УДК 574
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.47

ІНФОРМАЦІЙНО-ДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКОСИСТЕМИ ЛЮДИНИ НА МЕЖІ АГРАРНОЇ РЕВОЛЮЦІЇ

Волошин В.С. (orcid.org/0009-0005-6809-6779),
Кленін О.В. (orcid.org/ 0000-0003-3146-4847)
Приазовський державний технічний університет
49000 вул. Гоголя, 29, 49000, м. Дніпро
vsvlshn52@gmail.com, vipsenat@gmail.com

У роботі досліджено особливості функціональної трансформації екосистеми людини на межі аграрної революції з позицій математичної екології та системного аналізу. Основну увагу приділено зміні ролі антропогенної інформації в регулюванні матеріальних, енергетичних і біологічних потоків у процесі переходу від привласнення природних ресурсів до керованого відтворення біологічної продукції. Запропоновано інформаційно-динамічну модель, яка враховує взаємодію природної та контрольованої біомаси, доступної ексергії, природної інформації, аграрної антропогенної інформації та чисельності населення. Для кількісної характеристики функціональних змін системи використано показники біологічного контролю, накопичення продовольства, аграрного надлишку та інформаційної інтенсивності управління. Сформульовано систему диференціальних рівнянь, що описує взаємозалежну динаміку основних компонентів екосистеми людини. На основі нормованих початкових умов і калібрувальних параметрів проведено модельний аналіз із застосуванням методу Рунге–Кутти четвертого порядку. Отримані результати ілюструють можливість формування аграрного режиму, за якого посилення антропогенного контролю над біологічною продукцією супроводжується накопиченням продовольчих запасів і виникненням надлишку ресурсів. Показано, що визначальною характеристикою переходу є не абсолютний обсяг інформації, а її функціональна здатність забезпечувати регулювання відтворення біологічної продукції та організацію ресурсних потоків. Водночас модельні результати мають ілюстративний характер і не розглядаються як кількісна реконструкція конкретних археологічних процесів або встановлення універсальних історичних порогів. Проведено концептуальне зіставлення аграрного переходу з переходом від біосфери до ноосфери, що виявляє структурну аналогію посилення керуючої функції інформації за суттєвої відмінності масштабів і об'єктів регулювання. Запропонований підхід створює методологічну основу для подальшого дослідження інформаційних механізмів трансформації соціоприродних систем. *Ключові слова:* інформаційна динаміка; екосистема людини; аграрна революція; антропогенна інформація; функціональна здатність інформації.

Informational and dynamic features of the human ecosystem on the verge of the agrarian revolution. Voloshyn V., Klenin O.
The paper studies the features of the functional transformation of the human ecosystem on the verge of the agrarian revolution from the standpoint of mathematical ecology and system analysis. The main attention is paid to changing the role of anthropogenic information in the regulation of material, energy and biological flows in the process of transition from the appropriation of natural resources to the controlled reproduction of biological products. An information-dynamic model is proposed, which takes into account the interaction of natural and controlled biomass, available exergy, natural information, agrarian anthropogenic information and population size. For the quantitative characterization of functional changes in the system, indicators of biological control, food accumulation, agricultural surplus and information intensity of management are used. A system of differential equations describing the interdependent dynamics of the main components of the human ecosystem is formulated. On the basis of normalized initial conditions and calibration parameters, a model analysis was carried out using the Runge-Kutta method of the fourth order. The obtained results illustrate the possibility of forming an agrarian regime, in which the strengthening of anthropogenic control over biological products is accompanied by the accumulation of food stocks and the emergence of a surplus of resources. It is shown that the determining characteristic of the transition is not the absolute amount of information, but its functional ability to ensure the regulation of the reproduction of biological products and the organization of resource flows. At the same time, the model results are illustrative in nature and are not considered as a quantitative reconstruction of specific archaeological processes or the establishment of universal historical thresholds. A conceptual comparison of the agrarian transition with the transition from the biosphere to the noosphere is carried out, which reveals a structural analogy of strengthening the controlling function of information with a significant difference in the scale and objects of regulation. The proposed approach creates a methodological basis for further study of information mechanisms for the transformation of socio-natural systems. *Key words:* information dynamics; human ecosystem; agrarian revolution; anthropogenic information; functional capacity of information.

Постановка проблеми. Проблема дослідження полягає у необхідності визначення закономірностей трансформації екосистеми людини на межі аграрної революції та з'ясуванні ролі антропогенної інформації в переході від привласнення природної біологічної продукції до її цілеспрямованого відтворення й регулювання.

