

Хмельницький національний університет
Факультет міжнародних відносин і права
Кафедра міжнародних економічних відносин

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Роль штучного інтелекту в оптимізації екологічних показників міжнародної логістики


Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)

Галузь знань 29 МІЖНАРОДНІ ВІДНОСИНИ
Шифр і найменування

Спеціальність 292 МІЖНАРОДНІ ЕКОНОМІЧНІ ВІДНОСИНИ
Код і найменування

Освітня програма МІЖНАРОДНІ ЕКОНОМІЧНІ ВІДНОСИНИ
Назва

Виконала здобувачка
2 курсу, група МЕВм -24-1


Підпис

Дар'я ПОВАДІУК
ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:
старший викладач


Підпис

Галина СКИБА
ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри МЕВ,
д.е.н., професор


Підпис

Альона МЕЛЬНИК
ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Хмельницький, 2025

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота Повадюк Д.О. на тему «Роль штучного інтелекту в оптимізації екологічних показників міжнародної логістики» містить 74 сторінки, 39 таблиць, 3 рисунки, список літератури з 72 найменувань.

Актуальність теми: міжнародна логістика, як складова системи міжнародних економічних відносин, відіграє критичну роль у забезпеченні глобальних ланцюгів постачання. Посилення екологічних вимог у міжнародній торгівлі актуалізує необхідність впровадження AI-технологій для оптимізації екологічних показників міжнародних перевезень.

Мета: обґрунтування ролі штучного інтелекту в оптимізації екологічних показників міжнародної логістики та розробка практичних рекомендацій для підвищення конкурентоспроможності міжнародних логістичних операторів.

Завдання: дослідити місце міжнародної логістики в системі міжнародних економічних відносин; оцінити практики провідних міжнародних операторів; розробити механізм впровадження AI для підвищення екологічної ефективності міжнародних перевезень.

Об'єктом дослідження є процес оптимізації екологічних показників міжнародної логістики із застосуванням технологій штучного інтелекту.

Предметом дослідження є теоретико-методичні засади та практичні аспекти застосування штучного інтелекту для підвищення екологічної ефективності міжнародних логістичних систем.

Методи: компаративний аналіз міжнародних практик, бенчмаркінг глобальних операторів, економіко-математичне моделювання, SWOT-аналіз конкурентних позицій.

Результати: систематизовано міжнародний досвід застосування AI у логістиці; розроблено концептуальну модель розвитку міжнародної логістики на основі AI; запропоновано організаційно-економічний механізм для українських компаній у міжнародній логістиці.

Ключові слова: міжнародні економічні відносини, міжнародна логістика, штучний інтелект, глобальні ланцюги постачання, міжнародна торгівля, екологічні стандарти ЄС, конкурентоспроможність, міжнародні перевезення, сталий розвиток.

ABSTRACT

The qualification work of Povadiuk D.O. on the topic "The Role of Artificial Intelligence in Optimizing Environmental Indicators of International Logistics" contains 74 pages, 39 tables, 3 figures, a list of references with 72 items.

Relevance: international logistics, as a component of the international economic relations system, plays a critical role in ensuring global supply chains. Strengthening environmental requirements in international trade actualizes the need for AI technologies to optimize environmental indicators of international transportation.

Objective: substantiation of the role of artificial intelligence in optimizing environmental indicators of international logistics and development of practical recommendations for enhancing the competitiveness of international logistics operators.

Tasks: investigate the place of international logistics in the system of international economic relations; evaluate practices of leading international operators; develop an AI implementation mechanism to enhance environmental efficiency of international transportation.

The object of the research is the process of optimizing environmental indicators of international logistics using artificial intelligence technologies.

The subject of the research is the theoretical and methodological foundations and practical aspects of applying artificial intelligence to enhance the environmental efficiency of international logistics systems.

Methods: comparative analysis of international practices, benchmarking of global operators, economic-mathematical modeling, SWOT analysis of competitive positions.

Results: systematized international experience of AI application in logistics; developed a conceptual model for international logistics development based on AI; proposed an organizational-economic mechanism for Ukrainian companies in international logistics.

