

Н. М. Серєда,
к. е. н., доцент, доцент кафедри маркетингу,
Академія праці, соціальних відносин і туризм
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-0795>
Н. В. Писаренко,
к. е. н., доцент, доцент кафедри маркетингу,
Академія праці, соціальних відносин і туризму
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5851-1976>

DOI: 10.32702/2306-6814.2026.2.173

ЛОГІСТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ: МОДЕЛЮВАННЯ ЗВОРОТНИХ ПОТОКІВ РЕСУРСІВ У ВИРОБНИЧО-РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ

N. Sereda,
PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Marketing, Academy of Labour, Social Relations and Tourism
N. Pysarenko,
PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Marketing, Academy of Labour, Social Relations and Tourism

LOGISTICS SUPPORT OF THE CIRCULAR ECONOMY: MODELING OF RETURN FLOWS
OF RESOURCES IN PRODUCTION AND DISTRIBUTION NETWORKS

У статті досліджено теоретико-методологічні засади логістичного забезпечення циркулярної економіки та обґрунтовано доцільність моделювання зворотних потоків ресурсів у виробничо-розподільчих мережах. Розкрито економічну сутність і класифікацію реверсивних матеріальних потоків, проаналізовано особливості їх формування та функціонування в умовах замкнених логістичних контурів. Запропоновано концептуальний підхід до економіко-математичного моделювання зворотних потоків вторинних ресурсів з урахуванням економічних та екологічних критеріїв ефективності. Узагальнено та систематизовано теоретико-методологічні підходи до дослідження циркулярної економіки та логістичного забезпечення замкнених ланцюгів постачання. Проаналізовано організаційно-економічні умови функціонування зворотної логістики у виробничо-розподільчих мережах. Обґрунтовано методологічні підходи до моделювання зворотних потоків ресурсів у циркулярних виробничо-розподільчих мережах. Побудовано економіко-математичну модель зворотних потоків вторинних ресурсів, що відображають взаємодію елементів виробничо-розподільчої мережі. Здійснено оптимізацію параметрів функціонування логістичної системи з урахуванням економічних та екологічних критеріїв. Розроблено практичні рекомендації щодо вдосконалення логістичного забезпечення циркулярної економіки у виробничо-розподільчих мережах. Визначено перспективи подальших досліджень, пов'язаних із поглибленням економіко-математичного моделювання зворотних потоків ресурсів у циркулярних виробничо-розподільчих мережах, зокрема з урахуванням стохастичності обсягів повернення, часових лагів та поведінкових факторів учасників ланцюгів постачання.

The article explores the theoretical and methodological principles of the logistics support of the circular economy and justifies the feasibility of modeling the reverse flows of resources in production and distribution networks. The purpose of the article is a theoretical and applied study of the logistics support of the circular economy through modeling and optimization of the reverse flows of resources in production and distribution networks, taking into account economic, environmental and social aspects. The economic essence and classification of reverse material flows are revealed, the features of their formation and functioning in the conditions of closed logistics circuits are analyzed. A conceptual approach to the economic and mathematical modeling of the reverse flows of secondary resources is proposed, taking into account economic and environmental efficiency criteria. Theoretical and methodological approaches to the study of the circular economy and the logistics support of closed supply chains are generalized and systematized. The organizational and economic conditions of reverse logistics in production and distribution networks have been analyzed. Methodological approaches to modeling reverse flows of resources in circular production and distribution networks have been substantiated. An economic and mathematical model of reverse flows of secondary resources has been constructed, reflecting the interaction of elements of the production and distribution network. This model allows us to quantitatively assess and optimize the movement of materials in the production and distribution network, taking into account economic costs, environmental indicators and resource management efficiency, as well as make informed decisions regarding the planning, distribution and return of resources in closed logistics loops, which increases the overall efficiency and sustainability of the system. The parameters of the logistics system have been optimized taking into account economic and environmental criteria. Practical recommendations have been developed for improving the logistics support of the circular economy in production and distribution networks. Prospects for further research related to the deepening of economic and mathematical modeling of return flows of resources in circular production and distribution networks are identified, in particular, taking into account the stochasticity of return volumes, time lags, and behavioral factors of supply chain participants. The conclusions state that the logistics support of the circular economy requires a comprehensive approach that involves the integration of reverse flows of resources into production and distribution networks, the optimization of their movement according to economic and environmental criteria, as well as the application of digital technologies and methods of economic and mathematical modeling to increase the efficiency and sustainability of the system.

Ключові слова: циркулярна економіка, логістичне забезпечення, управління ланцюгами постачання, виробничо-розподільчі мережі, зворотні потоки ресурсів, зворотна логістика, логістичні принципи циркулярності, вторинні ресурси, логістичні управлінські рішення, оптимізація логістичних процесів, ресурсоефективність.

Key words: circular economy, logistics support, supply chain management, production and distribution networks, reverse resource flows, reverse logistics, circular logistics principles, secondary resources, logistics management decisions, logistics process optimization, resource efficiency.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасний етап трансформації економічних систем характеризується переходом від лінійних моделей виробництва і споживання до циркулярної економіки, що передбачає багаторазове використання ресурсів, мінімізацію відходів та зниження екологічного навантаження. У цьому контексті ключової ролі набуває логістичне забезпечення замкнених ланцюгів постачання, зокрема управління зворотними потоками матеріальних ресурсів у виробничо-розподільчих мережах. Водночас

практична реалізація циркулярних логістичних моделей ускладнюється високою варіативністю обсягів повернення ресурсів, неоднорідністю їх якісних характеристик, зростанням логістичних витрат та недостатнім рівнем інтеграції інформаційних і аналітичних інструментів управління.

Наявні підходи до організації зворотної логістики переважно орієнтовані на окремі операційні аспекти та не забезпечують системного врахування економічних і екологічних ефектів у межах єдиної виробничо-розподільчої мережі. Це зумовлює потребу в науковому обґрунтуванні методів моделювання зворотних потоків ресурсів, здатних підтримувати прийняття управлінсь-

ких рішень щодо оптимізації параметрів функціонування логістичних систем у циркулярній економіці. Вирішення окресленої проблеми безпосередньо пов'язане з важливими науковими завданнями розвитку теорії логістики та сталого розвитку, а також із практичними завданнями підвищення ресурсоефективності, конкурентоспроможності підприємств і екологічної безпеки економіки.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У наукових працях як вітчизняних, так і зарубіжних фахівців останніми роками значну увагу приділено проблемам логістичного забезпечення циркулярної економіки та моделювання зворотних потоків ресурсів у виробничо-розподільчих мережах. Ці дослідження формують теоретичну, методичну та прикладну базу для розв'язання складних завдань високоефективного управління потоками вторинних ресурсів у замкнених логістичних системах. Українські науковці внесли вагомий внесок у розвиток теми: В. В. Роледерс, І. М. Сисоєва [1, с. 40], О. К. Афанасьєва, В. В. Куляк [2, с. 8], О. А. Цимбалістова, Є. В. Юденко, О. С. Черніхова [3, с. 124], О. В. Свічинська [4], О. А. Цимбалістова, Є. В. Юденко, О. С. Черніхова [5, с. 124], Н. І. Горбаль, Ю. Р. Ломага [6, с. 9].

