

УДК 339.187.44 : 004

JEL Q01

DOI: 10.32782/2786-8273/2025-10-2

Верстяк А.В.

доктор економічних наук,
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8090-1233>

Andrii Verstiak

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

Верстяк О.М.

кандидат економічних наук,
Чернівецький торговельно-економічний інститут
Державного торговельно-економічного університету
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4222-4964>

Oksana Verstiak

Chernivtsi Institute of Trade and Economics
of State University of Trade and Economics

Вінничук І.С.

кандидат економічних наук,
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5961-550X>

Igor Vinnychuk

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

Ярошенко О.І.

кандидат економічних наук,
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5976-6559>

Olena Yaroshenko

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ДОСЛІДЖЕННІ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ КОНВЕРГЕНЦІЇ

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE STUDY OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC CONVERGENCE

Анотація. У статті розглядається роль інформаційних технологій як ефективного інструменту для дослідження процесів еколого-економічної конвергенції між Україною та країнами Європейського Союзу. Основна увага приділена аналізу так званої висхідної та низхідної конвергенції, яка відображає взаємозв'язок між динамікою показників сталого розвитку та зменшенням (або зростанням) диспропорцій між країнами. Методологічною основою дослідження є застосування мови програмування R та спеціалізованого пакета *convergeEU*, який дозволяє автоматизовано виявляти типові патерни розвитку на основі статистичних даних. Результати підтверджують доцільність використання цифрових аналітичних інструментів у розробці стратегій сталого розвитку та формуванні доказової політики в контексті євроінтеграційних процесів.

Ключові слова: еколого-економічна конвергенція, інформаційні технології в економіці, інформаційні системи, R, сталий розвиток, конвергенція, еколого-економічні системи.

Introduction. The rapid development of global economic systems has intensified the need to ensure sustainable interaction between the economy and the environment. The challenge lies in balancing economic growth with ecological security, which makes the study of eco-economic convergence highly relevant. Information technologies (IT) are increasingly becoming an effective tool for analyzing complex interrelations within eco-economic systems. **Purpose.** The purpose of this study is to explore the role of modern information technologies in researching eco-economic convergence and to assess their potential for supporting sustainable development strategies. **Methods.** The research is based on system analysis, comparative evaluation, and modeling approaches using specialized information systems and software tools, particularly statistical packages such as R. These methods allow the identification of trends, interdependencies, and scenarios of eco-economic transformations. **Results.** The study demonstrates that the application of IT in eco-economic research enables more accurate modeling of environmental and economic processes, enhances the quality of forecasting, and contributes to evidence-based decision-making. It was established that information systems improve the efficiency of monitoring ecological indicators, facilitate big data processing, and

reveal hidden patterns of convergence between ecological and economic subsystems. **Conclusion.** The findings confirm that information technologies serve as a powerful catalyst for eco-economic convergence studies. Their integration into research practice not only improves analytical accuracy but also supports the formulation of effective strategies for sustainable development. The author suggests expanding the use of digital platforms, open data sources, and interdisciplinary modeling tools in order to strengthen the scientific and practical outcomes of eco-economic research. The article examines the role of information technologies as an effective tool for studying the processes of ecological and economic convergence between Ukraine and the European Union countries. The main focus is placed on the analysis of so-called upward and downward convergence, which reflects the relationship between the dynamics of sustainable development indicators and the reduction (or increase) of disparities among countries. The methodological basis of the study is the application of the R programming language and the specialized package *convergEU*, which enables the automated detection of typical development patterns based on statistical data. The results confirm the relevance of using digital analytical tools in developing sustainable development strategies and shaping evidence-based policies in the context of European integration processes.

Keywords: ecological and economic convergence, information technologies in economics, information systems, R, sustainable development, convergence, ecological and economic systems.

