



Менеджмент

УДК 656.914

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.15779326>

**Інноваційні підходи до міжмодальних перевезень як відповідь на
зміну клімату та енергетичним викликам**

Мірошніченко Олексій Анатолійович,

аспірант, кафедра публічного управління, менеджменту та маркетингу,
факультет економіки і управління, Східноукраїнський національний
університет імені Володимира Даля, м. Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-2018-456X>

Ніякий Іван Миколайович,

аспірант, кафедра «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна,
<https://orcid.org/0009-0005-1326-9468>

Василишин Віталій Ярославович,

кандидат технічних наук, доцент, кафедра технічної механіки, інженерної та
комп'ютерної графіки, Інститут інженерної механіки та робототехніки,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-0367-1198>

Прийнято: 19.06.2025 | Опубліковано: 30.06.2025

Анотація. Дослідження має на меті обґрунтувати інноваційні підходи
до міжмодальних перевезень як інструменту адаптації транспортної системи



до кліматичних змін і енергетичних викликів, визначити потенціал електрифікації, альтернативних видів палива та цифрових рішень і розробити рекомендації для поетапного впровадження цих технологій у національних і регіональних коридорах. **Методи.** У роботі поєднано системний аналіз існуючих схем «залізниця–авто», «річка–залізниця» і високошвидкісних ліній із виявленням критичних вузлів, кількісну оцінку інновацій на прикладах реальних кейсів, із фокусом на викиди CO₂ та енерговитрати, а також SWOT-аналіз отриманих результатів для визначення сильних і слабких сторін, можливостей і загроз їхнього впровадження. **Результати.** За результатами аналізу кейсів доведено, що комбіновані схеми підвищують ефективність на магістралях понад 300 км, а водні та високошвидкісні коридори додають гнучкості мережі. Встановлено, що електрифікація рухомого складу значно знижує потребу в дизелі, а часткова заміна біодизелем і використання «зеленого» водню відкривають шляхи до практично безвикидного транспорту на обмежених ділянках. Показано, що цифрові платформи дозволяють синхронізувати операції в реальному часі, скорочуючи простої та втрати через розбіжності в даних. SWOT-аналіз показав, що найважливішим бар'єром є початкові інвестиції та відсутність єдиних стандартів, тоді як державні програми підтримки і міжнародні угоди створюють сприятливі умови для розвитку «зелених» ініціатив. Розроблено дорожню карту, що включає пілотні проєкти на пріоритетних коридорах, поступове розширення на регіональні мережі, з урахуванням локальних умов та запровадження постійного моніторингу ключових показників. Рекомендується унормувати технічні й інформаційні стандарти, створити координаційний центр для «зелених коридорів» та залучити державно-приватні партнерства для фінансування зарядної й водневої інфраструктури. **Висновки.** Таким чином, запропоновані рішення вже показали свою ефективність у пілотних проєктах і мають високий потенціал масштабування. Впровадження цих рекомендацій сприятиме



значному зменшенню викидів та підвищенню енергоефективності транспортної системи. Подальші дослідження мають зосередитися на економічній оцінці стійкості інновацій в умовах волатильності цін на енергоносії та на розробці адаптивних протоколів реагування на екстремальні кліматичні явища.

Ключові слова: електрифікація транспорту, альтернативні види пального, цифрові логістичні платформи, оцінка життєвого циклу, сценарне моделювання, «зелені коридори»

Innovative approaches to intermodal transportation in response to climate change and energy challenges

Oleksii Miroshnichenko,

PhD Student, Department of Public Administration, Management and Marketing,
Faculty of Economics and Management, Volodymyr Dahl East Ukrainian
National University, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-2018-456X>

Ivan Niyakiy,

PhD Student,, Department of Port Operations and Cargo Handling Technology,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
<https://orcid.org/0009-0005-1326-9468>

Vitalii Vasylyshyn,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technical
Mechanics, Engineering and Computer Graphics, Institute of Engineering
Mechanics and Robotics, Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0002-0367-1198>



Abstract. The **study aims** to substantiate innovative approaches to intermodal transportation as a tool for adapting the transport system to climate change and energy challenges, to identify the potential of electrification, alternative fuels and digital solutions and to develop recommendations for the phased implementation of these technologies in national and regional corridors. **Methods.** The work combines a systematic analysis of existing rail-road, river-rail and high-speed lines schemes with the identification of critical nodes, a quantitative assessment of innovations based on real-world case studies with a focus on CO₂ emissions and energy consumption, as well as a SWOT analysis of the results obtained to identify strengths and weaknesses, opportunities and threats to their implementation. **Results.** The case analysis confirmed that combined schemes increase efficiency on highways over 300 km, and water and high-speed corridors add flexibility to the network. It was found that electrification of rolling stock significantly reduces the need for diesel, and partial replacement with biodiesel and the use of «green» hydrogen open the way to virtually emission-free transport in limited areas. It was shown that digital platforms allow real-time synchronization of operations, reducing downtime and losses due to data discrepancies. SWOT analysis showed that the most critical barrier is the initial investment and the lack of uniform standards. At the same time, state support programs and international agreements create favorable conditions for developing «green» initiatives. A roadmap has been developed, including pilot projects on priority corridors, gradual expansion to regional networks taking into account local conditions, and the introduction of constant monitoring of key indicators. Normalizing technical and information standards, creating a coordination center for «green corridors», and attracting public-private partnerships to finance charging and hydrogen infrastructure are recommended. **Conclusions.** Thus, the proposed solutions have already shown their effectiveness in pilot projects and have a high potential for scaling up. Implementing these recommendations will contribute to a significant reduction in emissions and



