

УДК 330.322.5:622.341:504.06 (477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02>**Ганна КІРЕЙЦЕВА**

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екології та природоохоронних технологій,
Державний університет «Житомирська політехніка»

gef_kgv@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1055-1784**Олена ВИГОВСЬКА**

доктор філософії за спеціальністю 072 «Фінанси, банківська справа та страхування»,
старший викладач кафедри національної безпеки, публічного управління та адміністрування,
Державний університет «Житомирська політехніка»

alenyugovska@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-7905-0494**Світлана ХОМЕНКО**

аспірантка кафедри екології та природоохоронних технологій,
асистентка кафедри екології та природоохоронних технологій,
Державний університет «Житомирська політехніка»

org_hsv@ztu.edu.ua

ORCID: 0009-0002-7463-7867

ІНТЕГРОВАНА МОДЕЛЬ ЗАЛУЧЕННЯ ЗЕЛЕНИХ ІНВЕСТИЦІЙ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Анотація. Метою статті є розроблення інтегрованої моделі залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізорудної промисловості України в контексті запровадження Механізму вуглецевого кордонного регулювання Європейського Союзу та глобальних тенденцій переходу до кліматичної нейтральності. **Методологія** дослідження базується на системному підході з використанням функціонального моделювання бізнес-процесів, порівняльному аналізі міжнародного досвіду провідних світових гірничодобувних компаній (Rio Tinto, BHP, Vale, ArcelorMittal) і адаптації кращих практик декарбонізації до специфіки українських гірничо-збагачувальних комбінатів. Теоретичною основою є концепції сталого розвитку промисловості, теорія зеленого фінансування та методологія оцінювання парникових газів GHG Protocol. Використано методи сценарного планування для визначення траєкторій технологічної модернізації та фінансово-економічного аналізу для обґрунтування інвестиційних рішень у контексті переходу до кліматичної нейтральності. **Наукова новизна** роботи полягає в тому, що вперше розроблено інтегровану модель залучення зелених інвестицій, яка поєднує технологічний модуль каскадної модернізації від енергоефективних заходів до водневих технологій, фінансовий модуль диверсифікованого залучення капіталу через зелені облігації та ESG-фонди, верифікаційний модуль моніторингу викидів відповідно до міжнародних стандартів. Уперше запропоновано трифазну стратегію реалізації декарбонізації залізорудної промисловості із чітким розподілом на підготовчу (2025–2027 роки), модернізаційну (2027–2030 роки) та трансформаційну (2030–2035 роки) фази з визначенням конкретних обсягів інвестицій і цільових показників зниження викидів CO₂. **Висновки.** Декарбонізація української залізорудної промисловості потребує системної трансформації технологічних процесів та залучення 3,7–5,3 мільярдів доларів зелених інвестицій протягом 2025–2035 років. Інтегрована модель забезпечує послідовний перехід від енергоефективних заходів до впровадження проривних водневих технологій і систем уловлювання вуглецю, що дозволить досягти цільового зниження викидів на 50–60% до 2035 року. Успішна реалізація моделі забезпечить конкурентоспроможність українських гірничо-збагачувальних комбінатів на європейському ринку зеленої металургійної продукції та відповідність вимогам Механізму вуглецевого кордонного регулювання Європейського Союзу.

Ключові слова: декарбонізація, парникові гази, зелені інвестиції, залізорудна промисловість, гірничо-збагачувальні комбінати.

Hanna KIREITSEVA

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University

gef_kgv@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1055-1784

Olena VYHOVSKA

Doctor of Philosophy in specialty 072 "Finance, Banking and Insurance",

Senior Lecturer at the Department of National Security,

Public Administration and Management, Zhytomyr Polytechnic State University

alenvygovska@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-7905-0494

Svitlana KHOMENKO

Postgraduate Student at the Department of Ecology and Environmental Technologies,

