

# МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОГО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ В РОЗРІЗІ РЕСУРСНО-ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ

©2024 ПИВАВАР І. В., ПОНОМАРЕНКО О. О., ДЬЯЧКОВА О. В.

УДК 519.86  
JEL: C15; O11; Q57

## Пивавар І. В., Пономаренко О. О., Дьячкова О. В. Моделювання сталого економічного розвитку в розрізі ресурсно-екологічної складової

Метою дослідження є відображення взаємозв'язку між економічним розвитком і забрудненням навколишнього середовища. Для досягнення цієї мети побудовано імітаційну модель еколого-економічних процесів. У статті розглянуто загальноекономічні реформи, які призводять до непередбаченого збитку для навколишнього середовища. Тому існування застарілої політики, недосконалість ринку й організаційних структур деінде в економіці можуть непередбачуваним чином взаємодіяти з більші загальними економічними реформами та створювати стимули для надмірного використання природних ресурсів і деградації навколишнього середовища. Саме тому виправлення такого становища зазвичай не вимагає відмови від первісної економічної політики. Під час проведення імітаційних експериментів увесь спектр можливих картин поведінки моделі виходить при варіюванні коефіцієнта вибору стратегії, що являє собою управлінську. Побудована модель відображає еколого-економічні процеси, пов'язані із забрудненням та очищенням повітря на певній території виходячи із заданих початкових умов і часових рядів, що описують динаміку екзогенних змінних. Запропонована в дослідженні модель дозволяє передбачити динаміку ендогенних змінних (якісно і кількісно), причому зазначена поведінка можлива при незмінній структурі системи, а кількісні оцінки достовірні аж до 2040 р. (далі динаміка основних змінних наводиться для демонстрації можливої S-подібної поведінки системи). Наведена в роботі модель відображає взаємозв'язок між різними підсистемами (секторами економіки) за допомогою петель зворотного зв'язку та дозволяє розглянути вплив виділених підсистем (однієї на одну), що не вдається зробити за допомогою класичних методів, які застосовуються в економіці. Побудована модель дає зрозуміти, що для збереження екологічної рівноваги у світі ситуація вимагатиме серйозних збільшень інвестицій у розвиток природоохоронних технологій та зменшення екологічної шкоди від наявних виробничих технологій.

**Ключові слова:** сталий розвиток, економічний розвиток, ресурсно-екологічна складова, моделювання екологічної рівноваги, екологія, ресурси.

**Рис.:** 5. **Табл.:** 8. **Формул.:** 7. **Бібл.:** 11.

**Пивавар Ірина Володимирівна** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри державного управління, публічного адміністрування та економічної політики, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (просп. Науки, 9а, Харків, 61166, Україна)

**E-mail:** pivavariv@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6115-0200>

**Пonomarenko Олександр Олександрович** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри державного управління, публічного адміністрування та економічної політики, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (просп. Науки, 9а, Харків, 61166, Україна)

**E-mail:** alex.ponomarenko.tsk@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1188-4668>

**Дьячкова Ольга Володимирівна** – доцент кафедри математичних методів в економіці, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна)

**E-mail:** olga.v.dyachkova@karazin.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5751-9829>

**Researcher ID:** <https://www.webofscience.com/wos/author/record/B-1303-2016>

UDC 519.86  
JEL: C15; O11; Q57

## Pivavar I. V., Ponomarenko O. O., Dyachkova O. V. Modeling of Sustainable Economic Development in Terms of the Resource-Ecological Component

The purpose of the study is to reflect the relationship between economic development and environmental pollution. To achieve this goal, a simulation model of ecological and economic processes has been built. The article discusses general economic reforms that lead to unforeseen damage to the environment. Therefore, the existence of outdated policies, market imperfections, and organizational structures elsewhere in the economy can interact in unpredictable ways with broader economic reforms and create incentives for overuse of natural resources and environmental degradation. That is why the correction of such a situation usually does not require the abandonment of the original economic policy. When conducting simulation experiments, the whole range of possible pictures of the model's behavior is obtained by varying the coefficient of choice of the strategy, which is a managerial one. The built model reflects the ecological and economic processes associated with air pollution and purification in a certain area based on the specified initial conditions and time series that describe the dynamics of exogenous variables. The model proposed in the study allows predicting the dynamics of endogenous variables (qualitatively and quantitatively), and this behavior is possible with the unchanged structure of the system, and quantitative estimates are reliable until 2040 (further, the dynamics of the main variables is provided to demonstrate the possible S-shaped behavior of the system). The model presented in the paper reflects the relationship between different subsystems (sectors of the economy) with the help of feedback loops and allows to consider the influence of selected subsystems (one on the other), which cannot be done with the help of classical methods used in economics. The built model makes it clear that in order to maintain the ecological balance in the world, the situation will require a serious increase in investments in the development of environmental technologies and reduction of environmental damage from existing production technologies.

**Keywords:** sustainable development, economic development, resource and environmental component, ecological balance modeling, ecology, resources.