Актуальність дослідження. Аграрна революція стала одним із визначальних етапів еволюції екосистеми людини, оскільки спричинила перехід до

© Волошин В.С., Кленін О.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

керованого виробництва біологічної продукції, накопичення продовольчих запасів і формування нових форм соціальної організації. Важливим, проте недостатньо формалізованим аспектом цього переходу є зміна функціональної ролі антропогенної інформації, яка забезпечувала регулювання відтворення біологічних ресурсів, організацію праці та управління матеріальними й енергетичними потоками. Актуальність дослідження також визначається можливістю порівняльного аналізу аграрного переходу та переходу від біосфери до ноосфери як процесів посилення керуючої функції інформації за різних масштабів взаємодії суспільства з природним середовищем.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок пов'язаний із розвитком методології математичного моделювання соціоприродних систем, дослідженням механізмів антропогенного контролю над біологічною продукцією та розробленням кількісних підходів до аналізу взаємодії інформаційних, матеріальних, енергетичних і демографічних процесів в історичній динаміці екосистеми людини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На протязі всього історичного періоду існування екосистема людини переживала суттєві зміни – від еволюційних до чисто революційних, різних у часі, але таких що приводили людство до суттєвих змін у соціоекосистемі, економічному та інтелектуальному розвитку. До таких перетинів можна віднести послідовно когнітивну та аграрну революції, науково-технічну революцію та межу перетину від існування біосфери та ноосфери у чистому її розумінні В. І. Вернадського. Доцільно буде відмітити про існування однієї координати, яка супроводжувала всі ці зміни – це інформаційна складова суспільства в системі рушійних сил, що приводили екосистему з одного стану до іншого, більш сучасного.

Аграрна революція, це не випадкова або запрограмована дія в історії людства. На протязі тисячоліть вона поступово формувала зовсім іншу стратегію розвитку людства: від осілості та мисливства до землеробства та тваринництва [1, 2], від родо-племінного устрою до соціально згуртованого суспільства [3], від первинних зацікавлених обмінних стосунків до товарно-грошових відношень та HANPP [2], від тимчасових стоянок і печер до стаціонарних осель і міст. Все це не могло отримати розвитку без міцного антропогенного інформаційного потоку [4], який був в основі цієї революції, як її рушійна сила, наряду з енергетичними та матеріальними впливами [5], що різко змінили як суспільство, так і особисто кожну людину [6].

У узагальненому вигляді, можна сформулювати наступне: «*Революційний режим виникає тоді, коли інформація перестає переважно описувати наявний природний потік і починає систематично організовувати, передбачати та керувати його відтворенням*», що може бути центральним теоретичним результатом порівняння у вигляді трьох взаємозалежних режимів

«мисливсько-збиральницький→перехідний неолітичний→аграрно-соціаль-ний→біосферний→перехідний→ноосферний» [7]. Тут послідовно змінюється спосіб, яким людина використовує інформацію для управління потоками їжі, енергії, біомаси та праці, а надалі, змінюється спосіб, яким людство використовує інформацію для управління матеріальними, енергетичними та біосферними потоками планети [8].

Під час аграрної революції антропогенна інформація не виникає вперше [7]. Мисливці-збирачі вже володіли надзвичайно складним масивом екологічних знань, технологій, навичок, сезонних календарів і соціальних правил. Тому аграрний перехід треба моделювати як перебудову вже існуючої інформаційної структури та її зв'язку з матеріальними й енергетичними потоками, а не як просту появу інформації.

Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми. Недостатньо формалізованим залишається питання про те, як зміна функціональної ролі антропогенної інформації та її взаємодія з біологічними, енергетичними й демографічними процесами визначають перехід екосистеми людини від привласнення природної продукції до її керованого відтворення, накопичення та розподілу.

Наукова новизна роботи полягає в розробленні концептуального підходу до математичного моделювання екосистеми людини на межі аграрної революції, у межах якого антропогенну інформацію розглянуто як функціональний чинник регулювання відтворення біологічної продукції та організації ресурсних потоків.

Загальнонаукове значення. Загальнонаукове значення роботи полягає у формуванні системного підходу до дослідження історичних трансформацій екосистеми людини, який поєднує положення математичної екології, теорії динамічних систем і концепції інформаційної організації соціоприродних процесів.

Викладення основного матеріалу.

