції	Назва експерименту	Аналітичний результат
Мурахи	№ 1 «Навігаційний лабіринт»	логарифмічне збільшення колективного зондування різко підвищує швидкість навігації
Косякові риби	№ 2 «Лідер без авторитету»	групове рішення стає точнішим за індивідуальне
Узагальнені тваринні групи (Couzin)	№ 2 «Лідер без авторитету»	5–10 % інформованої меншості достатньо для керування всією групою
Косякові риби	№ 3 «Конфлікт сигналів»	існує поріг кворуму, після якого відбувається швидкий перехід до консенсусу

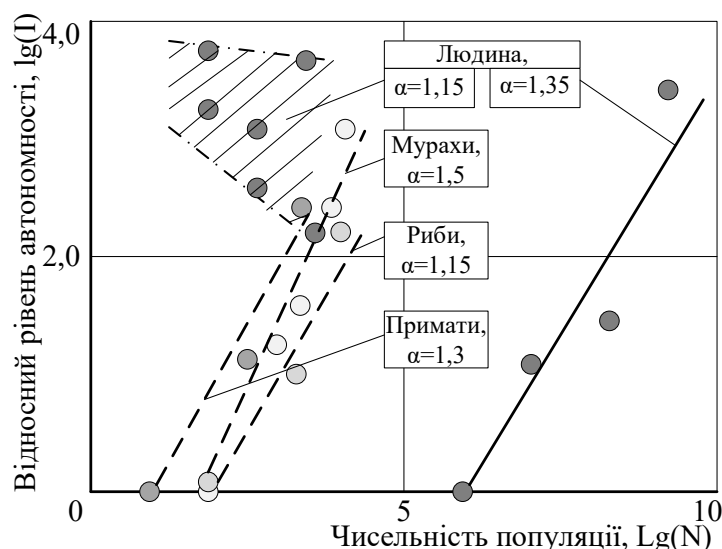


Рис. 4. Динаміка зміни рівнів індивідуальності для певних популяцій в процесі їх взаємодії зі зовнішнім середовищем

ється, і яка відповідає експериментальному підтвердженню, має вигляд:

«Із зростанням частки персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку в популяції зростає поведінкова автономність (індивідуалізація) окремих особин, але водночас зменшується швидкість формування єдиного колективного рішення».

Прийнята гіпотеза, як робоча теоретична основа, дозволяє зробити нетривіальний висновок: *проблема людського суспільства полягає не в надлишку індивідуалізму чи колективізму як таких, а в неоптимальній структурі інформаційних потоків між людьми в колективі.*

У межах запропонованої гіпотези звернемося до соціально-біонічної моделі адаптивного суспільства (див. рис. 1). Основні результати, що показує така модель, зведемо до поведінкової соціально-біонічної інтерпретації (таблиця 4). Центральний узагальнений принцип такої моделі сформулюємо так: *«в оптимальному стані суспільство не придушує індивідуальність, а мінімізує витрати на її координацію через ефективні системи зворотного інформаційного зв'язку».*

Важливіший механізм у запропонованій гіпотезі базується на принципі двоконтурного інформаційного обміну, коли, наприклад, людське суспільство в біонічній моделі повинно мати два незалежні інформаційні контури (див. рис. 1).

Контур А, це колективна координація, де інформація максимально деперсоналізована без механізмів ЗІЗ. Наприклад будь які штучні мережі: транспорт; енергетика; логістика; міське планування. Цей контур повинен працювати за логікою типового мурашника.

Контур Б, це індивідуальний розвиток за рахунок максимально розвинуеного персоналізованого зво-

ротного інформаційного зв'язку. Наприклад: освіта; наука; творчість; підприємництво; особистісний розвиток. Цей контур працює, наприклад, за логікою людської індивідуальності.

Таке співвідношення може існувати і для мурашиної колонії, тільки з акцентом «навіпаки».

Ці положення легко узагальнити у вигляді аргументованої таблиці порівняння колективних і індивідуальних здібностей для двох популяцій з діаметрально протилежними початковими даними (табл. 5).

Основний результат моделі в біонічному аспекті для людини може мати таке формулювання.

«Ефективність суспільства максимізується тоді, коли деперсоналізований інформаційний обмін використовується для координації спільних дій, а персоналізований зворотний інформаційний зв'язок використовується для розвитку індивідуальної поведінкової автономії».

Головною ідеєю такої, що впливає з соціально-біонічної моделі для людської спільноти, є не наслідування мурахам як колективістичним істотам, а перенесення в людське суспільство їхнього механізму дешевої та швидкої координації, зберігаючи при цьому високий рівень індивідуалізації, який забезпечується персоналізованим зворотним інформаційним зв'язком. Саме така комбінація теоретично дозволяє одночасно досягати високої інноваційності людських спільнот і високої ефективності колективних дій.

Головні висновки і перспективи використання результати дослідження.