**Fig.:** 5. **Tabl.:** 8. **Formulae:** 7. **Bibl.:** 11.

**Pyvavar Iryna V.** – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Public Administration, Public Administration and Economic Policy, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics (9a Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: pivavariv@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6115-0200>

**Ponomarenko Oleksandr O.** – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Public Administration, Public Administration and Economic Policy, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics (9a Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: alex.ponomarenko.tsk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1188-4668>

**Dyachkova Olga V.** – Associate Professor of the Department of Mathematical Methods in Economics, V. N. Karazin Kharkiv National University (4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine)

E-mail: olga.v.dyachkova@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5751-9829>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/B-1303-2016>

Сьогодні в умовах загострення енергетичних, ресурсних та екологічних проблем питання сталого економічного зростання є надзвичайно актуальним. Враховуючи це, зарубіжна практика розглядає питання сталості економічного розвитку як запоруку довгострокового добробуту через те, що економічний розвиток без обмежень не є оптимальним і в довгостроковому періоді може призвести до наслідків, що неможливо буде відвернути.

На всіх стадіях свого розвитку людина була тісно пов'язана з навколишнім світом. Проте відтоді, як з'явилося високоіндустріальне суспільство, небезпечне втручання людини в природу різко посилилося, розширився обсяг цього втручання, став різноманітніше і загрожує стати глобальною небезпекою для людства. Витрата невідновлюваних видів сировини підвищується, усе більше орних земель вибуває з економіки в результаті будівництва міст і виробничих ділянок. Людині доводиться все більше втручатися в господарство біосфери – тієї частини нашої планети, у якій існує життя. Біосфера Землі в цей час піддається щораз більшому антропогенному впливу.

В останнє десятиліття все більше визнання одержувало існування взаємного впливу здорового навколишнього середовища та сталого економічного розвитку. Водночас у світі відбувалися великі політичні, соціальні й економічні зміни, через те, що багато країн починали здійснення програм радикальної структурної перебудови своєї економіки. Таким чином, вивчення впливу на навколишнє середовище загальноекономічних заходів стало проблемою, що має серйозне значення та вимагає якнайшвидшого вирішення [8].

Слід також сказати, що загальноекономічні реформи іноді призводять до непередбаченого збитку для навколишнього середовища. Існування застарілої політики, недосконалість ринку та організаційних структур деінде в економіці можуть непередбачуваним чином взаємодіяти з більш загаль-

ними економічними реформами та створювати стимули для надмірного використання природних ресурсів і деградації навколишнього середовища. виправлення такого становища зазвичай не вимагає відмови від первісної економічної політики. Замість цього потрібні певні додаткові заходи, що усувають недосконалість ринку, організаційних структур чи віджили політику. Такі заходи зазвичай не тільки сприятливо позначаються на навколишньому середовищі, але й є вирішальним компонентом успіху загальноекономічних реформ [6].

З початку 70-х років XIX сторіччя все частіше озвучуються занепокоєння щодо діяльності людини, яка використовує ресурсні запаси та забруднює навколишнє середовище. Оскільки економічні рішення обмежені наявними природними ресурсами та здатністю природи «протистояти» забрудненню, це приводить нас до питання, чи варто продовжувати використання наявної концепції економічного розвитку [4].

Такі економісти, як D. H. Meadows зі співавторами [5] та Н. Е. Daly [1; 2], сформулювали песимістичні прогнози про «несподіване і неконтрольоване скорочення населення та виробничої спроможності», якщо не будуть встановлені «умови для екологічної й економічної стабільності, що є запорукою стабільності в майбутньому». Інші економісти, такі як М. Beckerman, мали оптимістичні погляди на технологічний прогрес і стверджували, що відкриття нових замінників робить можливим подальше економічне зростання.

Загальним консенсусом дебатів про економічний розвиток є компроміс між навколишнім середовищем та економікою. Компроміс полягає в тому, що економічна активність, яка ігнорує біологічні та соціальні системи, не є сталою. Існує безліч різних визначень поняття сталості, але всі вони схожі між собою в розрізі двох основних моментів. По-перше, вони визнають, що ресурси та навколишнє середовище обмежують можливості

впливу на концепції розвитку та споживання в довгостроковому періоді. По-друге, вони зосереджені на рівновазі між поколіннями. Одне з найбільш відомих визначень, висловлене Брундтландською Комісією в 1987 році: «Стабільний розвиток є розвитком, який задовольняє потреби сучасного покоління, не обмежуючи при цьому право майбутніх поколінь задовольняти їхні потреби». Подібним чином R. M. Solow [11] визначив стабільність як «зобов'язання вести себе так, що б надати майбутнім поколінням можливість жити не гірше, ніж ми». D. Pearce та інші висловили думку, що «природні ресурси не повинні скорочуватися», тоді як A. Pezzi визначив стабільність економічного зростання як «відсутність скорочення виробництва та споживання з часом» і сталість економічного розвитку як «незменшення корисності з часом».

Динамічні моделі поновлюваних ресурсів можуть бути знайдені в роботах таких учених, як C. Clark, W. Semmler, M. Sieveking [7–10]. У цих роботах теорема стабільності ресурсної економіки, які з'явилися при вивченні одного ресурсу, працюють тільки в тому випадку, коли ресурси взаємодіють як екологічна система. Надалі вивчається проблема управління ресурсами та політика, спрямована на їх збереження. Тим паче, що в роботі W. Semmler, M. Sieveking розглядається фінансове виснаження ресурсів і виснаження відкритих ресурсів.