За основу дослідження приймемо типову модель екосистеми, що описана в роботах В. Г. Горшкова [9]

$$X(t)=\left(M(t),E_A(t),I_B,H(t)\right). \qquad (1)$$

Для межового режиму аграрної революції послідовно: M^* (похідна від М) – матеріальна компонента для аграрного переходу, як сума природно доступної біомаси M_N та штучно створеної біомаси M_C, яка перебуває під людським контролем: культурні рослини, свійські тварини, запаси продовольства (саме виникнення M_C означає, що частина біосферного потоку перестає бути просто природним ресурсом і стає керованим антропогенним запасом), $H(t)$– чисельність людської популяції. Правка по енергетичній координаті E_A показує, що для аграрної рево-

люції не треба брати всю сонячну енергію Землі. Потрібна енергія E_A (Вт) у вигляді доступної ексергії, яка може бути використана людською соціоприродною системою. До неї входять: енергія їжі, енергія людської праці, енергія тварин, енергія деревини та контрольованих біологічних процесів, а пізніше – енергія ремесл і транспорту

Тоді можна визначити P_E^{AG}, як потужність використання чи розсіювання доступної ексергії аграрною системою.

У такому сенсі природна інформація I_B концептуально близька до первинної моделі В. Г. Горшкова, як структурна інформація природної екосистеми. Для аграрного суспільства вона включає: біорізноманіття, сезонність, трофічні зв'язки, родючість ґрунтів, поведінку диких рослин та диких тварин. Це інформація, яка існує в самій екосистемі, незалежно від того, чи знає про неї людина. Тому аграрна революція – це не умовна інформаційна трансформація $I_B + I_A = I_A > 0$, а радше $I_H \to I_{AG}$, де: I_H – інформація мисливсько-збиральницького способу господарювання, I_{AG}, – інформація аграрного способу керування біологічними масами

Функціональну роль інформації змінено. Якщо у мисливця-збирача простіша інформація переважно відповідає на питання: «*Де, коли і як знайти те, що вже виробила екосистема?*», то в аграрній системі така інформація відповідає на інше питання: «*Як змусити екосистему виробити потрібний нам біологічний продукт у потрібному місці й у потрібний час*?». Це фундаментальна поправка у моделі (рис. 1).

Відбувається перехід від інформації про природний потік до інформації, що керує природним потоком за рахунок штучних його здобутків. Тому виникає новий набір координат у вигляді тієї ж самої моделі (1) з урахуванням вищеозначених інтерпретацій змінних $M^*(t) = M_N + M_C$ та $E_A^*(t)$:

$$X(t) = \left(M^*(t), E_A^*(t),, I_B, I_{AG}, H(t)\right), \qquad (2)$$

Найважливішою інформаційною координатою стає I_{AG} – аграрна антропогенна інформація, яка включає шість основних функціональних блоків

$$I_{AG} = I_{eco} + I_{dom} + I_{stor} + I_{set} + I_{exc} + I_{soc} \qquad (3)$$

де: I_{eco} – інформація про екосистему: ґрунт, воду, сезонність, клімат, рослини; I_{dom} – інформація про доместикацію: відбір насіння, розмноження, селекцію, утримання тварин, контроль відтворення; I_{stor} – інформація про зберігання: запаси, зерносховища, силоси, сушіння та ін.; I_{set} – інформація осілості: планування поселення, будівництво, територіальна організація, розміщення полів, організація праці; I_{exc} – фундаментальні змін у демографії, соціальній організації, технології та відносин із природою, інформація обміну: міра, еквівалентність, обмін, спеціалізація, торгівля, контроль потоків продуктів. I_{soc} – соціально-організаційна інформація: власність, спадкування, правила розподілу, статус, підпорядкування, спеціалізація праці, контроль над запасами.

Для оцінки ефективності інформаційної організації суспільства, що народжувалося на межі аграрної революції, введемо декілька показників, що відображають співвідношення між непорівняними параметрами антропологічної та природної систем (табл. 1).

Перший з показників - нормована антропогенна інформація, що застосовано для оцінки ефективної інформаційної організації в системі.

Другий показник – коефіцієнт антропологічного контролю над біологічним потоком, навіть важливішим за абсолютну кількість інформації. Наприклад, у мисливсько-збиральницькій системі $C_B \ll 1$, у землеробській $C_B \uparrow$, що показує, що аграрна революція – це передусім революція контролю над біологічним потоком, а не просто збільшення кількості знань.