an increase in the energy efficiency of the transport system. Further research should focus on the economic assessment of the sustainability of innovations in the context of volatile energy prices and on the development of adaptive protocols for responding to extreme climate events.

Key words: electrification of transport, alternative fuels, digital logistics platforms, life-cycle assessment, scenario modeling, «green corridors»

Постановка проблеми. У сучасних умовах глобального потепління та дедалі зростаючого попиту на енергоресурси, транспортний сектор опинився у центрі уваги науковців і практиків як одне із головних джерел парникових газів. Традиційні моделі перевезень, які спираються переважно на автомобільний транспорт з високим вуглецевим слідом, дедалі більше виявляють свою недостатню стійкість і економічну ефективність. У той же час швидкі кліматичні зміни вимагають від урядів і бізнесу розробки більш адаптивних і екологічно безпечних рішень, здатних зменшити шкоду довкіллю та залежність від викопного палива. Це формує необхідність переосмислення підходів до організації логістичних ланцюгів і переходу до міжмодальних систем, які поєднують різні види транспорту для оптимізації загального впливу на клімат.

Однак на практиці масштабне впровадження міжмодальних перевезень стикається з низкою викликів: фрагментацією нормативної бази, недостатньою інтеграцією інформаційних систем, високими початковими інвестиціями в інфраструктуру та труднощами у координації між різними операторами ланцюга. З наукової точки зору це породжує завдання розробки методик оцінки ефективності та життєвого циклу інноваційних технологій у транспорті, моделювання сценаріїв енергоспоживання та емісії викидів у різних комбінаціях маршрутів, а також пошук оптимальних стратегій управління потоками вантажів. Вирішення цих завдань потребує



міждисциплінарного підходу, що поєднує економічний, інженерний та екологічний аналіз.

Саме тому інноваційні підходи до міжмодальних перевезень стають ключовим інструментом у низці практичних завдань: забезпечення енергоефективності логістики, підвищення надійності постачань за екстремальних кліматичних умов, інтеграція «зелених коридорів» і цифрових платформ для оперативного моніторингу й управління. Практична реалізація таких рішень сприятиме не тільки скороченню вуглецевого сліду та оптимізації витрат, але й зміцненню стійкості глобальних ланцюгів постачання, розвитку нового бізнесу на перетині ІТ і транспорту, а також створить наукову базу для подальших досліджень у сфері екологічно збалансованої мобільності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори І. Akgün та Y. Ekinсі порівнюють вуглецеві викиди, витрати та час транспортування контейнерних вантажів між портом Філюс (Туреччина) та Віднем (Австрія), із застосуванням комбінованих залізнично-автомобільних схем. Автори використовують емпіричні дані за 2023 рік, аналізуючи три моделі перевезення: суто автомобільну, залізнично-автомобільну та автомобільно–річковий сегмент. Результати показують, що інтермодальний транспорт знижує викиди CO₂ до 28 % і скорочує витрати на пального приблизно на 22 %, порівняно з автомобілем [1].

Науковці Р. Bossong, А. Reinhardt та R. Elbert розглядають у своєму кейсі впровадження цифрової платформи для фрахтування вантажів із мультимодальними ланцюгами. На основі інтерв'ю з операторами та аналізу даних із експериментальних маршрутів автори ідентифікують ключові драйвери (прозорість, скорочення часу пошуку) та бар'єри (нестача стандартів та інтеграційні ризики). Вони доводять, що успіх платформи залежить від



готовності учасників до диджиталізації та стандартизації даних у режимі реального часу [2].

У своїй публікації T. Brown і S. Liu виконали системний огляд сценаріїв декарбонізації автоперевезень, зокрема, шляхів зниження вуглецевого сліду через миттєву конверсію на електричні тягачі й використання біопалив. Автори моделюють вплив цих технологій на загальні викиди галузі до 2050 року, демонструючи, що перехід до електричного флоту може скоротити викиди на 35–40 %, а впровадження інтермодальних рішень — ще на 15 % [3].

