

М.В. Григорків, д.е.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0003-3327-991X>

В.С. Григорків, д.ф.-м.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0003-4866-946X>

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
м. Чернівці

ДВОСЕКТОРНА МОДЕЛЬ ЕКОНОМІКИ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ТА СПОЖИВАННЯ

Анотація

Розкрито актуальність проблеми екологізації економіки та інших сфер людської життєдіяльності. Ця проблема є однією із найбільш гострих і пріоритетних проблем сучасного світу, оскільки наслідком негативного антропогенного впливу на довкілля є екологічні кризи регіонального та планетарного масштабу, зокрема зміна клімату, що загрожує не лише соціально-економічному розвитку людської цивілізації, але й її існуванню взагалі. У зв'язку з цим актуальною є не тільки екологізація економіки, але й екологізація споживання, освіти, культури, виховання тощо. Дослідження цих і багатьох інших питань, пов'язаних із екологізацією людської діяльності, потребує застосування багатьох наукових інструментів. Проаналізовано багатоаспектність об'єкта та предмета досліджень, що власне приводить до використання сукупності концептуальних, методологічних і методичних підходів. Обґрунтовано ефективність методу моделювання та необхідність побудови моделей екологічної економіки з метою дослідження концептуальних засад і допустимих сценаріїв її становлення та розвитку. Розроблено диференціальну динамічну модель двосекторної економіки в умовах екологізації процесів виробництва та споживання, у якій один сектор займається виробництвом основного агрегованого продукту, а інший – утилізацією екологічно небезпечних решток виробництва та споживання. Особливістю моделі є також урахування у ній соціально-економічної кластеризації суспільства, що дозволяє у певному сенсі відобразити як еколого-економічні, так і соціальні аспекти досліджуваної економіки. Просторовими змінними моделі є ліквідні заощадження або ліквідні капітали власників виробництв і робітників кожного із секторів, ціна на основний агрегований продукт, тариф на утилізацію відходів, обсяг забруднення довкілля. Запропонована модель служить теоретичним підґрунтям для побудови моделей еколого-економічної динаміки

та основою для окремих її модифікацій, що враховують специфіку використаних поведінкових функцій та параметрів, і призначена для проведення експериментальних досліджень у режимі комп'ютерної імітації основних тенденцій та особливостей реальних еколого-економічних систем. Результати такого дослідження з моделями зазначеного класу дають можливість також проаналізувати допустимі екологічні стандарти виробництва та споживання, апробувати та вдосконалити відповідне інформаційне забезпечення, деталізувати принципово важливі для практики вимоги до використаних під час формалізації моделі функцій та параметрів і в кінцевому підсумку сформулювати цінну інформаційну базу для систем підтримки управлінських рішень щодо прогнозування та реалізації еколого-економічних процесів.

Ключові слова: модель, еколого-економічна динаміка, екологічна економіка, соціально-економічна кластеризація, утилізація забруднення.

Кількість джерел: 13.

Vasyl Hryhorkiv, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Professor,
Mariia Hryhorkiv, Doctor of Economic Science, Associate professor,
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
Chernivtsi

TWO-SECTOR MODEL OF ECONOMY UNDER CONDITIONS OF ECOLOGIZATION OF PRODUCTION AND CONSUMPTION

Summary

The urgency of the problem of ecologization of the economy and of other spheres of human life is revealed. This problem is one of the most acute and priority problems of the modern world, as the consequences of negative anthropogenic impact on the environment are environmental crises of regional and global scale, including climate change, which threatens not only socio-economic development of human civilization but also its existence. In this regard, not only the greening of the economy is relevant, but also the greening of consumption, education, culture, upbringing, and so on. The research of the stated and many other issues related to the greening of human activities requires the use of many scientific tools. The multifaceted nature of the object and subject of research is analyzed, which actually leads to the use of a set of conceptual, methodological and methodological approaches. The efficiency of the modeling method and the necessity of constructing the ecological economy models for the purpose to research conceptual bases and admissible scenarios of its formation and development are substantiated. The differential dynamic