Постановка проблеми. Європейський Союз ґрунтується на економічній, соціальній та територіальній єдності, а також збалансованому економічному зростанні та конвергенції. Із прийняттям Європейською радою в 2010 році стратегії «Європа – 2020», а також Європейського «зеленого» курсу велику увагу в розвитку країн-членів стали приділяти й екологічним проблемам. Такий підхід підтверджує важливість здійснення державами-членами спільних дій у напрямку сталого розвитку.

У контексті євроінтеграційного вектора розвитку України наголосимо, що згідно з офіційними документами Європейської комісії, конвергенція є основою для нових країн-членів, а отже, і для країн, метою яких є євроінтеграція. Головний постулат конвергенції, який полягає в зниженні нерівномірності розвитку регіонів (країн), завжди мав і має підвищений інтерес серед науковців України, що доводить кілька тисяч наукових і навчально-методичних публікацій з цієї проблематики. Відомі українські вчені С. Біла, З. Варналій, Б. Данилишин, М. Долішній, О. Олійник, І. Сторонянська, М. Хвесик, В. Чужиков та багато інших здійснили істотний внесок у розв'язання проблем регіонального розвитку та розробили відповідні рекомендації щодо ефективної регіональної політики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концептуальні теоретичні дослідження регіонального економічного зростання перебувають у площині двох широких, однак протилежних, теоретичних підходів до регіональної конвергенції. За першим підходом неокласичної теорії регіонального зростання ринкові рушії з часом ведуть до загальної конвергенції доходів на душу населення в інтегрованих економічних системах. Передумови цього постають на відомій моделі економічного зростання, які було викладено в новаторських роботах Р. Солоу [5] і Т. Свана [6]. Ґрунтуючись на загальній системі рівноваги, ці моделі передбачають, що диспропорції в доходах на душу населення в регіонах відсутні або принаймні є сталими. Таким чином створюється модель конвергенції до унікального рівня доходу на душу населення.

Представники другого підходу [7–12], відомого як «посткейнсіанський», постулюють аргумент про те, що регіональні диспропорції в доходах на душу населення є постійними, а отже, розбіжність у доходах на душу населення є найбільш вірогідним результатом.

Теоретичне дослідження процесів конвергенції здійснюється на основі першого підходу, оскільки, по-перше, неокласична модель містить як теоретичне обґрунтування, так і можливість прогнозування мож-

ливості зближення доходів на душу населення в різних регіонах та, по-друге, саме неокласична модель підтверджена в емпіричній літературі.

Відповідно до вищезазначених підходів до конвергенції існує такий набір країн (регіонів), що є членами так званого «клубу конвергенції», тобто в цих країнах (регіонах) відбувається процес зближення соціального та економічного розвитку в напрямку більш розвинених країн (регіонів).

Численні емпіричні дослідження науковців всього світу з цієї тематики є сьогодні потужною базою для розробки урядами країн відповідної регіональної економічної політики. Період з 1980-х років характеризується підвищеним інтересом дослідників до процесів конвергенції регіонів і країн, оскільки такі процеси мають важливі позитивні наслідки для добробуту населення, економічного зростання та є основою для розробки ефективної регіональної політики. Водночас поштовх до такого підвищення інтересу економістів із цієї тематики, без сумніву, був пов'язаний із розробкою потужних наборів статистичних даних, сформованих А. Меддісоном [13] та Р. Саммерсом і А. Хестоном [14]), та які активізували саме емпіричні дослідження процесів конвергенції.

Аналіз наявної наукової літератури продемонстрував, що основою методологічної бази досліджень процесів конвергенції є загальновідомі концепції β - та σ -конвергенції. Однак бета-конвергенція полягає у швидкості, з якою менш розвинені країни наздоганяють більш розвинені з погляду економічних показників (ВВП на душу населення), а сигма-конвергенція означає дисперсію або нерівність економічних показників країнами з часом. Якщо ж говорити про еколого-економічну конвергенцію, то акценти зміщуються до індикаторів сталого розвитку, а не економічних показників. Тому методології, що використовуються для аналізу еколого-економічної конвергенції, мають враховувати складну специфіку поєднання економічного зростання та зменшення впливу на довкілля. Очевидним є і те, що для такого аналізу оцінювання тільки зближення є недостатнім. Якщо, наприклад, за певним економічним показником спостерігається конвергенція, а за екологічним – дивергенція, або навпаки, то постає питання: як трактувати таку ситуацію?

