

УДК [630*23:519.863]:330.34

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ: ДОСЯГНЕННЯ І ПРОБЛЕМИ

Л. Загвойська

*Національний лісотехнічний університет України,
79057 м. Львів, вул. Ген. Чупринки, 103
E-mail: zahvoyska@ukr.net*

Проаналізовано природу еколого-економічних систем, досвід і проблеми їх моделювання. Розглянуто найбільш поширені моделі для дослідження еколого-економічних систем, їх сильні і слабкі сторони.

Ключові слова: еколого-економічні системи, імітаційні моделі, постнекласична наукова парадигма, агентні моделі, системна динаміка.

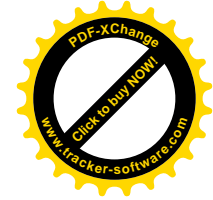
Постановка проблеми. Еколого-економічні системи (ЕЕС) як феномен синергетичної природи, потребують системних міждисциплінарних досліджень із використанням інструментарію моделювання. Сьогодні напрацьовано потужний клас імітаційних моделей, які дають засоби дослідження ЕЕС на засадах постнекласичної наукової парадигми. Для коректного застосування моделей потрібно проаналізувати можливості та обмеження цих засобів у контексті вимог до опису синергетичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та невирішені частини проблеми. Визнання об'єктивної обмеженості дисциплінарних наукових парадигм формує методологічне підґрунтя постнекласичної науки (*post-normal science*) [6; 9], бурхливий розвиток якої відбувається сьогодні. Розширення предметного простору досліджень і зумовлене ним взаємопроникнення понятійних апаратів і збагачення наукового інструментарію на засадах синергетики стає прикметною рисою сучасних досліджень. Ці процеси особливо помітні в мейнстрімі економічної теорії та моделювання економічних систем і процесів з урахуванням екологічних обмежень.

Екологічна економіка, одна з наймолодших гілок дерева економічних наук, постулює фундаментальну роль глобальної екологічної системи, яка уможливує і забезпечує виникнення і розвиток суспільства та його економічної діяльності [2; 3; 10]. Органічна єдність і глибинна взаємозалежність економічних та екологічних систем, а також об'єктивна обмеженість потуги останньої стають критеріями адекватності суспільної практики, зокрема, наукових досліджень.

У такому методологічному контексті постнекласичного дискурсу ми пропонуємо розглядати ЕЕС як синергетичну єдність, синергію екологічної та економічної систем, пов'язаних обміном речовини, енергії та інформації.

ЕЕС притаманна сильна нелінійна взаємодія, а відтак для них характерна колективна (виникаюча, емерджентна) поведінка. W. Weaver (1948) переконливо доводить [16], що цей тип складності, у порівнянні з багатовимірною механічною



взаємодією великою кількістю елементів, яка вивчається статистикою з використанням інструментарію усереднення поведінки (XIX ст.), та порівняно з неорганізованою складністю, яку досліджувала наука XX ст., є найскладнішим і найбільш невідкладним викликом для сучасної науки.

Підсистеми ЕЕС коеволюціонують. Для опису їх взаємозалежності можна скористатися прикладом сполучених посудин, відомим нам із фізики. І якщо на етапі безпечного, з точки зору якості довкілля, розвитку зв'язок систем не був для нас очевидним, то на етапі переходу до ноосфери [1] або антропоцену [8], цей зв'язок стає очевидним, як і роль людини в підтриманні рівноваги в ЕЕС.

Для дослідження еволюції економічних систем, процесів виникнення і руйнування економічної рівноваги, розроблена парадигма економічної теорії складності (*complexity economics*) [7]. Проте її сильним методологічним обмеженням (станом на сьогодні) є ігнорування екологічного імперативу. Воно помітно знижує адекватність її концептуальних моделей ЕЕС і на емпіричному рівні долається в парадигмі моделювання ЕЕС. Відтак **метою** статті є дослідження сучасного інструментарію моделювання ЕЕС, його сильних і слабких сторін.

Основні результати дослідження. Моделювання ЕЕС потребує холистичного мислення, широкої міждисциплінарності, глибокого знання економічної теорії, економіки, екології, соціології, системної динаміки та ін., розуміння можливостей та обмежень інструментарію моделювання.