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

model of a two-sector economy in the conditions of greening of production and consumption processes has been developed, in which one sector is engaged in the production of the main aggregate product, and the other – in utilization of environmentally hazardous production and consumption residues. A specific feature of the model is also taking into account the socio-economic clustering of society, which allows in a sense to reflect both environmental, economic and social aspects of the economy under the study. Spatial variables of the model are liquid savings or liquid capital of production owners and workers in each sector, the price of the main aggregate product, the tariff for waste disposal, the amount of environmental pollution. The proposed model serves as a theoretical basis for building models of ecological and economic dynamics and the basis for some of its modifications, taking into account the specifics of behavioral functions and parameters, and is designed for experimental research in computer simulation of major trends and features of real ecological and economic systems. The results of such a study with models of this class also provide an opportunity to analyze acceptable environmental standards of production and consumption, test and improve the relevant information support, detail the fundamentally important requirements for the functions and parameters used in formalizing the model and ultimately create a valuable information base for systems support of management decisions on forecasting and implementation of ecological and economic processes.

Keywords: model, ecological and economic dynamics, ecological economy, socio-economic clustering, pollution disposal.

Number of sources – 13.

Постановка проблеми. За останні декілька десятиків років минулого століття та, власне, за перших два десятиліття уже двадцять першого століття негативний антропогенний вплив на природу та умови життєдіяльності людства став настільки суттєвим і очевидним, що проблема екологізації економіки та суспільного життя загалом перетворилася в одну із найбільш пріоритетних і гострих проблем сьогодні у світі. Якщо цю проблему людство не вирішить на свою ж користь, то за оцінками багатьох досліджень перспектив його розвитку у майбутньому не буде, оскільки екологічні кризи уже давно перетворилися із регіональних на планетарні, а їхнім наслідком є неминуча зміна клімату, свідками якої ми уже є і яка з часом може привести до ще більш масштабних екологічних катастроф, що унеможливають не лише соціально-економічне процвітання людської цивілізації, але й поставлять під загрозу її існування взагалі. У зв'язку з цим людство повинно

активно взятися за екологізацію усіх сфер своєї діяльності, зокрема й гуманітарної, тобто не тільки економіка, але й освіта, культура, виховання тощо повинні ставати «екологічнішими» і моральнішими у сенсі людського ставлення до природи і середовища свого існування.

Що стосується науки, то її роль в обґрунтуванні актуальності проблем еколого-економічної взаємодії та переходу економіки до нових моделей свого функціонування, які б привели до позитивних змін у плані екологізації усіх її явищ і процесів, надзвичайно важлива. При цьому глибоке дослідження проблем екологізації пов'язане із різними науковими напрямками та методологіями. Але сьогодні особливої значущості та перспективи набуває метод моделювання, зокрема математичного моделювання, застосування якого до проблем такого рівня є особливо ефективним. Саме математичному моделюванню еколого-економічних систем і присвячена ця праця.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як об'єкт, так і предмет досліджень, пов'язаних із процесами еколого-економічної взаємодії, мають широкий спектр напрямків і аспектів, тому коло дослідників у цій науковій сфері є не тільки достатньо численним, але й представницьким у межах усього світового наукового простору. Це означає, що здійснити огляд навіть найбільш суттєвих наукових праць та оцінити їхній вплив на розвиток відповідних концепцій, методологій та методик обґрунтування і моделювання еколого-економічних систем не лише складно, але й практично неможливо в окремій статті.