Третій показник – коефіцієнт накопичення (чисто аграрний зміст) показує, на скільки часу система може підтримувати себе без нового врожаю. У мобільній системі він переважно низький. В аграрній системі роль C_S невимірно вища, що породжує абсолютно нову властивість системи: «енергія/їжа відділяється від моменту її виробництва» тобто з'являється часова асиметрія між виробництвом і споживанням. Саме тут антропогенна інформація, у вигляді I_{AG} стає особливо важливою: необхідні

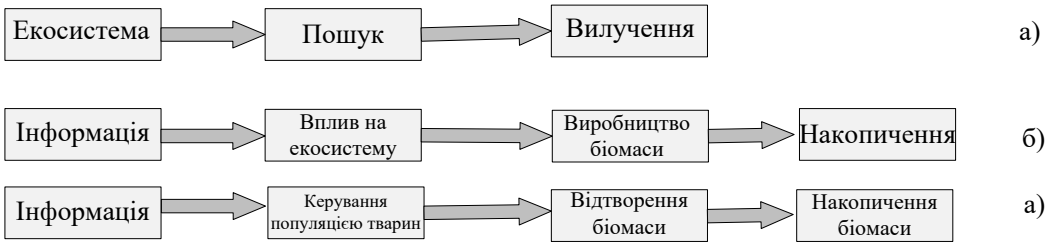

Рис. 1. Інформаційно насичена модель для межі аграрної революції: а) – доаграрний період; б) – аграрний період, землеробство; в) – аграрний період, тваринництво

знання про час і місце збереження, умови доступу і терміни використання ресурсу.

Четвертий показник відноситься до аграрного надлишку. Він особливо важливий, тому що саме надлишок створює можливість для соціальної диференціації, вперше проявляє себе, як інформація, яка діє, як рушійна сила соціосистеми.

П'ятий показник – інформаційна інтенсивність управління χ_{AG} характеризує не просто кількість інформації, а співвідношення швидкості формування керуючої інформаційної організації та швидкості енергетичного розсіювання системи.

Аграрна система стала спроможною для суттєвого збільшення ролі інформаційних показників через інші з модельних (M_C, C_B, C_S, σ, H), але це не означало автоматичного покращення добробуту окремої людини. Навпаки, археологічні дослідження вказують на випадки погіршення харчової різноманітності, здоров'я та збільшення інфекційного навантаження при одночасному зростанні населення та поширення інформаційного значення [10].

Система стала спроможною підтримувати більшу кількість людей, особливо за зростанням показників (M^* та E^*), навіть якщо середня якість життя окремої людини спочатку не покращилася. Є припущення, що інформаційна складова на цей час була недостатньою не за кількістю, а за темпами зростання енергетичних та матеріальних ресурсів у екосистемі людини.

Розглянемо систему диференціальних рівнянь для повноцінної динамічної екосистеми людини у мінімальному вигляді наступним чином

$$\frac{dM_C}{dt} = r_C M_C \left(1 - \frac{M_C}{K_C}\right) + f\left(I_{AG}, E_A\right) - \mu_C M_C \qquad (4)$$

$$\frac{dM_N}{dt} = G_N\left(I_B\right) - H\left(I_{AG}\right) - \mu_N M_N \qquad (5)$$

$$\frac{dE_A}{dt} = P_{in}^{AG} - P_{E,AG} - P_{work} \qquad (6)$$

$$\frac{dI_B}{dt} = F_B\left(M_N, E_A\right) - \delta_B I_B \qquad (7)$$

$$\frac{dI_{AG}}{dt} = F_{learning} + F_{dom} + F_{stor} + F_{soc} - \delta_{AG} I_{AG} \qquad (8)$$

З урахуванням демографії

$$\frac{dH}{dt} = H\left(b\left(I_{AG}, M_C, E_A\right) - d\left(I_{AG}, M_C, E_A\right)\right) \qquad (9)$$

система показує, як інформаційно організоване виробництво впливає на демографічну динаміку. Тут послідовно r_C – внутрішня швидкість росту контрольованої біомаси; K_C – ємність середовища для контрольованої біомаси; μ_C – коефіцієнт втрат (смертності) контрольованої біомаси; η_M – конверсія біомаси в доступну ексергію; μ_E – швидкість використання доступної ексергії; G_N – природна генерація (приріст) природної біомаси; μ_N – коефіцієнт природних втрат біомаси; μ_A – втрата (старіння) аграрної інформації; α – генерація аграрної інформації через взаємодію людини з природою; β – внутрішнє самопосилення аграрної інформації; γ – вплив продовольчого надлишку на людську систему; r_H – базова швидкість організаційно-демографічного росту; K_N – нормована місткість людської системи; b – коефіцієнт вилучення (перетворення) природної біомаси людиною; c – норма споживання на одиницю людини; d – коефіцієнт деградації (втрат) контрольованої системи; q – вплив аграрного контролю на природну інформаційну систему;

Висловимо ключову гіпотезу: аграрна революція починається не тоді, коли людина отримує більше інформації, а тоді, коли інформація набуває здатності стабільно керувати відтворенням нового біологічного потоку. Тобто критична зміна C_B стає навіть концептуально важливішою за абсолютний обсяг I_{AG}.