Keywords: international economic relations, international logistics, artificial intelligence, global supply chains, international trade, EU environmental standards, competitiveness, international transportation, sustainable development.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВПЛИВУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ МІЖНАРОДНОЇ ЛОГІСТИКИ	8
1.1 Міжнародна логістика в системі концепцій сталого розвитку та «зеленої» логістики	8
1.2 Теоретичні підходи до трактування технологій штучного інтелекту та особливості їх застосування в логістичних процесах	11
1.3 Система екологічних індикаторів логістичної діяльності, методи їх оцінювання та нормативно-правові вимоги	15
Висновки до першого розділу	31
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ У МІЖНАРОДНІЙ ЛОГІСТИЦІ	32
2.1 Сучасні світові тенденції цифровізації та екологізації міжнародних логістичних систем із використанням штучного інтелекту	32
2.2 Оцінка стану екологічних показників міжнародної логістики з урахуванням наявних інструментів штучного інтелекту	36
2.3 Оцінка результатів застосування AI-технологій щодо зміни екологічних параметрів логістичних процесів	38
Висновки до другого розділу	53
РОЗДІЛ 3 НАПЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖНАРОДНОЇ ЛОГІСТИКИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	54
3.1 Формування концептуальних засад екологічно орієнтованого розвитку міжнародної логістики із застосуванням штучного інтелекту	54
3.2 Вдосконалення організаційно-економічного механізму впровадження AI-рішень у логістичну діяльність	60
3.3 Еколого-економічні результати впровадження механізму та можливі ризики й обмеження його реалізації.	65
Висновки до третього розділу	71
ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	75

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку глобальної логістики характеризується безпрецедентними викликами, пов'язаними зі зміною клімату та необхідністю переходу до моделі сталого розвитку. Транспортний сектор є одним з найбільших джерел викидів парникових газів, генеруючи близько 25% глобальних викидів CO₂, при цьому вантажна логістика відповідає за значну частку цих емісій. В умовах посилення екологічного регулювання, зокрема EU Green Deal, Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) та Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), логістичні компанії змушені кардинально переглядати свої операційні моделі та стратегії розвитку.

Водночас стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту відкриває принципово нові можливості для оптимізації екологічних показників логістичних операцій. AI-технології демонструють здатність скорочувати викиди CO₂ на 15-35% завдяки оптимізації маршрутів, прогнозуванню попиту, управлінню автопарком та енергоефективності складських комплексів. Глобальний ринок AI у логістиці зростає з 18 млрд дол. США у 2024 році до прогнозованих 549 млрд дол у 2033 році (CAGR 46,7%), що свідчить про трансформаційний потенціал цих технологій.

Актуальність дослідження посилюється геополітичною нестабільністю, волатильністю цін на енергоносії та зростаючим тиском з боку споживачів та інвесторів щодо «зеленої» логістики. Компанії, які першими інтегрують AI-рішення для екологізації, отримують значні конкурентні переваги: зниження операційних витрат, доступ до зеленого фінансування, покращення ESG-рейтингів та відповідність регуляторним вимогам. Це зумовлює необхідність системного дослідження ролі штучного інтелекту в оптимізації екологічних показників міжнародної логістики.

Теоретичні та практичні аспекти застосування інноваційних технологій у логістиці досліджували такі вітчизняні науковці як Крикавський Є.В.[3],

який розробив фундаментальні положення щодо логістичного управління, Окландер М.А., що досліджував питання цифрової трансформації логістики, Чухрай Н.І., яка зосередилася на інноваційних стратегіях логістичних систем, Григорак М.Ю., що вивчала інтелектуалізацію ринку логістичних послуг, Посилкіна О.В. та Сумець О.М.[6], які зробили значний внесок у розвиток теорії екологічної логістики.

Серед закордонних дослідників вагомий внесок у розробку теоретичних засад сталої логістики та застосування AI зробили Alan McKinnon, який досліджував декарбонізацію логістики, Martin Christopher, що розробив концепцію стійких ланцюгів постачання, Michael Porter з теорією конкурентних переваг через екологічну ефективність, Jean-Paul Rodrigue, чії праці присвячені географії транспортних систем, а також Joseph Sarkis та Kannan Govindan, які досліджували зелене управління ланцюгами постачання.