У дослідженні процесів еволюції ЕЕС, яку можна трактувати як коеволюцію екологічних та економічних систем, важливо дослідити зворотні зв'язки (позитивні і негативні, тт.. підсилюючі та балансуючі) та процеси й механізми адаптації до виникаючих обставин. Ці два аспекти є імпліцитними, внутрішньо-притаманними для ЕЕС. Важливими рисами ЕЕС, які необхідно відобразити в моделях, залишаються нелінійна ймовірнісна поведінка, чутливість до початкових умов, самоорганізована поведінка на різних рівнях.

Статистичні підходи, такі як регресійний і факторний аналіз, використовують для дослідження залежностей та агрегованих атрибутів систем. Регресійні моделі можуть бути використані для прогнозу, якщо відомо, що умови, які були в минулому, не зазнають змін. Однак, ці моделі не можна застосувати, якщо досліджувані системи мають координовану або когерентну взаємодію [10].

Для дослідження суб'єктивності в моделях поведінки стейкхолдерів послуг екосистем використовують напівструктуровані інтерв'ю, а отримані емпіричні дані опрацьовують методами багатофакторного аналізу, Q-методу, методами непараметричної статистики та ін. Методи багатофакторного аналізу дають змогу перевірити обґрунтованість гіпотез дослідника щодо вагомості ідентифікованих ним чинників формування поведінки респондентів. Прикладом такого дослідження може бути дослідження вподобань респондентів щодо рекреаційних об'єктів – об'єктів неживої природи [5; 12]. Діаметрально-протилежний підхід пропонує Q-метод, який використовують для ідентифікації чинників поведінки і подальшого групування вербальних моделей поведінки респондентів за виявленими чинниками з використанням апарату факторного аналізу [4; 12]. Метод концептуально-змістовного когнітивного картування застосовують для вивчення ставлення респондентів до досліджуваного об'єкту, наприклад, послуг лісових екосистем, шляхом ідентифікації, групування та ранжування виявлених уподобань методами непараметричної статистики [17].



Мережі Байсса (*Bayesian networks*) – можуть включати якісну інформацію про поведінку для різних кількісних даних і статистичних розподілів, але не можуть представляти зворотних зв'язків, притаманних ЕЕС. Моделі цього класу використовують у процесах прийняття рішень для обґрунтованого розрахунку ймовірностей настання подій в умовах невизначеності. Проте, як і попередні моделі, мережі базуються на лінійній математиці, то ж не залишають місця для адаптивної поведінки та взаємодій.

Системна динаміка (*system dynamics*) – різновид імітаційного моделювання. Моделі цього класу, як правило, розглядають макроскопічний рівень економічних чи соціальних систем і використовують для цього лише одного агента з порівняно невисоким рівнем складності структури. Зазвичай ці моделі використовують диференціальні рівняння, які можуть бути розв'язані аналітично для певних умов. Але аналітичні рішення дають змогу знайти точки рівноваги. Сила методів системної динаміки полягає в можливості дослідити траєкторії і час, необхідний для досягнення стану рівноваги, тобто процеси руйнування існуючого рівноважного стану і формування нового [11]. Обмеженням підходу є його принципова неадаптивність – рівняння і зворотні зв'язки в моделях системної динаміки є структурними, можливість їх виникнення контролюється варіацією значень параметрів.

Моделі системної динаміки використовують для дослідження коеволуції екологічних та економічних систем. Зазвичай, цей інструментарій не має теоретичного економічного підґрунтя, що дає серйозні підстави для критики цієї парадигми моделювання. Однак інтегрування теоретично обґрунтованих аналітичних співвідношень у моделі системної динаміки дає можливість для глибшого дослідження динаміки ЕЕС та аналізу чинників її зміни. Особливо цікавою, з точки зору синтезу парадигм економічної теорії та системної динаміки, є модель формування економіки сталого розвитку, яку запропонували *W. W. Wakeland, T. Uehara, Y. Nagase* (2013) [15]. Це одна з перших робіт цього напрямку і, з огляду на можливість дослідження процесів структурних змін в ЕЕС, вона буде продовжена.

Клітинний автомат (*cellular automaton*) – дискретна модель, набір клітинок, які утворюють періодичну решітку. Різновид агентного моделювання, для якого розташування агента є фіксованим, а зміна його стану визначається станом і просторовою метрикою самої клітини і станом сусідніх клітинок на момент моделювання. Кожна клітинка має скінченну кількість станів. Правила зміни стану клітинок чітко визначені наперед (*ex ante*) і є достатньо абстрактними. Цю парадигму моделювання використовують для дослідження локальних взаємодій, для яких важлива відстань між індивідуумами, що взаємодіють.