Класичні праці з реверсивної логістики та замкнених ланцюгів постачання стали підґрунтям сучасних моделей циркулярної економіки у вивченні іноземних науковців: A. A. Alamri [7], S. Bag, S. Gupta [8, с. 1097], J. Medina-abad, A. Freire-pesantez [9, с. 101], Apolinario Quintana R., Rodriguez Donoso M., Apolinario Quintana C., Zambrano Farias F. J. [10, с. 1], V. Julianelli, R. Goyannes, L. Scavarda, S. Pinto [11, с. 1], S. Agrawal, R. K. Singh [12, с. 1146].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ (ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ)

Цілями статті є теоретичне обґрунтування логістичного забезпечення циркулярної економіки та розроблення методичного підходу до моделювання зворотних потоків ресурсів у виробничо-розподільчих мережах; аналіз особливостей формування і функціонування реверсивних матеріальних потоків у межах замкнених логістичних контурів; обґрунтування можливостей оптимізації параметрів логістичних систем з урахуванням економічних та екологічних критеріїв ефективності; визначення напрямів удосконалення управління виробничо-розподільчими мережами в умовах переходу до циркулярної економіки.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поглиблення глобальних екологічних викликів, зростання дефіциту природних ресурсів та підвищення вимог до сталості економічного розвитку зумовлюють необхідність трансформації традиційних лінійних моделей виробництва і споживання. У цьому контексті концепція циркулярної економіки набуває стратегічного значення, оскільки орієнтована на замкнення матеріальних і ресурсних потоків, мінімізацію утворення відходів та підвищення загальної ресурсоефективності еко-

мічних систем. Реалізація принципів циркулярності неможлива без формування адекватного логістичного забезпечення, здатного інтегрувати прямі та зворотні потоки ресурсів у межах виробничо-розподільчих мереж.

Особливе місце в системі циркулярної економіки посідає зворотна логістика, що охоплює процеси повернення, сортування, переробки та повторного використання матеріальних ресурсів. Виробничо-розподільчі мережі в умовах циркулярних бізнес-моделей ускладнюються за структурою та функціонуванням, оскільки поряд із традиційними потоками готової продукції виникають реверсивні потоки відходів, вторинної сировини та компонентів, які потребують ефективного управління. Низький рівень координації учасників логістичних ланцюгів, невизначеність обсягів і якості повернутих ресурсів, а також зростання логістичних витрат істотно обмежують практичне впровадження циркулярних підходів [13].

У цих умовах актуалізується потреба в застосуванні науково обґрунтованих методів моделювання зворотних потоків ресурсів, які дають змогу формалізувати взаємозв'язки між елементами виробничо-розподільчих мереж, оцінити економічні та екологічні наслідки управлінських рішень і обґрунтувати оптимальні параметри функціонування логістичних систем. Моделювання реверсивних потоків виступає важливим інструментом підтримки прийняття рішень у контексті переходу до циркулярної економіки, поєднуючи завдання підвищення конкурентоспроможності підприємств із досягненням цілей сталого розвитку.

Формування концепції циркулярної економіки є результатом еволюції наукових поглядів на взаємодію економічного розвитку та використання природних ресурсів. Її витоки простежуються в межах екологічної економіки, теорії сталого розвитку, індустріальної екології та системного підходу до управління виробництвом. Уже в середині ХХ ст. у працях К. Боулдінга була сформульована ідея "космічного корабля Земля", що підкреслювала обмеженість ресурсів і необхідність замкнених економічних циклів [14]. Подальший розвиток ці підходи отримали в концепціях "економіки замкненого циклу", "zero waste" та "cradle-to-cradle", які стали теоретичним підґрунтям сучасної циркулярної економіки [15, с. 9].

На відміну від лінійної моделі "take-make-dispose", циркулярна економіка ґрунтується на принципах збереження цінності ресурсів, продуктів і матеріалів упродовж максимально тривалого періоду. Її економічний зміст полягає у формуванні замкнених матеріальних і енергетичних потоків, що забезпечують повторне використання, відновлення, ремануфактуру та рециклінг ресурсів. Таким чином, економічна система розглядається не як сукупність ізольованих виробничих процесів, а як інтегрована мережа взаємопов'язаних потоків, у межах якої мінімізується утворення відходів і зменшується залежність від первинної сировини [16, с. 166].

З економічного погляду циркулярна економіка трансформує звичні підходи до творення вартості. Додана цінність формується не лише на етапах виробництва та продажу продукції, а й у процесах зворотної ло-

гістики, переробки та повторного вжитку ресурсів. Це спричиняє зміну структури витрат підприємств, виникнення нових джерел прибутків і зростання загальної ресурсоефективності. Водночас циркулярна економіка сприяє зменшенню екологічних зовнішніх ефектів, що має прямий вплив на макроекономічні показники зростання та екологічну безпеку.

У сучасному середовищі концепція циркулярної економіки здобула інституційного закріплення на рівні державної та наднаціональної політики. Це спричинило її перехід від теоретичної моделі до практичного знаряддя економічного розвитку. Її економічний зміст дедалі більше пов'язується з формуванням інноваційних бізнес-моделей, розвитком циркулярних ланцюгів постачання та інтеграцією логістичних рішень, які спрямовані на ефективне управління як прямими, так і зворотними потоками ресурсів. У цьому контексті циркулярна економіка постає комплексною моделлю підвищення конкурентоспроможності економічних систем у тривалій перспективі.

Логістика виступає ключовим механізмом реалізації принципів циркулярної економіки, оскільки забезпечує інтеграцію всіх етапів руху матеріальних ресурсів у виробничо-розподільчих мережах, включно з прямими та зворотними потоками. В умовах циркулярних бізнес-моделей логістика перестає обмежуватися функціями транспортування та складування; вона перетворюється на системоутворюючий елемент, який координує процеси створення, збереження та відновлення цінності продуктів і матеріалів протягом усього життєвого циклу.

Циркулярні ланцюги створення вартості передбачають не лише виробництво та розподіл готової продукції, а й організацію зворотних потоків ресурсів — повернення відходів, використаних матеріалів, компонентів продукції та упаковки для повторного використання або переробки. Логістика в цьому контексті забезпечує ефективну координацію руху ресурсів, планування обсягів і маршрутів повернення, управління запасами вторинних матеріалів, а також інтеграцію інформаційних систем для моніторингу та контролю якості ресурсів на всіх етапах циклу [17].

