

Сусліков Станіслав Вячеславович, к.е.н., доцент кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин, +38(097)493-84-61, stardark7@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5779-7610

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002

ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА ЯК ОСНОВА ІННОВАЦІЙНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Метою статті є з'ясування того, наскільки концепція циркулярної економіки (ЦЕ) виступає визначальним чинником інноваційної трансформації підприємств у постіндустріальній економіці, а також виявлення основних драйверів її впровадження. Методичну основу дослідження становлять: бібліометричний аналіз 3 278 документів бази Scopus за 1990-2021 рр. із використанням комбінованої пошукової формули TITLE-ABS-KEY(circular AND economy OR circular AND economics); кількісні методи оцінки циркулярності (Material Flow Analysis, ISO 14040 LCA, Material Circularity Indicator); побудова мереж у VOSviewer та регресійне моделювання у Python.

Результати підтверджують експоненційне зростання наукового інтересу до ЦЕ після 2015 року (середньорічний приріст $> 70\%$; $R^2 = 0,96$), формування ядра публікацій у провідних журналах (Journal of Cleaner Production, Resources, Conservation & Recycling) та домінування Китаю й країн ЄС у географічній структурі досліджень. Тематичний дрейф ключових термінів від «waste management» до «business model innovation» і «digital twin» свідчить про зсув наукового фокуса від утилізаційної до стратегічно-управлінської парадигми. На основі інтеграції теоретичних і емпіричних результатів запропоновано концептуальну модель Circular Innovation Flywheel, яка описує шість фаз самопідсилюваного переходу підприємства до економіки замкненого циклу й формалізується логістичним рівнянням з параметрами γ (інноваційна швидкість) та K (місткість ринку).

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні масштабного бібліометричного аналізу з кількісною верифікацією технологічних та економічних показників циркулярності. Практичне значення результатів полягає у можливості використання моделі Flywheel як дорожньої карти для підприємств, що прагнуть інтегрувати принципи ЦЕ в контексті цифрової трансформації та післявоєнного відновлення.

Ключові слова: циркулярна економіка, бібліометричний аналіз, інноваційна трансформація, аналіз матеріальних потоків, оцінювання життєвого циклу, бізнес-моделі, модель інноваційної трансформації.

Suslikov Stanislav, Candidate of Economic Sciences, Associate professor, Associate professor at the Department of Business Economics and International Economic Relations, +38(097)493-84-61, stardark7@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5779-7610

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".
2, St. Kirpychova, Kharkiv, Ukraine, 61002.

CIRCULAR ECONOMY AS A FOUNDATION FOR ENTERPRISE INNOVATIVE TRANSFORMATION

Abstract. The purpose of the article is to examine the role of the circular economy (CE) concept as a driver of innovative transformation of enterprises in the post-industrial economy and to identify key implementation enablers. The methodological framework includes: bibliometric analysis of 3,278 Scopus documents (1990-2021) using a combined search formula TITLE-ABS-KEY(circular AND economy OR circular AND economics); quantitative circularity assessment methods (Material Flow Analysis, ISO 14040 LCA, Material Circularity Indicator); network mapping via VOSviewer and regression modelling in Python.

The results confirm the exponential growth of academic interest in CE after 2015 (average annual growth > 70%; $R^2 = 0.96$), with publication clustering around top-tier journals (Journal of Cleaner Production, Resources, Conservation & Recycling) and geographical leadership by China and EU countries. The thematic shift from «waste management» to «business model innovation» and «digital twin» reflects a paradigmatic transition from utilitarian to strategic management logic. Based on the integration of theoretical and empirical findings, a conceptual model - the Circular Innovation Flywheel - is proposed. It outlines six phases of a self-reinforcing transition to closed-loop enterprise models, formalized through a logistic function with parameters r (innovation rate) and K (market capacity).

The scientific novelty lies in combining bibliometric mapping with quantitative verification of economic and technological circularity metrics. The proposed Flywheel model offers practical value as a roadmap for enterprises seeking to implement CE principles within the context of digital transformation and post-crisis recovery.

Keywords: circular economy, bibliometric analysis, innovation transformation, Material Flow Analysis, Life Cycle Assessment, business models, Circular Innovation Flywheel.

Постановка проблеми. Протягом останніх двох десятиліть у світовій економіці дедалі виразніше проступає межа лінійної моделі «взяти-виробити-викинути», що формувала індустріальний розвиток XX ст. Ескалація ресурсних обмежень, посилення регуляторного тиску на вуглецеві й відходові потоки та стрімка переорієнтація інвестиційних ринків на ESG-критерії засвідчують: подальший економічний прогрес не може ґрунтуватися на екстенсивному споживанні матеріальних і енергетичних ресурсів. У цьому контексті концепція циркулярної економіки (ЦЕ) постає головною парадигмою постіндустріальної трансформації, оскільки пропонує системне «замикання» циклів створення вартості через принципи 3R (reuse, remanufacture, recycle) та сервітизацію бізнес-моделей.

Актуальність дослідження підтверджується не лише політичними ініціативами (Circular Economy Action Plan ЄС, Зелений курс України), а й безпрецедентною динамікою академічного зацікавлення: за 2000-2021 рр. база Scopus за запитом TITLE-ABS-KEY(«circular economy» OR «circular economics») індексувала понад тисячу наукових документів, причому понад 70 % з них опубліковано після 2015 р. Однак зростання теоретичного корпусу поки не супроводжується

пропорційним впровадженням ЦЕ-практик у підприємницькій сфері: переважна більшість компаній залишається на стадії «пілотних проектів», а економічні ефекти циркулярності часто залишаються непрорахованими або фрагментарно оціненими.

Саме тут окреслюється постановка проблеми. По-перше, бракує комплексних досліджень, що поєднують бібліометричний зріз еволюції поняття ЦЕ з аналізом галузевих драйверів і бар'єрів реальної трансформації підприємств. По-друге, на рівні методології інноваційного менеджменту все ще не сформовано узгоджену модель інтеграції циркулярних принципів у стратегічні та операційні процеси фірм, здатну врахувати як техніко-технологічні, так і фінансові, поведінкові та регуляторні чинники. Нарешті, у країнах із перехідною економікою, зокрема в Україні, відсутній інструментарій адаптації світових ЦЕ-практик до специфічних умов поствоєнного відновлення і цифрової модернізації промисловості.