Звідси випливає загальний законоподібний принцип: *революційна перебудова соціоприродної системи у соціоекосистему співпадає з переходом від описових*

Таблиця 1

Показники ефективності інформаційної організації суспільства у перехідні періоди.

Назва показника	Формула для розрахунку	Пояснення до Показника
Нормована антропогенна інформація	$i = \frac{I_{AG}}{I_{AG}^{max}}$	I_{AG}^{max} – модельна максимальна інформаційна ємність відповідної соціоприродної системи, що відповідає умові для системи «біосфера-ноосфера»
коефіцієнт біологічного контролю	$C_B = \frac{P_{control}}{P_{available}}$	$P_{control}$ – потік біологічної продукції, який люди-на може цілеспрямовано регулювати, $P_{available}$ – весь доступний потік природної продукції.
Коефіцієнт накопичення	$C_S = \frac{S}{F}$	S – запас продовольства, F – середнє споживання за одиницю часу
Показник аграрного надлишку	$\sigma = \frac{Y - C}{Y}$,	Y – вироблена харчова енергія, C – необхідне споживання
Інформаційна інтенсивність управління	$P_{I,AG} = k_I T \dot{I}_{AG}$	χ_{AG} характеризує не просто кількість інформації, а співвідношення швидкості формування керуючої інформаційної організації та швидкості енергетичного розсіювання системи.

до керуючих функцій. Зокрема, у аграрній революції це керування локальною біопродукцією, у ноосферній – керування глобальними соціоприродними потоками [9]. Отже, аграрна революція може розглядатися як рання форма інформаційно керованої перебудови біосферної взаємодії людини, але не як ноосфера у сучасному її значення. Як аргумент, концептуально випливає порівняльна схема (табл. 2).

Але ж, існуючу математичну аналогію ще не можливо будувати як твердження про те, що аграрна революція – це «маленька передумова ноосферної революції». Правильніше бачити їх як два різні рівні одного типу інформаційної перебудови соціоприродної системи. Сучасна археологія змушує нас відмовитися від образу єдиної миттєвої «аграрної революції». У багатьох регіонах осілість, зберігання, управління рослинами, доместикація, повне землеробство та соціальна диференціація виникали в різний час і в різній послідовності. Тому математично правильніше говорити не про одну точку біфуркації, а про перехідну область або послідовність пов'язаних біфуркацій.

Запропонована методологія дозволяє перейти від простого опису «аграрної революції» до кількісної моделі зміни інформаційного режиму людини у складі біосфери.

Початкові калібрувальні параметри для аналізу вихідної моделі представлені в табл. 3 [1, 5, 11, 12]

Ці та інші числові дані моделі не пропонуються як «значення, знайдені в археологічному джерелі». Вони поділяються на емпірично прив'язані за вказаними науковими джерелами та є нормувальними. Тому модель носить характер калібрувальних результатів, які можуть мати більш точні значення, а результати моделювання мають тільки якісні результати.

Покажемо, що цей механізм пов'язаний із можливим аграрним фазовим переходом, що пов'язаний з принципово новими соціальними відносинами в суспільстві, а саме – накопиченням надлишкових ресурсів та розвитком принципово нового економічного розмежування. Формально це стан $\chi_{AG} < 1$, який показує на домінування природного привласнення перед виробництвом. Стан, для якого $\chi_{AG} = 1$ показує на його критичність, а $\chi_{AG} > 1$ пов'язаний вже з домінуванням інформаційно організованого біологічного виробництва з його надлишковими накопиченнями. Але, як і у випадку «біосфера–ноосфера» [9], це не археологічно виміряний універсальний поріг. Це модельна нормалізація. Принциповою перевагою слід вважати що аграрний перехід не слід визначати тільки через χ_{AG}, а й через визначення критичної поверхні аграрного переходу одночасно трьома умовами: $\chi_{AG} \approx 1, C_B \uparrow, C_S \uparrow$, а виникнення стійкого аграрного режиму додатково пов'язувати з умовою σ>0.