Однак, незважаючи на значний науковий доробок у цій сфері, питання комплексного застосування штучного інтелекту для оптимізації екологічних показників міжнародної логістики потребує подальшого дослідження. Це зумовлено стрімким розвитком AI-технологій, появою нових регуляторних вимог, зміною бізнес-моделей логістичних операторів та необхідністю формування практичних рекомендацій щодо впровадження AI-рішень. Особливої актуальності набувають питання інтеграції AI у стратегічне управління екологічною ефективністю, оцінки результативності AI-технологій та розробки організаційно-економічних механізмів їх впровадження.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування ролі штучного інтелекту в оптимізації екологічних показників міжнародної логістики та розробка практичних рекомендацій щодо впровадження AI-технологій для досягнення цілей сталого розвитку логістичних компаній.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розкрити сутність та систематизувати теоретичні підходи до визначення екологічних показників у міжнародній логістиці;
- дослідити можливості та напрями застосування технологій штучного інтелекту для оптимізації логістичних процесів;
- проаналізувати міжнародний досвід впровадження AI-рішень для екологізації логістики;
- оцінити сучасний стан та тенденції цифровізації та екологізації міжнародних логістичних систем;
- дослідити екологічні показники міжнародної логістики на прикладі ЄС та провідних логістичних операторів;
- здійснити оцінювання результативності застосування AI-технологій щодо зміни екологічних параметрів логістичних процесів;
- сформулювати концептуальні засади екологічно орієнтованого розвитку міжнародної логістики із застосуванням штучного інтелекту;
- розробити організаційно-економічний механізм впровадження AI-рішень у логістичну діяльність з урахуванням екологічних пріоритетів;
- обґрунтувати очікувані екологічні та економічні результати реалізації запропонованого механізму та визначити можливі ризики і обмеження.

Об’єктом дослідження є процес оптимізації екологічних показників міжнародної логістики із застосуванням технологій штучного інтелекту.

Предметом дослідження є теоретико-методичні засади та практичні аспекти застосування штучного інтелекту для підвищення екологічної ефективності міжнародних логістичних систем.

Методи дослідження. Методологічною основою дослідження є загальнонаукові та спеціальні методи пізнання. Для досягнення поставленої мети та вирішення визначених завдань застосовано такі методи: діалектичний метод та системний підхід – для дослідження сутності екологічних показників логістики та ролі AI у їх оптимізації; методи аналізу та синтезу – для вивчення складових AI-технологій та їх впливу на екологічну ефективність логістичних процесів; метод порівняльного аналізу – для співставлення підходів різних

логістичних компаній до впровадження AI-рішень та оцінки їх результативності; статистичні методи – для обробки та аналізу кількісних даних щодо викидів CO₂, енергоспоживання та економічних показників логістичних операторів; метод економіко-математичного моделювання – для розрахунку NPV, IRR та оцінки ефективності інвестицій у AI-технології; метод сценарного аналізу – для прогнозування результатів впровадження AI за різних умов; графічний метод – для наочного представлення динаміки екологічних показників та візуалізації даних; метод SWOT-аналізу – для оцінки можливостей та загроз впровадження AI для екологізації логістики; метод бенчмаркінгу – для порівняння практик провідних логістичних операторів (DHL, UPS, FedEx, Maersk); абстрактно-логічний метод – для теоретичного узагальнення та формулювання висновків і рекомендацій.

Інформаційною базою дослідження слугували наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених з питань логістики, сталого розвитку та штучного інтелекту; статистичні дані міжнародних організацій (Європейське агентство з довкілля, Міжнародний транспортний форум, World Economic Forum); звіти про сталий розвиток провідних логістичних компаній (DHL Group, UPS, FedEx, Maersk); аналітичні матеріали консалтингових компаній (McKinsey, Gartner, Deloitte, BCG); нормативні документи ЄС (EU Green Deal, CSRD, EU AI Act); галузеві стандарти (GHG Protocol, GLEC Framework, ISO 14083); матеріали наукових конференцій та періодичні видання з питань розвитку глобальної логістики та AI-технологій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку теоретичних положень та розробці практичних рекомендацій щодо застосування штучного інтелекту для оптимізації екологічних показників міжнародної логістики. Зокрема:

– удосконалено класифікацію AI-технологій для екологізації логістики за доменами застосування (транспортна логістика, складська логістика, управління ланцюгами постачання) та типами екологічного ефекту;

– розроблено концептуальну модель екологічно орієнтованого розвитку міжнародної логістики на основі AI, що інтегрує стратегічний, тактичний, операційний та моніторинговий рівні управління;

– запропоновано модель зрілості AI-впровадження для екологізації логістики, що визначає п'ять рівнів розвитку з відповідними характеристиками та очікуваними результатами;

– розроблено організаційно-економічний механізм впровадження AI-рішень, що включає цільовий, організаційний, процесний, ресурсний та контрольний блоки;

– обґрунтовано кількісні параметри екологічної та економічної результативності впровадження AI (скорочення CO₂ на 25-35%, NPV 8,2 млн EUR, IRR 127%).