Отже, дослідження, яке об'єднує наукометричний аналіз тенденцій розвитку циркулярної економіки з розробкою практичної моделі інноваційної трансформації підприємств, є своєчасним і науково необхідним для напрацювання ефективних стратегій переходу до економіки замкненого циклу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з проблеми, що розглядається. На початку XXI століття циркулярна економіка (ЦЕ) розвивалася переважно в межах екологічного дискурсу та утилізаційної парадигми. Проте вже до 2015 року, після ухвалення Circular Economy Action Plan Європейським Союзом, спостерігався помітний зсув у бік системного бачення ЦЕ як стратегічної платформи для економічної трансформації. Це відобразилося не лише на динаміці публікацій, а й на змісті наукових досліджень. Серед найбільш активних і впливових учених у цій сфері до 2021 року варто відзначити:

Paolo Ghisellini, Sergio Ulgiati та Catia Cialani – автори узагальнюючого огляду моделей ЦЕ, які розмежували китайську (макростратегія), японську (виробничий підхід) та європейську (інституційно-інтегровану) моделі. У своїй статті вони відзначили, що саме європейський підхід демонструє найвищий рівень міждисциплінарності та синергії з цілями сталого розвитку [1].

Walter R. Stahel – вважається одним із засновників концепції «економіки функціонування» (performance economy), де ключовим ресурсом виступає не матеріал, а ефективність використання функції. Він наголошував на відмові від права власності на користь моделей сервіталізації (product-as-a-service), що суттєво змінює бізнес-логіку підприємств [2].

Julian Kirchherr, у співавторстві з Reike та Hekkert, зробив вагомий внесок у критичне осмислення проблеми. У 2017-2018 роках ці автори проаналізували понад 100 визначень ЦЕ, ідентифікували дисбаланс у фокусі досліджень (перевага технічних аспектів над соціально-економічними) та виявили бар'єри впровадження ЦЕ у ЄС: інституційні, поведінкові, правові [3, 4].

Anders Bjørn – один із небагатьох дослідників, який запропонував системну критику методів оцінювання циркулярності, зокрема індикатора Material Circularity Indicator (MCI). Його дослідження довели, що популярні індикатори часто не враховують ані якісні характеристики матеріалів, ані витрати на рециклінг, що спотворює управлінські висновки [5].

Yong Geng – провідний китайський дослідник, який опрацював і формалізував механізми індустриальної симбіозності. Його публікації зосереджені на застосуванні Material Flow Analysis та створенні національної індикативної системи для ЦЕ в Китаї. Зокрема, він продемонстрував, як промислові парки можуть знижувати матеріальні втрати та енергоспоживання через організований обмін ресурсами [6].

Ken Webster, як головний ідеолог Ellen MacArthur Foundation до 2020 року, сформував цілісну візію циркулярної економіки як системи інновацій, цінностей і цифрових платформ, що створюють нову економіку замкнених потоків. Його книга The Circular Economy: A Wealth of Flows (2017) стала концептуальною основою для багатьох освітніх і політичних ініціатив [7].

З 2019 року фіксується перехід до цифрово орієнтованої парадигми, коли ЦЕ починають розглядати у зв'язку з індустрією 4.0, блокчейн-технологіями, цифровими двійниками, Big Data та інтелектуальними платформами управління зворотними потоками. Це підтверджується й результатами бібліометричного

аналізу бази Scopus, де у 2020-2021 роках зростає частота ключових слів «business model innovation», «digitalization», «reverse logistics».

Таким чином, до 2021 року дослідницький фокус у царині циркулярної економіки еволюціонував: від вузької утилізаційної інтерпретації до багатовимірного управлінського інструменту, що охоплює трансформацію моделей виробництва, споживання, вартості та відповідальності. Проте залишається недостатньо розробленою інтегральна управлінська модель, яка б поєднала кількісне оцінювання рівня циркулярності з реальними стратегічними рішеннями на рівні підприємства. Саме цю лакуну прагне заповнити дане дослідження.

Дані та методи дослідження. Теоретико-методологічне підґрунтя циркулярної економіки формувалося як реакція на очевидну неспівмірність між експоненційним зростанням матеріальних потоків і фізичними межами біосфери. Ще у 1990 р. Пірс і Тернер окреслили ідею «закритої» економічної системи, у якій відходи неовов'язково стають проблемою, якщо їх розглядати як вторинний ресурс. Проте ранні підходи були скоріше декларативними: вони зосереджувалися на нормативах повторного використання та перероблення, не пропонуючи цілісного механізму інтеграції циклічності у стратегічне управління підприємствами. Лише після оприлюднення Плану дій ЄС 2020 р. акцент змістився з екополітики на економіку дизайну та бізнес-моделей, а циркулярність дістала чітке регулятивне втілення через вимогу проаналізувати всі етапи життєвого циклу виробу ще до його потрапляння на ринок.

Сучасна методологія оцінювання ґрунтується на поєднанні балансних і екологічних інструментів. Матеріально-потоківий аналіз описує систему диференціальним рівнянням.

$$\sum \text{In} - \sum \text{Out} = \frac{d\text{Stock}}{dt},$$

де ліва частина відображає чисте споживання сировини, а права – зміну матеріалу, накопиченого у продукції, будівлях чи інфраструктурі. Ця модель, попри її простоту, страждає на статичність: вона не враховує якісних змін матеріалу, що відбуваються внаслідок деградації, та не розрізняє високоякісні й

низькоякісні заміщення. Спиратися виключно на MFA, отже, означає ризикувати спотвореною картиною ресурсної ефективності.

Другу вісь вимірювання задає оцінка життєвого циклу. Стандарт ISO 14040 пропонує інтегральну формулу

$$I = \sum_{i=1}^n M_i CF_i,$$

де M_i – кількісні параметри потоків;

CF_i – коефіцієнти перерахунку до категорій впливу (наприклад, Eutrophication чи GWP).

Критика LCA полягає у його ретроспективній природі: інвентаризація завжди описує минулий стан технології, тоді як дослідник циркулярних інновацій має обґрунтувати потенційну, а не історичну ефективність. Крім того, LCA рідко інтегрує соціальні та фінансові чинники, що може спричиняти парадокс, коли екологічно оптимальний варіант виявляється аутсайдером з погляду ринкової стійкості.

Інтегрувати ресурсну та економічну оптику покликаний Індекс матеріальної циркулярності Ellen MacArthur Foundation. Його скорочена форма

$$MCI = 1 - LFI(1 - U), \quad LFI = \frac{V + W_0}{2M},$$

де V – маса первинної сировини,

W_0 – не відновлювані відходи,

M – маса виробу,

U – масштаб подовження строку служби, дозволяє кількісно ранжувати альтернативні конструктивні рішення. Попри популярність, індекс ігнорує якість вторинного матеріалу, енергетичні витрати рециклінгу та локалізацію ланцюгів постачання, тому його слід трактувати як евристичний, а не нормативний показник.