Концепція сталого розвитку за відносно короткий період часу стала доволі часто згадуваним поняттям в економіці. Однак існують певні неоднозначності стосовно вживання понять сталості та сталого розвитку. R. Goodland у своїй роботі [3] розрізняв поняття сталості, економічної сталості, соціальної сталості та сталого розвитку. Екологічна сталість визначається як підтримка світової системи життєздатною. Економічна сталість є еквівалентною екологічній сталості, але визначена як збереження певного рівня капіталу. Соціальна сталість – це збереження соціального капіталу. Сталий розвиток повинен містити в собі всі вищезгадані типи сталості. Водночас як труднощі в знаходженні визначення екологічної та економічної сталості (включаючи з розгляду соціальну сталість), поняття сталого розвитку є навіть більш неоднозначним. Визначення G. H. Brundtland сталого розвитку було таким: «розвиток, що є компромісом між добробутом сучасного покоління та правом майбутніх поколінь реалізувати свої потреби». Воно базується на теорії міжгенераційної рівноваги.

З появою концепції сталого розвитку багато економістів ставились зі скептицизмом до використання цієї концепції в економіці. Сьогодні так само багато з них продовжують демонструвати

скептицизм, проте слід зауважити, що все більше і більше вчених поповнюють ряди прихильників і відзначають її значущість. Для багатьох економістів сталий розвиток зводиться до питання меж генеративної рівноваги та оптимального використання ресурсів. Концепція оптимального використання ресурсів має ключову роль у теорії добробуту. Для інших економістів цілком сталого розвитку є встановлення обмежень на масштаби функціонування економіки.

Завданням статті є побудова імітаційної моделі еколого-економічних процесів. Метою цього дослідження є відображення взаємозв'язку між економічним розвитком і забрудненням навколишнього середовища.

Розглянемо модель, яка відображає такі еколого-економічні процеси:

- ✦ забруднення навколишнього середовища ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ) у результаті сільськогосподарського та промислового виробництва, а також при спалюванні палива (нафти, газу та вугілля);
- ✦ зменшення й усунення забруднення природним і штучним (за допомогою наявних технологій) шляхами;
- ✦ поліпшення природоохоронних технологій шляхом інвестицій в охорону навколишнього середовища.

Проведемо послідовну побудову імітаційної моделі. Ця модель (система) містить 49 елементів [4]. У ній можна виділити чотири пов'язані між собою підсистеми: підсистема забруднення, що описує процеси утворення та розсіювання забруднення; підсистема природоохоронних капіталовкладень; технологічна підсистема; підсистема управління.

Перша з вищезгаданих підсистем, підсистема забруднення, описує забруднення повітря двоокисом вуглецю та іншими речовинами; такими як  $\text{SO}_x$  та  $\text{NO}_x$ , далі не- $\text{CO}_2$  забрудники [6]. У цій підсистемі можна виділити такі екзогенні й ендогенні змінні, що наведено в *табл. 1*.

У цій підсистемі розглядаються процеси накопичення та розсіювання  $\text{CO}_2$  та не- $\text{CO}_2$  забруднення ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ). Тому серед ендогенних змінних можливо виділити такі змінні темпів і рівнів (*табл. 2*).

Решта ендогенних змінних будуть відігравати роль допоміжних, причому ефективний час розсіювання визначає зворотний зв'язок між інтенсивністю забруднення і часом розсіювання забруднення, є табличною функцією, залежне від відносної інтенсивності забруднення. Екзогенні змінні можна розділити на константи і табличні функції. Табличні функції є заданими у вигляді часових рядів, які виходять на етапі референції шляхом аналізу

Таблиця 1

## Екзогенні й ендогенні змінні підсистеми забруднення моделі в моделі

Екзогенні змінні	Ендогенні змінні
Забруднення від виробництва виробничих товарів (кг/\$)	CO <sub>2</sub> забруднення (кг)
Забруднення від виробництва сільськогосподарських товарів (кг/\$)	Не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг)
Товари, що виробляються (\$/рік)	Накопичення CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)
Сільськогосподарська продукція, що виробляється (\$/рік)	Накопичення не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)
Площа земель (га)	Розсіювання CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)
Загальна енергія спалення палива (газ, вугілля, нафта) (БТЕ/гол)	Розсіювання не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)
Коефіцієнти зв'язку загальної енергії спалювання палива (газу, вугілля, нафти) з кількістю CO <sub>2</sub> та не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг/БТЕ)	Не-CO <sub>2</sub> забруднювання від спалювання палива (кг/рік)
Інтенсивність забруднення (кг/га)	Інтенсивність забруднення (кг/га)
Час розсіювання забруднення (рік)	час розсіювання забруднення (рік)
Технологія (бр)	Ефективний час розсіювання забруднення (рік)

Таблиця 2

## Змінні темпів і рівнів підсистеми забруднення в моделі

Змінні темпів	Змінні рівнів
Накопичення CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)	CO <sub>2</sub> забруднення (кг)
Розсіювання CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)	
Накопичення не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)	Не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг)
Розсіювання не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг/рік)	

Таблиця 3

## Константи та табличні функції підсистеми забруднення в моделі

Константи	Табличні функції
Забруднення від виробництва товарів (кг/\$)	Товари, що виробляються (\$/рік)
Забруднення від сільськогосподарського виробництва (кг/\$)	
Площа земель (га)	Сільськогосподарська продукція, що виробляється
Інтенсивність забруднення (кг/га)	
Час розсіювання забруднення (рік)	Загальна енергія спалювання палива (газ, вугілля, нафта) (БТЕ/рік)
Коефіцієнти зв'язку загальної енергії спалювання палива (газ, вугілля, нафта) з кількістю CO <sub>2</sub> та не-CO <sub>2</sub> забруднення (кг/БТЕ)	

статистичних даних, що стосуються промисловості, сільського господарства та енергетики [6]. Слід зазначити, що всі часові ряди в цій моделі складаються з реальних (1960–2020 рр.) і прогнозованих (2021–2050 рр.) значень (табл. 3).