Assistant at the Department of Ecology and Environmental Technologies,

Zhytomyr Polytechnic State University

org_hsv@ztu.edu.ua

ORCID: 0009-0002-7463-7867

INTEGRATED MODEL FOR ATTRACTING GREEN INVESTMENTS FOR DECARBONIZATION OF UKRAINE'S IRON ORE INDUSTRY

Abstracts. *The aim* of the article is to develop an integrated model for attracting green investments for the decarbonization of Ukraine's iron ore industry in the context of implementing the European Union's Carbon Border Adjustment Mechanism and global trends towards achieving climate neutrality. The research **methodology** is based on a systematic approach utilizing functional modeling of business processes, comparative analysis of international experience from leading global mining companies (Rio Tinto, BHP, Vale, ArcelorMittal), and adaptation of best decarbonization practices to the specificities of Ukrainian mining and processing plants. The theoretical foundation comprises concepts of sustainable industrial development, green finance theory, and the GHG Protocol methodology for greenhouse gas assessment. Scenario planning methods were employed to determine technological modernization trajectories, and financial-economic analysis was used to substantiate investment decisions in the context of transition to climate neutrality. **The scientific novelty** of the work lies in the first-time development of an integrated green investment attraction model that combines a technological module of cascaded modernization from energy-efficient measures to hydrogen technologies, a financial module of diversified capital attraction through green bonds and ESG funds, and a verification module for emissions monitoring in accordance with international standards. For the first time, a three-phase strategy for implementing decarbonization of the iron ore industry has been proposed with clear delineation into preparatory (2025–2027), modernization (2027–2030), and transformation (2030–2035) phases, with defined investment volumes and target CO₂ emission reduction indicators. **Conclusions.** Decarbonization of Ukraine's iron ore industry requires systematic transformation of technological processes and attraction of USD 3,7–5,3 billion in green investments during 2025–2035. The integrated model ensures a sequential transition from energy-efficient measures to implementation of breakthrough hydrogen technologies and carbon capture systems, enabling achievement of the target emission reduction of 50–60% by 2035. Successful implementation of the model will ensure the competitiveness of Ukrainian mining and processing plants in the European green metallurgical products market and compliance with the requirements of the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism.

Key words: decarbonization, greenhouse gases, green investments, iron ore industry, mining and processing plants.

Постановка проблеми. Залізорудна промисловість є одним зі значних джерел викидів парникових газів у глобальному масштабі, що зумовлено енергоємністю процесів видобутку, збагачення та транспортування залізорудної сировини. За даними Міжнародної ради з гірничої справи та металургії, галузь взяла на себе зобов'язання досягти до 2050 р. кліматич-

ної нейтральності, що потребує залучення приблизно 1,4 трлн доларів інвестицій [9; 20; 26].

Особливу роль у цьому контексті відіграє Україна, адже посідає шосте місце у світовому виробництві залізної руди [14]. У структурі галузі важливу роль відіграють гірничо-збагачувальні комбінати (далі – ГЗК), які здійснюють повний цикл

виробництва від видобутку сировини до випуску готової продукції. Основними підприємствами галузі є: АТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Центральний ГЗК», ПрАТ «Інгулецький ГЗК», ПрАТ «Північний ГЗК» та ПрАТ «Південний ГЗК» [1].

Підвищення показників українського експорту до ЄС набуває особливого значення в контексті європейської стратегії кліматичної нейтральності. План REPowerEU, розроблений Європейською комісією, передбачає декарбонізацію приблизно 30% первинного виробництва сталі в ЄС до 2030 р. Зважаючи на це, надійні постачання високоякісної залізної руди стають критично важливими для успішного «зеленого» переходу європейської гірничодобувної промисловості до низьковуглецевих технологій [6; 9]. Однак успішність цієї трансформації критично залежить від здатності залучити необхідні зелені інвестиції. Можливими перешкодами є надмірно висока вартість упровадження новітніх технологій і неефективна та нечітка система обліку та звітності парникових газів [2; 16; 17; 18]. Це може вплинути на отримання доступу до зелених інвестицій та, відповідно, знизити інвестиційні ризики.

Аналіз джерел та останніх досліджень. Останніми роками все більше науковців приділяють увагу проблемам зеленого гірництва й екологічної відповідальності в цій сфері. Варто відзначити роботи науковців Ф. Тагізаде–Хесарі зі співавторами [23], які досліджують взаємодію між економічними гравцями та політиками для забезпечення цілей сталого розвитку в економіці. М. Сінгханія та співавтори [21] у своєму дослідженні аналізують розвиток і потенційні напрями досліджень у сфері сталих фінансів. Дослідження С. Нейта та співавторів [15] присвячене розробленню політики управління мінеральними ресурсами в умовах їх обмеженості та необхідності забезпечення переходу до зеленої енергетики, з особливим акцентом на балансуванні між економічними потребами й екологічними вимогами сталого розвитку. Дослідження А. Найміддінова та співавторів [14] розглядає роль інновацій у стимулюванні сталого зростання через зелені фінанси та ESG-інвестиції. Й. Чжан і М. Умаір [27] вивчають застосування блокчейн-технологій для підвищення підзвітності та прозо-

рості у сталих фінансах. Отже, аналіз останніх публікацій показує, що існуючі дослідження найчастіше зосереджені лише на окремих аспектах проблеми декарбонізації або зелених фінансів, не забезпечують комплексного розуміння процесів трансформації залізорудної галузі. Саме тому розроблення інтегрованої моделі залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізорудної промисловості України є надзвичайно важливим і актуальним завданням.