Однак, коли йдеться про зазначену проблематику, то обов'язково потрібно згадати тих науковців, чиї праці стали основоположними для формування ключових орієнтирів і напрямків наукових пошуків сучасних і майбутніх дослідників. До таких науковців світового рівня належать у тому числі Дж. Форрестер [1], Д. Медоуз [2], В. Леонт'єв і Д. Форд [3], М. Месарович і Е. Пестель [4], М. Мойсєєв

[5] та інші. Отримані ними результати розкрили глибинну суть екологічних криз у всесвітньому масштабі, більшість з яких спровоковані антропогенним фактором. Крім того, їхні дослідження, зокрема розроблені ними моделі взаємного впливу економіки на екологію та екології на економіку, дозволили оцінити як екологічні, так і соціальні наслідки неадекватної стосовно природи людської діяльності, що, власне, і привело до проголошення так званої концепції сталого, або стійкого розвитку [6]. Важливу роль у вивченні проблем еколого-економічної взаємодії у контексті розробки відповідних моделей та методик зіграли також праці багатьох вітчизняних учених, зокрема І. Ляшенка, М. Михалевича [7, 8], А. Онищенко [9], авторів цієї праці [10-13] та інших. Зважаючи на актуальність предмета досліджень, можна стверджувати, що такі дослідження мають надійну перспективу.

Формулювання цілей статті. Для того, щоб в економіці нового типу екологічна та соціально-економічна підсистеми були гармонійно збалансованими, крім екологізації виробництва, екологічним повинно бути і споживання, культура якого нерозривно пов'язана із загальною екологічною культурою, традиціями і навіть з моральними критеріями. Саме тому метою цього дослідження є побудова динамічної моделі двосекторної економіки, яка враховує як процеси екологізації виробництв, так і процеси екологізації споживання. При цьому, на відміну від багатьох інших моделей економічної динаміки, просторові змінні зазначеної моделі та її модифікацій мають відображати еколого-економічну динаміку з урахуванням соціально-економічної кластеризації суспільства та забруднення довкілля рештками виробництва та споживання. Підкреслимо також, що закладена у такій моделі ідея соціально-економічної кластеризації узгоджується із проблемою соціалізації суспільства, яка сумісно з його екологізацією повинна бути реалізована в економіці сталого розвитку. Крім того, виділення у моделі окремого так званого

екологічного сектора або сектора утилізації забруднювачів є надзвичайно актуальним у сенсі сучасного екологічного стану процесів виробництва та споживання, який сьогодні потребує негайного покращення. Перш ніж перейти до опису основного матеріалу пропонованого дослідження, варто зазначити, що воно логічно продовжує попередні наукові розробки авторів з моделювання еколого-економічних процесів і систем та методології побудови екологічної економіки.

Виклад основного матеріалу. Щоб здійснити формалізацію анонсованої вище моделі, спочатку конкретизуємо базові припущення щодо її побудови та динамічні змінні, які характеризують поведінку у часі досліджуваної двосекторної економіки, у якій перший сектор (сектор I) займається виробництвом основної агрегованої продукції (ОАП), а другий (сектор II) – утилізацією продуктів забруднення, створених під час виробництва та споживання ОАП, а також під час їх утилізації. У кожному із секторів задіяні два суспільні кластери: власники виробництв і працівники (надалі – власники та робітники). Нехай M_I, M_{II} і N_I, N_{II} – відповідно чисельність власників і робітників секторів I та II. Крім того, нехай z_I, \tilde{z}_I і z_{II}, \tilde{z}_{II} – ліквідні заощадження або ліквідний капітал (надалі заощадження) власників і робітників секторів I і II; p_I – ціна на ОАП; p_{II} – тариф на утилізацію; z – обсяг забруднення довкілля; α_I, α_{II} та $\tilde{\alpha}_I, \tilde{\alpha}_{II}$ ($0 \leq \alpha_I, \alpha_{II}, \tilde{\alpha}_I, \tilde{\alpha}_{II} \leq 1$) – виділені на придбання ОАП частки заощаджень власників і робітників кожного із секторів; β_I і β_{II} ($0 \leq \beta_I, \beta_{II} \leq 1$) – виділені на свою виробничу діяльність (тобто на випуск ОАП та утилізацію забруднювачів) частки заощаджень власників секторів I та II ($\alpha_I + \beta_I \leq 1, \alpha_{II} + \beta_{II} \leq 1$). Зауважимо, що у межах свого кластеру усі його члени (власники, робітники)

вважаються «рівноцінними», тобто будь-який представник кожного із кластерів «усереднено» репрезентує весь свій кластер.