1. Запропоновано концептуальний підхід до аналізу біологічних екосистем через структуру зовнішніх інформаційних потоків, у якій взаємодія між колективною координацією та індивідуальною автоно-

Таблиця 4

Основні положення поведінкової соціально-біонічної інтерпретації для деяких популяцій

Принцип суперорганізму мурах	Соціально-біонічна інтерпретація для людини	Очікуваний ефект
Сигнал важливіший за відправника	Оцінюється зміст інформації, а не статус людини	Зниження культу авторитетів
Колективне рішення виникає з локальних взаємодій	Більшість рішень приймається на нижчому рівні організації	Зменшення бюрократії
Відсутність єдиного центру управління	Поліцентричне управління суспільством	Підвищення стійкості системи
Постійний зворотний зв'язок	Безперервний моніторинг наслідків рішень	Швидка корекція помилок
Феромонне підсилення успішних маршрутів	Автоматичне масштабування успішних практик	Прискорення інновацій
Зникнення неефективних маршрутів	Автоматичне припинення неефективних програм	Економія ресурсів
Простота локальних правил	Прості та зрозумілі суспільні процедури	Зниження транзакційних витрат
Розподілене виявлення проблем	Кожен громадянин є джерелом інформації	Підвищення адаптивності
Паралельний пошук рішень	Заохочення багатьох альтернатив одночасно	Підвищення інноваційності
Гнучкий розподіл функцій	Тимчасові ролі замість жорстких статусів	Зростання соціальної мобільності

Таблиця 5

Узагальнюючі дані для соціально-біонічної моделі людської спільноти та мурашиної суперколонії

Параметр	Мурашиний суперорганізм	Сучасне людське суспільство	Запрограмовано соціально-біонічною моделлю
Загальний інформаційний обмін (F)	Дуже високий	Дуже високий	<i>Дуже високий</i>
Персоналізація (P)	Дуже низька	Дуже висока	<i>Диференційована</i>
Автономність (I)	Низька	Висока	<i>Висока</i>
Швидкість колективних рішень	Дуже висока	Середня	<i>Висока</i>
Інноваційність	Низька	Висока	<i>Висока</i>
Стійкість системи	Дуже висока	Середня	<i>Дуже висока</i>
Вартість координації	Дуже низька	Висока	<i>Низька</i>
Залежність від лідерів	Майже відсутня	Висока	<i>Низька</i>
Адаптивність до кризи	Висока	Середня	<i>Висока</i>
Баланс колективізму та індивідуалізму	Колективізм	Індивідуалізм	<i>Динамічний баланс</i>

мією особин описується через параметри зворотного інформаційного зв'язку (F) та індивідуалізації (I).

2. На підставі аналізу експериментальних даних показано, що однаковий або навіть високий рівень інформаційного обміну може породжувати принципово різні форми організації – від колективного інтелекту мурашиних колоній до індивідуалізованих людських спільнот.

3. Висунуто гіпотезу, що рівень індивідуалізації визначається не загальним обсягом інформаційного обміну, а часткою персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку в популяції.

4. На основі запропонованої гіпотези сформульована соціально-біонічна модель, у якій колективність та індивідуальність між особинами є взаємопов'язаними станами мережі взаємодій, що регулюються механізмом зворотного інформаційного зв'язку.

5. Модель показує, що керування інформаційною зв'язністю в межах екосистеми забезпечує самоналаштування балансу між кооперацією та індивідуальною адаптацією. Це дає підстави розглядати інформаційну зв'язність, як самостійний екологічний фактор стійкості, адаптивності та інноваційного розвитку сучасних соціоекосистем.

Література

1. Edward O. Wilson, Bert Hölldobler. Dense Heterarchies and Mass Communication as the Basis of Organization in Ant Colonies. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 3, No. 3, 1988, pp. 65–68. DOI: 10.1016/0169-5347(88)90018-3.
2. Hölldobler B., Wilson E. O. *The Superorganism*. New York: W.W. Norton, 2009. 522 p. <https://wnorton.com/books/The-Superorganism>
3. Dreyer T., Feinerman O. et al. Comparing Cooperative Geometric Puzzle Solving in Ants versus Humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 122(1), 2025. DOI: 10.1073/pnas.2414274121.
4. Wiener N. *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MA: MIT Press. Cambridge, 2019. 352 p. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/11810.001.0001>
5. Feinerman O., Korman A. Individual versus Collective Cognition in Social Insects. 2017. Vol. 220, No. 1. Pp. 73–82. DOI: 10.1242/jeb.143891. Доступ: <https://doi.org/10.1242/jeb.143891>
6. Rosenberg L., Willcox G., Schumann H., et al. Towards Collective Superintelligence: Amplifying Group IQ Using Conversational Swarms. *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2024)*. Angers, France, 2024. Vol. 1. Pp. 759–766. DOI: 10.5220/0012687500003690.
7. Di Caro G., Dorigo M. AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 1998. Vol. 9. Pp. 317–365. DOI: 10.1613/jair.530.
8. Волошин В. С., Данилова Т. Г. Про один порівняльний критерій по відношенню до певних екосистем, людини і створених нею систем штучного інтелекту. *Екологічні науки*. № 59. Київ, 2025.
9. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Ентропійний фактор у прояві властивостей органічних і неорганічних систем на межі співіснування людини та навколишнього середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. № 52, Дніпро, 2025. С. 151-157
10. Gelblum A., Fonio E., Rodeh Y., Korman A., Feinerman O. Ant collective cognition allows for efficient navigation through disordered environments. *eLife*, Vol. 9, 2020. DOI: 10.7554/eLife.55195
11. Couzin I.D., Krause J., Franks N.R., Levin S.A. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature*, 433(7025), 2005. pp. 513–516. DOI: 10.1038/nature03236
12. Ward A.J.W., Sumpter D.J.T., Couzin I.D., Hart P.J.B., Krause J. Quorum decision-making facilitates information transfer in fish shoals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. DOI: 10.1073/pnas.0710344105
13. Asch, S. E. Opinions and Social Pressure. *Scientific American*. 1955. Vol. 193, No. 5. Pp. 31–35. DOI: 10.1038/scientificamerican1155-31.
14. Sumpter D.J.T., Krause J., James R. et al. Consensus decision making by fish. *Current Biology*, 18(22), 2008, pp. 1773–1777. DOI: 10.1016/j.cub.2008.09.064.

Дата першого надходження статті до видання: 02.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026