Роль інформації у мисливця I_H – це ефективне вилучення, у землероба I_{AG} – пефективне відтворення. Додаткова інформація аграрної системи починає збільшувати не лише ефективність вилучення ресурсу, а майбутню пропозицію самого ресурсу в відповідному модельному сенсі

Роль інформації у мисливця I_H – це ефективне вилучення, у землероба I_{AG} – пефективне відтворення. Додаткова інформація аграрної системи починає збільшувати не лише ефективність вилучення ресурсу, а майбутню пропозицію самого ресурсу в відповідному модельному сенсі

$$\frac{\partial M_{available}}{\partial I_H} \ll \frac{\partial M_C}{\partial I_{AG}} \qquad (10)$$

У порівнянні інформаційної агресії на межі аграрної революції та ноосферного періоду, відповідно, $I_H \to I_{AG}$ та $I_B \to (I_B, I_A)$ перетин типу «інформація про біомасу переходить у інформацію щодо управління біомасою» до «природна інформаційна організація переходить у антропогенну організацію» - це переходи від пасивно-адаптивної до регуляторної ролі інформації. Різниця у масштабах (табл. 4).

Більш глибока схожість стосується за рахунок збільшення інформаційного забезпечення та

Таблиця 2

Порівняльні дані інформаційного впливу на межах аграрної революції та перехідного періоду в системі «біосфера-ноосфера»

Аграрна революція			Перехід «біосфера-ноосфера»		
мисливець	**Неоліт**	**Аграрне суспільство**	**Біосфера**	**перехід**	**Ноосфера**
I_H	$I_{AG} \uparrow$	$maxI_{AG}$	I_B	$maxI_A$	I_A – керуюча координата
$C_B \ll 1$	$C_B \uparrow$	$maxC_B$	(M, E, I_B)	–	(M, E, I_B, I_A)
$minC_S$	$C_S \uparrow$	$maxC_S$	–	–	–
$\chi_{AG} < 1$	$\chi_{AG} \approx 1$	$\chi_{AG} > 1$	$\chi < 1$	$\chi \approx 1$	$\chi > 1$

інформаційної керованості матерії за різними рівнями. На рівні мисливця інформація це пошук, на рівні землероба інформація це виробництво, тому для аграрного суспільства інформація це виробництво, накопичення та нерівноправний розподіл. А для ноосфери – інформація це виробництво, накопичення, розподіл і глобальне управління. Це можна назвати ієрархією інформаційного контролю над потоками, що є одним із центральних понять всієї порівняльної роботи.

Послідовно, обираємо дуже малу контрольовану масу (M^*) і низький організований енергетичний запас (E^*) із впливом переважно природної інформації (I_B), а також за наявністю зачаткової аграрної інформації (I_{AG}) для певної вибірки невеликої організаційно-демографічної системи (не для реконструкції конкретного поселення та без даних археологічного порогу).

За основу для розрахунків приймаємо модель (1)-(9), показники перехідного періоду (див. табл. 1) та калібровані вихідні дані для використання (табл. 4) і з використанням методу Рунге-Кутти 4 порядку [13].

Результати аналізу представлені на рис. 2. За розрахунковими даними, область стаціонарного стану системи для якого виконується умова $\dot{M} = \dot{I}_B = \dot{I}_{AG} = \dot{H} = 0$ чисельно виконується в області точки

$$X^* = (1{,}1597; 2{,}3194; 0{,}6204; 0{,}5294; 2{,}1166)$$

Тобто послідовні змінні $M^* = 1{,}1597$; $E^* = 2{,}3194$; $I_B^* = 0{,}6204$; $I_{AG}^* = 0{,}5294$; $H^* = 2{,}1166$.

У цій області модель показує на функціональну порівнянність засвоєння інформації $I_B : 0{,}95 \to 0{,}62$ і $I_{AG} : 0{,}02 \to 0{,}81$ відповідно: від початкової 0,95 та 0,02 до застосовної 0,62 та 0,81 інформації на межі аграрного періоду. Тобто аграрний перехід не створює інформацію з нуля, а змінює співвідношення між природною і антропогенно організованою інформацією, що відповідає початковій концепції $I_H \to I_{AG}$.

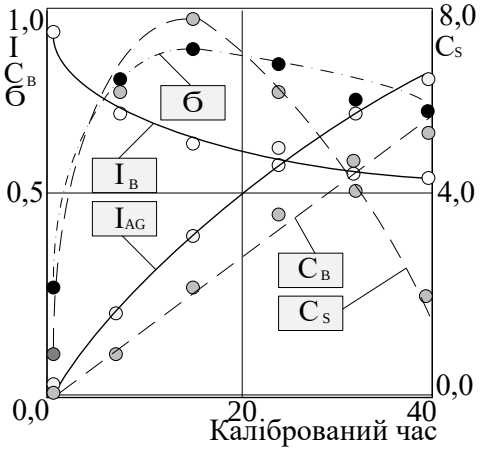

Рис. 2. Інформаційні показники межового періоду аграрної революції як джерела формування накопичення та розподілу надлишкового ресурсу в екосистемі людини

Для отриманого X^* фіксуємо $C_B^* = 0{,}564$, тобто близько 56 % модельованого продуктивного біологічного потоку припадає на контрольовану компоненту. Водночас $C_S^* = 2{,}19$ показує, що існуючий запас приблизно у 2,2 рази перевищує нормоване поточне споживання, а надлишковий потік, у модельному виразі, перевищує на 54% поточні потреби у споживанні ($\sigma^* = 0{,}544$).