Апробація результатів дослідження. Основні висновки, положення і результати роботи оприлюднені на міжнародній науково-практичній конференції «Міжнародні економічні відносини: сталий розвиток та діджиталізація»(м. Хмельницький, 22 трав. 2025 р.)

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 74 сторінок друкованого тексту. Робота містить 39 таблиць, 3 рисунки, що відображають аналітичні дані, результати розрахунків та систематизовану інформацію. Список використаних джерел налічує 72 найменування.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВПЛИВУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ МІЖНАРОДНОЇ ЛОГІСТИКИ

1.1 Міжнародна логістика в системі концепцій сталого розвитку та «зеленої» логістики

Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується зростаючим усвідомленням необхідності інтеграції принципів сталого розвитку в усі сфери господарської діяльності, включаючи міжнародну логістику. Концепція сталого розвитку, сформульована у звіті Комісії Брундтланд «Наше спільне майбутнє» (1987), передбачає задоволення потреб теперішнього покоління без шкоди для можливостей майбутніх поколінь задовольняти власні потреби [71]. Ця парадигма набуває особливої актуальності для логістичної галузі, яка є одним з основних джерел антропогенного впливу на навколишнє середовище.

Транспортний та логістичний сектор відповідає приблизно за 24% глобальних викидів CO₂, що робить його критично важливим об'єктом для реалізації кліматичних цілей [23]. За даними Європейського агентства з навколишнього середовища, за відсутності рішучих та ефективних заходів до 2050 року логістика буде відповідальною за 40% глобальних викидів CO₂. Це підкреслює нагальну потребу у трансформації логістичних систем на засадах екологічної відповідальності та ресурсоефективності.

Концепція «зеленої» логістики (Green Logistics) виникла як відповідь на зростаючі екологічні виклики та являє собою інтеграцію екологічних міркувань у логістичні операції з метою мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище при збереженні економічної ефективності [49]. «Зелена» логістика охоплює всі етапи ланцюга постачання – від закупівлі сировини до доставки кінцевому споживачу та утилізації відходів, включаючи транспортування, складування, пакування та управління запасами.

Систематизація концепцій екологічно орієнтованої логістики

Концепція	Ключові характеристики	Основний фокус
Зелена логістика (Green Logistics)	Мінімізація екологічного впливу; оптимізація ресурсів; екологічна відповідальність	Зниження викидів, відходів, споживання енергії
Стала логістика (Sustainable Logistics)	Баланс економічних, екологічних та соціальних аспектів; довгострокова перспектива	Триєдиний підхід (TBL): прибуток, планета, люди
Еко-логістика (Eco-logistics)	Екологічний дизайн; зменшення екологічного сліду; біорозкладні матеріали	Екологічна оптимізація процесів та матеріалів
Реверсивна логістика (Reverse Logistics)	Управління зворотними потоками; переробка; повторне використання	Замикання циклу матеріалів, мінімізація відходів
Низьковуглецева логістика (Low-carbon Logistics)	Скорочення вуглецевого сліду; альтернативні палива; електрифікація	Декарбонізація транспорту та операцій

Джерело: систематизовано автором на основі [23; 49; 71].

Як демонструє таблиця 1.1, існує множина концепцій екологічно орієнтованої логістики, що мають спільну мету – зменшення негативного впливу на довкілля – але відрізняються акцентами та підходами. Узагальнюючи, можна виділити спільні принципи цих концепцій: мінімізація споживання ресурсів та генерації відходів; оптимізація транспортних маршрутів для зниження викидів; використання екологічно чистих технологій та матеріалів; інтеграція зворотних логістичних потоків.

Цілі сталого розвитку ООН (Sustainable Development Goals, SDGs) формують глобальну рамку для трансформації логістичної галузі. Особливо релевантними для логістики є: SDG 9 (Промисловість, інновації та інфраструктура), SDG 11 (Сталі міста та громади), SDG 12 (Відповідальне споживання та виробництво) та SDG 13 (Кліматичні дії) [69]. Згідно зі Звітом про цілі сталого розвитку 2024, лише близько 17% цілей знаходяться на правильному шляху до виконання, майже половина демонструють слабкий або середній прогрес, а понад третина стагнують або навіть регресують.