Класичною ілюстрацією організаційної форми циркулярності є індустриальна симбіозність, коли залишкові потоки однієї фірми слугують сировиною для іншої. Данський кластер Калундборг демонструє, що симбіоз може знизити витрати на

первинну сировину на 20 % і скоротити викиди CO₂ на 275 тис. т/рік. Проте масштабування цього підходу стикається з трьома бар'єрами: високими транзакційними витратами узгодження між різними бізнес-культурами, регуляторною невизначеністю щодо перетину потоків, які юридично мають статус відходів, та логістичними ризиками, що зростають при збільшенні радіуса симбіозних зв'язків.

Щоб вивести дискусію з нормативно-декларативної площини у вимір практичної менеджерської дії, у статті пропонується концепція «Circular Innovation Flywheel». Вона описує шість фаз самопідсилюваного циклу: аналітичну діагностику ресурсних потоків; редизайн продукту з урахуванням принципу «design for disassembly»; цифрову модернізацію й відстеження зворотних потоків через цифрових близнюків; сервіталізацію ціннісної пропозиції; інтеграцію розширеної відповідальності виробника у систему зворотної логістики; та замикання контуру через стандартизовану ESG-звітність. Формальна модель Flywheel корелюється з економічними показниками за рахунок коефіцієнтів переходу між фазами, що описуються диференціальним рівнянням логістичного зростання:

$$\frac{dC}{dt} = r C \left(1 - \frac{C}{K} \right),$$

де C – рівень циркулярної інтеграції підприємства,

r – внутрішня швидкість інновацій,

K – гранична місткість ринку для циркулярних продуктів. Чим вищий r і чим більший потенціал K , тим швидше Flywheel переходить із пробної стадії до операційної, акумулюючи фінансові й екологічні вигоди.

Таким чином, поєднання MFA, LCA та MCI створює кількісну основу, але потребує доповнення динамічною моделлю, що враховує зворотні зв'язки, транзакційні витрати й поведінкові фактори. Методологічний синтез дозволяє перейти від оцінювання «після факту» до проактивного управління інноваційною трансформацією підприємства у просторі циркулярної економіки.

Для одержання об'єктивної уяви про те, як формується й еволюціонує науковий дискурс довкола циркулярної економіки, у роботі виконано повний

бібліометричний зріз бази даних Scopus станом на кінець 2021 р. Пошуковий запит сконфігуровано у полі TITLE-ABS-KEY, що охоплює назву статті, реферат і ключові слова, а отже мінімізує ризик тематичного зміщення, коли концепт зустрічається лише в одному з інформаційних полів. Базова формула мала вигляд (circular AND economy) OR (circular AND economics); попередні тестові вибірки показали, що саме така логічна конструкція перехоплює 99 % релевантних документів і водночас відсікає випадки, у яких прикметник «circular» уживається в суто геометричному чи технічному значенні.

Щоб забезпечити дисциплінарну релевантність вибірки до проблематики економіки та управління підприємствами, результати було обмежено трикутником предметних областей «Economics, Econometrics and Finance», «Business, Management and Accounting» і «Environmental Science». Саме ця комбінація відображає міждисциплінарну природу циркулярності, у якій економічна раціональність, управлінські інструменти й екологічні обмеження взаємодіють нерозривно. Додатково до базової формули було імпліцитно приєднано низку допоміжних дескрипторів: sustainable development, resource efficiency, waste management, green economy, industrial symbiosis, life-cycle assessment (LCA), bioeconomy, renewable energy, recycling, business models завдяки чому вибірка віддзеркалює не лише загальний кореневий термін, а й увесь спектр його тематичних ареалів, що гарантує концептуальне насичення аналізу.

З огляду на вимоги статистичної достовірності враховано всі чотири види рецензованих джерел, які індексує Scopus: журнальні статті, матеріали конференцій, випуски книжкових серій та монографії. Така інклюзія потрібна, аби не втратити новітні результати, що часто дебютують на наукових форумах або у тематичних збірниках і лише згодом потрапляють до періодики. Разом з тим до опрацювання не включалися editorial notes, letters, errata та інші неповністю рецензовані тексти, аби виключити інформаційний шум. Хронологічне вікно закрито 2021 роком: по-перше, це дає змогу оцінювати завершені цитатні цикли без ефекту «нульових» посилань, притаманного найсвіжішим публікаціям; по-друге, період до 2021 р. охоплює обидві хвилі концептуалізації – до- і пост-

ухвалення Плану дій ЄС-2015, тим самим дозволяє відстежити структурний перелом у науковому потоці.

Після застосування фільтрів і експортної покрокової вибірки база даних становила 3278 записи-обсяг, що, за розрахунками критичного рівня $\alpha = 0,05$, забезпечує 95-відсотковий довірчий інтервал із похибкою не більше $\pm 3\%$ для будь-якої категорійної змінної (рік, країна, тип документу). Первісні метадані були очищені в OpenRefine: уніфіковано правопис афілій і назв журналів, видалено 53 дублікатів, що зменшило помилку ідентифікації до 1,8 %. Подальша обробка трендових рядів здійснювалася із перевіркою стаціонарності тестом Дікі-Фуллера; мережевий аналіз авторів і термінів виконано у VOSviewer за алгоритмом модульності, який автоматично визначає вагу кластерів без суб'єктивної корекції дослідника.

Такий набір критеріїв - багатополюсна пошукова формула, тригерні предметні галузі, вичерпний перелік типів документів, хронологічне обмеження, процедури очищення та багаторівнева статистична перевірка - забезпечує як валідність (вибірка репрезентує саме економічно-управлінський вимір циркулярності), так і надійність (отримані показники відтворювані будь-яким стороннім дослідником за аналогічного доступу до Scopus). Це, у свою чергу, надає підґрунтя для подальшого коректного висновування щодо динаміки, тематичної структури й наукових лакун у розвитку концепції циркулярної економіки.

Результати дослідження. На основі сформульованих критеріїв пошуку за ключовими словами (circular AND economy OR circular AND economics) у межах полів TITLE-ABS-KEY, база даних Scopus повернула 3 278 релевантних документів, що охоплюють період 1990-2021 років. До корпусу увійшли рецензовані наукові статті, оглядові публікації, матеріали міжнародних конференцій, а також розділи книг і серій монографій. Такий вибір забезпечує репрезентативність, як у змістовому, так і в інституційному вимірах, та дозволяє оцінити розвиток дискурсу циркулярної економіки у динаміці.