Спостережуване забруднення від виробництва товарів і від сільськогосподарського виробництва пов'язує випуск промислової та сільськогосподарської продукції з кількістю не-CO<sub>2</sub> забруднення (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>).

Спостережувана інтенсивність забруднення та спостережуване розсіювання забруднення є нормувальними коефіцієнтами для відповідних ендогенних змінних. Співвідношення між цими змінними та нормувальні коефіцієнти є основою інформаційних петель зворотного зв'язку, присутніх у цій підсистемі [7].

Площа земель необхідна для обчислення інтенсивності забруднення на заданій території.

Коефіцієнти зв'язку загальної енергії спалювання палива (газу, вугілля, нафти) з кількістю

CO<sub>2</sub> та не-CO<sub>2</sub> забруднення (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) дозволяють переводити енергію спалюваного палива в кількість CO<sub>2</sub> і не-CO<sub>2</sub> забруднення, що виділяється в результаті. Технологія ж є змінною, що зв'язує підсистему забруднення навколишнього середовища з технологічною підсистемою [8]. Підсистема природоохоронних капіталовкладень включає в себе такі екзогенні й ендогенні змінні (табл. 4).

Оскільки в цій підсистемі розглядаються процеси накопичення та вибуття природоохоронного капіталу, то так само, як і для попередньої підсистеми, можна виділити серед ендогенних змінних такі, що претендують на роль змінних темпів і рівнів (табл. 5).

Решта ендогенних змінних виступатиме як допоміжні змінні. Екзогенні змінні цієї підсистеми можна розділити на константи і табличні функції таким чином (табл. 6).

Середній термін служби природоохоронного капіталу являє собою узагальнений період його амортизації. Тимчасова затримка природоохоронних капіталовкладень відображає часовий лаг між цільовими природоохоронними інвестиціями та початком їх роботи як природоохоронного капіталу [6].

Бажаний вплив природоохоронного капіталу на забруднення задається табличній функцією, що зв'язує підсистему забруднення навколишнього середовища з підсистемою природоохоронних капіталовкладень.

Табличні функції, пов'язані з товарами, дають внесок у обчислену стандартним чином частку наявних товарів, яка відображає ефективність природоохоронних інвестицій (табл. 7).

Передбачається, що технологія розвивається кумулятивним чином з одиничного значення за рахунок природоохоронних інвестицій, а її рівень підвищується за рахунок процесу технологічного

Таблиця 4

**Екзогенні й ендогенні змінні природоохоронної підсистеми моделі**

Екзогенні змінні	Ендогенні змінні
Середній строк служби природоохоронного капіталу (рік)	Природоохоронний капітал (\$)
Часова затримка природоохоронних капіталовкладень (рік)	Природоохоронні інвестиції (\$/рік)
Відносний природоохоронний капітал на душу населення (\$/ос.)	Вибуття природоохоронного капіталу (\$/рік)
Кількість населення (ос.)	
Товари, що виробляються (\$/рік)	Цільовий природоохоронний капітал (\$)
Товари, що експортуються (\$/рік)	
Товари, що імпортуються (\$/рік)	
Загальний попит на товари (\$/рік)	Цільові природоохоронні інвестиції (\$/рік)
Функція вибору природоохоронних стратегій (бр)	Частка наявних товарів (бр)
Бажаний вплив природоохоронного капіталу на забруднення (бр)	Відносний природоохоронний капітал (\$)

Таблиця 5

**Змінні темпів і рівнів природоохоронної підсистеми моделі**

Змінні темпів	Змінні рівнів
Природоохоронні інвестиції (\$/рік)	Природоохоронний капітал (\$)
Вибуття природоохоронного капіталу (\$/рік)	

Таблиця 6

**Константи і табличні функції природоохоронної підсистеми моделі**

Константи	Табличні функції
Середній строк служби природоохоронного капіталу (рік)	Кількість населення (ос.)
Часова затримка природоохоронних капіталовкладень (рік)	Товари, що виробляються (\$/рік)
Відносний природоохоронний капітал на душу населення (\$/ос.)	Товари, що експортуються (\$/рік)
Бажаний вплив природоохоронного капіталу на забруднення (бр)	Товари, що імпортуються (\$/рік)
	Загальний попит на товари (\$/рік)

Екзогенні й ендогенні змінні технологічного сектора моделі

Екзогенні змінні	Ендогенні змінні
Природоохоронний капітал (\$)	Технологія (бр)
Природоохоронні інвестиції (\$/рік)	Технологічний розвиток (1/рік)
Технологічний параметр (бр)	

Таблиця 8

Змінні темпів і рівнів технологічного сектора моделі

Змінні темпів	Змінні рівнів
Технологічний розвиток (1/рік)	Технологія (бр)

розвитку. Тому серед ендогенних змінних технологічного сектора однозначно виявляються змінні темпу та рівня (табл. 8).