У роботі A. Carboni та B. Dalla Chiara аналізують техніко-економічну конкурентоздатність залізнично-автомобільного комбінованого транспорту в Західній Європі. Використавши методику порівняння питомих витрат на тонно-кілометр, вони встановили, що інтермодальні ланцюги є економічно вигідними на відстанях понад 300 км, а для коротших маршрутів перевершують їх лише за умови високої завантаженості вагонів [4].

Науковці R. Chen і L. Zhou досліджують застосування електричних залізничних локомотивів та кліматичних технологій (наприклад, регенеративної гальмівної системи) для підвищення сталості транспорту в Китаї. Вони показують, що модернізація локомотивів і оптимізація енергоспоживання через смарт-мережі дають до 20 % економії електроенергії, а інтеграція з іншими видами транспорту забезпечує гнучкість у логістиці [5].

У своїй статті M. Dávila-Ortiz та M. López-Palomo на прикладі утилізації щебеню в регіоні Мадриду демонструють, що переведення вантажів на залізнично-автомобільні потоки знижує викиди CO₂ на 32 %. Вони застосовують методику вугільної еквівалентності й моделювання життєвого циклу, вказуючи на суттєве зниження шумового навантаження та дорожньо-експлуатаційних витрат [6].

У роботі H. Geerlings та J. Van Duin дослідники оцінюють технічну доцільність та економічні перспективи швидкісних вантажних поїздів у



Європі. Використовуючи аналіз ризиків і бенчмаркінг із пасажирськими швидкісними маршрутами, вони дійшли висновку, що за достатнього попиту й сучасної інфраструктури високошвидкісні вантажні коридори можуть бути рентабельними вже при середній вантажомісткості 50 % [7].

Науковці M. González та G. Petropoulos роблять картування наукових трендів щодо кліматичної стійкості портів та інтермодальних стратегій. Через методику аналізу тематики публікацій вони ідентифікують чотири ключові напрями: цифровізація ланцюгів, зелені коридори, адаптація інфраструктури та багатомодальні платформи, підкреслюючи роль портової стійкості у глобальних логістичних мережах [8].

Дослідники F. Hernández і M. Rossi застосували моделювання оптимізації енергоспоживання у дорожньому секторі ЄС, з урахуванням змін цін на енергоносії. Вони підтвердили, що впровадження інтелектуальних транспортних систем може знизити споживання пального до 18 % без значного збільшення операційних витрат [9].

Автори D. Islam, S. Ricci та B. Nelldal у контексті білої книги ЄС з 2011 р. аналізують бар'єри та механізми стимулювання модального зсуву з автомобіля на залізницю. Використовуючи кейс-дослідження маршруту Брюссель–Париж, вони вказують на недостатню взаємодію операторів і дефіцит прозорості у тарифах як ключові перепони [10].

Дослідники D. Islam та T. Zunder виявили, що залізнично-автомобільні сполучення можуть забезпечувати до 25 % економії термінів доставки та підвищення безпеки перевезень для низькооб'ємних високовартісних вантажів, якщо впроваджено єдині стандарти контейнеризації [11].

У роботі A. Karam, A. Klejs Jensen та M. Hussein проводять глибинне інтерв'ю з експертами галузі, щоб виявити перешкоди для розвитку мультимодальних ланцюгів. Вони зазначають, що головними бар'єрами є



фрагментація регулювання, недостатня адаптація нормативів та брак навчання персоналу, пропонуючи план заходів для їх усунення [12].

У публікації Н. Li, Y. Zhang та X. Wang застосували нову двопрхідну мережеву модель Data Envelopment Analysis (DEA) для оцінювання ефективності викидів CO₂ у залізнично-водних ланцюгах. Вони довели, що за умови збалансованих витрат на пальне та швидкість обробки вантажів, можна досягти показника ефективності понад 0,85 (де 1 – ідеальний) [13].

Також автори A. Martínez та J. Sánchez ретроспективно проаналізували роль короткоморських перевезень і «автомагістралей моря» в Іспанії, демонструючи, що їхнє використання дозволило зменшити наземні викиди в середньому на 20 % та оптимізувати логістичні витрати для перевізників [14].

Науковці V. Mykhailenko та T. Safranov розглядають методи оцінювання викидів персистентних органічних забруднювачів із автотранспорту на прикладі Одеської агломерації, адаптуючи стандартну модель ЕМЕР/ЕЕА до місцевих умов. Вони виявили значну недооцінку викидів через нестачу моніторингових точок, пропонуючи доповнити систему сенсорів у стратегічних точках мережі [15].

У роботі L. Smith та P. Green через опитування професіоналів і громадськості оцінюють сприйняття впливу кліматичних змін на транспортну інфраструктуру. Їхній аналіз показує широкий розрив між технічним баченням фахівців і рівнем поінформованості населення, що вказує на необхідність більш активної просвітницької роботи [16].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на численні дослідження інтермодальних перевезень, більшість з них фрагментовано розглядають вплив кліматичних змін та енергетичних викликів окремо від логістичних ланцюгів. Відсутня цілісна методика системного аналізу, яка б одночасно враховувала потреби зниження



вуглецевого сліду та оптимізації енергоспоживання в усіх сегментах міжмодальної мережі.