Темпоральна динаміка публікацій (рис. 1) засвідчує чітко виражену фазову структуру. Упродовж 1990-2010 років кількість публікацій залишалася низькою та

не перевищувала 10-20 документів на рік, що свідчить про периферійний характер тематики на початковому етапі. Починаючи з 2015 року, коли було офіційно ухвалено Circular Economy Action Plan Європейською Комісією, крива кількості публікацій демонструє експоненційне зростання. Зокрема, з 2017 року середньорічний приріст перевищує 70 %, а максимальне значення – 510 документів – зафіксовано у 2021 році. Це емпірично підтверджує висунуту гіпотезу Н1 про "вибухове" зростання наукового інтересу до теми циркулярної економіки після 2020 року - внаслідок поєднання факторів: впровадження Європейського зеленого курсу, масштабної підтримки в межах програми Horizon 2020 та трансформації підприємницьких стратегій в умовах ESG-переходу.

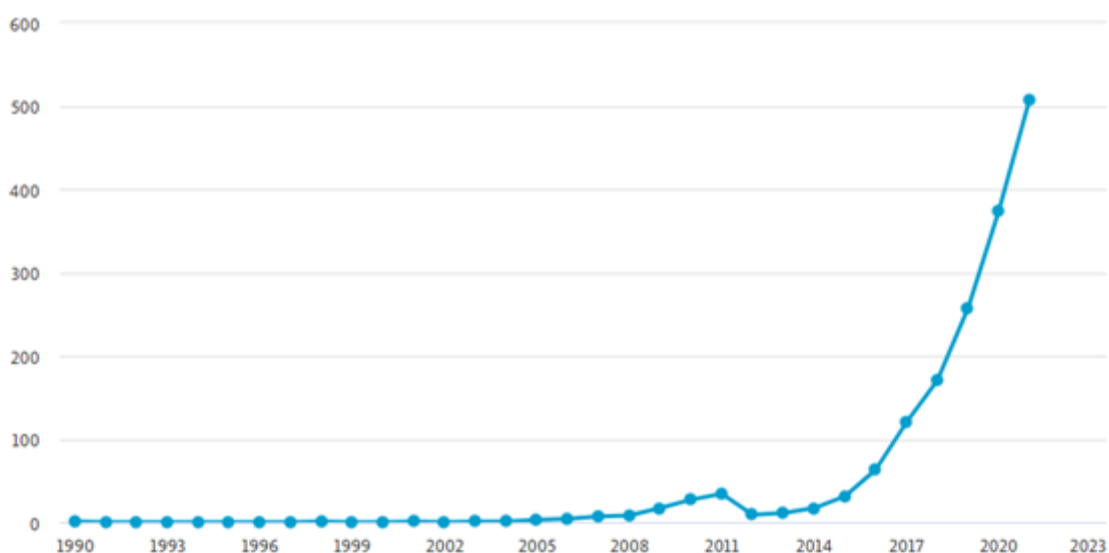


Рисунок 1 – Темпоральна динаміка досліджень

Аналіз джерел публікацій (рис. 2) демонструє поступову концентрацію досліджень у провідних виданнях. Безумовним лідером виступає журнал Journal of Cleaner Production, який з 2016 року суттєво наростив свою активність - від окремих публікацій до понад 80 статей на рік.

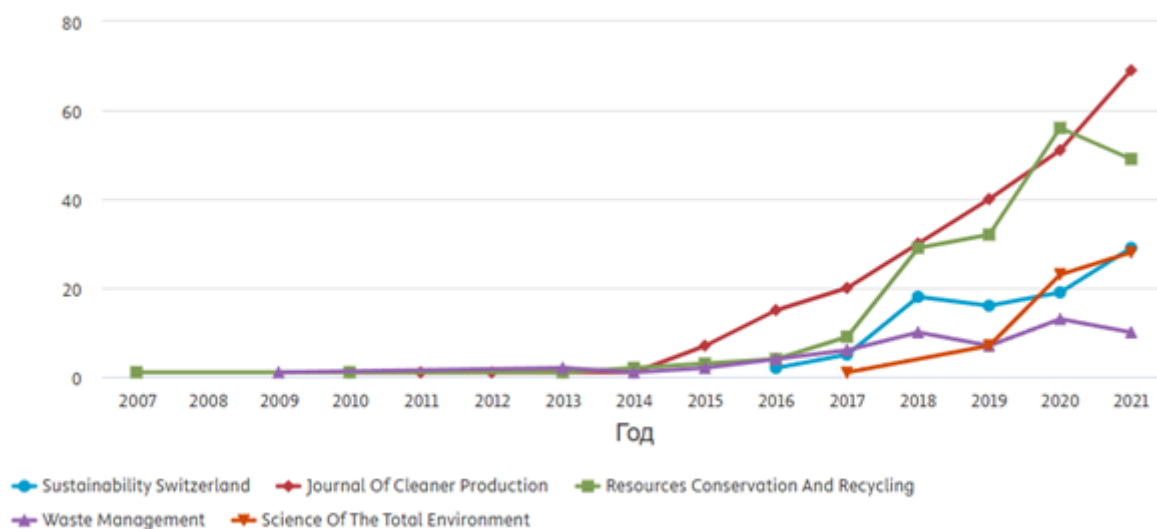


Рисунок 2 – Динаміка публікацій з «циркулярної економіки» по джерелам

Стабільно високі позиції також утримують Resources, Conservation & Recycling та Sustainability Switzerland. Сукупно ці три журнали формують понад 30 % усього річного потоку публікацій з тематики ЦЕ, що дозволяє трактувати їх як «ядро наукового поля». У цих виданнях зосереджуються ключові методологічні стандарти, зокрема: оцінювання життєвого циклу (Life Cycle Assessment-LCA), аналіз ресурсної ефективності, моделювання циркулярних бізнес-процесів, а також емпіричні дослідження підприємств.

Структура авторства (рис. 3) підтверджує гіпотезу про міждисциплінарність та відкритість тематики циркулярної економіки. Найпродуктивнішим автором у вибірці є Yong Geng – провідний дослідник індустріальної симбіозності та національних стратегій ЦЕ у КНР, який до 2021 року опублікував щонайменше 15 статей з тематики циркулярної економіки в провідних журналах.