За модельним критерієм стаціонарний аграрний режим перебуває трохи вище критичної межі χ=1, на що показує коефіцієнт інформаційної інтенсивності

Таблиця 3

Вихідні калібрувальні параметри моделі динамічної екосистеми людини на межі аграрної революції

Параметр*	Значення	Параметр*	Значення	Параметр*	Значення
r_C	0,36	μ_E	0,54	β	0,25
K_C	1,00	G_N	0,25	μ_A	0,18
μ_C	0,05	μ_N	0,12	r_H	0,03
B	0,22	Q	0,11	K_H	1,00
η_M	1,00	α	0,12	c	0,25
γ	0,08	D	0,01	k_I	*16,0*
Встановлені змінні початкового стану системи**					
M	*0,06*	I_B	0,95	H	0,19
E	0,11	I_{AG}	0,02		

Примітка: * – параметри не відносяться до фізичних констант і не є фундаментальними; ** – нормований початковий стан, який дозволяє дослідити динаміку переходу

управління ($\chi^*_{AG} \approx 1{,}06$). Тобто методологічно критичним стає не максимальне накопичення інформації а співвідношення швидкості інформаційних організації до масштабу енергетичного обороту.

Запропонована модель дозволяє сформулювати загальний механізм перехідного періоду між ерами «переходу від збиральництва до землеробства» і «біосфери-ноосфери» у порівняльному вигляді (рис. 3).

При цьому для аграрної революції такий механізм передбачає розвиток через появу біологічного контролю та накопичення надлишків, як специфічних властивостей аграрної революції (рис. 2, б), замкнутих на відповідні інформаційні потоки. А механізми перехідного періоду системи «біосфера-ноосфера» оперують глобальними матеріальними та енергетичними потоками, які також базуються на нових інформаційних потоках управління, але глобальних (рис. 3, в).

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження.

1. Встановлено концептуальні особливості трансформації екосистеми людини на межі аграрної революції, що полягають у переході від переважного привласнення природної біологічної продукції до її цілеспрямованого відтворення та регулювання.

2. За результатами модельного аналізу визначено сукупність ознак становлення аграрного режиму, пов'язаних зі зростанням інформаційного контролю над біологічною продукцією, формуванням продовольчих запасів і виникненням надлишку ресурсів. Отримані результати ілюструють потенційну роль інформаційної організації у забезпеченні стійкості аграрної системи, водночас не передбачаючи автоматичного поліпшення добробуту окремої людини.

3. Обґрунтовано структурну аналогію між аграрним переходом і переходом від біосфери до ноос-

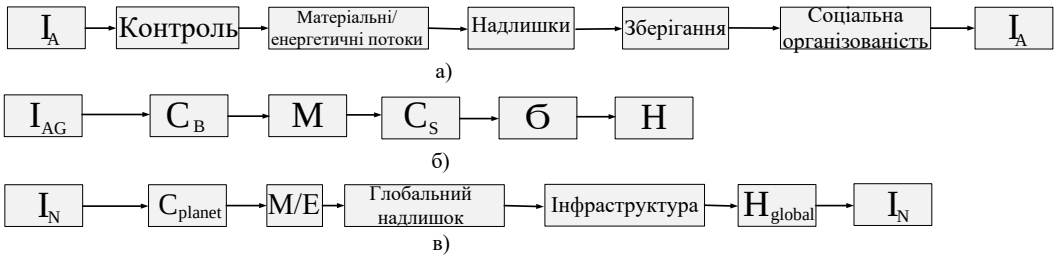

Рис. 3. Лінійний механізм спільних властивостей у системах, що розглядаються: а)-спільний механізм дії; б)-для аграрної революції; в)-для ноосферного переходу