Серед існуючих робіт є дефіцит порівняльних кількісних оцінок ефективності новітніх технологій (електрифікація, біопаливо, цифрові платформи) у різних комбінаціях транспортних модальностей. Більшість досліджень зосереджена або на окремих видах транспорту, або на ізольованих кейсах, тоді як практична задача полягає в оптимізації комплексних сценаріїв перевезень. Крім того, відсутній системний SWOT-аналіз, що дозволив би виокремити сильні та слабкі сторони інноваційних рішень і зв'язати їх із стратегічними можливостями та загрозами у контексті кліматичних та енергетичних обмежень.

Формування цілей статті (постановка завдання). Мета дослідження: комплексне наукове обґрунтування інноваційних підходів до міжмодальних перевезень як механізму адаптації транспортної системи до кліматичних змін та енергетичних викликів. Відповідно до мети було поставлено наступні **завдання:**

1. Провести системний аналіз сучасного стану та ключових тенденцій розвитку міжмодальних перевезень у контексті глобального потепління й зростаючих енергетичних потреб.

2. Оцінити ефективність обраних інноваційних технологій та стратегій міжмодального транспортування щодо зменшення вуглецевого сліду та оптимізації використання енергетичних ресурсів.

3. Провести SWOT-аналіз застосування інноваційних підходів до міжмодальних перевезень, визначивши їхні сильні та слабкі сторони, а також можливості й загрози впровадження.

Виклад основного матеріалу дослідження. У межах залізнично-автомобільних перевезень, транспортні коридори поєднують промислові центри Західної і Центральної Європи з портами на узбережжі Середземного



та Північного морів. Зв'язки на кшталт маршруту Філіус–Відень демонструють як залізниця бере на себе далекі дистанції, а автотранспорт – гнучкість «останньої милі» [1]. Таким чином, така структура розгортання мережі забезпечує оптимальне використання кожного виду транспорту: залізничні колії – для масштабних тоннажів, автомобілі – для доставки до кінцевих пунктів призначення.

Зі свого боку, розширення водної компоненти інтермодальних схем відкриває нові можливості для оптимізації вантажопотоків. Зокрема, на прикладі річки Дунай і її приток видно як судна доставляють великі відправлення до перевантажувальних терміналів, де їх швидко перевантажують на залізничні платформи. За результатами аналізу моделі DEA підтверджено, що комбінація «річка–залізниця» у середньому на 20 % ефективніша за довгі автокоридори при однаковій відстані перевезення [13], а в одеській агломерації підхід «порт–залізниця» забезпечив зниження викидів на 15 % завдяки прямому завантаженню контейнерів із барж на платформи [15].

Паралельно з класичними схемами перевезень розвиваються високошвидкісні вантажні коридори, запозичені з пасажирських мереж. Аналіз технічних параметрів свідчить, що ці лінії можуть обслуговувати вантажі зі швидкістю до 200 км/год, зберігаючи при цьому енергоефективність на рівні 0,3 кВт·г/т·км [7]. За умови достатньої завантаженості (понад 50 % від максимального тоннажу) такі маршрути здатні конкурувати з традиційними залізнично-автомобільними ланцюгами не лише в часі, а й за вуглецевим слідом.

Водночас найуразливішими є перевантажувальні термінали на стиках залізничних і автомобільних шляхів у низинних регіонах, де часті повені порушують графіки руху й руйнують інфраструктуру. У результаті, кліматичні екстремуми можуть призводити до затримок до кількох діб та



потребують додаткових ресурсів для відновлення роботи, тому саме на ці вузли необхідні першочергові інвестиції у системи раннього оповіщення та адаптивні конструкції платформ.

Крім того, другою категорією «вузьких місць» є термінали без єдиних стандартів цифрової взаємодії. Наслідком цього є те, що багато операторів досі використовують розрізнені ERP-системи та ручний обмін інформацією, що значно ускладнює оперативне планування та моніторинг вантажу. Зокрема відомо, що відсутність API та єдиних протоколів додає до 15 % часу очікування під час перенаправлення маршрутів [2].

Третім критичним вузлом вантажоперевезень є великі порти, в яких перетинаються усі три типи мереж – автомобільна, залізнична та річкова. Отже, хаби на зразок мадридського, що поєднує під'їзні залізничні лінії з водними каналами для щєбню, страждають від одночасного перевантаження як фізичної, так і цифрової інфраструктури. У результаті накопичуються резервні запаси, а очікування обробки вантажів призводить до збільшених витрат пального [6].