Серед ендогенних змінних природоохоронний капітал і природоохоронні інвестиції є змінними, що зв'язують технологічну підсистему з підсистемою природоохоронних капіталовкладень.

Технологічний параметр, використовуваний в моделі, є калібрувальним коефіцієнтом, що відображає зв'язок вищевказаних підсистем.

Підсистема управління представлена в цій моделі одним агрегованим параметром, а саме, функцією вибору природоохоронної стратегії.

Функція вибору природоохоронної стратегії є інструментом впливу на природоохоронні інвестиції та може приймати значення в інтервалі від 0 до 1. Причому чим більше її значення, тим більше величина цільових природоохоронних інвестицій, що відображають залежні від вибору стратегії природоохоронні інвестиції.

**В**заємозв'язок параметрів описаних вище трьох підсистем можна виразити мовою диференціальних рівнянь. Усі наведені нижче рівняння виходять або з аналізу розбіжностей і закону збереження матеріальних ресурсів (рівняння рівнів і темпів), або з експертних оцінок та аналізу статистичної інформації (табличні функції) [7].

Розглянемо спочатку сектор забруднення атмосфери. Нехай  $P_{nco2}(t)$  – не- $CO_2$  забруднення ( $NO_x$ ,  $SO_x$ ),  $V_{gnco2}(t)$  – швидкість накопичення не- $CO_2$  забруднення;  $V_{dnco2}(P_{nco2})$  – швидкість розсіювання не- $CO_2$  забруднення, тоді:

$$\begin{cases} \frac{dP_{nco2}}{dt} = V_{gnco2} - V_{dnco2} \\ P_{nco2}(t_0) = N_{lnco2} \cdot Sl \end{cases}, \quad (1)$$

де  $N_{lnco2} = 5$  кг/га – початкова інтенсивність не- $CO_2$  забруднення;

$Sl = 9.37 \cdot 10^8$  га – площа земель;

$t_0 = 1965$  рік.

Наступне рівняння відображає  $CO_2$  забруднення:

$$\begin{cases} \frac{dP_{co2}}{dt} = V_{gco2} - V_{dco2} \\ P_{co2}(t_0) = N_{lpc2} \cdot Sl \end{cases}, \quad (2)$$

де  $N_{lpc2} = 7$  кг/га – початкова інтенсивність  $CO_2$  забруднення;

$P_{co2}(t)$  –  $CO_2$  забруднення;

$V_{gco2}(t)$  – швидкість накопичення  $CO_2$  забруднення;

$V_{dco2}(P_{co2})$  – швидкість розсіювання  $CO_2$  забруднення.

Вказана в рівняннях швидкість визначається таким чином:

$$\begin{cases} V_{gnco2} = \sum_{i=1}^2 NP_2 \cdot Y(t)_i + \\ + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^3 (K_{nox_j} + K_{sox_j}) \cdot TEF_j(t); \\ V_{dnco2} = \frac{P_{nco2}}{Td} \cdot \alpha (1+T), \\ Td = Tnd \cdot f_1(RPI), f_1 > 0; \\ V_{gco2} = \sum_{j=1}^3 Kc_j \cdot TEF(t)_j; \\ V_{dco2} = \frac{P_{co2}}{Td} \cdot \alpha (1+T); \\ RPI = \frac{P_{nco2} + P_{co2}}{S \cdot NPI}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $NP = (0,28; 0,00007)$  кг/\$ – коефіцієнти спостережуваного забруднення від сільськогосподарського та промислового виробництва відповідно;

$Y(t) = (Y_{agr}(t), Y_{ind}(t))$ , \$/рік – продукція, що випускається сільським господарством і промисловістю відповідно; за роки та виражена в доларовому еквіваленті (задається екзогенно);

$T(t)$  – рівень технологічного розвитку, що визначається в технологічній підсистемі (секторі);

$TEF(t) = (Tefc(t), Tefo(t), Tefg(t))$ , БТЕ/год – загальна енергія спалювання палива (вугілля, нафти та газу) в рік (задається екзогенно);

$Knox = (3,16 \cdot 10^{-7}, 3,26 \cdot 10^{-7}, 1,42 \cdot 10^{-7})$  кг/БТЕ – коефіцієнт зв'язку енергії спалювання палива з кількістю забруднення оксидами азоту для вугілля, нафти та газу відповідно;

$Knos = (1,36 \cdot 10^{-6}, 9 \cdot 10^{-8}, 1,7 \cdot 10^{-8})$  кг/БТЕ – коефіцієнти зв'язку енергії спалювання палива з кількістю забруднення оксидом сірки для вугілля, нафти та газу відповідно;

$\alpha = 0,5$  – підганяльний коефіцієнт моделі (визначається екзогенно), що зв'язує підсистему забруднення з технологічною підсистемою і визначальний вплив рівня технологічного розвитку на швидкості розсіювання  $CO_2$  та не- $CO_2$  забруднення;

$Td$  – час розсіювання забруднення;

$Tnd = 2$  роки – час розсіювання забруднення;

$Kc = (2,53 \cdot 10^{-5}, 1,9 \cdot 10^{-5}, 1,44 \cdot 10^{-5})$ , кг/БТЕ – коефіцієнти зв'язку енергії спалювання палива з кількістю, забруднення вуглекислим газом для вугілля, нафти та газу відповідно;

$RPI$  – відносна інтенсивність забруднення;

$NPI$  – інтенсивність забруднення [7].