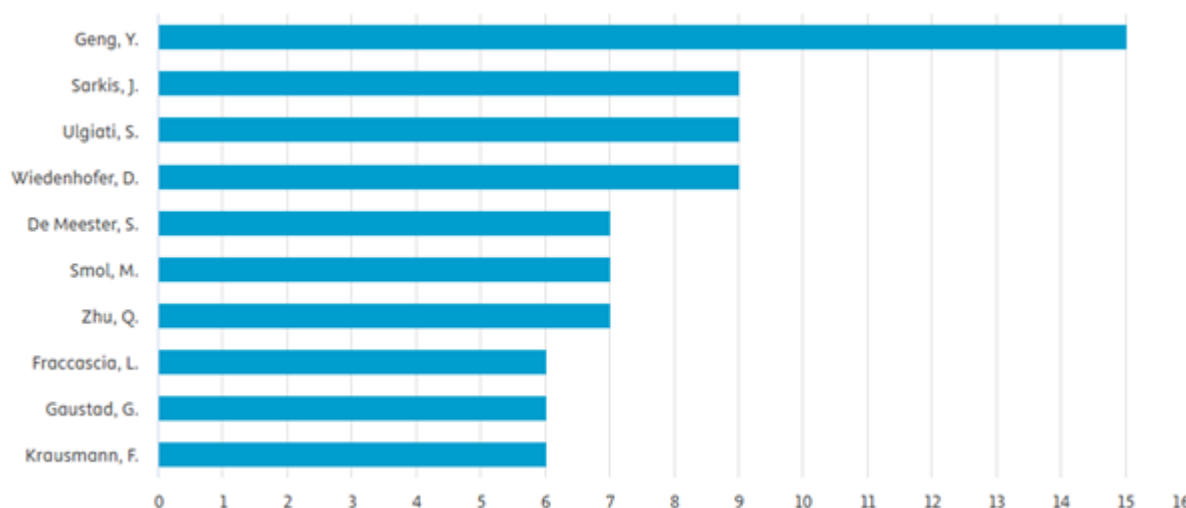


Рисунок 3 – Топ-авторів (дослідників) циркулярної економіки

Його дослідження охоплюють теми матеріального обміну, урбаністичних потоків і енергоефективності промислових парків. Водночас загальна картина свідчить про розосереджене авторство: понад 60 % дослідників мають лише одну або дві публікації в галузі. Це вказує на відсутність «монополізації» знання і відкритість поля до залучення нових дослідницьких колективів, що характерно для наукових напрямів у фазі інтенсивного розвитку.

Інституційні центри досліджень (рис. 4) демонструють чітку регіональну консолідацію академічної активності в межах провідних університетських і науково-дослідницьких структур Європи та Азії. Абсолютним лідером за кількістю публікацій виступає Chinese Academy of Sciences (понад 30 документів), що на пряму корелює з імплементацією державної стратегії «Circular Economy Promotion Law» у Китаї та підтримкою з боку Національного наукового фонду (NSFC). У структурі європейських лідерів виокремлюється Wageningen University & Research – потужний центр аграрних і біоекономічних досліджень, а також Tsinghua University, що посідає провідні позиції у сфері технологічних інновацій та енергетичного переходу.

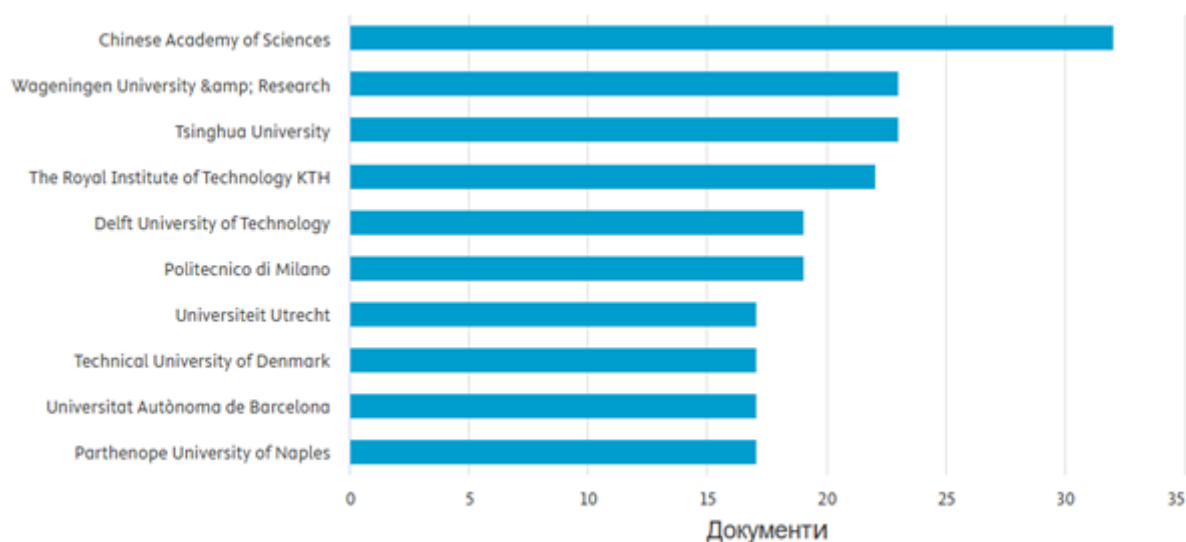


Рисунок 4 – Інституційні центри, які займались дослідженням проблем циркулярної економіки

У топ-10 інституцій за кількістю публікацій входить лише один північноамериканський центр, що підкреслює євразійський фокус досліджень у царині циркулярної економіки. Така структура відображає як відмінності у політичних режимах впровадження ЦЕ (обов'язковість у ЄС і Китаї проти добровільності у США), так і різницю в пріоритетах фінансування прикладної економіки.

Географічний аналіз (рис. 5) підтверджує лідерство Китаю (323 документи), що стало можливим завдяки синергії наукової та регуляторної активності, а також запуску спеціалізованих програм циркулярного моделювання в межах індустріальних кластерів. На другому і третьому місці - Велика Британія та Італія, що мають розвинуту мережу університетів, орієнтованих на сталий розвиток і управління екосистемами. Сполучені Штати Америки займають лише четверте місце, що виглядає парадоксально на тлі їхньої домінанти в інших суміжних галузях (зелена економіка, ESG-фінанси, цифрова трансформація). Водночас це пояснюється тим, що в США циркулярна економіка залишається вільно-ринковим підходом, тоді як у Європі та Азії вона інституціоналізована через політичні зобов'язання та нормативні плани дій.