Таким чином, логістика є не просто функціональним компонентом виробничо-розподільчої системи, а системоутворюючим елементом, що забезпечує замкнутість ресурсних потоків, координацію дій усіх учасників ланцюга та формування стійкої доданої вартості у рамках циркулярної економіки. Вона виступає інтегратором технологічних, економічних та екологічних процесів, що дозволяє досягати ефективності як окремих підприємств, так і всієї виробничо-розподільчої мережі в цілому.

Після узагальнення та систематизації теоретико-методологічних підходів до дослідження циркулярної економіки та логістичного забезпечення замкнених ланцюгів постачання стає можливим більш детально розглянути практичні аспекти функціонування таких систем. Зокрема, центральним елементом циркулярних моделей є зворотні потоки ресурсів, які забезпечують замкнутість матеріальних і енергетичних циклів та створюють додаткову економічну цінність [3, с. 124].

У цьому контексті доцільним є розкриття економічної сутності цих потоків, їхньої ролі у формуванні доданої вартості та стійкості виробничо-розподільчих мереж, а також розробка класифікаційної системи, яка дозволяє впорядкувати різноманіття зворотних потоків ресурсів і визначити методи їх ефективного управління у рамках циркулярних бізнес-моделей. Такий перехід від теоретичних підходів до конкретних механізмів функціонування зворотної логістики створює основу для подальшого моделювання та оптимізації цих процесів у виробничо-розподільчих мережах [13].

Зворотні потоки ресурсів забезпечують замкненість матеріальних та енергетичних циклів. Створюють додаткову економічну вартість через повторне використання, відновлення або переробку ресурсів. Економічна сутність таких потоків полягає у зберіганні та поновленні вартості матеріалів, продукції. Це дає змогу зменшити залежність від первинної сировини, оптимізувати витрати на логістику та підвищити дієвість використання ресурсів у виробничо-розподільчих мережах.

У контексті циркулярних бізнес-моделей зворотні потоки ресурсів виконують такі функції [8, с. 1097]:

- економічну — зменшення витрат на закупівлю та утилізацію ресурсів, створення нових джерел доходу через продаж або повторне використання матеріалів;

- екологічну — скорочення обсягів відходів, зменшення негативного впливу на довкілля та підвищення ресурсоефективності підприємства;

- соціальну — стимулювання зайнятості у сфері переробки та логістики вторинної сировини, підвищення корпоративної відповідальності підприємств.

Для ефективного управління зворотними потоками ресурсів у виробничо-розподільчих мережах доцільно їх класифікувати за кількома ознаками [18, с. 732]:

1. За типом ресурсів:

- вторинна сировина (метали, пластик, папір тощо);

- компоненти продукції, придатні для повторного використання;

- відходи виробництва та споживання, що підлягають переробці;

- упаковка та тара, придатні для повторного застосування.

2. За джерелом формування:

- від підприємств-виробників (технологічні відходи, брак продукції);

- від споживачів (продукція, що вийшла з експлуатації, відпрацьована упаковка).

3. За функціональною роллю в логістичній мережі:

- потоки повернення для відновлення або ремонту (remanufacturing);

- потоки для повторного використання у виробництві (reuse);

- потоки для переробки та вторинного виробництва (recycling).

4. За рівнем контролю та прогнозованості:

- планові потоки, інтегровані у виробничо-розподільчу мережу;

- непередбачувані або спонтанні потоки, що формуються залежно від поведінки споживачів і якості відходів.

В умовах циркулярної економіки виробничо-розподільчі мережі перестають бути лише лінійними кана-

лами руху продукції від постачальника до споживача. Вони трансформуються у замкнені логістичні контури, де поряд із прямими потоками товарів функціонують зворотні потоки ресурсів — відходи, використані матеріали, компоненти продукції та упаковка, що підлягають повторному використанню, ремонту або переробці [17].

Замкнені логістичні контури утворюють інтегровану мережу елементів, де кожен вузол виконує не лише функцію пересилання продукції, а й забезпечує координацію процесів повернення ресурсів. Така структура дозволяє підвищити ефективність використання матеріалів, зменшити витрати на придбання первинної сировини, оптимізувати транспортні маршрути та скоротити негативний вплив на навколишнє середовище.

Ключові особливості виробничо-розподільчих мереж у замкнених контурах [19, с. 215]:

1. Динамічна взаємодія прямих і зворотних потоків — забезпечує безперервне відновлення ресурсів і підвищує гнучкість мережі.

2. Координація учасників ланцюга — включає виробників, дистриб'юторів, споживачів та операторів зворотної логістики.

3. Інформаційне забезпечення — діджиталізація управління потоками ресурсів у режимі реального часу.

4. Оптимізація ресурсів і витрат — дозволяє мінімізувати втрати матеріалів і енергії.

Функціонування зворотної логістики у виробничо-розподільчих мережах залежить від комплексу організаційно-економічних умов, які визначають ефективність руху матеріальних ресурсів від споживача або підприємства назад у виробничий цикл для повторного використання, ремонту чи переробки.

Для ефективного функціонування зворотної логістики у виробничо-розподільчих мережах необхідно враховувати комплекс організаційно-економічних умов, що визначають координацію, управління та економічну доцільність руху зворотних потоків ресурсів. В табл. 1 наведено систематизований огляд ключових факторів, що впливають на ефективність логістичних процесів у рамках циркулярної економіки, з урахуванням організаційних, економічних, технологічних та соціальних аспектів. Такий підхід дозволяє наочно оцінити умови, що сприяють підвищенню ресурсоефективності та стійкості виробничо-розподільчих мереж.

Оцінка ефектів впровадження зворотної логістики дозволяє визначити доцільність інвестицій у відповідні процеси, оцінити рівень ресурсоефективності та екологічної безпеки, а також врахувати соціальні наслідки для працівників і споживачів. Комплексний підхід до оцінювання економічних, екологічних та соціальних ефектів є необхідною умовою для формування збалансованої та стійкої логістичної системи, яка здатна забезпечувати повторне використання ресурсів, мінімізувати відходи та

Таблиця 1. Організаційно-економічні умови функціонування зворотної логістики у виробничо-розподільчих мережах

Категорія умов	Основні елементи	Вплив на функціонування зворотної логістики
Організаційні умови	Структура мережі та взаємодія учасників. Інформаційна інтеграція. Політика стимулювання партнерів і споживачів	Забезпечує координацію потоків, контроль якості ресурсів, залучення всіх учасників ланцюга
Економічні умови	Витрати на транспортування, сортування, зберігання та переробку. Економічна вигода від повторного використання ресурсів. Регулювання та нормативне забезпечення	Доцільність логістичних рішень, збільшує прибутковість та спонукає повторне використання засобів.
Технологічні умови	Використання цифрових платформ, систем відстеження та управління запасами. Автоматизація сортування та переробки	Покращує точність планування, зменшує час обробки потоків та прозорість процесів
Соціальні умови	Стимулювання участі споживачів. Підвищення корпоративної відповідальності	Забезпечує активну участь споживачів у зворотних потоках та формує позитивний імідж підприємства

Джерело: сформовано на основі [20, с. 1; 21, с. 71].