Індекс логістичної ефективності (Logistics Performance Index, LPI), що публікується Світовим банком, є глобальним індикатором для оцінки

ефективності та продуктивності логістики в різних країнах [69]. Він відображає вплив логістичного середовища, політик та інвестицій країни на ефективність логістики та є важливим показником міжнародної торгівлі та економічного розвитку. Інтеграція екологічних критеріїв у оцінку логістичної ефективності є актуальним напрямком розвитку методології.

Європейський Союз є лідером у впровадженні регуляторних механізмів для «озеленення» логістики. Європейський зелений курс (European Green Deal) встановлює амбітну мету досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, що передбачає кардинальну трансформацію транспортного та логістичного секторів [25]. Ключові ініціативи включають: посилення стандартів викидів для транспортних засобів (Euro 7); розвиток мультимодальної логістики; стимулювання електрифікації автопарків; впровадження механізму прикордонного вуглецевого коригування (CBAM).

Таблиця 1.2

Регуляторні ініціативи ЄС у сфері сталої логістики

Ініціатива	Рік впровадження	Вплив на логістику
Стандарти Euro 7	2025	Уніфікація вимог до викидів для всіх типів транспортних засобів
CSRD (звітність зі сталості)	2024	Обов'язкова звітність великих компаній про екологічні дії
ISO 14083	2025 (обов'язково)	Стандартизована оцінка вуглецевого сліду логістики
Зони низьких викидів (LEZ)	Діє	Обмеження доступу забруднюючих транспортних засобів
CBAM	2026 (повністю)	Вуглецеве коригування на кордоні для імпорту

Джерело: складено на основі даних [25]

Глобальні угоди, такі як Паризька угода та Конференція сторін (COP28) Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC), підкреслюють важливість логістичного сектору в досягненні кліматичних цілей, особливо через програми декарбонізації та розвиток низьковуглецевих транспортних технологій [23]. Для виходу на траєкторію досягнення нульових викидів CO₂

до 2050 року, викиди транспортного сектору повинні скорочуватися більш ніж на 3% щорічно.

Сталість у логістиці виходить за межі простого переміщення товарів з точки А в точку Б. Вона охоплює багатогранний підхід, спрямований на мінімізацію екологічного впливу транспортних та дистрибуційних процесів при забезпеченні економічної життєздатності та соціальної відповідальності [49]. У своїй основі стала логістика прагне збалансувати потреби сьогодення, не компрометуючи здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби.

Отже, впровадження сталих логістичних практик приносить відчутні бізнес-переваги. Насамперед, прийняття сталих практик допомагає компаніям знизити витрати, пов'язані зі споживанням ресурсів та управлінням відходами. Оптимізуючи транспортні маршрути, підвищуючи паливну ефективність та мінімізуючи відходи пакування, логістичні компанії можуть досягти значної економії витрат на паливо та матеріали.

1.2 Теоретичні підходи до трактування технологій штучного інтелекту та особливості їх застосування в логістичних процесах

Штучний інтелект (Artificial Intelligence, AI) являє собою галузь комп'ютерних наук, що спрямована на створення систем, здатних виконувати завдання, які традиційно вимагають людського інтелекту – навчання, розпізнавання образів, прийняття рішень, розуміння природної мови та вирішення проблем [52]. В останні роки інтеграція AI у логістичну оптимізацію привернула значну увагу, особливо в контексті критеріїв сталого розвитку.

Машинне навчання (Machine Learning, ML) є підгалуззю AI, що дозволяє комп'ютерним системам навчатися на основі спостережень за даними без явного програмування. ML-алгоритми поділяються на чотири основні категорії: навчання з учителем (supervised learning), навчання без учителя (unsupervised learning), напівкероване навчання (semi-supervised learning) та

навчання з підкріпленням (reinforcement learning). Кожен тип має специфічні застосування в логістиці [52].

Глибоке навчання (Deep Learning, DL) є підмножиною машинного навчання, що використовує багатошарові нейронні мережі для обробки складних даних та виявлення прихованих закономірностей. Багатошаровий перцептрон (Multilayer Perceptron, MLP) є поширеним типом нейронної мережі, що застосовується в різних сферах, включаючи розрахунок системного навантаження, прогнозування функціональних підходів та аналіз складних систем [17].