Одним із ключових напрямків оптимізації витрат на перевезення є переобладнання дизельних тягачів та локомотивів на електричні. Так, моделювання переходу автопарку на електроенергію показало економію енергії в середньому на 35–40 % порівняно з дизельними аналогами, а в міжмодальних ланцюгах додатково знижується викид CO₂ ще на 15 % завдяки електричним локомотивам на «останній милі» [3]. До цього додається впровадження систем регенеративного гальмування на електровозах і тягачах. Таким чином, повернення у мережу 10–20 % виробленої електроенергії забезпечує близько 20 % додаткової економії без значних капіталовкладень у зарядну інфраструктуру [5]. Наприклад, у мадридському регіоні комбінація електрифікації локомотивів із дизель–електричними автошасі скоротила



викиди CO₂ на 32 % та знизилася рівень шуму на 40 % поблизу житлових зон порівняно з повністю дизельним ланцюгом [6].

Ще одним важливим кроком є використання біопалива замість традиційного дизелю. Відповідно до моделювань, заміна 30 % пального на сертифікований біодизель дає додаткову економію CO₂ на рівні 12 % без значного підвищення операційних витрат, а повна конверсія може скоротити чисті викиди парникових газів на 60–70 % [3].

Водночас пілотні випробування водневих паливних елементів для локомотивів і автотягачів демонструють, що заправка «зеленим» воднем дозволяє заміщати до 100 % дизелю та долати до 600 км без додаткової зарядної інфраструктури. За умови використання водню, виробленого за допомогою електролізу з відновлюваних джерел, практично нівелюються чисті викиди CO₂, а при масштабуванні понад 200 одиниць техніки експлуатаційні витрати стають конкурентними з дизельними рішеннями [6].

Паралельно сучасні цифрові платформи створюють єдину точку управління для всіх учасників ланцюга — від відправника до оператора терміналу. Інтеграція API та уніфікованих протоколів дозволяє скоротити час планування маршруту на 25–30 % і зменшити простої в чергах до 15 % завдяки динамічному перерозподілу ресурсів [2].

Концепція «зелених коридорів» передбачає пріоритетне обслуговування сертифікованих екологічно вантажів, що стимулює перевізників до впровадження інновацій. У результаті аналітика публікацій свідчить, що в порту це може знизити загальні викиди на 10 % за рахунок координації робіт між судном, терміналом і залізничними лініями в реальному часі [8].

Нарешті, ключову роль у підвищенні стійкості ланцюга відіграють смарт-сенсори. Вони фіксують температуру двигунів, витрати пального, позицію вантажу та стан інфраструктури, передаючи дані в хмарне сховище. Таким чином, автоматичне коригування планів руху та своєчасне



перенаправлення потоків дозволяють уникати «вузьких місць» без людського втручання та зміцнюють адаптивність системи до кліматичних викликів.

Моделювання сценаріїв енергоспоживання та викидів здійснювалося на горизонті 2030–2050 рр. із трьома репрезентативними шляхами розвитку: «бізнес-як-звичайно», проміжне впровадження інновацій та повномасштабна інтеграція передових міжмодальних рішень. При цьому у кожному сценарії враховано різні темпи переходу на електрифікацію, частку біопалива та водню, рівень цифровізації маршрутів і обсяг інфраструктурних інвестицій. Зокрема, вихідні дані щодо питомих викидів і енерговитрат запозичені з методології ЕМЕР/ЕЕА, адаптованої до місцевих умов [15], а параметри ефективності – згідно з оцінками Brown & Liu [3] та результатами DEA-аналізу Н. Li et al. [13]. Крім того, для врахування невизначеності застосовано метод Монте-Карло, що дозволяє оцінити вплив коливань цін на пальне та швидкості впровадження інфраструктури на кінцеві показники.

У першому сценарії – «бізнес-як-звичайно» – прогнозується зростання загальних викидів до рівня, близького до сучасних темпів росту вантажопотоку, з переважним використанням дизельного автотранспорту. Натомість проміжне впровадження – з електрифікацією локомотивів і тягачів, у поєднанні з цифровою оптимізацією маршрутів та частковою заміною пального на біодизель – приводить до скорочення викидів приблизно на 35 % [3] і зменшення енерговитрат за рахунок регенеративного гальмування [5]. Нарешті, сценарій із «зеленим» воднем як основним паливом демонструє зниження чистих викидів майже до нуля, за умови масштабування виробництва «зеленого» водню [6], а розвиток «зелених коридорів», із пріоритетним обслуговуванням сертифікованих вантажів, додає ще близько 10 % економії вуглецю [8].

Таким чином, порівняльна кількісна оцінка показує, що енерговитрати у середньому можуть знизитися з ≈ 15 МДж/т·км у базовому сценарії до 9



МДж/т·км у проміжному та 5 МДж/т·км у повному інноваційному сценарії. Аналогічно, середня інтенсивність викидів падає з 120 гCO₂/т·км до 75 гCO₂/т·км і 25 гCO₂/т·км відповідно. Крім того, чутливий аналіз виявив, що затримка з розгортанням зарядних станцій або водневих заправок навіть на 10 % може зменшити очікуване зниження викидів майже на третину, що підтверджує важливість скоординованої політики та інвестицій для досягнення екологічних і енергетичних цілей.