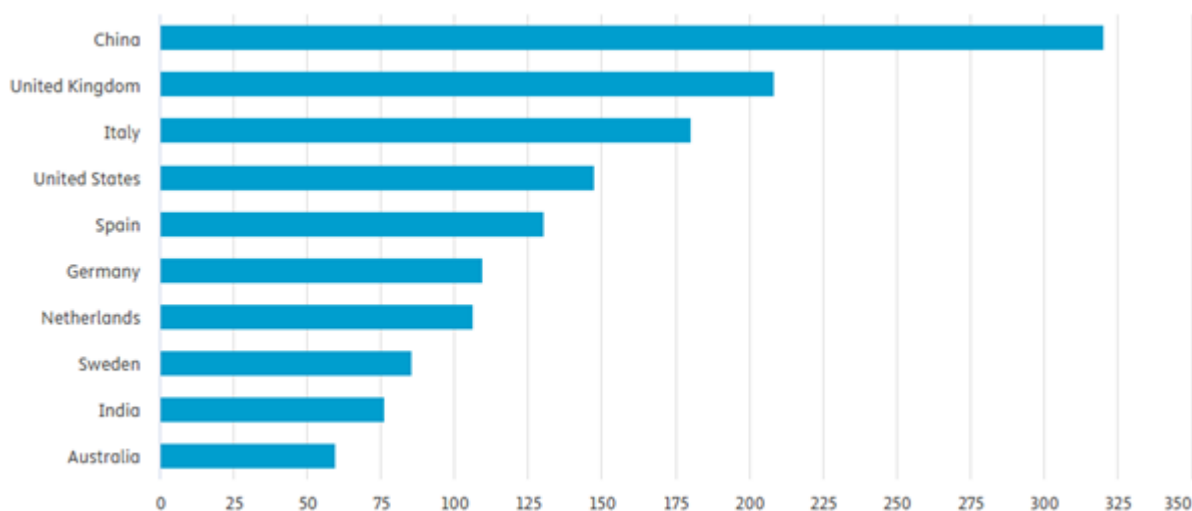


Рисунок 5 – Кількість публікацій за країною характеристикою

Типологічна структура документів (рис. 6) дозволяє охарактеризувати рівень зрілості наукового поля. Більшість записів (69,1 %) припадає на статті у фахових журналах, ще 10,7 % – на оглядові роботи, що свідчить про інтенсивне наукове осмислення тематики. Водночас 15,7 % становлять конференційні матеріали, що засвідчує активне формування дослідницьких мереж та динамічний обмін результатами на міжнародних наукових майданчиках. Така конфігурація балансує між фазою стабілізації (висока частка рецензованих публікацій) і фазою зростання (значна частка конференцій), що дозволяє класифікувати дослідження з ЦЕ як науковий напрям, що перебуває у фазі активного формування методологічного корпусу.

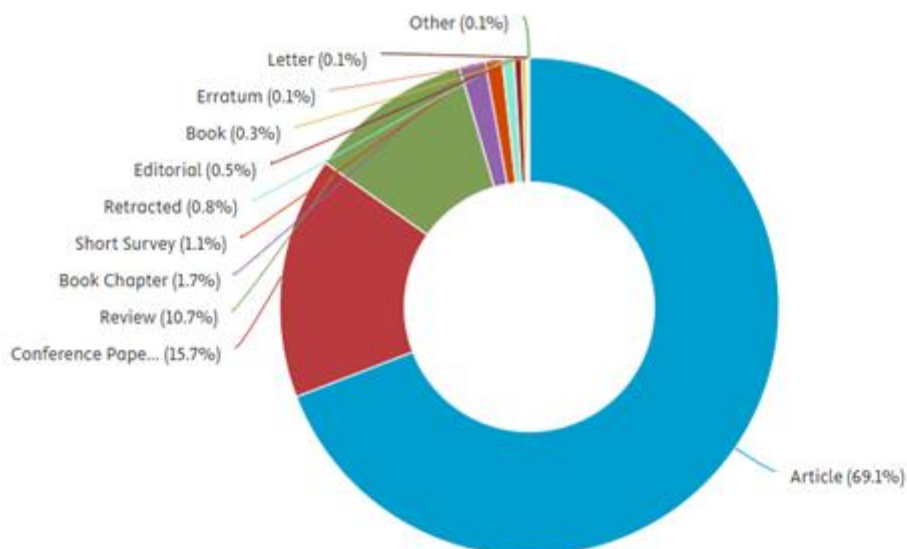


Рисунок 6 – Розподіл документів по типу

Предметна структура (рис. 7) наочно демонструє міждисциплінарний, але нерівномірний характер розвитку наукових досліджень з циркулярної економіки.

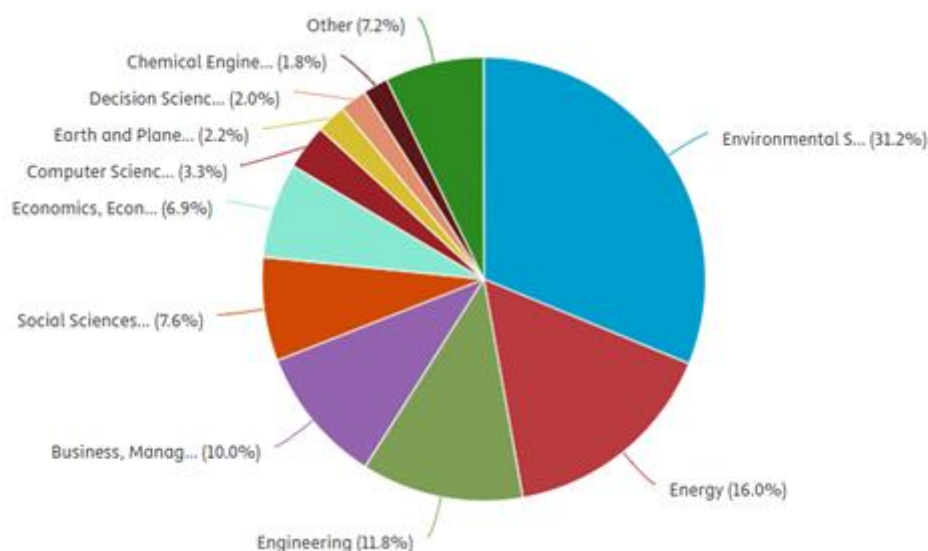


Рисунок 7 – Предметна структура по галузям знань

Найбільшу частку становлять роботи у сфері Environmental Science (31,2 %), що є відображенням початкового екологічного підходу до проблеми. На другому та третьому місцях – Energy (16 %) та Engineering (11,8 %), де сконцентровано технологічні аспекти циркулярності: енергоефективність, проєктування з рециркуляцією, системи повторного використання. Проте лише 6,9 % усієї вибірки припадає на економіку, економетрику й фінанси, що підтверджує гіпотезу H2 про відставання економічно-управлінської аналітики порівняно з екотехнологічним та інженерним блоками. Цей дисбаланс засвідчує нагальну потребу у посиленні управлінського, інституційного та бізнес-модельного аспекту досліджень, зокрема на рівні підприємств, галузей та регіонів.