підвищувати конкурентоспроможність підприємств у довгостроковій перспективі [22, с. 1925].

Для наочного представлення результатів оцінки впливу впровадження зворотних потоків ресурсів у логістичних системах доцільно узагальнити ключові економічні, екологічні та соціальні ефекти у вигляді табл. 2. Такий підхід дозволяє систематизувати основні показники та результати впровадження зворотної логістики, наочно відобразити її вплив на ефективність виробничо-розподільчих мереж та підкреслити багатовимірну користь для підприємств, довкілля та суспільства.

Таблиця 2. Оцінка економічних, екологічних та соціальних ефектів впровадження зворотних потоків ресурсів у логістичних системах

Категорія ефектів	Основні показники та результати	Вплив на логістичну систему
Економічні	Зменшення витрат на первинну сировину. Оптимізація логістичних витрат. Додаткові джерела доходу від вторинних матеріалів. Підвищення конкурентоспроможності підприємств	Зниження витрат на виробництво та логістику, підвищення ефективності використання ресурсів
Екологічні	Зменшення обсягів відходів та забруднення. Скорочення споживання природних ресурсів. Зниження енергетичних витрат і викидів парникових газів. Відповідність екологічним стандартам	Підвищення екологічної безпеки, підтримка сталого розвитку та іміджу підприємства
Соціальні	Створення нових робочих місць. Підвищення корпоративної соціальної відповідальності. Формування культури відповідального споживання. Розвиток компетенцій працівників	Збільшення суспільної відповідальності підприємств, залучення покупців, розвиток людського капіталу

Джерело: сформовано на основі [11, с. 1; 23].

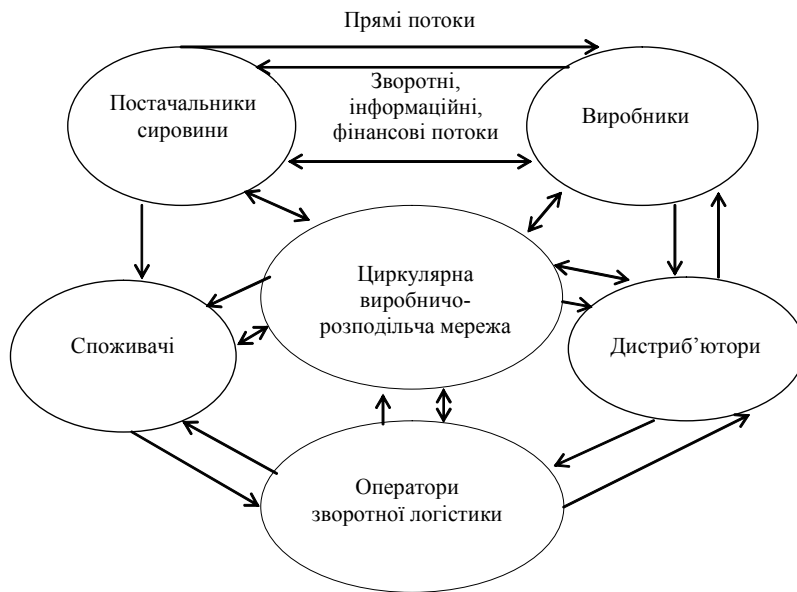


Рис. 1. Концептуальна модель циркулярної виробничо-розподільчої мережі

Джерело: авторська розробка.

Оцінка економічних, екологічних та соціальних ефектів впровадження зворотних потоків ресурсів у логістичних системах дозволяє обґрунтувати доцільність переходу до циркулярних моделей господарювання та виявити їхній багатовимірний вплив на ефективність виробничо-розподільчих мереж. Водночас результати такої оцінки свідчать, що досягнення позитивних ефектів значною мірою залежить від рівня узгодженості дій учасників мережі, раціональності розподілу ресурсів та оптимальності логістичних рішень у межах як прямих, так і зворотних потоків [22, с. 1925].

У зв'язку з цим виникає потреба у формалізованому інструментарії, який дозволив би кількісно описати взаємодію елементів виробничо-розподільчої мережі, врахувати обмеження та взаємозалежності між потоками ресурсів і забезпечити обґрунтування управлінських рішень. Таким інструментом є економіко-математичне моделювання зворотних потоків вторинних ресурсів, що створює методичну основу для оптимізації функціонування циркулярних логістичних систем і підвищення їх економічної, екологічної та соціальної результативності [24, с. 590].

Побудова економіко-математичної моделі зворотних потоків вторинних ресурсів є необхідним етапом дослідження функціонування виробничо-розподільчих мереж в умовах циркулярної економіки. Ускладнення логістичних зв'язків, поєднання прямих і реверсивних матеріальних потоків, а також необхідність узгодження економічних та екологічних цілей зумовлюють потребу у формалізованому описі взаємодії елементів мережі.

Економіко-математичне моделювання дозволяє відобразити структуру циркулярної виробничо-розподільчої мережі, кількісно описати рух вторинних ресурсів між її учасниками та оцінити вплив управлінських рішень на загальну ефективність логістичної системи. Застосування моделей оптимізації створює передумови для мінімізації сукупних витрат, раціонального використання ресурсів і підвищення стійкості мережі за

рахунок інтеграції зворотних потоків у виробничі процеси [25].

У цьому контексті побудова економіко-математичної моделі зворотних потоків вторинних ресурсів виступає інструментом обґрунтування оптимальних параметрів функціонування циркулярної виробничо-розподільчої мережі та забезпечує методичну основу для подальшого аналізу і моделювання сценаріїв її розвитку.

Концептуальна модель циркулярної виробничо-розподільчої мережі є інтегрованим представленням структури та взаємодії всіх учасників ланцюга постачання, включно з прямими та зворотними потоками ресурсів. Вона дозволяє систематизувати управлінські процеси, забезпечити координацію дій і створити передумови для економічної, екологічної та соціальної ефективності мережі.

Концептуальна модель є підґрунтям для формування економіко-математичних моделей та створення стратегій оптимізації закритих виробничо-розподільчих мереж.

Економіко-математична модель зворотних потоків вторинних ресурсів у виробничо-розподільчій мережі дозволяє формалізувати взаємодію всіх учасників, оптимізувати рух матеріалів і оцінювати ефективність управлінських рішень. Така модель поєднує економічні, логістичні та екологічні параметри і є основою для прийняття обґрунтованих рішень у рамках циркулярної економіки [26].