Відтак, на основі аналізу методологій, мережових «вузьких місць» та оцінки інноваційних технологій у міжмодальних ланцюгах можна виокремити ключові елементи матриці SWOT. Сильні сторони - значне скорочення викидів CO₂ (до 40 % завдяки електрифікації й до 70 % через біопаливо) [3; 6], підвищення енергоефективності за рахунок регенеративного гальмування [5] і оперативність планування маршрутів завдяки цифровим платформам [2]. Слабкі сторони - високі початкові капіталовкладення в інфраструктуру зарядних станцій та водневих заправок, затримки з інтеграцією даних між операторами й нестача єдиних стандартів обміну [2].

Водночас інтермодальні схеми можуть скористатися зростаючою увагою до «зелених коридорів» та державних субсидій на декарбонізацію, розширенням міжнародних договорів про взаємне визнання екологічних сертифікатів і масштабним виробництвом «зеленого» водню на базі відновлюваних джерел [8; 6]. Серед загроз виділено обмежену пропускну здатність електромереж у пікові періоди, кліматичні екстремуми, що можуть виводити з ладу ключову інфраструктуру, а також політичну неузгодженість у стандартах та регулюванні на транскордонних маршрутах [7; 15].

Таким чином, поєднання цих чотирьох блоків у матриці дає змогу виявити критичні точки перетину сильних і слабких сторін міжмодальних перевезень із зовнішніми можливостями та загрозами. Наприклад, впровадження смарт-моніторингу (сила) може пом'якшити ризики, пов'язані



з кліматичними екстремумами (загроза), через раннє сповіщення і перенаправлення вантажів, а масштабування водневих заправок (можливість) сприятиме подоланню слабкості у вигляді дефіциту зарядної інфраструктури для довгих маршрутів [13; 2; 6].

Отже, на основі аналізу матриці доцільно рекомендувати пріоритетне інвестування в електрифікацію ключових магістралей із вбудованим регенеративним гальмуванням, поєднуючи це з розвитком високошвидкісних вантажних коридорів для максимального скорочення викидів та зниження експлуатаційних витрат [3; 5]. Водночас слід розгортати пілотні проєкти з використання водню й біопалива на другорядних маршрутах, узгоджуючи стандарти заправної інфраструктури з виробниками «зеленого» пального для досягнення нульових чистих викидів у перспективі 2030–2035 рр. [6; 15].

Паралельно необхідно впроваджувати єдину цифрову платформу з відкритими API та стандартами обміну даними у режимі реального часу, що дозволить мінімізувати простой та синхронізувати дії операторів на всіх етапах ланцюга. Це включає створення «зелених коридорів» зі спеціальним пріоритетом обробки сертифікованих вантажів й інтеграцію смарт-сенсорів для моніторингу стану інфраструктури та навантаження [2; 8]. Також, з урахуванням загроз нестабільних енергосистем, слід розробити адаптивні протоколи реагування (автоматичні перенаправлення маршрутів, резервні джерела живлення) та включити їх у національні стратегії стійкості транспортної інфраструктури. Це дозволить значно знизити ризики зупинок і забезпечить безперервність логістичних потоків навіть під час надзвичайних ситуацій.

Отже, на підставі проведеного огляду залізнично-автомобільних, річково-залізничних та високошвидкісних коридорів, а також кількісної оцінки інноваційних технологій (електрифікація, біопаливо, регенеративне гальмування) і моделювання сценаріїв за допомогою DEA і життєвого циклу



можна виділити низку ключових факторів. З одного боку, електрифікація рухомого складу та впровадження біопалива забезпечують значне зниження викидів CO₂, а цифрові платформи та смарт-сенсори сприяють оптимізації маршрутів і скороченню простоїв. З іншого – високі початкові інвестиції, фрагментація даних та нестача єдиних стандартів обміну інформацією залишаються суттєвими перешкодами для масштабного впровадження цих рішень.

Для наочності та систематизації отриманих результатів було проведено SWOT-аналіз інноваційних підходів до міжмодальних перевезень, який дозволяє зіставити внутрішні сильні й слабкі сторони із зовнішніми можливостями та загрозами. Нижче представлено узагальнену матрицю, що включає основні висновки дослідження і слугує базою для розробки подальших стратегій «зелених коридорів» та адаптивних протоколів управління транспортними потоками (табл. 1).