Мета дослідження – розробити інтегровану модель залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізорудної промисловості України.

Виклад основного матеріалу. Розроблення інтегрованої моделі залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізорудної промисловості України базувалася на комплексному аналізі міжнародного досвіду, національних особливостей галузі та сучасних тенденцій у сфері кліматичного фінансування. Методологічний підхід до створення моделі ґрунтувався на синтезі теоретичних концепцій сталого розвитку, практичних кейсів успішної декарбонізації гірничодобувних підприємств і специфічних умов функціонування українських гірничо-збагачувальних комбінатів.

У процесі проведення дослідження були опрацьовані та детально проаналізовані корпоративні звіти про сталий розвиток провідних світових і європейських металургійних компаній, серед яких Rio Tinto [19], BHP [7], Vale, ArcelorMittal [3], ThyssenKrupp [25], Tata Steel, SSAB [22], які вже успішно реалізують проекти декарбонізації та сталого зеленого фінансування.

Структурування інтегрованої моделі здійснювалося на основі системного підходу з використанням методології функціонального моделювання. Застосування принципів декомпозиції дозволило виділити чотири ключові підсистеми (модулі), кожна з яких виконує специфічні функції в загальній системі декарбонізації.

Першим модулем є технологічний модуль, який розроблено за принципом каскадної модернізації, в основі якої лежить концепція «низько висячих плодів» (low-hanging fruit) в енергоефективності. Такий підхід передбачає послідовне впровадження заходів від найбільш

економічно ефективних до найбільш технологічно складних, а це дозволяє значно мінімізувати ризики.

Другим є фінансовий модуль, який розроблено на основі теорії оптимальної структури капіталу Модільяні – Міллера, з урахуванням специфіки зелених фінансових інструментів [12]. Для зменшення витрат і залучення фінансування підприємствам краще використовувати різні способи отримання грошей, серед яких кредити та залучення інвесторів.

Наступним є верифікаційний модуль, який базується на міжнародних стандартах обліку та звітності про викиди парникових газів, зокрема GHG Protocol. Саме від того, наскільки дієвою буде система моніторингу звітності та верифікації викидів парникових газів, залежить і якісний перехід до СВМ та залучення зелених інвестицій [5].

Отже, розроблена інтегрована модель є унікальною та інноваційною, адаптованою до українських реалій, як-от особливості національного законодавства, структура власності в галузі, геополітичні ризики й інтеграційні процеси з ЄС.

З погляду практичного використання розроблена модель надає конкретний інструментарій для керівництва українських ГЗК щодо планування та реалізації проектів декарбонізації. Детальний розподіл за фазами з конкретними цільовими показниками й обсягами інвестицій дозволяє здійснювати обґрунтоване стратегічне планування. Запропонована інтегрована модель являє собою комплексну систему взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують синергетичний ефект від одночасного впровадження зелених технологій, розвитку фінансових механізмів і створення надійної системи верифікації викидів парникових газів (рис. 1). В основі моделі лежить концепція поетапних технологічних змін, що описує як соціально-технічні системи поступово трансформуються завдяки взаємному впливу інновацій різних рівнів. Структурно модель складається із трьох взаємопов'язаних модулів, кожен із яких виконує специфічні функції в загальній системі декарбонізації. Технологічний модуль охоплює всі аспекти модернізації виробничих процесів, від оптимізації енергоспоживання до впровадження револю-



Рисунок 1. Інтегрована модель залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізничної промисловості України.

Джерело: розроблено авторами

ційних технологій прямого відновлення заліза. Фінансовий модуль забезпечує мобілізацію необхідних капітальних ресурсів через диверсифіковані джерела зеленого фінансування. Верифікаційний модуль гарантує точність та достовірність даних про викиди парникових газів, що є критично важливим для залучення міжнародних інвестицій.