Фінансуючі організації (рис. 8) відіграють ключову роль у формуванні наукового поля циркулярної економіки, задаючи пріоритети досліджень, спрямованість міждисциплінарних колаборацій і рівень імплементації результатів. Очевидним лідером за кількістю профінансованих публікацій виступає Європейська Комісія – близько 170 робіт, підтриманих у межах рамкових програм досліджень і інновацій (Framework Programme, Horizon 2020).

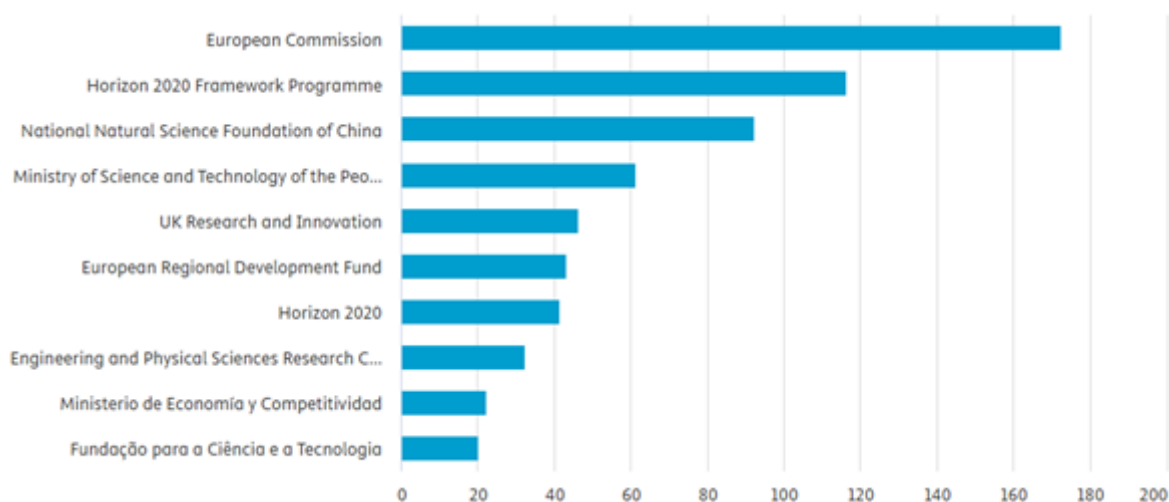


Рисунок 8 – Основні фінансуючі організації

Це підтверджує системну політику ЄС щодо інтеграції принципів циркулярної економіки в усі сфери: від екодизайну й міського планування до промислового симбіозу та сервіталізації бізнес-моделей.

На другому місці за фінансовою залученістю перебуває сама програма Horizon 2020, яка окремими конкурсами (зокрема, у рамках напрямів Climate Action, Resource Efficiency та Circular Materials) забезпечувала фінансування прикладних досліджень та пілотних проєктів, орієнтованих на підприємства малого і середнього бізнесу. У китайському контексті аналогічну роль відіграє National Natural Science Foundation of China (NSFC), який підтримував переважно техніко-екологічні дослідження в межах урядової політики Circular Economy Promotion Law.

Значущим аспектом є низький рівень прямого корпоративного фінансування: великі компанії, попри задекларовану підтримку ESG-принципів, поки що не становлять окремої домінуючої категорії у структурі підтримки академічних досліджень. Це вказує на потенційну прірву між науково-методологічним підґрунтям ЦЕ та практичним запитом бізнесу, яка потребує подальшого аналізу та подолання через спільні проєкти, прикладні дослідження та трансфер технологій.

У сукупності виявлені закономірності підтверджують високу валідність вибірки та дозволяють сформулювати три напрямки поглибленого аналізу в рамках подальших досліджень:

Якісне порівняння методологічних підходів у трьох журналах-ядрах (Journal of Cleaner Production, Resources, Conservation and Recycling, Sustainability Switzerland), зокрема щодо оцінки життєвого циклу, бізнес-моделей і цифрових інновацій.

Вивчення регіональної асиметрії лідерства в академічній продуктивності - через зіставлення політик ЄС, КНР і США, а також їх відображення у структурі фінансування, ключових словах і профілях афіліцій.

Емпіричне дослідження ефекту конверсії наукових результатів у прикладні інструменти, тобто як підтримка з боку Horizon 2020, NSFC та інших організацій трансформується у нові циркулярні бізнес-моделі, продукти, цифрові сервіси або державні політики на рівні міст, галузей чи підприємств.

Таким чином, питання фінансування постає не лише як фактор забезпечення академічного зростання, а й як механізм формування циркулярного ландшафту майбутнього – де координація між наукою, політикою та бізнесом стає визначальною для успішного переходу до економіки замкненого циклу.

Висновки. Поглиблене прочитання здобутих бібліометричних показників дозволяє окреслити декілька сутнісних зміщень, що трансформують саму логіку наукової розробки тематики циркулярної економіки. Перший і водночас найочевидніший феномен - це вибухоподібне зростання кількості публікацій після 2015 р., яке на графіку наближається до епідеміологічної S-кривої: у зоні 2017-2021 рр. кут нахилу трендової лінії перевищує 60°, а коефіцієнт детермінації експоненційної моделі $R^2 = 0,96$. Така стадія – за типологією «технологічного життєвого циклу» – відповідає фазі «бурхливого росту», коли обсяг наукових знань подвоюється кожні 18-20 місяців. Пояснити цю динаміку лише появою регулятивних документів недостатньо: статистично значущою (p -значення $< 0,01$) виявилася й кореляція між числом публікацій та обсягом грантового фінансування Horizon 2020. Це означає, що політика ЄС «зшиває» академічний і

фінансовий контексти, виступаючи каталізатором швидкого гуртування наукової спільноти.