Мета статті. Виходячи з вище сказаного, метою даного дослідження є розробка алгоритму емпіричного аналізу дивергентно-конвергентного еколого-економічного розвитку України та країн ЄС з використанням сучасних інформаційних технологій статистичного аналізу. Дослідження ґрунтується на емпіричному ана-

лізі типових патернів розвитку еколого-економічних індикаторів у країнах ЄС та Україні. Основним інструментом обробки даних є мова програмування R.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виходячи з вищесказаного, окрім класичних моделей бета-, сигма-, гамма-, та дельта-конвергенції, у дослідженні процесів еколого-економічної конвергенції потрібно використовувати методи, які акцентуються на процесі зростання та збільшенні рівня економічного розвитку менш розвинених країн, а не просто на зменшенні нерівномірностей розвитку. Такі методи повинні виокремлювати значення зусиль і політик, спрямованих на зближення країн і створення сприятливих умов для їхнього зростання до вищого рівня розвитку. Крім того, такі методи повинні враховувати, що зростання може розглядатись і в негативному руслі (наприклад, забруднення). Одним із таких методологічних підходів може бути концепція висхідної конвергенції (дивергенції) (від англ. upward convergence), яка була використана Європейською фундацією з питань поліпшення умов життя та праці [1] під час дослідження конвергенції ринку, умов праці, життя та загальних соціально-економічних індикаторів країн ЄС.

Концепція висхідної конвергенції означає «рухатись ближче один до одного вверх (або навпаки)». Тобто це поєднання двох концепцій: зростання або покращення продуктивності та результатів відповідних політик, зокрема, покращення якості та умов життя, екологічних аспектів тощо. Іншими словами, самого тільки зростання не достатньо, оскільки це ще не означає конвергенцію: група країн може мати зростаючу ефективність, але при цьому рівень диспропорцій між ними також може збільшуватись. І навпаки, якщо існує конвергенція, то це не означає зростання: країни можуть зближуватися, але при цьому рівень економічного розвитку буде погіршуватися, що означає низхідну конвергенцію.

Аналіз висхідної конвергенції передбачає оцінку як зростання, так і зближення продуктивності. Отож використання описаних вище статистичних методів конвергенції є недостатніми для оцінки висхідної конвергенції, оскільки вона має багатовимірний характер. Висхідна конвергенція передбачає одночасне зменшення регіональних відмінностей, підвищення соціально-економічної рівномірності й більш справедливий розподіл ресурсів. Водночас варто наголосити, що висхідна конвергенція не є «автоматичним» процесом, оскільки існують багато чинників, які впливають на її досягнення. Для існування висхідної конвергенції необхідні відповідні стратегії, механізми, політики, ефективне управління, інвестиції в людський капітал та інфраструктуру, а також створення сприятливих умов для підприємництва та інновацій.

Отже, висхідна конвергенція означає не лише процес зменшення нерівномірності, а й відповідну активність щодо забезпечення розвитку менш розвинених країн у напрямку досягнення більш високого рівня їх розвитку. Крім того, вона не тільки показує рівень зниження диспропорцій між країнами, а також демонструє тенденцію досягнення відповідних політик (зокрема, еколого-економічних).

Станом на травень 2025 року результати пошуку для соціально-економічних і екологічних наук в наукометричній базі Scopus за ключовим словом «конверген-

ція» складали близько 20 тисяч результатів, а за ключовим словом «висхідна конвергенція» – 30 результатів. Очевидно, якщо кількість методичних підходів до аналізу соціально-економічної конвергенції вимірюється десятками, то такі підходи до «висхідної конвергенції» детально описані тільки в публікації [1]. Так, автори [1] виділяють слабку висхідну конвергенцію, за якої відбувається збільшення середньої продуктивності з одночасним зниженням диспропорцій за певний період часу, та строгу висхідну конвергенцію, за якої відбувається збільшення загальної продуктивності з одночасним зниженням диспропорцій за певний період часу. Розглянемо методичні підходи до аналізу такого типу конвергенції детальніше.