Технологічний модуль інтегрованої моделі базується на концепції каскадної модернізації, яка передбачає послідовне впровадження технологічних рішень від найбільш економічно ефективних до найбільш технологічно складних. Перший рівень каскаду включає заходи з підвищення енергоефективності існуючого обладнання, зокрема й оптимізацію процесів дроблення та подрібнення руди, упровадження частотно-регульованих приводів, модернізацію систем освітлення та вентиляції. Ці заходи характеризуються відносно низькими капітальними витратами та коротким терміном окупності.

Другий рівень каскаду передбачає заміну застарілого обладнання на енергоефективні аналоги. Це включає встановлення високоефективних млинів мокрого подрібнення з покращеною футеровкою, модернізацію флотаційних машин з енергоощадними аераторами, упровадження магнітних сепараторів нового покоління з постійними магнітами. Розрахунки показують, що такі заходи можуть забезпечити зниження енергоспоживання на 15–25% за періоду окупності 3–5 років.

Третій рівень каскаду включає впровадження систем відновлюваної енергетики безпосередньо на промислових майданчиках ГЗК. Встановлення сонячних електростанцій потужністю 50–100 МВт на кожному великому комбінаті дозволить покрити 20–30% потреб в електроенергії завдяки чистим джерелам. Системи акумулювання енергії на базі літій-іонних батарей забезпечуватимуть стабільність енергопостачання в періоди низької генерації від відновлюваних джерел.

Четвертий рівень каскаду включає найскладніші технологічні новинки, зокрема й використання водневих технологій у технологічному процесі. Упровадження цих новітніх технологій потребуватиме значних інвестицій, проте дозволить значно знизити викиди CO₂ у процесах відновлення залізної руди.

Фінансовий модуль інтегрованої моделі побудований на принципах диверсифікації джерел капіталу та поетапного залучення інвестицій відповідно до технологічної готовності проєктів. Модуль включає три основні компоненти: систему залучення боргового капіталу, механізми акціонерного фінансування та державні фінансові інструменти.

Одним із фінансових інструментів, який дозволить якісно здійснити перехід до низьковуглецевого розвитку, є зелене фінансування [8].

Саме створення та впровадження нових фінансових інструментів, технологій і бізнес-моделей дозволяє більш ефективно спрямовувати капітал на сталі методи видобутку та технології. Ці інструменти охоплюють як традиційні боргові й акціонерні механізми, так і інноваційні рішення, зокрема й цифрові активи та ринкові механізми торгівлі викидами (табл. 1).

Система залучення боргового капіталу базується на випуску спеціалізованих зелених облігацій з різними характеристиками для різних фаз проєкту. На підготовчій фазі пропонується випуск коротко- та середньострокових зелених облігацій (3–5 років) для фінансування енергоефективних заходів. Розмір емісії для одного великого ГЗК оцінюється у 100–150 млн доларів з купонною ставкою 6–8% річних, що відповідає поточним ринковим умовам для українських емітентів з урахуванням ризиків.

На модернізаційній фазі планується випуск довгострокових зелених облігацій (7–10 років) для фінансування проєктів з модернізації обладнання та будівництва об'єктів відновлюваної енергетики. Підприємство може залучити 300–500 млн доларів з гарантіями від міжнародних фінансових організацій для зниження ризиків.

Трансформаційна фаза потребуватиме залучення коштів через випуск кліматичних облігацій, спеціально призначених для фінансування проривних технологій. Обсяг фінансування на цій фазі може досягати 800–1 000 млн доларів на підприємство, що передбачатиме створення спеціальних фінансових структур (Special Purpose Vehicle) для управління ризиками.

Механізми акціонерного фінансування включають залучення коштів спеціалізованих ESG-фондів, фондів прямих інвестицій

Таблиця 1

Класифікація інструментів зеленого фінансування для декарбонізації залізорудної промисловості