У секторі природоохоронних капіталовкладень маємо такі співвідношення:

$$\begin{cases} \frac{dIC}{dt} = Vi - Vd \\ IF(t_0) = RIC \cdot P \end{cases}, \quad (4)$$

де  $IF(t_0)$  – природоохоронний капітал;

$Vi$  – природоохоронні інвестиції;

$Vd(IC)$  – вибуття природоохоронного капіталу;

$RIC = 5$  \$/ос. – відносний природоохоронний капітал на душу населення;

$P = 100$  млн ос. – початкова кількість населення (в 1965 р.).

При цьому швидкість  $Vi(t)$  і  $Vd(IC)$  визначається таким чином:

$$\begin{cases} Vi = Ti \cdot Fga, Ti = MAX(0, Vd + \left(\frac{Tic \cdot IC}{Tdi}\right)) \\ Vd = \frac{IC}{Tlic} \\ Tic = IC \cdot f_2(RIP), f_2 > 0 \\ Fga = \frac{Y_2(t) + I(t) - E(t)}{D} \end{cases}, \quad (5)$$

де  $Ti$  – цільові природоохоронні інвестиції;

$Fga$  – частка наявних товарів;

$Tic$  – цільовий природоохоронний капітал;

$k \in [0, 1]$  – коефіцієнт вибору стратегії, що визначає частку природоохоронних інвестицій від загального обсягу інвестицій;

$Tdi = 5$  років – тимчасова затримка природоохоронних капіталовкладень;

$Tlic = 15$  років – середній термін служби природоохоронного капіталу;

$Y_2(t) = Yind(t)$ , \$/рік – продукція промисловості, що випускається, за роки та виражена в доларовому еквіваленті;

$I(t)$  – імпорт товарів;

$E(t)$  – експорт товарів;

$D(t)$  – загальний (сукупний) попит на товари промислового виробництва (задаються екзогенно).

У секторі природоохоронної технології маємо такі співвідношення:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = Vtd \\ T(t_0) = 1 \end{cases}, \quad (6)$$

де  $T(t)$  – технологія (рівень технологічного розвитку);

$Vtd(T)$  – технологічний розвиток (швидкість).

При цьому  $Vtd(T)$  відділяється таким чином:

$$Vtd = \beta \frac{Vi}{IC}, \quad (7)$$

де  $P = 0.08$  – технологічний параметр (визначається екзогенно), що є підганяльним коефіцієнтом моделі та визначає зв'язок технологічної підсистеми з підсистемою природоохоронних інвестицій.

Під час проведення імітаційних експериментів весь спектр можливих картин поведінки моделі виходить при варіюванні коефіцієнта вибору стратегії, що являє собою управлінську підсистему [2]. Крім того, можна змінювати табличні функції  $f_1, f_2$ , а також функції  $TEF(t), Y(t), I(t), E(t), D(t)$ .

У кінцевому підсумку за допомогою методу системної динаміки імітаційного моделювання отримаємо таку чотирирівневу поточкову діаграму, яка відобразить вищевказані підсистеми та взаємозв'язки між ними, що побудована за допомогою пакета Vensim (рис. 1).

Ця модель дозволяє проаналізувати механізм утворення викидів екологічно-небезпечних речовин у результаті функціонування світової промисловості [3]. Одним із таких небезпечних викидів є викиди  $CO_2$ , динаміку яких наведено на рис. 2.

Екологічний збиток також містить у собі викиди таких речовин:  $SO_2$  і  $NO_2$ , які в моделі об'єднані як не- $CO_2$  викиди. Їх динаміку наведено на рис. 3.