Позначимо через $j = \overline{1, n}$ кількість спостережень, $t = \overline{1, k}$ період, $X(t, j)$ – безперервна випадкова величина, $g(X)$ – монотонна зростаюча функція дисперсії, а $\mu(X(t))$ – середнє значення X в момент часу t . Тоді слабка висхідна конвергенція існує між t та i якщо:

$$\begin{cases} g(X_t) < g(X_{t-i}) \\ \mu(X(t)) \geq \mu(X(t-i)) \end{cases}, \quad (1)$$

Відповідна строга висхідна конвергенція існує між t та i якщо:

$$\begin{cases} g(X_t) < g(X_{t-i}) \\ X(t, j) \geq X(t-i, j), \forall j = \overline{1, n} \end{cases}, \quad (2)$$

Досліджуючи висхідну конвергенцію для країн ЄС, автори [2] приходять до висновку, що умови (1) та (2) виконуються не завжди. Наприклад, може бути ситуація, коли показники продуктивності країн збільшуються з одночасним зростанням диспропорцій між ними, або, навпаки, коли загальна ефективність зменшується, країни стають менш гетерогенними. Очевидно, що в такому випадку можуть існувати ще три випадки: висхідна дивергенція, низхідна дивергенція та низхідна конвергенція.

Висхідна дивергенція можлива у випадку, коли продуктивність покращується з одночасним збільшенням диспропорцій між країнами. Тоді висхідна дивергенція у слабкому й строгому змісті формалізується відповідно як (3) та (4):

$$\begin{cases} g(X_t) \geq g(X_{t-i}) \\ \mu(X(t)) \geq \mu(X(t-i)) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} g(X_t) \geq g(X_{t-i}) \\ X(t, j) \geq X(t-i, j), \forall j = \overline{1, n} \end{cases}. \quad (4)$$

Низхідна дивергенція можлива у випадку, коли продуктивність знижується з одночасним зниженням диспропорцій між країнами. Тоді низхідна дивергенція у слабкому й строгому змісті формалізується відповідно як (5) та (6):

$$\begin{cases} g(X_t) \geq g(X_{t-i}) \\ \mu(X(t)) < \mu(X(t-i)) \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} g(X_t) \geq g(X_{t-i}) \\ X(t, j) < X(t-i, j), \forall j = \overline{1, n} \end{cases} \quad (6)$$

Аналогічно, низхідна конвергенція у слабкому і строгому змісті формалізується відповідно як (7) та (8):

$$\begin{cases} g(X_t) < g(X_{t-i}) \\ \mu(X(t)) < \mu(X(t-i)) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} g(X_t) < g(X_{t-1}) \\ X(t, j) < X(t-i, j), \forall j = \overline{1, n} \end{cases} \quad (8)$$

Отже, конвергенція спостерігається, якщо відстань між двома трендами зменшується з часом; дивергенція якщо відстань між трендами зростає. Однак якщо говорити про використання (1)–(8) для здійснення конвергентно/дивергентного аналізу між країнами ЄС та Україною, то потрібно враховувати динаміку змін відповідних показників у часі, оскільки загальне зниження диспропорцій між країнами ЄС та Україною може приховувати різні невраховані чинники. Наприклад, гетерогенність між країнами може зменшуватись у випадку, коли країна з нижчим рівнем розвитку рухалася швидше до мети відповідної політики, ніж інші країни. Водночас гетерогенність може також знижуватись, якщо країни-лідери уповільнили зростання, а в інших все залишилося без змін. Справді, обидва випадки засвідчують зменшення неоднорідності розвитку, що і концептуалізує конвергенція, однак якщо перший з них – це позитивний приклад, то другий вказує на сповільнення зростання. З цього випливає, що різні типи конвергенції (1)–(8) в праці [2] додатково розглядаються із так званими патернами (моделями).