1. Позначення елементів мережі:

— $i = 1, 2, \dots, I$ — виробники;

— $j = 1, 2, \dots, J$ — дистриб'ютори;

— $k = 1, 2, \dots, K$ — споживачі;

— $l = 1, 2, \dots, L$ — оператори зворотної логістики (переробка, ремонт, повторне використання).

Основні змінні:

— x_{ij} — обсяг прямого потоку продукції від виробника i до дистриб'ютора j ;

— y_{jk} — обсяг продукції, що доставляється від дистриб'ютора j до споживача k ;

— r_{kl} — обсяг вторинних ресурсів, що повертається від споживача k до оператора зворотної логістики l ;

— s_{li} — обсяг ресурсів, що повертаються від оператора до виробника i для повторного використання.

Цільова функція:

Метою моделі може бути мінімізація загальних витрат на логістичні процеси, враховуючи прямі та зворотні потоки ресурсів [27, с. 603]:

$$\min Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij}^{dir} x_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_{jk}^{dist} y_{jk} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L C_{kl}^{rev} r_{kl} + \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I C_{li}^{reuse} s_{li} \quad (1),$$

де:

C_{ij}^{dir} — витрати на транспортування продукції від виробника i до дистриб'ютора j , тис.грн;

C_{jk}^{dist} — витрати на доставку до споживача k , тис.грн;

C_{kl}^{rev} — витрати на зворотну логістику від споживача k до оператора l , тис.грн;

C_{li}^{reuse} — витрати на повернення ресурсів оператором до виробника i , тис.грн

Обмеження:

Баланс потоків продукції:

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = \text{Виробнича потужність}$$

$$i, i = 1, \dots, I$$

$$\sum_{k=1}^K y_{jk} = \sum_{i=1}^I x_{ij}, j = 1, \dots, J$$

Обмеження зворотних потоків:

$$\sum_{l=1}^L r_{kl} \leq y_{jk}, k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{i=1}^I s_{li} = \sum_{k=1}^K r_{kl}, l = 1, \dots, L$$

Можливі модифікації:

— додавання екологічних критеріїв — мінімізація викидів CO_2 або енергетичних витрат;

— введення соціальних критеріїв — врахування робочих місць чи безпеки персоналу;

— використання ймовірнісних величин для обсягів вторинних ресурсів у випадку невизначеності;

— оптимізація маршрутів транспортних потоків за допомогою мережових моделей.

У межах оптимізаційного підходу економічні критерії включають витрати на транспортування, зберігання, обробку та переробку ресурсів, а також витрати, пов'язані з управлінням зворотними потоками. Екологічні критерії, у свою чергу, відображають рівень споживання природних ресурсів, обсяги утворення відходів, викиди парникових газів і енергоємність логістичних операцій. Інтеграція цих критеріїв у єдину модель дозволяє оцінювати компроміси між економічною ефективністю та екологічною результативністю логістичної системи [24, с. 590].

Оптимізація може здійснюватися шляхом застосування багатокритеріальних методів, зокрема зваженої цільової функції або методу компромісних рішень, що дає змогу визначити оптимальні параметри руху прямих і зворотних потоків, розміщення логістичних потужностей, вибору маршрутів транспортування та рівнів запасів вторинних ресурсів. У результаті

формується оптимальна конфігурація логістичної системи, яка забезпечує мінімальні сукупні витрати за умови дотримання заданих екологічних обмежень або досягнення визначених екологічних показників [28].

Здійснення оптимізації параметрів функціонування логістичної системи з урахуванням економічних та екологічних критеріїв дозволяє визначити раціональні конфігурації руху прямих і зворотних потоків ресурсів, оцінити компроміси між витратами та екологічним навантаженням і обґрунтувати ефективні управлінські рішення в межах циркулярних виробничо-розподільчих мереж. Водночас результати оптимізаційних розрахунків мають прикладну цінність лише за умови їх трансформації у конкретні управлінські заходи та інструменти впровадження [29, с. 125].

У цьому контексті виникає необхідність розроблення практичних рекомендацій, спрямованих на вдосконалення логістичного забезпечення циркулярної економіки у виробничо-розподільчих мережах, які ґрунту-



Рис. 2. Напрями вдосконалення логістичного забезпечення циркулярної економіки у виробничо-розподільчих мережах

Джерело: авторська розробка.

валися на отриманих результатах оптимізації та враховували організаційні, економічні й інституційні особливості функціонування логістичних систем.

Розроблення практичних рекомендацій щодо вдосконалення логістичного забезпечення циркулярної економіки у виробничо-розподільчих мережах є логічним завершальним етапом дослідження, спрямованого на поєднання теоретичних положень, результатів аналітичної оцінки та економіко-математичного моделювання. В умовах переходу до циркулярної моделі господарювання особливої актуальності набуває питання практичної реалізації принципів замкненості ресурсних потоків та інтеграції зворотної логістики у систему управління ланцюгами постачання [9, с. 101].

Потреба формування подібних настанов зумовлена наявністю організаційних, фінансових та інституційних унеможливлень, що стримують дієве функціонування зворотних потоків ресурсів у виробничо-розподільчих мережах. Тому практичні пропозиції мають ґрунтуватися на здобутках оптимізації параметрів логістичних систем, брати до уваги економічні й екологічні критерії дієвості та бути спрямованими на підвищення ресурсоефективності, зменшення екологічного навантаження і забезпечення сталого зростання.

Ефективне логістичне забезпечення циркулярної економіки у виробничо-розподільчих мережах потребує комплексного підходу, що поєднує організаційні, економічні, технологічні та інституційні інструменти управління потоками ресурсів. З урахуванням результатів теоретичного аналізу, оцінки ефектів та економіко-математичного моделювання доцільно сформулювати такі практичні рекомендації [28].

Для систематизації та узагальнення запропонованих напрямів удосконалення логістичного забезпечення циркулярної економіки у виробничо-розподільчих мережах доцільно подати практичні рекомендації на рис. 2. Такий підхід дозволяє структуровано відобразити основні напрями впливу, зміст управлінських заходів та очікувані результати їх впровадження, а також забезпечує наочність і зручність використання таблиці як прикладного інструменту для суб'єктів господарювання та органів управління.

Отже, узагальнені на рис. 2 практичні рекомендації свідчать, що вдосконалення логістичного забезпечення циркулярної економіки у виробничо-розподільчих мережах потребує комплексного підходу, який поєднує організаційні, економічні, технологічні та інституційні заходи. Реалізація запропонованих рекомендацій сприятиме інтеграції зворотних потоків у логістичні системи, підвищенню ресурсоефективності, зниженню екологічного навантаження та формуванню стійких циркулярних виробничо-розподільчих мереж, здатних забезпечити узгодження економічних, екологічних і соціальних цілей розвитку.