Уточнимо також основні функції, без яких складно обійтися під час формалізації моделі. Попит на ОАП будемо описувати за допомогою функції попиту $q_I = q_I(s)$, де s – купівельна спроможність споживача, зокрема купівельні спроможності щодо ОАП зазначених категорій споживачів визначаються співвідношеннями

$$s_{I,\alpha} = \frac{\alpha_I z_I}{p_I}, \quad \tilde{s}_{I,\alpha} = \frac{\tilde{\alpha}_I \tilde{z}_I}{p_I}, \quad s_{II,\alpha} = \frac{\alpha_{II} z_{II}}{p_I}, \quad \tilde{s}_{II,\alpha} = \frac{\tilde{\alpha}_{II} \tilde{z}_{II}}{p_I}.$$

Власники секторів I та II, виділяючи частки β_I та β_{II} своїх заощаджень на виробництво, формують свої виробничі спроможності

$$s_{I,\beta} = \frac{\beta_I z_I}{p_I}, \quad s_{II,\beta} = \frac{\beta_{II} z_{II}}{p_{II}},$$

які служать аргументами виробничих функцій або функцій випусків (у секторі I – обсяг ОАП, а у секторі II – обсяг утилізованих одиниць (од.) забруднення) f_I та f_{II} відповідно ($f_I = f_I(s_{I,\beta})$, $f_{II} = f_{II}(s_{II,\beta})$). Оскільки вище йшлося про екологізацію як виробництва, так і споживання, то потрібно ввести у розгляд функції випуску забруднення у секторах I та II, а також функції попиту на його утилізацію. Нехай f_I^* та f_I^{**} – функції випуску забруднення у процесі виробництва та споживання ОАП; q_I^* та q_I^{**} – функції попиту на утилізацію забруднення, створеного під час виробництва та споживання; f_{II}^* та q_{II}^* – функції випуску забруднення, створеного у секторі II, та попиту на його утилізацію. Щодо аргументів усіх цих функцій можуть бути різні припущення.

Наприклад, можна вважати, що

$$f_I^* = f_I^*(s_{I,\beta}), \quad q_I^* = q_I^*(s_{I,\beta}), \quad f_I^{**} = f_I^{**}(s^{**}), \quad q_I^{**} = q_I^{**}(s^{**}),$$

$$f_{II}^* = f_{II}^*(s_{II,\beta}), \quad q_{II}^* = q_{II}^*(s_{II,\beta}),$$

де s^{**} – купівельна спроможність споживача.

Саме ці припущення і будуть використані нижче.

Приступимо до формалізації основних співвідношень моделі. Очевидно, що дохід робітника у кожному із секторів залежить від його зарплатні (нехай d_I і d_{II} – величина зарплатні робітника у секторах I і II), податку на дохід (ставку цього податку позначимо через π_0), витрат на споживання ОАП та утилізацію решток споживання ОАП. Тому рівняння динаміки заощаджень робітників секторів I та II матимуть вигляд:

$$\frac{d\tilde{z}_I}{dt} = d_I(1 - \pi_0) - p_I q_I(\tilde{s}_{I,\alpha}) - p_{II} q_{II}^{**}(\tilde{s}_{I,\alpha}), \quad (1)$$

$$\frac{d\tilde{z}_{II}}{dt} = d_{II}(1 - \pi_0) - p_I q_I(\tilde{s}_{II,\alpha}) - p_{II} q_{II}^{**}(\tilde{s}_{II,\alpha}). \quad (2)$$