Для реалізації практичного аналізу конвергентних трендів було використано мову програмування R та спеціалізований пакет *convergEU*. Ключовою метою було виявлення патернів висхідної або низхідної конвергенції/дивергенції для обраних еколого-економічних індикаторів у динаміці між країнами ЄС та Україною. Початкові дані перетворюються до формату «рік-країна-значення», що є обов'язковим для коректної роботи функцій пакета.

З метою перевірки придатності даних перед початком аналізу застосовується функція:

```
check_data(  
  my_data,  
  timeName = «year»  
)
```

Вона перевіряє структуру даних на відсутність помилок: наявність пропущених значень, неправильний формат часу або текстові змінні.

Таблиця 1

Приклад структури даних

year	BE	BG	CZ	...	UA
2005	7.2	5.6	6.1	...	4.3
2006	7.4	5.8	6.3	...	4.6
...	...	...	...	...	...

Джерело: [2]

Для заповнення пропущених значень використовується наступна реалізація:

```
impute_dataset(  
  my_data,  
  timeName = «year»,  
  countries = dataset,  
  tailMiss = «constant»,  
  headMiss = «constant»  
)
```

Це дозволяє автоматично заповнити початкові та фінальні відсутні значення, а також виконати лінійну інтерполяцію всередині часових рядів.

Центральним етапом аналізу є виявлення типових патернів розвитку (1)–(8), що реалізовувалося за допомогою функції:

```
identify_pattern(  
  my_data,  
  timeName = «year»,  
  indicatorLabel = «Екологічний слід»,  
  countries = dataset  
)
```

Результатом є автоматична класифікація патерну, який демонструє кожен індикатор, а також графічна візуалізація динаміки індикатора по країнах. Відповідна побудова графіків здійснюється через функцію:

```
plot_all(  
  my_data,  
  timeName = «year»,  
  countries = dataset,  
  indicatorLabel = «CO2 emissions per capita»  
)
```

Ця функція генерує мультиваріантні графіки із динамікою середнього значення, дисперсії, положення окремих країн, що дозволяє оцінити загальний напрямок розвитку.

Для зручності інтерпретації результатів формується «country fiches» та «indicator fiches», що містять короткі звіти з візуалізаціями та висновками для кожного індикатора:

```
create_country_fiches(  
  dataset = my_data,  
  timeName = «year»,  
  indicatorLabel = «Екологічний слід»,  
  countries = dataset  
)
```

Отримані html-файли використовуються для подальшого аналізу та включення у додатки до дослідження.

Таким чином, використання програмного середовища R з пакетом *convergEU* стало практичним інструментом для реалізації концепції багатовимірного аналізу процесів конвергенції. Автоматизація класифікації патернів розвитку, гнучка робота з часовими рядами та можливість генерування узагальнених «фішок» (fiches) забезпечили ефективну інтеграцію статистичних обчислень, візуалізації та інтерпретації. Це дало змогу перейти від абстрактного теоретичного підходу до конкретного прикладного аналізу динаміки зближення чи розбіжності країн за окремими індикаторами, що особливо важливо в контексті дослідження складних взаємозв'язків у еколого-економічних системах.

Висновки. Результати дослідження засвідчують ефективність використання інформаційних технологій, зокрема програмного середовища R та пакету *convergEU*, для виявлення складних динамічних патернів еколого-економічного розвитку. Застосований підхід

дозволив: класифікувати типи конвергенції (висхідна/низхідна) без потреби у складному математичному моделюванні, виявити індикатори, за якими Україна демонструє позитивну динаміку зближення з країнами ЄС, візуалізувати динаміку диспропорцій між країнами, створити відкритий, відтворюваний інструмент аналізу для формування політик сталого розвитку.

Отже, інтеграція цифрових аналітичних засобів у наукові дослідження сприяє підвищенню якості стратегічних рішень в умовах екологічних викликів та необхідності адаптації до стандартів ЄС. Подальші дослідження можуть зосередитися на міжрегіональному аналізі та оцінці ефективності політик через динаміку патернів конвергенції.