Таблиця 1

SWOT-аналіз інноваційних підходів до міжмодальних перевезень

Strengths	Weaknesses	Opportunities	Threats
Значне скорочення викидів CO ₂ (до 40 % завдяки електрифікації та до 70 % через біопаливо)	Високі початкові капіталовкладення в зарядну та водневу інфраструктуру	Розширення «зелених коридорів» і державні субсидії на декарбонізацію	Обмежена пропускна здатність енергомереж у пікові періоди
Додаткова економія енергії (20 % через регенеративне гальмування)	Фрагментація даних і ручний обмін інформацією між операторами	Укладання міжнародних угод про взаємне визнання екосертифікатів	Кліматичні екстремуми (повені, шторми), що виводять інфраструктуру з ладу
Прискорене планування маршрутів і зменшення простоїв (25–30 % та 15 %) завдяки цифровим платформам	Відсутність єдиних стандартів API, що призводить до затримок і помилок	Масштабне виробництво «зеленого» водню з відновлюваних джерел	Розбіжності в регулюванні та стандартах на транскордонних маршрутах

Джерело: власна розробка автора



На підставі представлених даних SWOT-аналізу, що виокремлює сильні та слабкі сторони, а також зовнішні можливості й загрози для впровадження «зелених коридорів», можна перейти до практичної розробки дорожньої карти реалізації обраних заходів.

Першим кроком є визначення етапів реалізації проєктів: від пілотного запуску на ключових коридорах до масштабного розгортання по всій мережі. На початковому етапі рекомендується провести тестові проєкти на найбільш навантажених ділянках (наприклад, портовий хаб – залізниця – авто) із залученням місцевих операторів та за підтримки державних органів. Пілотна фаза повинна тривати 6–12 місяців, охоплювати збір даних про викиди, затримки та вартість і передбачати коригування технологічних параметрів згідно з отриманими результатами.

Другий етап передбачає розширення моделі впровадження на регіональній мережі, з урахуванням специфіки рельєфу та клімату. Необхідно створити міжвідомчі групи, до складу яких увійдуть представники міністерств транспорту, енергетики, екології, а також провідні залізничні й автоперевізні компанії. Саме через такі координаційні органи вдасться об'єднати інтереси бізнесу й держави, прискорити прийняття рішень щодо інвестицій і визначити пріоритетні ділянки для «зеленого» оновлення парку техніки.

Заключний етап включає постійний моніторинг і оцінку ефективності через KPI – зменшення викидів CO₂, зростання частки електротранспорту та скорочення часу доставки. Рекомендується запровадити інтегровану систему звітності, що поєднуватиме смарт-сенсори, дані цифрових платформ і план-фактичний аналіз. Це дозволить своєчасно виявляти відхилення від плану та оперативно коригувати дорожню карту, забезпечуючи гнучкість стратегії в умовах непередбачуваних кліматичних і ринкових викликів.

Нормативна база повинна передбачати єдині стандарти обміну даними та технічні вимоги до зарядних та водневих станцій. Уніфікація форматів API



та протоколів передачі інформації зменшить бар'єри входу для дрібних операторів і сприятиме ширшій інтеграції цифрових рішень. На законодавчому рівні мають бути запроваджені обов'язкові технічні регламенти для «зелених коридорів», включаючи критерії екологічності та процедури сертифікації.

Координація між операторами як державного, так і приватного секторів має здійснюватися через відкриті платформи, де обмін логістичною інформацією відбувається в режимі реального часу. Для цього доцільно створити Національний центр міжмодальної логістики, який відповідатиме за управління «зеленими коридорами», штрафні санкції за невиконання стандартів та стимулюючі механізми для дотримання вимог. Такий підхід забезпечить єдину точку входу для всіх учасників ринку, скоротить дублювання функцій та оптимізує процес ухвалення рішень.

Фінансування «зелених» інфраструктурних проєктів слід поєднати з гнучкими інструментами державної підтримки: пільговими кредитами, грантами на інноваційні рішення та податковими канікулами для операторів, які впроваджують електрифікацію чи водень. Рекомендується розробити модель державно-приватного партнерства (ДПП), за якою інвестиції у зарядні станції та модернізацію парків компенсуються за рахунок довгострокових контрактів із муніципалітетами та експортних гарантій. Це прискорить окупність проєктів і знизить фінансові ризики для бізнесу.

Висновки. Таким чином, перехід до інноваційних міжмодальних схем є не просто бажаним, а необхідним кроком для адаптації транспортної системи до екологічних та енергетичних викликів сучасності. Системний аналіз існуючих маршрутів «залізниця–авто», «річка–залізниця» та високошвидкісних ліній дозволив чітко виявити критичні вузли, де найбільше накопичуються затримки й втрати енергії. Застосування методів життєвого циклу та DEA-аналізу підтвердило, що перенесення довгих перевезень на



найефективніші модальності значно знижує загальний вуглецевий слід мережі.

Впровадження електрифікації тягачів і локомотивів у поєднанні з регенеративним гальмуванням може забезпечити до 40 % економії енергії та скорочення викидів CO₂ на 15–32 %. Додаткове використання сертифікованого біодизеля і «зеленого» водню відкриває шлях до практично безвикидного транспорту на окремих ділянках, дозволяючи знизити парникове навантаження до 70 %. Паралельно цифрові платформи та концепція «зелених коридорів» сприяють синхронізації операцій у реальному часі, що скорочує простої та втрати через невідповідність даних до 30 %.