Щоб конкретизувати рівняння динаміки заощаджень власників виробництв секторів I та II, потрібні певні уточнення. Дохід власника сектора I складається із оподаткованої вартості реалізованої усім споживачам (власникам і робітникам обох секторів, а також іншій частині суспільства та державі (обсяг Q_I) ОАП, а витрати пов'язані із власним споживанням ОАП, фондом заробітної плати та податку на нього (π_1 – ставка податку), організаційними видатками на діяльність щодо виробництва ОАП ($\lambda_{I,\beta}$ – частка витрат від доданої вартості), податком на додану вартість (π_2 – ставка податку) і попитом на утилізацію решток виробництва та особистого споживання ОАП. Отже, рівняння динаміки заощаджень власника сектора I формалізується так:

$$\begin{aligned} \frac{dz_I}{dt} = \frac{p_I(1-\pi_0)}{M_I} & \left[M_I q_I(s_{I,\alpha}) + M_{II} q_I(s_{II,\alpha}) + N_I q_I(\tilde{s}_{I,\alpha}) + N_{II} q_I(\tilde{s}_{II,\alpha}) + Q_I \right] - \\ & - p_I q_I(s_{I,\alpha}) - \frac{N_I d_I (1 + \pi_1)}{M_I} - p_I (\lambda_{I,\beta} + \pi_2) f_I(s_{I,\beta}) - \\ & - p_{II} q_I^*(s_{I,\beta}) - p_{II} q_I^{**}(s_{I,\alpha}). \end{aligned} \quad (3)$$

Стосовно попиту Q_I зазначимо, що у випадку, коли відома купівельна спроможність іншої частини суспільства те держави, то обсяг попиту Q_I можна виразити за допомогою функції попиту на ОАП q_I . Споживаючи ОАП, ця частина суспільства та держава продукують певний обсяг забруднення, який надалі позначимо через P_I , а попит на його утилізацію – через Q_I^{**} .

Екологічно небезпечні рештки або забруднювачі (незалежно від того, джерелом забруднення є виробництво чи споживання) утилізуються сектором II, але дохід власника виробництв сектора II залежить не тільки від попиту на утилізацію власників і робітників сектора I, але й від попиту на утилізацію іншої частини суспільства та держави. Витрати власників сектора II здійснюються на оподаткування доходу (ставка π_0), особисте споживання ОАП, видатки на фонд заробітної плати робітників сектора II та їх оподаткування (ставка π_1), організаційні потреби виробництва ($\lambda_{II,\beta}$ – частка від доданої вартості), оподаткування «доданої» вартості або права займатися утилізаційною діяльністю (ставка π_3), забезпечення попиту на утилізацію решток своєї виробничої діяльності та особистого споживання ОАП. Урахування усіх зазначених складників доходу та витрат приводить до такого рівняння динаміки заощаджень власника виробництв сектора II:

$$\frac{dz_{II}}{dt} = \frac{p_{II}(1-\pi_0)}{M_{II}} \left\{ M_I \left(q_I^*(s_{I,\beta}) + q_I^{**}(s_{I,\alpha}) \right) + N_I q_I^{**}(\tilde{s}_{I,\alpha}) + N_{II} q_I^{**}(\tilde{s}_{II,\alpha}) + Q_I^{**} \right\} -$$

$$\begin{aligned}
 & -p_I q_I(s_{II,\alpha}) - \frac{N_{II} d_{II} (1 + \pi_1)}{M_{II}} - p_{II} (\lambda_{II,\beta} + \pi_3) f_{II}(s_{II,\beta}) - \\
 & - p_{II} q_{II}^*(s_{II,\beta}) - p_{II} q_I^{**}(s_{II,\alpha}). \tag{4}
 \end{aligned}$$