Таблиця 1.3

Класифікація технологій штучного інтелекту та їх застосування в логістиці

Технологія AI	Характеристика	Застосування в логістиці
Машинне навчання (ML)	Навчання на даних, виявлення закономірностей, прогнозування	Прогнозування попиту, оптимізація маршрутів, предиктивне обслуговування
Глибоке навчання (DL)	Багатошарові нейронні мережі, обробка неструктурованих даних	Розпізнавання образів, автономне водіння, обробка зображень
Обробка природної мови (NLP)	Розуміння та генерація людської мови	Чат-боти, аналіз документів, голосові асистенти
Комп'ютерний зір	Аналіз та інтерпретація візуальної інформації	Контроль якості, сортування, складська автоматизація
Навчання з підкріпленням	Навчання через взаємодію з середовищем та винагороди	Планування маршрутів, управління запасами, роботизація
Генеративний AI (GAI)	Створення нового контенту, симуляція сценаріїв	Оцінка життєвого циклу, планування декарбонізації, звітність

Джерело: систематизовано автором на основі [17; 30; 52].

Генеративний штучний інтелект (Generative AI, GAI) має трансформаційний потенціал, що перевершує традиційні AI-парадигми. Системи GAI є особливо важливими для оцінки життєвого циклу, планування декарбонізації та звітності зі сталості завдяки їх здатності синтезувати складні набори даних у корисні висновки, моделювати екологічні сценарії та автономно пропонувати нові підходи [30].

Застосування AI у логістиці є різноманітним та трансформаційним, охоплюючи предиктивну аналітику для точного прогнозування попиту, складні моделі машинного навчання для оптимізації маршрутів доставки та AI-керовані стратегії підвищення паливної ефективності [37]. Ці передові розробки дозволяють компаніям значно зменшити свій вуглецевий слід, максимізувати завантаження транспортних засобів та мінімізувати викиди.

Оптимізація маршрутів є одним з основних застосувань AI у логістиці, спрямованим на підвищення екологічної сталості при збереженні операційної ефективності. AI-керована оптимізація маршрутів інтегрує потоки даних про трафік у реальному часі, погодні оновлення та метрики продуктивності транспортних засобів для динамічного визначення найбільш паливо-ефективних маршрутів для вантажних перевезень та доставки «останньої милі» [15].

Алгоритми машинного навчання додатково сприяють предиктивному обслуговуванню, стратегіям електрифікації автопарку та прогнозуванню попиту, забезпечуючи операційну сталість. Дослідження демонструють, що AI-системи оптимізують процеси повернення, обираючи найбільш паливо-ефективні маршрути, що значно знижує вуглецевий слід операцій зворотної логістики [46].

Предиктивна аналітика для прогнозування попиту, що забезпечується AI-алгоритмами, має значний потенціал для покращення показників сталості логістичних компаній. Аналізуючи історичні дані продажів, ринкові тренди та зовнішні фактори, такі як сезонні варіації та економічні індикатори, AI-алгоритми можуть прогнозувати майбутній попит на продукцію з надзвичайною точністю [59]. Табл.1.4.

Управління запасами є фундаментальним аспектом логістичних операцій, і його ефективність має прямий вплив на екологічну сталість.

Впровадження AI у цій сфері дозволило логістичним компаніям досягти безпрецедентного рівня точності та ефективності, значно зменшуючи відходи

та викиди. Одним з основних внесків AI в управління запасами є його здатність прогнозувати попит з надзвичайною точністю [59].

Таблиця 1.4

Основні напрямки застосування AI у логістиці для досягнення сталості

Напрямок	AI-рішення	Екологічний ефект
Оптимізація маршрутів	ML-алгоритми, обробка даних в реальному часі, динамічне планування	Скорочення пробігу на 10-20%, зниження витрат палива та викидів
Прогнозування попиту	Предиктивна аналітика, часові ряди, нейронні мережі	Зменшення надлишкових запасів на 20-30%, оптимізація поставок
Предиктивне обслуговування	IoT-сенсори, аналіз аномалій, ML-моделі	Продовження терміну служби обладнання, зниження аварійних ремонтів
Управління запасами	Алгоритми оптимізації, прогнозування, автоматизація	Зменшення відходів, оптимізація складських площ, енергоефективність
Відстеження викидів	IoT, блокчейн, аналітика великих даних	Прозорість вуглецевого сліду, ідентифікація точок скорочення
Автономний транспорт	Комп'ютерний зір, сенсорні системи, DL	Оптимальний стиль водіння, зниження споживання палива на 4-10%

Джерело: узагальнено автором на основі [15; 37; 46].