Перехід до циркулярної економіки зумовлює необхідність глибокої трансформації логістичних систем, орієнтованої на замкненість ресурсних потоків, підвищення ефективності використання вторинних ресурсів та зменшення екологічного навантаження. У цьому контексті логістичне забезпечення набуває стратегічного значення як інструмент координації взаємодії учасників

виробничо-розподільчих мереж і практичної реалізації принципів циркулярності [30].

Наслідки теоретичного аналізу, оцінки господарських та довкілнських впливів, а також економіко-математичного моделювання зворотних шляхів ресурсів засвідчують наявність суттєвого потенціалу зростання ефективності логістичних систем за умови запровадження багатогранних керівних рішень. Водночас впровадження циркулярних логістичних схем вимагає формування належних інституційних обставин, покращення організаційно-господарських засобів, розвитку цифрових проваджень управління та врахування потенційних загроз.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Здійснене дослідження дозволило всебічно оглянути логістичне забезпечення циркулярної економіки через призму формування та керування зворотними потоками ресурсів у виробничо-розподільчих мережах. Узагальнення теоретичних концепцій довело, що циркулярна економіка — це еволюційний ступінь розвитку економічних систем, у межах якого логістика набуває системоутворюючого значення, гарантуючи замкненість матеріальних потоків та узгодження взаємодії учасників ланцюгів додавання вартості.

Узагальнення та систематизація теоретико-методологічних підходів до дослідження циркулярної економіки дозволили встановити, що її економічний зміст полягає у формуванні замкнених ланцюгів створення вартості, орієнтованих на мінімізацію використання первинних ресурсів і максимізацію повторного використання матеріалів. Логістика в цих умовах виступає системоутворюючим елементом, що забезпечує інтеграцію прямих і зворотних матеріальних потоків та координацію взаємодії учасників ланцюгів постачання.

У роботі розкрито економічну сутність та здійснено класифікацію зворотних потоків ресурсів з позицій циркулярних бізнес-моделей, що дало змогу уточнити їх функціональну роль у виробничо-розподільчих мережах. Проаналізовано організаційно-економічні умови функціонування зворотної логістики та виявлено ключові обмеження її розвитку, пов'язані з інституційними бар'єрами, недостатнім рівнем координації та високою невизначеністю обсягів вторинних ресурсів. Оцінка економічних, екологічних і соціальних ефектів підтвердила доцільність впровадження зворотних потоків як інструменту підвищення ресурсоефективності та сталості логістичних систем.

Обґрунтовано методологічні підходи до моделювання циркулярних виробничо-розподільчих мереж. Побудована економіко-математична модель зворотних потоків вторинних ресурсів дозволяє оптимізувати параметри функціонування логістичної системи. На підставі отриманих результатів розроблено практичні поради щодо вдосконалення логістичного забезпечення циркулярної економіки, спрямовані на інтеграцію зворотної логістики, розвиток цифрових технологій та формування сприятливого інституційного середовища.

Побудована економіко-математична модель зворотних потоків вторинних ресурсів відображає взаємодію ключових елементів виробничо-розподільчої мережі та дозволяє визначати оптимальні параметри руху матеріальних потоків у замкнених логістичних контурах. Використання моделі створює передумови для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері циркулярної логістики.

Обґрунтування методологічних підходів до моделювання зворотних потоків ресурсів дозволило визначити економіко-математичне моделювання як ефективний інструмент аналізу та оптимізації функціонування циркулярних виробничо-розподільчих мереж. Запропонований підхід забезпечує можливість комплексного врахування економічних та екологічних критеріїв ефективності.

Перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямі пов'язані з розширенням економіко-математичних моделей циркулярної логістики з урахуванням ризиків, невизначеності та поведінкових факторів учасників мережі; дослідженням впливу цифрових платформ, технологій Інтернету речей і блокчейну на керування зворотних потоків; а також розробленням методик комплексної оцінки ефективності циркулярних логістичних систем з урахуванням регіональних та галузевих особливостей.

Література:

1. Роледерс В. В., Сисоєва І. М. Моделювання екологічної системи в контексті циркулярної моделі економіки. *Агросвіт*. 2024. № 7. С. 40—45. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.7.40.
2. Афанасьєва О. К., Куляк В. В. Реверсивна логістика як ключовий елемент моделі циркулярної економіки. *Вчені записки: зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Київ. нац. екон. ун-т ім. Вадима Гетьмана; [редкол.: О. Яценко (голов. ред.) та ін.]. Київ: КНЕУ, 2025. Вип. 40. С. 8—19. URL: <https://ir.kneu.edu.ua/handle/2010/53011>.*
3. Цимбалістова О. А., Юденко Є. В., Черніхова О. С. Проблематика та перспективи розвитку напрямку реверсивної логістики в Україні. *Економічний простір*. 2020. № 159. С. 124—129. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/159-26>.
4. Свічинська О. В. Циркулярна логістика як напрям удосконалення управління запасами. URL: <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/468b5087-1fc2-498b-9a19-d0e6428825b6/content>.
5. Цимбалістова О. А., Юденко Є. В., Черніхова О. С. Проблематика та перспективи розвитку напрямку реверсивної логістики в Україні. *Економічний простір*. 2020. № 159. С. 124—129. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/159-26>.
6. Горбаль Н. І., Ломага Ю. Р. Циркулярна економіка — основа сталого розвитку підприємств. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Проблеми економіки та управління"*. 2022. № 1 (9). С. 9—24. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/apr/27434/220198verstka-11-26.pdf>.
7. Alamri A. A. A Sustainable Closed-Loop Supply Chains Inventory Model Considering Optimal Number of Remanufacturing Times. *Sustainability*. 2023. Volume 15. 23 P. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9517>.
8. Bag S., Gupta S. Examining the effect of green human capital in the adoption of reverse logistic and remanufacturing operations performance. *International Journal of Manpower*. 2020. Volume 41 (7). pp. 1097—1117. URL: <https://doi.org/10.1108/IJM-07-2019-0349>.
9. Medina-abad J., Freire-pesantez A. Barreras para la implementacion de la economia circular en paises en vias de desarrollo. *Estudios de la Gestin*. 2023. Volume 14 (14). pp. 101—123. URL: <https://doi.org/10.32719/25506641.2023.14.6>.
10. Apolinario Quintana R., Rodriguez Donoso M., Apolinario Quintana C., Zambrano Farias F. J. Barriers to Reverse Logistics and the Circular Economy in Supply Chain Arrangements: A Qualitative Study in Ecuador. *Revista Galega de Economia*. 2024. Volume 33 (2). pp. 1—18. DOI: <https://doi.org/10.15304/rge.33.2.9228>.
11. Julianelli V., Goyannes R., Scavarda L., Pinto S. Interplay between reverse logistics and circular economy: Critical success factors-based taxonomy and framework. *Resources, Conservation & Recycling*. 2020. Volume 158. pp. 1—12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104784>.
12. Agrawal S., Singh R. K. Outsourcing and reverse supply chain performance: a triple bottom line approach. *Benchmarking: An International Journal*. 2021. Volume 28 (4). pp. 1146—1163. URL: <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2020-0498>.
13. Підгірна В., Зибарева О., Чубрей О. Проектна діяльність з впровадження циркулярних бізнес-моделей для конкурентоспроможності на засадах сталого розвитку. *Економіка та суспільство*. 2024. Випуск 67. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-75>.
14. Boulding K. E. The Economics of the Coming Spaceship Earth. In H. Jarrett (Ed.). *Environmental Quality in a Growing Economy* (pp. 3-14). Baltimore, MD: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press. 1966. URL: <https://www.pym.org/eco-justice-collaborative/wp-content/uploads/sites/58/2016/05/Boulding.pdf>.
15. Приклади впровадження циркулярної економіки в Україні К.: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2024. 44 с. URL: https://www.recpc.org/wp-content/uploads/2024/05/National-cases-of-CE_publication_ukr.pdf.
16. Галак І. І. Замкнений ланцюг постачань: інструмент забезпечення сталого розвитку сучасного підприємства. *Підприємництво в аграрній сфері: глобальні виклики та ефективний менеджмент в рамках 20-ої агропромислової спеціалізованої виставки "АгроТехСервіс — 2021" Запорізької торгово-промислової палати. Запоріжжя, 2021. № 12. С. 166—169.*
17. Южаков М. Ю. Циркулярні ланцюги постачання: трансформація глобальних моделей у напрямі сталості. *Чорноморські наукові студії*. 2025. DOI: 10.36059/978-966-397-522-1-57.
18. Gallegos G. M. C., Valenzo-Jimenez M. A., Tapia G. G., Rodriguez S. A. E., Paniagua C. F. O., Leslie H. S. A Systematic Review of Reverse Logistics Research: Bibliometric Study of the Years 2013—2023. *Journal of*