Тепер перейдемо до опису динаміки цін та тарифів. Вони визначаються попитом і пропозицією відповідних економічних і екологічних продуктів. Оскільки обсяг попиту на ОАП є сумою обсягів попиту окремих суб'єктів, а виробництво ОАП залежить лише від власників виробництв сектора I, то рівняння зміни ціни в часі матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 \frac{dp_I}{dt} = \theta_I \left[M_I q_I(s_{I,\alpha}) + M_{II} q_I(s_{II,\alpha}) + N_I q_I(\tilde{s}_{I,\alpha}) + \right. \\
 \left. + N_{II} q_I(\tilde{s}_{II,\alpha}) + Q_I - M_I f_I(s_{I,\beta}) \right], \tag{5}
 \end{aligned}$$

де коефіцієнт θ_I будемо називати коефіцієнтом інерційності або регулювання ціни.

Ринковий тариф на утилізацію решток виробництва та споживання також залежить від попиту на утилізацію та пропозиції щодо цієї утилізації. Попит визначають зацікавлені в утилізації суб'єкти, а пропозицію – сектор II, тобто власники утилізаційних виробництв. Обсяги пропозиції можна оцінити за допомогою функції утилізації. Враховуючи сказане, приходимо до такого рівняння динаміки тарифу:

$$\begin{aligned}
 \frac{dp_{II}}{dt} = \theta_{II} \left\{ M_I \left[q_I^*(s_{I,\beta}) + q_I^{**}(s_{I,\alpha}) \right] + M_{II} \left[q_{II}^*(s_{II,\beta}) + q_I^{**}(s_{II,\alpha}) \right] + \right. \\
 \left. + N_I q_I^{**}(\tilde{s}_{I,\alpha}) + N_{II} q_I^{**}(\tilde{s}_{II,\alpha}) + Q_I^{**} - M_{II} f_{II}(s_{II,\beta}) \right\}. \tag{6}
 \end{aligned}$$

У рівнянні (6) θ_{II} – коефіцієнт регулювання тарифу.

Залишилося змоделювати поведінку в часі динамічної змінної z (забруднення довкілля). Очевидно, що приріст забруднення довкілля дорівнює різниці між обсягами створеного та утилізованого забруднення. Однак під утилізацією забруднення тут треба розуміти

як безпосередньо утилізацію, яка здійснюється сектором II, так і утилізацію, пов'язану із здатністю природного середовища до самоочищення. З огляду на це, для динамічної змінної z отримаємо рівняння

$$\frac{dz}{dt} = M_I [f_I^*(s_{I,\beta}) + f_I^{**}(s_{I,\alpha})] + M_{II} [f_{II}^*(s_{II,\beta}) + f_{II}^{**}(s_{II,\alpha})] + N_I f_I^{**}(\tilde{s}_{I,\alpha}) + N_{II} f_{II}^{**}(\tilde{s}_{II,\alpha}) + P_I - M_{II} f_{II}(s_{II,\beta}) - \mu z, \quad (7)$$

де μ – коефіцієнт природного спадання забруднення (коефіцієнт асиміляції).

Логічним є також припущення про те, що значення шуканих динамічних змінних у початковий момент часу t_0 задані, тобто

$$\begin{cases} z_I(t_0) = z_I^{(0)}, z_{II}(t_0) = z_{II}^{(0)}, \tilde{z}_I(t_0) = \tilde{z}_I^{(0)}, \\ \tilde{z}_{II}(t_0) = \tilde{z}_{II}^{(0)}, p_I(t_0) = p_I^{(0)}, p_{II}(t_0) = p_{II}^{(0)}, \\ z(t_0) = z^{(0)}. \end{cases} \quad (8)$$