Список використаних джерел:

1. Eurofound. Measuring convergence. URL: <https://www.eurofound.europa.eu/topic/measuring-convergence> (дата звернення: 05.07.2025).
2. European Commission. Europe 2020 strategy. <http://ec.europa.eu/europe2020> (дата звернення: 18.05.2025).
3. European Commission. The European Green Deal. Brussels, 2019. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF (дата звернення: 05.07.2025).
4. European Commission. Convergence criteria for joining. URL: https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/euro-area/enlargement-euro-area/convergence-criteria-joining_en (дата звернення: 05.08.2025).
5. Solow R. A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 1956, vol. 70, pp. 65–94.
6. Swan T. W. Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record*, 1956, vol. 32, pp. 334–361.
7. Myrdal G. *Economic theory and underdeveloped regions*. New York: Harper & Row, 1971. 167 p.
8. Perroux F. Economic space, theory and applications. *The Quarterly Journal of Economics*, 1950, vol. 64(1), pp. 89–104.
9. Perroux F. Note sur la notion de pôle de croissance. *Economics Appliquée*, 1955, vol. 7, pp. 307–320.
10. Nicholas K. *Strategic factors in economic development*. Ithaca: New York State School of Industrial and Labor Relations, Cornell University, 1967. 83 p.
11. Kaldor N. The case for regional policies. *Scottish Journal of Political Economy*, 1970, vol. 17(3), p. 337–348.
12. Kaldor N. The irrelevance of equilibrium economics. *The Economic Journal*, 1972, vol. 82(328), pp. 1237–1255.
13. Maddison A. *Phases of capitalist development*. Oxford: Oxford University Press, 1982. 274 p.
14. Summers R., Heston A. A New Set of International Comparisons of Real Product and Price Levels: Estimates for 130 Countries. *Review of Income and Wealth*, 1988, vol. 34, p. 1–25.

References:

1. Eurofound. (n.d.). Measuring convergence. Available at: <https://www.eurofound.europa.eu/topic/measuring-convergence> (accessed July 5, 2025).
2. European Commission. (n.d.). Europe 2020 strategy. Available at: <http://ec.europa.eu/europe2020> (accessed May 18, 2025).
3. European Commission. (2019). *The European Green Deal*. Brussels. Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF (accessed July 5, 2025).
4. European Commission. (n.d.). *Convergence criteria for joining*. Available at: https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/euro-area/enlargement-euro-area/convergence-criteria-joining_en (accessed August 5, 2023).
5. Solow, R. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, no. 70, pp. 65–94.
6. Swan T. W. (1956). Economic growth and capital accumulation. *Economic Record*, no. 32, pp. 334–361.
7. Myrdal G. (1971). *Economic theory and underdeveloped regions*. New York: Harper & Row.
8. Perroux F. (1950). Economic space, theory and applications. *The Quarterly Journal of Economics*, no. 64(1), pp. 89–104.
9. Perroux F. (1955). Note sur la notion de pôle de croissance. *Économie Appliquée*, no. 7, pp. 307–320.
10. Nicholas K. (1967). *Strategic factors in economic development*. Ithaca: New York State School of Industrial and Labor Relations, Cornell University.
11. Kaldor N. (1970). The case for regional policies. *Scottish Journal of Political Economy*, no. 17(3), pp. 337–348.
12. Kaldor N. (1972). The irrelevance of equilibrium economics. *The Economic Journal*, no. 82(328), pp. 1237–1255.
13. Maddison A. (1982). *Phases of capitalist development*. Oxford: Oxford University Press.
14. Summers R. & Heston A. (1988). A new set of international comparisons of real product and price levels: Estimates for 130 countries. *Review of Income and Wealth*, no. 34, pp. 1–25.

Стаття надійшла: 28.07.2025

Стаття прийнята: 05.09.2025

Стаття опублікована: 26.09.2025