Scientometric Research. 2024. Vol 13. Issue 3. pp.732-744. DOI:10.5530/jscires.20041196.

19. Григорак М. Ю. Реверсивна логістика в контексті сталих ланцюгів постачання: синергія для сталого розвитку. VI міжнародна науково-практична конференція "Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи". Секція 3. Сталі ланцюги поставок: європейські стратегії та практики в українських реаліях. 2025. С. 215—216. URL: <https://confmanagement-proc.kpi.ua/article/view/329601>.

20. Cao S., Liao W., Huang Y. Heterogeneous fleet recyclables collection routing optimization in a two-echelon collaborative reverse logistics network from circular economic and environmental perspective. *Science of the Total Environment*. 2021. Volume 758. pp. 1—15. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144062>.

21. Dhar B. K., Sarkar S. M., Ayittey F. K. Impact of social responsibility disclosure between implementation of green accounting and sustainable development: A study on heavily polluting companies in Bangladesh. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2022. Volume 29 (1). pp. 71—78. URL: <https://doi.org/10.1002/csr.2174>.

22. Frei R., Jack L., Krzyzaniak S.-A. Sustainable reverse supply chains and circular economy in multichannel retail returns. *Business Strategy and the Environment*. 2020. Volume 29 (5). pp. 1925—1940. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/bse.2479>.

23. Alamerew Y. A., Brissaud D. Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Volume 254. 120025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120025>.

24. Kazancoglu I., Sagnak M., Kumar Mangla S., Kazancoglu Y. Circular economy and the policy: A framework for improving the corporate environmental management in supply chains. *Business Strategy and the Environment*. 2021. Volume 30 (1). pp. 590—608. URL: <https://doi.org/10.1002/bse.2641>.

25. Gonbadi A. M., Genovese A., Sgalambro A. Closed-loop supply chain design for the transition towards a circular economy: A systematic literature review of methods, applications and current gaps. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Volume 323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129101>.

26. Mallick P. K., Salling K. B., Pigosso D. C.A., McAloone T.C. Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review. *Journal of Environmental Management*. 2023. Volume 328. 117017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117017>.

27. Govindan K., Soleimani H., Kannan D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*. 2015. Volume 240. № 3. pp. 603-626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>.

28. Jebreili S., Babazadeh R., Fazayeli S., Kamran M. A., Gharibi A. R. A Multi Objective MILP Model for Sustainable Closed Loop Supply Chain Network Design. *Mathematics*. 2022. Volume 13(21). 3478. URL: <https://doi.org/10.3390/math13213478>

29. Роlederс В. Екологістична система в моделі циркулярної економіки. *Економічні горизонти*. 2023. №4 (26). С. 125—134. URL: [https://doi.org/10.31499/2616-5236.4\(26\).—2023.293106](https://doi.org/10.31499/2616-5236.4(26).—2023.293106).

30. Azadnia A. H., Onofrei G., Ghadimi P. Electric vehicles lithium-ion batteries reverse logistics implementation barriers analysis: a tism-micmac approach. *Resources, Conservation & Recycling*. 2021. 174 (May), 105751. URL: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105751>.

References:

1. Roleders, V. V., and Sysoieva, I. M. (2024), "Modeling the ecological system in the context of a circular economy model", *Agrosvit*, vol. 7, pp. 40—45. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.7.40.

2. Afanasieva, O. K., and Kuliak, V. V. (2025), "Reverse logistics as a key element of the circular economy model", *Scientific notes: collection of scientific works*, vol. 40. pp. 8-19. available at: <https://ir.kneu.edu.ua/handle/2010/53011> (Accessed 25 Dec 2025).

3. Tsymbalistova, O.A., Yudenko, Ye.V., and Chernikhova, O.S. (2024), "Problems and prospects for the development of reverse logistics in Ukraine", *Economic space*, vol. 159, pp. 124—129. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/159-26>.

4. Svichynska, O. V. "Circular logistics as a direction for improving inventory management". available at: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitsstreams/468b5087-1fc2-498b-9a19-d0e6428825b6/content> (Accessed 25 Dec 2025).

5. Tsymbalistova, O. A., Yudenko, Ye. V., and Chernikhova, O. S. (2020), "Problems and prospects for the development of reverse logistics in Ukraine", *Economic space*, vol. 159. pp. 124—129. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/159-26>.

6. Horbal, N. I., and Lomaha, Yu. R. (2022), "Circular economy is the basis for sustainable development of enterprises", *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series "Problems of Economics and Management"*, vol. 1 (9). pp. 9—24. available at: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/apr/27434/220198verstka-11-26.pdf> (Accessed 25 Dec 2025).

7. Alamri, A.A. (2023), "A Sustainable Closed-Loop Supply Chains Inventory Model Considering Optimal Number of Remanufacturing Times", *Sustainability*, vol. 15, available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9517> (Accessed 25 Dec 2025).