Агентне моделювання (*agent-based modeling*) є різновидом імітаційного моделювання, яке виявляє поведінку на макрорівні як емерджентний феномен, котрий виникає в результаті взаємодії множини автономних одиниць, кожна з яких має власну динамічну і гетерогенну поведінку. Агенти можуть відрізнитися здатністю опрацювати інформацію. Структура платформ моделювання дозволяє використання статистичних методів, рівнянь, моделей системної динаміки. Агентне моделювання має широке застосування в екології, економіці та екологічній економіці, коли важливо дослідити макроповедінку системи через мікротиви і взаємодії. В екологічній економіці агентне моделювання використовують для дослідження менеджменту природних ресурсів (ресурсів спільного використання), змін у землекористуванні, дифузії еко-інновацій, особливостей прийняття рішень



індивідом, змін у поведінці та ін. для опису взаємодії між численними елементами ЕЕС з обмеженими ресурсними умовами та їхнім зовнішнім середовищем [10].

Напрямами подальшого розвитку цієї парадигми є калібрування та валідація моделей шляхом інтегрування елементів експериментальної економіки та розроблення моделей, які можуть взаємодіяти з іншими парадигмами моделювання через виникаючу на макрорівні поведінку.

Огляд засобів моделювання ЕЕС, їх переваг і обмежень подано в табл. 1.

Докладний аналіз прикладів моделювання ЕЕС, який подають *F. Waetzold, M. Drechsler* та ін. [14], дозволив нам сформулювати й обґрунтувати принципи моделювання ЕЕС на засадах постнекласичної наукової парадигми [2], які дозволяють уникнути обмеженості дисциплінарних моделей.

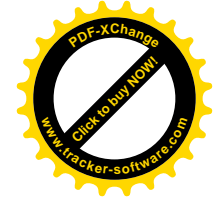
Висновки. Вітальність і висока турбулентність процесів у ЕЕС зумовлює формування нових теоретичних парадигм та інструментів для дослідження цих процесів. Практика моделювання ЕЕС сьогодні пропонує нові підходи і перевіряє їхню адекватність. Широкий спектр методів імітаційного моделювання дає дослідникам нові можливості для дослідження ЕЕС.

Таблиця 1

Найпоширеніші підходи до моделювання ЕЕС

Парадигма моделювання	Проблемне питання	Сильні сторони	Слабкі сторони
Статистичні методи, Методи, що базуються на рівняннях Мережі Байеса	Розкриття залежностей у системах, визначення агрегованих атрибутів	Добротне теоретичне підґрунтя	Не відображають синергетичну природу ЕЕС (динамічні зворотні зв'язки, лінійність, гетерогенність)
Системна динаміка	Пояснює поведінку ЕЕС у часі, а також у залежності від структури ЕЕС	Відображає синергетичну природу ЕЕС, виникнення нових станів рівноваги	Принципова неадаптивність
Клітинний автомат	Локальна взаємодія агентів з урахуванням їхньої просторової локалізації	Гетерогенна взаємодія агентів	Наперед визначені правила перетворень
Агентне моделювання	Дослідження макроповедінки системи на основі мікрвзаємодій множини агентів	Експліцитна адаптивна взаємодія	Питання адекватності моделей, поєднання з іншими моделями

Наявні сьогодні імітаційні моделі різняться рівнем аналізу та складністю організації систем: одні моделі описують макрорівень на основі моделювання одного агента нескладної природи, інші – представляють поведінку на макрорівні як результат взаємодії численних агентів на мікро- або мезорівні (напр. окремі агенти



або кластери). Особливо цікаві засоби надають ці моделі для опису процесів адаптації: руйнування існуючої рівноваги і переходу до нового рівноважного стану.

Розглянуті моделі, насамперед агентні моделі, дають новий інструментарій досліднику. Разом із тим вони потребують подальшого теоретичного обґрунтування моделей та інтегрування в моделі інших класів.