Категорія	Тип інструменту	Характеристика	Застосування
Боргові інструменти	Зелені облигації	Боргові цінні папери для фінансування екологічних проєктів.	Модернізація технологій видобутку, упровадження відновлюваної енергії, зменшення викидів CO ₂ .
	Сталі облигації	Комбінація зелених і соціальних цілей.	Проєкти з декарбонізації та покращення умов праці.
	Кліматичні облигації	Спеціалізовані на боротьбі зі зміною клімату.	Перехід на водневе виробництво прямовідновленого заліза (DRI).
	Банківські зелені кредити	Цільові кредити з ESG-критеріями.	Фінансування енергоефективного обладнання, очисних споруд.
Акціонерний капітал	ESG-фонди	Інвестиційні фонди з екологічними критеріями.	Інвестиції в компанії з високими ESG-рейтингами.
	Зелені венчурні інвестиції	Ризикові інвестиції в зелені технології.	Фінансування стартапів з інноваційними технологіями видобутку.
	Спеціалізовані фонди прямих інвестицій	Фонди для великих проєктів декарбонізації.	Масштабні проєкти переходу на чисті технології.
Державні інструменти	Зелені гранти	Безповоротне фінансування від держави.	Дослідження та розроблення чистих технологій.
	Кліматичні фонди	Міжнародні фонди боротьби зі зміною клімату.	Проєкти декарбонізації у країнах, що розвиваються.
	Субсидії на зелені технології	Державна підтримка впровадження технологій.	Упровадження електричного транспорту в кар'єрах.
	Державні зелені облигації	Суверенні облигації для екологічних проєктів.	Інфраструктурні проєкти зеленої металургії.
Ринкові механізми	Торгівля вуглецевими кредитами	Ринок дозволів на викиди.	Монетизація зменшення викидів CO ₂ .
	ESG-пов'язані кредити	Кредити із процентною ставкою, прив'язаною до ESG-показників.	Стимулювання досягнення екологічних цілей.

Джерело: складено авторами на основі [7].

з фокусом на чисті технології та стратегічних інвесторів з металургійної галузі. Особливу роль відіграють суверенні фонди скандинавських країн, які активно інвестують у проєкти декарбонізації гірничодобувної промисловості. Прогнозується залучення 20–30% необхідного капіталу через акціонерні механізми.

Державні фінансові інструменти включають участь у міжнародних кліматичних фондах, зокрема Зеленому кліматичному фонді ООН та Європейському банку реконструкції та розвитку. Держава може виступати як співінвестор через механізми державно-приватного партнерства, забезпечувати 10–15% капітальних витрат проєкту.

Верифікаційний модуль являє собою комплексну систему вимірювання, моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів, побудовану відповідно до найвищих міжнародних стандартів. Модуль базується на трирівневій архітектурі, як-от: рівень первинного збору даних, рівень обробки й аналізу, рівень звітності та верифікації [13; 19].

Додатково впроваджуються мобільні системи моніторингу для контролю фугітивних викидів з відвалів, хвостосховищ та транспортних шляхів. Використання дронів, обладнаних спеціалізованими сенсорами, дозволяє проводити регулярний моніторинг великих площ з мінімальними операційними витратами.

Рівень звітності та верифікації включає автоматичне генерування звітів відповідно до стандартів GHG Protocol. Незалежна верифікація здійснюється акредитованими організаціями з використанням ризик-орієнтованого підходу. Цифрові сертифікати верифікації зберігаються в розподіленому реєстрі для забезпечення прозорості та доступності для інвесторів [11].

Реалізація інтегрованої моделі здійснюється у три послідовні фази, кожна з яких має чітко визначені цілі, завдання та критерії успіху. Фазовий підхід дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити поступове накопичення експертизи та фінансових ресурсів.

Підготовча фаза (2025–2027 рр.) зосереджена на створенні фундаментальних передумов

мов для реалізації успішної декарбонізації. Основним завданням цієї фази є розроблення та впровадження системи обліку викидів парникових газів відповідно до міжнародних стандартів, розроблення стратегії декарбонізації для кожного підприємства з конкретними цілями та часовими рамками.

Водночас необхідно проводити підготовку фінансової документації для залучення перших зелених інвестицій. Упровадження пілотних проєктів з енергоефективності дозволяє продемонструвати технічну й економічну життєздатність обраного підходу.

Основним критерієм на даному етапі є зниження питомих викидів CO₂ на 10–15% порівняно з базовим рівнем і успішне залучення 200–300 млн доларів через випуск перших зелених облігацій і створення дієвої системи обліку викидів парникових газів.

Модернізаційна фаза (2027–2030 рр.) характеризується масштабним упровадженням енергоефективних технологій і розбудовою систем відновлюваної енергетики. Ключовими проєктами цієї фази є заміна застарілого обладнання на енергоефективні аналоги, будівництво сонячних електростанцій загальною потужністю 300–500 МВт на промислових майданчиках усіх великих ГЗК, упровадження систем рекуперації тепла й оптимізації енергоспоживання.