Отже, доповнивши рівняння (1)-(7) співвідношеннями (8), отримаємо систему (1)-(8), яка, власне кажучи, і формалізує одну із динамічних моделей двосекторної економіки в умовах екологізації виробництва та споживання. Однак, враховуючи широкі можливості її модифікації, можна стверджувати, що система (1)-(8) насправді є узагальненою теоретичною специфікацією цілого класу моделей еколого-економічної динаміки двосекторної економіки.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Запропонована двосекторна модель екологічної економіки, як і її можливі модифікації, має декілька важливих для теорії та практики еколого-економічного моделювання особливостей. По-перше, просторові змінні моделі охоплюють економічні, екологічні та соціальні аспекти об'єкта моделювання, що у теоретичному плані достатньо повно та адекватно відображає цей об'єкт на формалізованому рівні. По-друге, модель належить до класу диференціальних моделей

еколого-економічної динаміки, які мають ґрунтовне теоретичне обґрунтування та достатньо потужне прикладне забезпечення, тому при наявності відповідної інформаційної підтримки на основі розробленої моделі можна здійснити якісні імітаційні експерименти, призначені для вивчення реальних еколого-економічних процесів, які відбуваються в економіці, їх динаміки та специфіки. По-третє, модель формалізована у такий спосіб, щоб мати можливість врахувати у разі її застосування у системах підтримки управлінських рішень окремі вимоги до використаних функцій економічної поведінки та параметрів моделі, що принципово важливо не тільки для дослідження якісних характеристик траєкторій еколого-економічного розвитку, але й встановлення екологічних стандартів у процесах виробництва та споживання.

Щодо експериментальних досліджень з моделлю потрібно ще раз підкреслити, що основною проблемою тут є адекватне інформаційне забезпечення, розробка якого є окремим предметом дослідження. Однак у цьому контексті зазначимо, що практика імітаційних експериментів з моделями, у тому числі і з диференціальними моделями, підтверджує, що ці експерименти дозволяють не лише апробувати саму модель, але й вдосконалити її інформаційне забезпечення.

Список використаних джерел:

1. Форрестер Дж. Мировая динамика. Москва : Наука, 1978. 168 с.
2. Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рандерс Й. За пределами роста : Уч. пос. Москва : Прогресс, Пангея, 1994. 304 с.
3. Леонтьев В. В., Форд Д. Межотраслевой анализ влияния структуры экономики на окружающую среду. *Экономика и математические методы*. Москва, 1972. Т. 8. №3. С. 370–400.
4. Mesarovich, M., Pestel, E. (1974). *Mankind at the Turning Point*. New York, 230 p.
5. Моисеев Н. Н. Экология человечества глазами математика (Человек, природа и будущее цивилизации). Москва : Мол. гвардия, 1988. 254 с.
6. Концепція сталого розвитку України / Волошин В. В., Гордієнко Н. М., Горленко І. О., Данилишин Б. М., Дорогунцов С. І. Київ, 1997. 17 с.
7. Ляшенко І. М. Економіко-математичні методи та моделі сталого розвитку. Київ : Вища школа, 1999. 236 с.
8. Ляшенко І. Н., Михалевич М.В., Утеулиев Н.У. Методы эколого-экономического

моделирования. Нукус : Билим, 1994. 236 с.

9. Онищенко А. М. Моделювання еколого-економічної взаємодії в процесі виконання рішень Кіотського протоколу : [монографія]. Полтава : Полтавський літератор, 2011. 398 с.

10. Григорків М. В. Динамічні моделі еколого-економічних систем в умовах соціально-економічної кластеризації : монографія. Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2020. С. 415.

11. Буяк Л. М. Математичні моделі загальної економічної динаміки з урахуванням соціально-економічної кластеризації : монографія. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2016. 392 с.

12. Григорків В. С., Григорків М. В. Динамічні моделі односекторної економіки з урахуванням утилізації продуктів забруднення. *Науково-виробничий журнал «Інноваційна економіка»*. Тернопіль, 2021. № 1–2. С. 174-179.