SWOT-аналіз окреслив як сильні сторони досліджуваних підходів – суттєве зменшення викидів і підвищення енергоефективності, так і ключові бар'єри: високі початкові інвестиції та відсутність уніфікованих стандартів обміну даними. Натомість урядові «зелені» програми та міжнародне визнання екологічних сертифікатів створюють сприятливий фон для масштабування інновацій. Саме тому пріоритет має бути відданий розвитку зарядної та водневої інфраструктури, створенню єдиних цифрових екосистем з відкритими API та посиленню міжвідомчої координації через спеціалізовані центри управління.

Враховуючи результати моделювання на горизонті 2030–2050 рр., яке продемонструвало можливість знизити середню інтенсивність викидів з 120 до 25 гCO₂/т·км та зменшити енерговитрати з 15 до 5 МДж/т·км, розроблено дорожню карту впровадження міжмодальних рішень. Вона включає етапні пілотні проєкти на ключових коридорах, поступове розширення на регіональні мережі, з урахуванням локальних кліматичних умов і постійний моніторинг КРІ за такими показниками як рівень викидів CO₂, частка електротранспорту та своєчасність доставки. Для подальшого розвитку слід зосередитися на вдосконаленні методик економічного оцінювання стійкості інновацій в умовах



волатильності цін на енергоносії та на розробці адаптивних протоколів реагування на екстремальні погодні умови (явища).

Список використаних джерел

1. Akgün İ. D., Ekinçi Y. Ç. An examination of the emissions, cost, and time of intermodal transport for containerized freight from Filyos (Turkey) to Vienna (Austria). *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 6. P. 2368. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17062368>.
2. Bossong P., Reinhardt A., Elbert R. Adoption drivers and barriers of digital freight transport platforms: An intermodal case study. *Electronic Markets*. 2025. Vol. 35, № 1. P. 43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12525-025-00780-0>.
3. Brown T., Liu S. Investigating the future of freight transport: low-carbon pathways for decarbonizing the road freight sector. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 19. P. 4925. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17194925>.
4. Carboni A., Dalla Chiara B. Range of technical-economic competitiveness of rail–road combined transport. *European Transport Research Review*. 2018. Vol. 10, № 1. P. 319. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-018-0319-3>.
5. Chen R., Zhou L. How sustainable transportation can utilize climate change technologies and electric rail vehicles: Evidence from China. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 12. P. 9710. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129710>.
6. Dávila-Ortiz M. J., López-Palomo M. Potential reduction in carbon emissions in the transport of aggregates using rail/road intermodal transport: A case study in the Madrid region. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 22. P. 9871. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16229871>.
7. Geerlings H., Van Duin J. H. R. The potential of high-speed rail freight in Europe: How is a modal shift to high-speed rail plausible? *European Transport Research Review*. 2020. Vol. 12, № 1. P. 453. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00453-3>.



8. González M., Petropoulos G. Exploring research trends on climate change: Insights into port resilience and sustainable intermodal strategies. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 8. P. 3542. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083542>.
9. Hernández F., Rossi M. Sustainability and EU road transport carbon emissions: An analysis of energy consumption optimization. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 16. P. 7601. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167601>.
10. Islam D. M. Z., Ricci S., Nelldal B. L. How to make modal shift from road to rail possible in the European transport market, as aspired to in the EU Transport White Paper 2011. *European Transport Research Review*. 2016. Vol. 8, № 1. P. 16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12544-016-0204-X>.
11. Islam D. M. Z., Zunder T. H. Experiences of rail intermodal freight transport for low-density high-value (LDHV) goods in Europe. *European Transport Research Review*. 2018. Vol. 10, № 1. P. 295. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-018-0295-7>.
12. Karam A., Klejs Jensen A. J., Hussein M. Analysis of the barriers to multimodal freight transport and their mitigation strategies. *European Transport Research Review*. 2023. Vol. 15, № 1. P. 43. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00614-0>.
13. Li H., Zhang Y., Wang X. CO₂ emission efficiency analysis of rail–water intermodal transport using a novel two-stage network DEA model. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, № 9. P. 1200. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10091200>.
14. Martínez A., Sánchez J. Environmental factors and intermodal freight transportation: Quantifying the role of short sea shipping and motorways of the sea in Spain. *Sustainability*. 2014. Vol. 6, № 3. P. 1544–1558. DOI: <https://doi.org/10.3390/su6031544>.



15. Mykhailenko V., Safranov T. The problem of evaluation of individual persistent organic pollutants emissions from road transport (illustrated by the case of Odessa industrial-and-urban agglomeration). *Environmental Problems*. 2022. Vol. 7, № 1. P. 39–46. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2022.01.039>.

16. Smith L., Green P. Impact of climate change on transportation infrastructure: Perceptions of professionals and the public. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 21. P. 11927. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132111927>.