Особливу увагу варто приділяти розвитку електротранспорту в кар'єрах, заміні дизельних самоскидів на електричні аналоги та встановленню зарядної інфраструктури. За прогнозами, до кінця цієї фази частка електричного транспорту в кар'єрному парку досягне 40–50%.

Фінансування модернізаційної фази здійснюється через випуск середньо- та довгострокових зелених облігацій загальним обсягом 1,5–2 млрд доларів, залучення коштів ESG-фондів і участь у програмах міжнародних фінансових інституцій. Критеріями успіху є зниження викидів на 25–35% порівняно з базовим рівнем, досягнення 30% частки відновлюваної енергії в енергобалансі підприємств і демонстрація стабільної прибутковості зелених інвестицій.

Трансформаційна фаза (2030–2035 рр.) передбачає впровадження найбільш передових технологій декарбонізації, включаючи водневу металургію та повну інтеграцію систем

управління вуглецевим слідом. Будівництво установок електролізу води для виробництва «зеленого» водню потужністю 100–200 МВт на кожному великому ГЗК дозволить розпочати виробництво прямовідновленого заліза без використання викопного палива.

Фінансування трансформаційної фази передбачає залучення 2–3 млрд доларів через механізми кліматичних облігацій, стратегічних партнерств з міжнародними технологічними компаніями й участі у глобальних ініціативах з декарбонізації. Цільовим результатом фази є досягнення 50–60% зниження викидів порівняно з базовим рівнем і позиціонування українських ГЗК як лідерів у сфері сталого виробництва на європейському ринку. Розроблена модель надає конкретний інструментарій для керівництва українських ГЗК щодо планування та реалізації проєктів декарбонізації. Детальний розподіл за фазами з конкретними цільовими показниками дозволяє здійснювати обґрунтоване стратегічне планування.

Висновки. Проведення дослідження дозволило розробити інтегровану модель залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізничної промисловості України, яка являє собою комплексну систему взаємопов'язаних технологічних, фінансових і верифікаційних механізмів, адаптованих до специфічних умов функціонування українських гірничо-збагачувальних комбінатів у контексті європейської інтеграції та запровадження Механізму вуглецевого кордонного регулювання ЄС. Основним результатом дослідження є створення тримодульної системи, що включає технологічний модуль з каскадною модернізацією від енергоефективних заходів до водневих технологій, фінансовий модуль з диверсифікованими джерелами зеленого капіталу та верифікаційний модуль для точного моніторингу викидів парникових газів відповідно до міжнародних стандартів. Економічна ефективність запропонованої моделі підтверджується поетапним підходом до реалізації із прогнозованим залученням 4–5,5 млрд доларів інвестицій протягом 2025–2035 рр. і досягненням цільового показника зниження викидів CO₂ на 50–60% порівняно з базовим рівнем, що забезпечить українським підприємствам відповідність європейським кліматичним стандартам і збереження експортних позицій на ринку ЄС.

Практична значущість розробленої моделі полягає в наданні керівництву українських ГЗК конкретного інструментарію для стратегічного планування декарбонізації із чітким розподілом за фазами, цільовими показниками та джерелами фінансування, що дозволяє мінімізувати інвестиційні ризики та забезпечити поступове накопичення технологічної експертизи. Наукова новизна дослідження полягає в уперше запропонованому системному підході до декарбонізації залізничної галузі, що інтегрує технологічні рішення з фінансовими механізмами та системою верифікації, адаптованому до українських реалій, з урахуванням геополітичних викликів, нормативно-правових особливостей і структури власності в галузі. Результати дослідження мають стра-