13. Григорків В. С., Григорків М. В. Динамічні моделі двосекторної екологічної економіки у випадку лінійних поведінкових функцій її суб'єктів. *Науковий журнал «Наукові записки Національного університету «Острозька академія», серія «Економіка»*. 2021. Випуск 20(48). С. 141–146.

References:

1. Forrester, Dzh. (1978). *Mirovaja dinamika* [World dynamics]. Nauka, Moskva, 168 p. (in Russ.).

2. Medouz, D.H., Medouz, D.L., Randers, J. (1994). *Za predelami rosta* [Beyond growth]. Progress, Pangeja, Moscow, 304 p. (in Russ.).

3. Leont'ev, V.V., Ford, D. (1972). Interdisciplinary analysis of the influence of economic structure on the environment. *Mezhotraslevoj analiz vlijanija struktury jekonomiki na okruzhajushhuju sredu* [Economics and Mathematical Methods], vol. 3, pp. 370–400 (in Russ.).

4. Mesarovich, M., Pestel, E. (1974). *Mankind at the Turning Point*. New York, 230 p.

5. Moiseev, N.N. (1988). *Ekologiya chelovechestva glazami matematika: (Chelovek, priroda i budushheye tsivilizatsii)* [The ecology of humanity through the eyes of a mathematician (Human, nature and the future of civilization)]. Mol. gvardiya, Moscow, Russia, 254 p. (in Russ.).

6. Voloshyn, V.V., Hordiienko, N.M., Horlenko, I.O., Danylyshyn, B.M., Dorohuntsov, S.I. (1997). *Kontsepsiia staloho rozvytku Ukrainy* [The concept of sustainable development of Ukraine]. Kyiv, 17 p. (in Ukr.).

7. Lyashenko, I.M. (1999). *Ekonomiko-matematychni metody ta modeli stalogo rozvytku* [Economic and mathematical methods and models of sustainable development]. Vyshha shkola, Kyiv, 236 p. (in Ukr.).

8. Ljashenko, I.N., Mihalevich, M.V., Uteuliev, N.U. (1994). *Metody jekologo-jekonomicheskogo modelirovanija* [Methods of the eco-economic modeling]. Bilim, Nukus, 236 p. (in Russ.).

9. Onyschenko, A.M. (2011). *Modeliuvannia ekoloho-ekonomichnoi vzaemodii v protsesi vykonannia rishen' Kiots'koho protokolu* [Modelling of ecologic-economic interaction in the process of implementation decisions of Kiotskogo protocol]. Poltavs'kyj literator, Poltava, 398 p. (in Ukr.).

10. Hryhorkiv, M.V. (2020). *Dynamichni modeli ekologo-ekonomichnyx system v umovax socialno-ekonomichnoyi klasterizaciyi* [Dynamic models of eco-economic systems in the conditions of socio-economic clustering]. *Ekonomichna dumka TNEU, Ternopil'*, P. 415 (in Ukr.).

11. Buiak, L.M. (2016). *Matematychni modeli zahalnoi ekonomichnoi dynamiky z urakhuvanniam sotsialno-ekonomichnoi klasteryzatsii* [Mathematical models of general economic dynamics taking into account socio-economic clustering]. Chernivetskyi nats. un-t, Chernivtsi, Ukraine, 392 p. (in Ukr.).

12. Hryhorkiv, V.S., Hryhorkiv, M.V. (2021). Dynamic models of one-sector economy taking into account the utilization of pollution products. *Innovatsijna ekonomika [Innovative economy]*, vol. 1–2, pp. 174–179 (in Ukr.).

13. Hryhorkiv, V.S., Hryhorkiv, M.V. (2021). Dynamic models of a two-sector environmental economy in the case of linear behavioral functions of its subjects. «*Naukovi zapysky Natsional'noho universytetu «Ostroz'ka akademii», serii «Ekonomika»»* [Scientific notes of the National University «Ostroh Academy», series «Economics»], vol. 20(48), pp. 141–146 (in Ukr.).