8. Bag, S., and Gupta, S. (2020), "Examining the effect of green human capital in the adoption of reverse logistic and remanufacturing operations performance", *International Journal of Manpower*, vol. 41 (7), pp. 1097—1117. <https://doi.org/10.1108/IJM-07-2019-0349>.

9. Medina-abad, J., and Freire-pesantez, A. (2023), "Barreras para la implementacion de la economia circular en paises en vias de desarrollo", *Estudios de la Gestiyn*, vol. 14 (14), pp. 101—123. <https://doi.org/10.32719/25506641.2023.14.6>.

10. Apolinario Quintana, R., Rodriguez Donoso, M., Apolinario Quintana, C., and Zambrano Farias, F. J. (2024), "Barriers to Reverse Logistics and the Circular Economy in Supply Chain Arrangements: A Qualitative Study in

Ecuador", *Revista Galega de Economía*, vol. 33 (2), pp. 1—18. DOI: <https://doi.org/10.15304/rge.33.2.9228>.

11. Julianelli, V., Goyannes, R., Scavarda, L., and Pinto, S. (2020), "Interplay between reverse logistics and circular economy: Critical success factors-based taxonomy and framework", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 158, pp. 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104784>.

12. Agrawal, S., and Singh, R. K. (2021), "Outsourcing and reverse supply chain performance: a triple bottom line approach", *Benchmarking: An International Journal*, vol. 28 (4), pp. 1146—1163. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2020-0498>.

13. Pidhirna, V., Zybarena, O., and Chubrei, O. (2024), "Project activities to implement circular business models for competitiveness based on sustainable development", *Economy and society*, vol. 67. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-75>.

14. Boulding, K. E. (1966), "The Economics of the Coming Spaceship Earth", *Environmental Quality in a Growing Economy* (pp. 3—14). Baltimore, MD: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press, available at: <https://www.pym.org/eco-justice-collaborative/wp-content/uploads/sites/58/2016/05/Boulding.pdf> (Accessed 25 Dec 2025).

15. UNIDO (2024), *Pryklady vprovadzhennia tsyrkuliarnoi ekonomiky v Ukraini* [Examples of circular economy implementation in Ukraine], Center for Resource Efficient and Cleaner Production, Kyiv, Ukraine. available at: https://www.recpc.org/wp-content/uploads/2024/05/National-cases-of-CE_publication_ukr.pdf (Accessed 25 Dec 2025).

16. Halak, I. I. (2021), "Closed supply chain: a tool for ensuring the sustainable development of a modern enterprise", *Entrepreneurship in the agricultural sector: global challenges and effective management within the framework of the 20th agro-industrial specialized exhibition "AgroTechService — 2021" of the Zaporizhzhia Chamber of Commerce and Industry*. Zaporizhzhia, Ukraine, vol. 12, pp. 166—169.

17. Yuzhakov, M. Yu. (2025), "Circular supply chains: transforming global models towards sustainability", *Black Sea Scientific Studies*. DOI:10.36059/978-966-397-522-1-57.

18. Gallegos, G. M. C., Valenzo-Jimenez, M. A., Tapia, G. G., Rodriguez, S. A. E., Paniagua, C. F. O., and Leslie, H. S. A (2024), "Systematic Review of Reverse Logistics Research: Bibliometric Study of the Years 2013—2023", *Journal of Scientometric Research*, vol. 13, Issue 3, pp.732-744. DOI:10.5530/jscires.20041196.

19. Hryhorak, M. Yu. (2025), "Reverse logistics in the context of sustainable supply chains: synergy for sustainable development", *VI mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Biznes, innovatsii, menedzhment: problemy ta perspektyvy". Sektsiia 3. Stali lantsiuihy postavok: ievropejs'ki stratehii ta praktyky v ukrains'kykh realiakh* [VI International Scientific and Practical Conference "Business, Innovation, Management: Problems and Prospects". Section 3. Sustainable Supply Chains: European Strategies and Practices in Ukrainian Realities], pp. 215—216. available at: <https://confmanagement-proc.kpi.ua/article/view/329601> (Accessed 25 Dec 2025).

20. Cao, S., Liao, W., and Huang, Y. (2021), "Heterogeneous fleet recyclables collection routing optimization in a two-echelon collaborative reverse logistics network from circular economic and environmental perspective", *Science of the Total Environment*. vol. 758. pp.1—15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144062>.

21. Dhar, B. K., Sarkar, S. M., and Ayittey, F. K. (2022), "Impact of social responsibility disclosure between implementation of green accounting and sustainable development: A study on heavily polluting companies in Bangladesh", *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, vol. 29 (1), pp. 71—78. <https://doi.org/10.1002/csr.2174>.

22. Frei, R., Jack, L., and Krzyzaniak, S.-A. (2020), "Sustainable reverse supply chains and circular economy in multichannel retail returns", *Business Strategy and the Environment*, vol. 29 (5), pp. 1925—1940. <http://dx.doi.org/10.1002/bse.2479>.

23. Alamerew, Y. A., and Brissaud, D. (2020), "Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries", *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, 120025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120025>.

24. Kazancoglu, I., Sagnak, M., Kumar Mangla, S., and Kazancoglu, Y. (2021), "Circular economy and the policy: A framework for improving the corporate environmental management in supply chains", *Business Strategy and the Environment*, vol. 30 (1), pp. 590—608. <https://doi.org/10.1002/bse.2641>.

25. Gonbadi, A. M., Genovese, A., and Sgalambro, A. (2021), "Closed-loop supply chain design for the transition towards a circular economy: A systematic literature review of methods, applications and current gaps". *Journal of Cleaner Production*, vol. 323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129101>.

26. Mallick, P. K., Salling, K. B., Pigosso, D. C.A., and McAloone, T.C. (2023), "Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review", *Journal of Environmental Management*, vol. 328, 117017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117017>.

27. Govindan, K., Soleimani, H., and Kannan, D. (2015), "Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future", *European Journal of Operational Research*, vol. 240, № 3, pp. 603—626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>.

28. Jebreili, S., Babazadeh, R., Fazayeli, S., Kamran, M. A., and Gharibi, A. R. (2022), "A Multi Objective MILP Model for Sustainable Closed Loop Supply Chain Network Design". *Mathematics*, vol. 13 (21), 3478. <https://doi.org/10.3390/math13213478>

29. Roleders, V. (2023), "Ecological system in the circular economy model", *Ekonomichni horyzonty*, vol. 4 (26), pp. 125—134. [https://doi.org/10.31499/2616-5236.4\(26\).—2023.293106](https://doi.org/10.31499/2616-5236.4(26).—2023.293106).

30. Azadnia, A. H., Onofrei, G., and Ghadimi, P. (2021), "Electric vehicles lithium-ion batteries reverse logistics implementation barriers analysis: a tism-micmac approach" *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 174 (May), 105751. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105751>.

Стаття надійшла до редакції 06.01.2026 р.