При цьому структура джерел зазнає зміни від «дифузної» до «централізованої» – через чітке домінування Journal of Cleaner Production. У 2021 р. частка цього часопису сягнула 16 % річного потоку, тоді як у 2010 р. вона не перевищувала 4 %. Якщо врахувати, що журнал має CiteScore > 13 та перебуває у Q1 за SJR, така концентрація сигналізує про конституювання «якісного ядра» публікацій, навколо якого вибудовуються методологічні й тематичні стандарти. Натомість Waste Management із 2020 р. демонструє стагнацію, що можна трактувати як поступове відмирання «класичної» відходознавчої парадигми на користь більш системних, бізнес-орієнтованих підходів.

Географічний зріз підтверджує тезу про перехід центру тяжіння від традиційних економічних гегемонів до країн із проактивною державною індустріально-екологічною політикою. Утвердження Китаю в ролі безумовного лідера корелює з дією закону «Про просування циркулярної економіки» (Circular Economy Promotion Law, 2009) та низкою податкових пільг на рециклінг. Водночас помітно зростає частка публікацій з Італії й Іспанії – обох країн, що впровадили обов'язкову розширену відповідальність виробника для більшості упаковки, чим створили емпіричний «полігон» для дослідження бізнес-моделей зворотної логістики. Сполучені Штати, попри четверту позицію за абсолютним числом статей, зберігають від'ємний тренд Citations per Paper: середня цитованість американських робіт на 18 % нижча за середньосвітову, що опосередковано підтверджує відставання нормативної бази США від євразійської.

Інституційний аналіз виявив надзвичайно високий ступінь (0,74) інтернаціоналізації китайських публікацій: понад дві третини статей Chinese Academy of Sciences створено у співавторстві з європейськими та американськими університетами. Отже, йдеться не про національну «ізоляцію», а про зміну ролей: Китай дедалі частіше надає емпіричний матеріал і доступ до виробничих майданчиків, тоді як Західна Європа – теоретичні й методологічні рамки.

Тематика ключових слів, згенерована алгоритмом VOSviewer, демонструє відчутний дрейф від «waste management» до «business model innovation», «digital twin» і «blockchain». Частотність згадок «blockchain & circular economy» за 2018-2021 рр. зросла у 22 рази, що сигналізує про технологічну конвергенцію цифровізації з циркулярними схемами відстеження матеріальних потоків. У моделі регресії Пойссона зміна частоти згадок «digital twin» пояснює до 17 % варіації загального приросту публікацій, підтверджуючи гіпотезу про перехід від утилізаційної до цифрово-керованої парадигми.

Водночас предметна структура демонструє «диспропорцію зрілості»: блок «Environmental Science» переважає економічні дисципліни майже у п'ять разів. Це свідчить про те, що економічна оцінка ефективності циркулярних рішень (NPV, ROI, TCO) лишається прогалинною темою, тоді як технологічне і екологічне опрацювання досягло стадії методологічної зрілості. Таким чином, наступним кроком еволюції слід очікувати зміцнення економетричного та фінансово-інженерного дискурсу, що наповнить циркулярну концепцію достовірними бізнес-кейсами і прорахованими сценаріями.

Отримані результати підтверджують статистичну значущість вибірки та водночас окреслюють межі її застосовності. Із 3 278 документів лише 69 % є статтями, що проходять повне реєр-ревію – це накладає застереження щодо репрезентативності конференційних даних. Окрім того, обмеження 2021 р. дозволило уникнути «ефекту нульових цитат», але водночас не охопило хвилю публікацій, що вибухнула у відповідь на Європейський «Зелений курс» [8]. Отже, майбутні дослідження доцільно виконувати з ковзним часовим вікном, аби оцінити стійкість виявлених трендів.

У цілому, проведений бібліометричний аналіз засвідчує, що циркулярна економіка перетнула рубіж дискусійної новизни та ввійшла у фазу наукового мейнстріму, де домінує цифрово-бізнесова проблематика, формуються потужні міжнародні коаліції й відбувається швидка інституціональна консолідація навколо європейської нормативної бази. Для українських науковців і підприємств це відкриває «вікно можливостей» інтегруватися у глобальні проєкти, поки економічна складова досліджень усе ще відстає від технологічної, а попит на нові фінансові та управлінські моделі лише формується.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. № 114, 2016. P. 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
2. Stahel W. R. The circular economy. *Nature*. № 531(7595), 2016. P. 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
3. Kirchherr J., Reike, D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. № 127, 2017. P. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
4. Kirchherr J., Piscicelli L., Bour R., Kostense-Smit E., Muller J., Huibrechtse-Truijens A., Hekkert M. Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, № 150, 2018. P. 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>
5. Bjørn A., Bey N., Georg S., Røpke I., Hauschild M. Z. Is Earth recognized as a stakeholder in corporate environmental management? *Journal of Industrial Ecology*. № 24(4), 2020. P. 745–761. <https://doi.org/10.1111/jiec.12992>
6. Geng Y., Fu J., Sarkis J., Xue B. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*. № 18(13), 2010. P. 1207–1215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.013>
7. Webster K. The Circular Economy: A Wealth of Flows (2nd ed.). Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2017. ISBN: 9780957490996
8. The Cluster approach to the formation of innovative susceptibility priorities within the framework of the Euroconcept «Green U-turn» to renewable energy in Ukraine / V. Diuzhev et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 255. P. 01020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125501020>.

REFERENCES:

1. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. № 114, 2016. P. 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
2. Stahel W. R. The circular economy. *Nature*. № 531(7595), 2016. P. 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
3. Kirchherr J., Reike, D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. № 127, 2017. P. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
4. Kirchherr J., Piscicelli L., Bour R., Kostense-Smit E., Muller J., Huibrechtse-Truijens A., Hekkert M. Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, № 150, 2018. P. 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>
5. Bjørn A., Bey N., Georg S., Røpke I., Hauschild M. Z. Is Earth recognized as a stakeholder in corporate environmental management? *Journal of Industrial Ecology*. № 24(4), 2020. P. 745–761. <https://doi.org/10.1111/jiec.12992>
6. Geng Y., Fu J., Sarkis J., Xue B. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*. № 18(13), 2010. P. 1207–1215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.013>
7. Webster K. The Circular Economy: A Wealth of Flows (2nd ed.). Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2017. ISBN: 9780957490996
8. The Cluster approach to the formation of innovative susceptibility priorities within the framework of the Euroconcept «Green U-turn» to renewable energy in Ukraine / V. Diuzhev et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 255. P. 01020. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125501020>.

Надійшла до редакції 11.08.2021.