AI революціонує логістичну галузь, пропонуючи інноваційні рішення для покращення показників сталості. Використовуючи потужність AI-керованих алгоритмів та аналітики даних, логістичні компанії можуть оптимізувати свої операції, зменшити екологічний вплив та підвищити загальну сталість у кількох ключових сферах [67].

Таким чином, важливим аспектом є здатність AI виконувати оцінку життєвого циклу варіантів пакування, оцінюючи їх екологічний вплив від виробництва до утилізації. Цей комплексний аналіз допомагає компаніям зрозуміти справжню сталість різних варіантів пакування, дозволяючи приймати обґрунтовані рішення, що пріоритизують довгострокові екологічні переваги [59].

1.3 Система екологічних індикаторів логістичної діяльності, методи їх оцінювання та нормативно-правові вимоги

Ключові показники ефективності (Key Performance Indicators – далі KPIs) у сталому ланцюзі постачання є критичними метриками, що оцінюють результативність впровадження практик, узгоджених з «зеленою» логістикою. Ці метрики дозволяють вимірювати екологічні, соціальні та економічні аспекти операцій ланцюга постачання, забезпечуючи сталість та відповідність міжнародним регуляціям [63].

Екологічні KPI зосереджуються на вимірюванні та покращенні ключових аспектів, таких як: вуглецевий слід та викиди парникових газів; ефективність використання ресурсів та енергії; генерація та утилізація відходів; споживання води; вплив на біорізноманіття. Моніторинг цих показників дозволяє ідентифікувати зони для покращення та оптимізувати операційну ефективність при одночасному зниженні витрат [63].

Таблиця 1.5

Система екологічних KPI для оцінки сталості логістичних операцій

Категорія KPI	Показник	Одиниця виміру	Бенчмарк
Вуглецевий слід	Викиди CO ₂ на тонно-км	г CO ₂ /т·км	50-100
Енергоефективність	Споживання енергії на одиницю	кВт·год/од.	галузевий
Паливна ефективність	Витрата палива на 100 км	л/100 км	25-35 (вантажівки)
Утилізація відходів	Частка відвернутих від полігону	%	>75%
Переробка	Частка переробленої упаковки	%	>65%
Екологічний транспорт	Частка EV/альт. палива в автопарку	%	>20% до 2030
Точність доставки	Доставка вчасно з першої спроби	%	>95%

Джерело: систематизовано автором на основі [32; 63; 68].

Методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment – далі LCA) є фундаментальним інструментом для оцінки екологічного впливу логістичних операцій. LCA дозволяє кількісно визначити вплив продукту або послуги на всіх етапах життєвого циклу – від видобутку сировини до кінцевої утилізації. Стандарти ISO 14040 та ISO 14044 забезпечують методологічну основу для проведення LCA та порівняння альтернативних рішень [40].

Триєдиний підхід (Triple Bottom Line – далі TBL), вперше запропонований Елкінгтоном у 1998 році, є способом вимірювання сталої результативності бізнесу. Він включає три виміри: екологічний (негативний або позитивний вплив бізнесу на відповідальне використання природних ресурсів, обсяг генерованих або перероблених відходів та викидів); соціальний (вплив на стейкхолдерів – клієнтів, партнерів, постачальників, працівників та місцеві громади); економічний (вплив на економіку через створення робочих місць, сприяння інноваціям, дотримання регуляцій та відповідальне створення багатства) [32].

Глобальна ініціатива звітності (Global Reporting Initiative далі – GRI) та Ініціатива науково обґрунтованих цілей (Science Based Targets initiative, SBTi) є ключовими рамками для звітності та встановлення цілей у сфері сталості. Стандарти GRI визначають методологію звітності про екологічну результативність, включаючи викиди, енергоспоживання, воду та відходи. SBTi допомагає компаніям встановлювати цілі скорочення викидів, узгоджені з науковими рекомендаціями щодо обмеження глобального потепління [65].

Стандарт ISO 14001 є міжнародно визнаним стандартом для систем екологічного менеджменту (Environmental Management System – далі EMS). Він надає рамку, яку організації можуть використовувати для проектування та впровадження ефективної EMS та постійного покращення екологічної результативності [40]. Станом на 2024 рік понад 500 000 організацій у більш ніж 180 країнах світу сертифіковані за ISO 14001. Табл. 1.6.