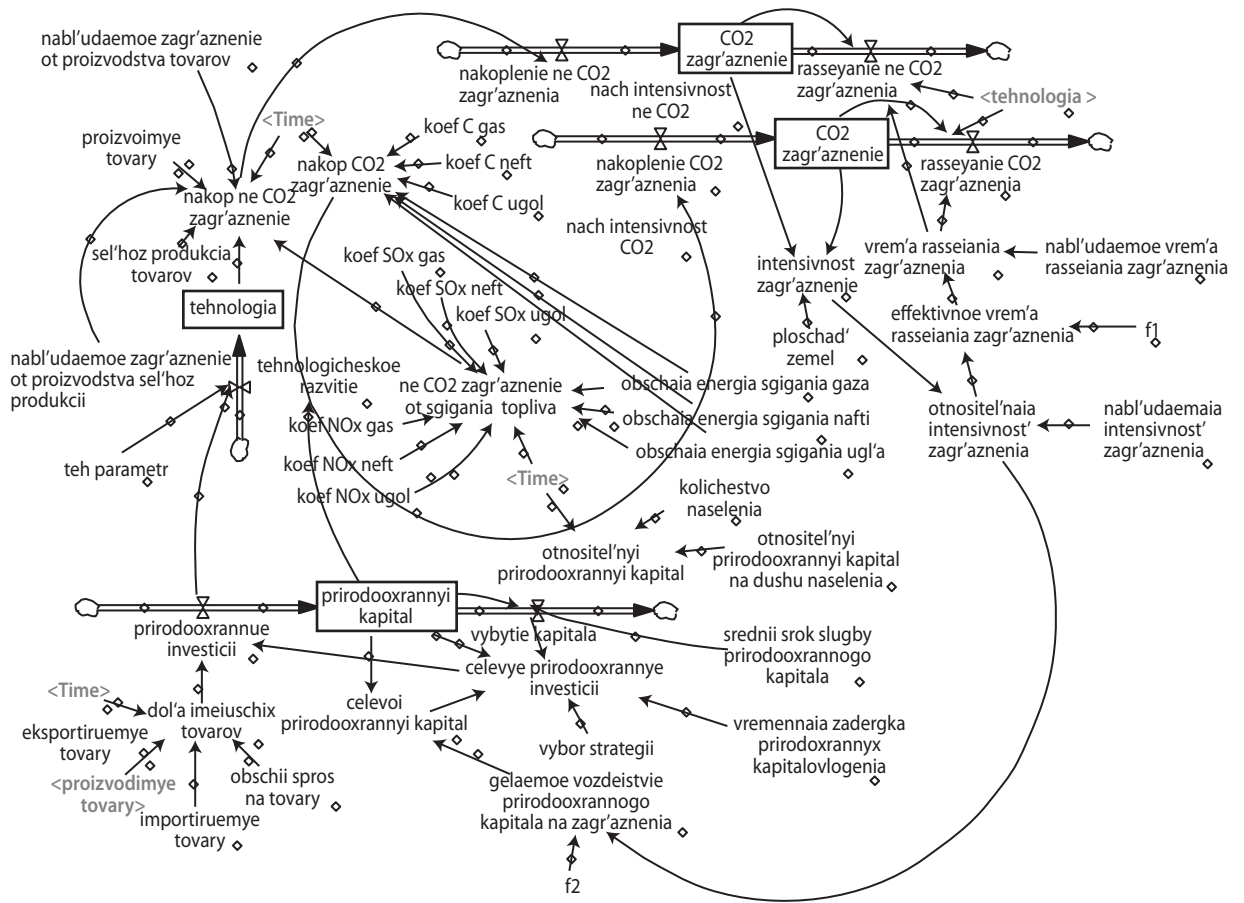
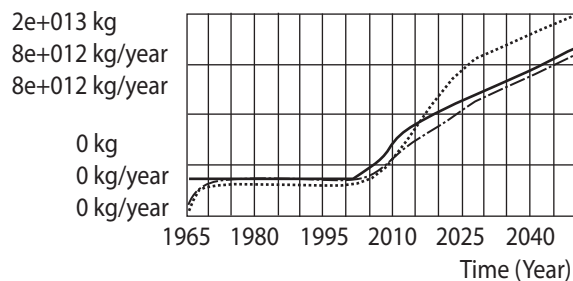
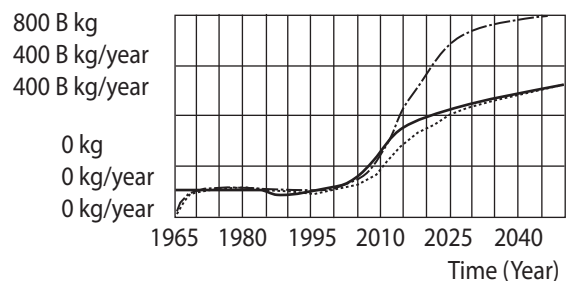


Рис. 1. Імітаційна модель еколого-економічних процесів



"CO2 zagr'aznenie": Current ..... kg  
 "nakoplenie CO2 zagr'aznenie": Current — kg/year  
 "rasseyanie CO2 zagr'aznenie": Current - - - kg/year

Рис. 2. Динаміка викидів CO<sub>2</sub>



"ne CO2 zagr'aznenie": Current ..... kg  
 "nakoplenie CO2 zagr'aznenie": Current — kg/year  
 "rasseyanie CO2 zagr'aznenie": Current - - - kg/year

Рис. 3. Динаміка викидів не-CO<sub>2</sub>

Говорячи тільки про енергетику, треба розуміти, що вона є основним джерелом викидів CO<sub>2</sub>. Розглядаючи не-CO<sub>2</sub> викиди, слід зауважити, що особливу роль тут також відіграє енергетика [4]. Дана модель також дозволяє проаналізувати це окремо, що показано на рис. 4.

Виходячи з проаналізованого впливу економіки на екологічний стан, слід звернути особливу увагу на діяльність, спрямовану на мінімізацію завданої шкоди. Ця мінімізація вимагає серйозних капіталовкладень. Їх динаміку наведено на рис. 5.

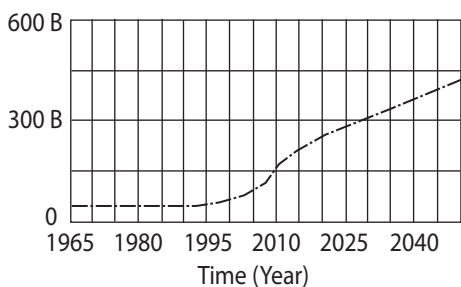
Отже, ця модель дає зрозуміти те, що для збереження екологічної рівноваги у світі ситуація вимагатиме серйозних збільшень інвестицій у розвиток природоохоронних технологій і зменшення екологічної шкоди від наявних виробничих технологій [6].