Таблиця 4

Масштабованість інформаційного впливу на революційних межах

Ознака	**Аграрна революція**	**«Біосфера → ноосфера»**
Об'єкт контролю	локальна екосистема	планетарна соціоприродна система
Масштаб	поселення/ландшафт /регіон	Земля
Інформація	I_{AG}	I_A
Природна інформація	I_B	I_B
Основний контроль	біологічна продукція	матеріальні, енергетичні, біосферні потоки
Основний матеріальний ресурс	їжа, біомаса	глобальні ресурси
Накопичення	запаси їжі	технологічна/інфраструктурна/ інформаційна система
Просторова зміна	мобільність → осілість	локальність → планетарна інтеграція
Соціальний ефект	спеціалізація, ієрархія	глобальна координація
Часова структура	виробництво → запас → споживання	інформація → планетарне управління
Критичний параметр	χ_{AG}	χ
Головна ознака переходу	$C_B \uparrow,\ C_S \uparrow, \sigma>0$	I_A стає керуючою координатою
Простір станів	(M, E_A, I_B, I_{AG})	(M, E, I_B, I_A)
Тип переходу	локально-соціоприродний	Планетарний

фери як процесами посилення керуючої функції інформації в соціоприродних системах.

4. Подальше використання результатів дослідження полягає у вдосконаленні математичних моделей динаміки екосистеми людини, кількісному аналізі взаємозв'язків між інформаційними, біологічними, енергетичними та демографічними процесами для поглиблення розуміння механізмів історичної трансформації соціоприродних систем.

Література

1. Kuijt I., Finlayson B. Evidence for food storage and predomestication granaries 11,000 years ago in the Jordan Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2009. Vol. 106, № 27. P. 10966–10970. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0812764106.
2. Bowles S. Cultivation of cereals by the first farmers was not more productive than foraging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2011. Vol. 108, № 12. P. 4760–4765. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1010733108.
3. Залізняк Л. Л. «Неолітична революція» в археології України початку XXI ст. *Археологія.* 2017. № 4. С. 5–25. DOI: https://doi.org/10.15407/archaeologyua2017.04.005.
4. Cohen D. J. The Beginnings of Agriculture in China: A Multiregional View. Current Anthropology. 2011. Vol. 52, No. S4. P. S273–S293. DOI: https://doi.org/10.1086/659965.
5. Kraft T. S., Venkataraman V. V., Wallace I. J., Crittenden A. N., Holowka N. B., et al. The energetics of uniquely human subsistence strategies. *Science*. 2021. Vol. 374, № 6575. P. 1183–1187. DOI: https://doi.org/10.1126/science.abf0130.
6. Ashraf Q., Michalopoulos S. Climatic Fluctuations and the Diffusion of Agriculture. *The Review of Economics and Statistics*. 2015. Vol. 97, № 3. P. 589–609. DOI: https://doi.org/10.1162/REST_a_00461.
7. Oldfield J. D., Shaw D. J. B. V. I. Vernadsky and the noosphere concept: Russian understandings of society–nature interaction. *Geoforum.* 2006. Vol. 37, № 1. P. 145–154. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2005.01.004.
8. Lew-Levy S., Boyette A. H., Crittenden A. N., Hewlett B. S., Lamb M. E. A Review of Social Learning and Cultural Transmission in Hunter-Gatherers. *Evolutionary Human Sciences*. 2020. Vol. 2. Article e7. DOI: https://doi.org/10.1017/ehs.2020.7.
9. Gorshkov V. G. Physical and Biological Bases of Life Stability: Man, Biota, Environment. Berlin ; *Heidelberg : Springer-Verlag*, 1995. XI, 340 p. ISBN 3-540-57049-7. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-85001-1.
10. Larsen C. S. The agricultural revolution as environmental catastrophe: implications for health and lifestyle in the Holocene. *Quaternary International*. 2006. Vol. 150, № 1. P. 12–20. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.01.004.
11. Araus J. L., Slafer G. A., Romagosa I., Molist M. Estimated wheat yields during the emergence of agriculture based on the carbon isotope discrimination of grains: evidence from a 10th millennium BP site on the Euphrates. *Journal of Archaeological Science*. 2001. Vol. 28, № 4. P. 341–350. DOI: https://doi.org/10.1006/jasc.2000.0569.
12. Araus J. L., Ferrio J. P., Voltas J. at al. Agronomic conditions and crop evolution in ancient Near East agriculture. *Nature Communications*. 2014. Vol. 5. Article 3953. DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms4953.
13. Butcher J. C. Runge–Kutta Methods. In: Numerical Methods for Ordinary Differential Equations. 2nd ed. Chichester: *John Wiley & Sons*, 2008. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470753767.ch3.

Дата першого надходження статті до видання: 16.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026