1. Вернадский В.И. Размышления натуралиста. Научная мысль как планетарное явление. Несколько слов о ноосфере / В.И. Вернадский. – М.: Наука, 1944. – 191с.
2. Загвойська Л.Д. Теоретичні підходи до моделювання динаміки еколого-економічних систем / Л.Д. Загвойська // Моделювання регіональної економіки. Зб. наук. праць. – 2013. – Вип. 2(22). – С. 85-102.
3. Загвойська Л.Д. Філософсько-економічний дискурс проблеми «Людина-Природа» / Л.Д. Загвойська // Сталий розвиток та екологічна безпека: теорія, методологія, практика / За ред. Є.В. Хлобистова / ДУ «ІЕПСР НАН України»: монографія. – Сімферополь : АРІАЛ, 2011.– С.12-41.
4. Загвойська Л.Д. Готовність деревообробних підприємств Рівненщини до вдосконалення екологічної політики: погляд зсередини / Л.Д. Загвойська, М.О.Петрук // Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наук. пр. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 10. – С. 207-215.
5. Подольчак М.Ю. Еколого-економічна оцінка ландшафтів / М.Ю. Подольчак, Л.Д. Загвойська // Науковий вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2005. – Вип. 15.1. – С. 270-273.
6. Стёпин В.С. Философия науки: Общие проблемы / В.С. Стёпин. – М. : Гардарики, 2006. – 384 с.
7. Arthur W. B. Complexity and the economy / W. B. Arthur // Science. – 1999. – Т. 284. – №. 5411. – С. 107-109.
8. Crutzen P. Geology of mankind - The Anthropocene / P. Crutzen // Nature. – 2002. – P. 415-423.
9. Funtowicz S.O. A new scientific methodology for global environmental issues / S. O. Funtowicz, J. R. Ravetz // R. Costanza (Ed.) // Ecological economics: The science and management of sustainability. – 1991. – Vol. 10. – P. 137-152.
10. Heckbert S. Agent-based modeling in ecological economics / S. Heckbert, T. Baynes, A. Reeson // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2010. – Vol. 1185. – №. 1. – С. 39-53.
11. Gilbert N. Simulation for the social scientist / N. Gilbert, K. G. Troitzsch // J. Artificial Societies and Social Simulation. – 2000. – Vol. 3. – №. 3. – 37-48.
12. Nijnik M. Public evaluation of landscape content and change: Several examples from Europe / M. Nijnik, L. Zahvoyska, A. Nijnik, A. Ode // Land Use Policy. – 2009. – Vol 26 (1). – P. 77-86.
13. Richnau G. Multi-faceted total economic value profiles of forest owner groups in South Sweden: the River Helge å catchment as a case study / G. Richnau, P. Angelstam, S. Valasiuk, L. Zahvoyska et al. // Ambio. – 2013. – Vol. 42. – Issue 2. – P. 188-200.
14. Waetzold F. Ecological-Economic Modeling for Biodiversity Management: Potential, Pitfalls, and Prospects / F. Waetzold, M. Drechsler, C.W. Armstrong // Conservation Biology. – 2006. – Т. 20. – №. 4. – P. 1034-1041.



15. Wakeland W.W. Integrating Economics and System Dynamics Approaches for Modeling an Ecological-Economic System / W.W. Wakeland, T. Uehara, Y. Nagase // Proc. of the 31st Int-l Conf. on the System Dynamics Society, Cambridge, Massachusetts USA. – 2013. [Electronic source]. – Available from: <http://works.bepress.com>.
16. Weaver W. Science and complexity / W. Weaver // American Scientist. – 1948. – № 36. – P. 536-544.
17. Zahvoyska L., Bas T. Stakeholders' perceptions of mountain forest ecosystem services: the Ukrainian Carpathians case study. In: J. Kozak, K. Ostapowicz, A. Bytnerowicz, B. Wyga (Eds). The Carpathians: Integrating Nature and Society towards Sustainability. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – P. 353-367.

SIMULATION OF ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEMS: ACHIEVEMENTS AND PROBLEMS

L. Zahvoyska

*Ukrainian National Forestry University,
79057 Lviv, Gen. Chuprynky str., 103*

Nature of ecological-economic systems, experience and problems of their modeling are considered. The most widespread models for their investigation, their strengths and weaknesses are highlighted.

Keywords: ecological-economic systems, simulation models, postnormal scientific paradigm, agent-based models, system dynamics models.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

Л. Загвойська

*Национальный лесотехнический университет Украины,
79057 г. Львов, ул. Ген. Чупрынки, 103*

Проанализирована природа эколого-экономических систем, опыт и проблемы их моделирования. Рассмотрены наиболее распространенные модели для исследования эколого-экономических систем, их сильные и слабые стороны.

Ключевые слова: эколого-экономические системы, имитационные модели, постнеклассическая научная парадигма, агентные модели, модели системной динамики.