### ВИСНОВКИ

При дослідженні цієї моделі варто зазначити таке:

- ♦ модель відображає еколого-економічні процеси, пов'язані із забрудненням та очищен-





“ne CO2 zagr’aznenie ot sgigania topliva” :  
Current ..... kg/year

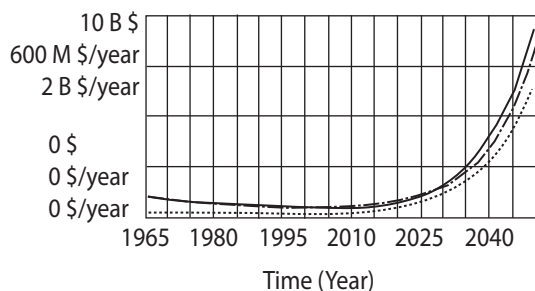
**Рис. 4. Динаміка викидів не- $\text{CO}_2$  відходів як результат функціонування світової енергетики**

ням повітря на певній території, з урахуванням заданих початкових умов і часових рядів, що описують динаміку екзогенних змінних;

- ✦ модель дозволяє передбачити динаміку, ендогенних змінних (якісно та кількісно), причому зазначена поведінка можлива при незмінній структурі системи, а кількісні оцінки достовірні аж до 2040 р. (далі динаміка основних змінних наводиться для демонстрації можливої S-подібної поведінки системи);
- ✦ модель відображає взаємозв’язок між різними підсистемами (секторами економіки) за допомогою петель зворотного зв’язку та дозволяє розглянути вплив виділених підсистем (одна на одну), що не вдається зробити за допомогою класичних методів, які застосовуються в економіці. ■

#### БІБЛІОГРАФІЯ

1. Daly H., Cobb J. B. For the Common Good: Redirecting the Economy toward Community, the Environment and a Sustainable Future. Boston : Beacon Press, 1989.
2. Daly H. E. The economic growth debate: what some economists have learned but many have not. *Journal of Environmental Economics and Management*. 1987. Vol. 14. Iss. 4. P. 323–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(87\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0095-0696(87)90025-8)
3. Goodland R. The Concept of Environmental Sustainability. *Annual Review of Ecological Systems*. 1995. Vol. 26. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.000245>
4. Hanley N., Shogren J. F., White B. Environmental Economics: In Theory and Practice. Palgrave Macmillan, Basingstoke, 2007.
5. Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. W. The Limits to Growth. New York : Universe Books, 1972.



природо охранны і капитал : Current ..... \$  
v y by tie капитал : Current ..... \$/year  
природо охранные инвестиции : Current ..... \$/year

**Рис. 5. Динаміка капіталовкладень у природоохоронні проекти**

6. Forestman S. Environmental and Natural Resource Economics. Glen view, Illinois London, 1984.
7. Semmler W., Gong G. Estimating parameters of real business cycle models. *Journal of Economic Behavior and Organization*. 1997. Vol. 30. Iss. 3. P. 301–325. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2681\(96\)00872-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2681(96)00872-4)
8. Semmler W., Sieveking M. On the optimal exploitation of interacting resources. *Journal of Economics*. 1994. Vol. 59. P. 23–49. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01225931>
9. Semmler W., Sieveking M. Debt dynamics and sustainable debt. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2000. Iss. 5–7. P. 1121–1144. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-1889\(99\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0165-1889(99)00039-1)
10. Sieveking M., Semmler W. The present value of resources with large discount rates. *Applied Mathematics and Optimization*. 1997. Vol. 35. P. 283–309. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02683332>
11. Solow R. M. Is the end of the world at hand? The Economic Growth Controversy / A. Weintraub, E. Schwartz, R. Aronson (eds.) London : Palgrave Macmillan, London, 1973. P. 39–61. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-349-02214-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-349-02214-4_2)

#### REFERENCES

- Daly, H. E. “The economic growth debate: what some economists have learned but many have not”. *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 14, no. 4 (1987): 323–336. DOI: [https://doi.org/10.1016/0095-0696\(87\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0095-0696(87)90025-8)
- Daly, H., and Cobb, J. B. *For the Common Good: Redirecting the Economy toward Community, the Environment and a Sustainable Future*. Boston: Beacon Press, 1989.
- Forestman, S. *Environmental and Natural Resource Economics*. Illinois London: Glen view, 1984.
- Goodland, R. “The Concept of Environmental Sustainability”. *Annual Review of Ecological Systems*, vol. 26 (1995): 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.000245>

- Hanley, N., Shogren, J. F., and White, B. *Environmental Economics: In Theory and Practice*. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2007.
- Meadows, D. H. et al. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books, 1972.
- Semmler, W., and Gong, G. "Estimating parameters of real business cycle models". *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 30, no. 3 (1997): 301-325.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2681\(96\)00872-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2681(96)00872-4)
- Semmler, W., and Sieveking, M. "Debt dynamics and sustainable debt". *Journal of Economic Dynamics and Control*, no. 5-7 (2000): 1121-1144.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-1889\(99\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0165-1889(99)00039-1)
- Semmler, W., and Sieveking, M. "On the optimal exploitation of interacting resources". *Journal of Economics*, vol. 59 (1994): 23-49.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01225931>
- Sieveking, M., and Semmler, W. "The present value of resources with large discount rates". *Applied Mathematics and Optimization*, vol. 35 (1997): 283-309.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02683332>
- Solow, R. M. *Is the end of the world at hand? The Economic Growth Controversy*. London: Palgrave Macmillan, London, 1973.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-349-02214-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-349-02214-4_2)