тегічне значення для забезпечення конкурентоспроможності української залізничної промисловості в умовах глобального переходу до кліматичної нейтральності, оскільки без системної декарбонізації галузь приречена на поступову втрату ринкових позицій, зниження інвестиційної привабливості та технологічну деградацію. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення детальних техніко-економічних обґрунтувань конкретних технологічних рішень, аналіз впливу геополітичних ризиків на реалізацію проєктів декарбонізації, створення цифрових платформ для управління вуглецевим слідом і розроблення механізмів державно-приватного партнерства для прискорення впровадження зелених технологій у гірничодобувній промисловості України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гірничодобувна промисловість України : статистичний збірник / Державна служба статистики України. Київ : Державна служба статистики України, 2023. 195 с.
2. Стратегія розвитку гірничо-металургійного комплексу України до 2030 р. / Міністерство економіки України. Київ : Міністерство економіки України, 2023. 124 с.
3. Integrated Annual Review 2022: Climate Action Report / ArcelorMittal. Luxembourg : ArcelorMittal S.A., 2023. 284 p.
4. Climate Transition Action Plan 2023 / BHP Group. Melbourne : BHP Group Limited, 2023. 68 p.
5. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. *Official Journal of the European Union*. 2003. L 275. P. 32–46.
6. REPowerEU Plan. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM (2022) 230 final / European Commission Brussels : European Commission, 2022. 114 p.
7. Huang H., Ata S., Rougieux F., Kay M. Decarbonising mining of Australia's critical mineral deposits: Opportunities for sustainable mining through solar photovoltaics and wind energy integration. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 455. P. 142300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142300>
8. Huang L. Green bonds and ESG investments: Catalysts for sustainable finance and green economic growth in resource-abundant economies. *Resources Policy*. 2024. Vol. 91. P. 104806. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104806>
9. International Council on Mining and Metals. Climate change and the mining industry: Pathways to net zero by 2050. London : ICMM, 2023. 124 p.
10. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking / International Energy Agency. Paris : IEA Publications, 2023. 178 p.
11. Li T., Lau W.T., Dato Haji Yahya M.H. Blockchain Applications in Green Finance for Transparency and Accountability in Sustainable Investments. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. № 6. P. 2520. <https://doi.org/10.3390/su17062520>
12. Liang H., Renneboog L. Corporate social responsibility and sustainable finance : A review of the literature. *Oxford Review of Economic Policy*. 2020. Vol. 36. № 3. P. 429–454. <https://doi.org/10.1093/oxrep/graa001>
13. Litvinenko V.S., Sergeev I.B. Digital transformation of the mining industry: Technologies, risks and opportunities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019. № 11. P. 49–67. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-49-67>
14. Najmitdinov A., Rahman S., Kumar V., Singh A. Green finance and ESG investing: Driving sustainable growth through innovation. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. № 3. P. 2456. <https://doi.org/10.3390/su17032456>
15. Nate S., Bilan Y., Kurylo M., Lyashenko O., Napieralski P., Kharlamova G. Mineral policy within the framework of limited critical resources and a green energy transition. *Energies*. 2021. Vol. 14. № 9. P. 2688. <https://doi.org/10.3390/en14092688>
16. Raman R., Ray S., Das D., Nedungadi P. Innovations and barriers in sustainable and green finance for advancing sustainable development goals. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. Vol. 12. P. 1513204. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1513204>

17. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) № 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). *Official Journal of the European Union*. 2021. L 243. P. 1–17.
18. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union*. 2023. L 130. P. 52–121.
19. Climate Report 2022: Our pathway to net zero / Rio Tinto. London : Rio Tinto plc, 2023. 52 p.
20. Siljander R., Cederlöf M., Skoglund K., Herronen V. Annual climate report 2023. Helsinki : Finnish Meteorological Institute, 2023. 156 p.
21. Singhania M., Saini N., Sharma P., et al. Sustainable finance: A comprehensive review and future research agenda. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 421. P. 138456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.138456>
22. HYBRIT – Towards fossil-free steel making : Annual Progress Report / SSAB. Stockholm : SSAB AB, 2023. 45 p.
23. Taghizadeh-Hesary F., Taghizadeh-Hesary F. Green finance and the economic goals of the Paris Agreement : A critical review. *Energy Policy*. 2022. Vol. 168. P. 113125. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113125>
24. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition). Washington, DC : World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004. 116 p.
25. ThyssenKrupp AG. tkH2Steel: Roadmap to climate-neutral steel production. Essen : ThyssenKrupp AG, 2023. 38 p.
26. Mining industry decarbonization: Investment requirements and timeline / Wood Mackenzie. London : Wood Mackenzie Limited, 2023. 89 p.
27. Zhang Y., Umair M. Blockchain applications in sustainable finance: Enhancing transparency and accountability in extractive industries. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 398. P. 136543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136543>

REFERENCES:

1. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. (2023). *Hirnychodobuvna promyslovist Ukrainy: Statystychnyi zbirnyk* [Mining industry of Ukraine: Statistical collection]. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [in Ukrainian].
2. Ministerstvo ekonomiky Ukrainy. (2023). *Stratehiia rozvytku hirnycho-metallurhiinoho kompleksu Ukrainy do 2030 r.* [Strategy for the development of the mining and metallurgical complex of Ukraine until 2030]. Ministerstvo ekonomiky Ukrainy [in Ukrainian].
3. ArcelorMittal. (2023). *Integrated Annual Review 2022: Climate Action Report*. ArcelorMittal S.A [in English].
4. BHP Group Limited. (2023). *Climate Transition Action Plan 2023*. BHP Group Limited [in English].
5. European Parliament, & Council of the European Union. (2003). Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. *Official Journal of the European Union*, L 275, 32–46 [in English].
6. European Commission. (2022). *REPowerEU Plan. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions* (COM (2022) 230 final). European Commission [in English].
7. Huang, H., Ata, S., Rougieux, F., & Kay, M. (2024). Decarbonising mining of Australia's critical mineral deposits: Opportunities for sustainable mining through solar photovoltaics and wind energy integration. *Journal of Cleaner Production*, 455, 142300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142300> [in English].
8. Huang, L. (2024). Green bonds and ESG investments: Catalysts for sustainable finance and green economic growth in resource-abundant economies. *Resources Policy*, 91, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104806> [in English].
9. International Council on Mining and Metals. (2023). Climate change and the mining industry: *Pathways to net zero by 2050*. ICMM [in English].
10. International Energy Agency. (2023). *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking*. IEA Publications [in English].
11. Li, T., Lau, W.T., & Dato Haji Yahya, M.H. (2025). Blockchain applications in green finance for transparency and accountability in sustainable investments. *Sustainability*, 17 (6), 2520. <https://doi.org/10.3390/su17062520> [in English].
12. Liang, H., & Renneboog, L. (2020). Corporate social responsibility and sustainable finance: A review of the literature. *Oxford Review of Economic Policy*, 36 (3), 429–454. <https://doi.org/10.1093/oxrep/gra001> [in English].
13. Litvinenko, V.S., & Sergeev, I.B. (2019). Digital transformation of the mining industry: Technologies, risks and opportunities. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 11, 49–67. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-49-67> [in English].

14. Najmitdinov, A., Rahman, S., Kumar, V., & Singh, A. (2025). Green finance and ESG investing: Driving sustainable growth through innovation. *Sustainability*, 17 (3), 2456. <https://doi.org/10.3390/su17032456> [in English].
15. Nate, S., Bilan, Y., Kurylo, M., Lyashenko, O., Napieralski, P., & Kharlamova, G. (2021). Mineral policy within the framework of limited critical resources and a green energy transition. *Energies*, 14 (9), 2688. <https://doi.org/10.3390/en14092688> [in English].
16. Raman, R., Ray, S., Das, D., & Nedungadi, P. (2024). Innovations and barriers in sustainable and green finance for advancing sustainable development goals. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1513204. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1513204> [in English].
17. European Parliament, & Council of the European Union. (2021). Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). *Official Journal of the European Union*, L 243, 1–17 [in English].
18. European Parliament, & Council of the European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union*, L 130, 52–121 [in English].
19. Rio Tinto plc. (2023). Climate Report 2022: *Our pathway to net zero*. Rio Tinto plc. [in English].
20. Siljander, R., Cederlöf, M., Skoglund, K., & Herronen, V. (2023). *Annual climate report 2023*. Finnish Meteorological Institute [in English].
21. Singhania, M., Saini, N., Sharma, P., et al. (2024). Sustainable finance: A comprehensive review and future research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.138456> [in English].
22. SSAB AB. (2023). *HYBRIT – Towards fossil-free steel making: Annual Progress Report*. SSAB AB [in English].
23. Taghizadeh-Hesary, F., & Taghizadeh-Hesary, F. (2022). Green finance and the economic goals of the Paris Agreement: A critical review. *Energy Policy*, 168, 113125. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113125> [in English].
24. World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard* (Revised ed.). WRI and WBCSD [in English].
25. ThyssenKrupp AG. (2023). *tkH2Steel: Roadmap to climate-neutral steel production*. ThyssenKrupp AG [in English].
26. Wood Mackenzie Limited. (2023). *Mining industry decarbonization: Investment requirements and timeline*. Wood Mackenzie Limited [in English].
27. Zhang, Y., & Umair, M. (2023). Blockchain applications in sustainable finance: Enhancing transparency and accountability in extractive industries. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136543> [in English].

Дата надходження статті: 01.10.2025

Дата прийняття статті: 04.11.2025

Опубліковано: 17.12.2025