Стандарти ISO у сфері екологічного управління логістикою

Стандарт	Призначення	Застосування в логістиці
ISO 14001:2015	Системи екологічного менеджменту — вимоги та керівництво	Комплексне управління екологічним впливом логістичних операцій
ISO 14040/14044	Оцінка життєвого циклу — принципи, рамки, вимоги	Оцінка екологічного впливу логістичних послуг та продуктів
ISO 14083	Кількісна оцінка викидів ПГ у ланцюгах постачання	Стандартизований облік вуглецевого сліду логістики
ISO 50001	Системи енергетичного менеджменту	Управління енергоспоживанням на складах та в транспорті
ISO 14064	Облік та верифікація парникових газів	Звітність про викиди ПГ за Score 1, 2, 3

Джерело: складено на основі даних ISO [40; 41].

Поправка ISO 14001:2015/Amd 1:2024 вносить зміни щодо кліматичних дій, посилюючи фокус на кліматичній стійкості, біорізноманітті та мисленні життєвого циклу. Очікується, що 4-та редакція ISO 14001 буде опублікована у другому кварталі 2026 року. Це підкреслює динамічний характер стандартизації та необхідність постійного оновлення систем управління [41].

Протокол парникових газів (GHG Protocol) визначає методологію обліку викидів за трьома областями: Score 1 (прямі викиди від джерел, що належать або контролюються організацією), Score 2 (непрямі викиди від придбаної енергії) та Score 3 (усі інші непрямі викиди в ланцюзі постачання) [65]. Для логістичних компаній Score 3 є особливо важливим, оскільки охоплює викиди від транспортування, дистрибуції та використання продукції.

Вимоги Директиви CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) з 2024 року зобов'язують великі компанії звітувати про свої ESG-показники, включаючи екологічну результативність. Це стимулює впровадження комплексних систем моніторингу екологічних індикаторів та забезпечує прозорість для стейкхолдерів [25].

Методи та інструменти оцінювання екологічної ефективності логістики

Метод/Інструмент	Призначення	Переваги для AI-інтеграції
LCA (оцінка ЖЦ)	Комплексна оцінка впливу на всіх етапах	AI автоматизує збір даних та розрахунки, підвищує точність
Carbon Footprint	Вимірювання вуглецевого сліду	ML-моделі прогнозують викиди, оптимізують маршрути
Збалансована система показників	Багатовимірна оцінка результативності	AI-аналітика інтегрує дані з різних джерел
Бенчмаркінг	Порівняння з галузевими лідерами	AI ідентифікує найкращі практики та gaps
IoT-моніторинг	Збір даних у реальному часі	AI обробляє потоки даних, виявляє аномалії
Блокчейн-трасування	Прозорість та верифікація даних	AI аналізує ланцюги для оптимізації

Джерело: узагальнено автором на основі [63; 68; 65].

Провідні компанії досягають скорочення вуглецевих викидів на 20% протягом п'яти років завдяки комплексним програмам «зеленої» логістики. Бенчмарком вважається досягнення 5% щорічного скорочення як стандартної цілі [68]. Використання екологічних KPI для відстеження споживання енергії під час транзиту дозволяє логістичним компаніям ідентифікувати зони для покращення показників сталості.

Відстеження викидів парникових газів (ПГ) приносить користь планеті, а також допомагає компаніям формувати сприятливу репутацію та залишатися конкурентоспроможними у швидко змінюваному ландшафті. Майбутнє передбачає, що перевізники повинні прагнути отримати гнучкість та інсайти, необхідні для побудови сталих ланцюгів постачання в режимі реального часу [68].

Технології штучного інтелекту та машинного навчання продовжуватимуть прогресувати, дозволяючи перевізникам моніторити ланцюги постачання, ідентифікувати зони для покращення та швидко впроваджувати коригувальні заходи. Відстеження KPI сталості також надає

глибший інсайт щодо екологічного та соціального впливу логістичних операцій.

Кліматичні зміни суттєво впливають на логістичні компанії, і цей вплив лише посилюватиметься. Для досягнення цілей сталості постачальники логістичних послуг повинні впроваджувати КРІ ланцюга постачання, розроблені для відстеження прогресу та моніторингу стратегій покращення у боротьбі за збереження планети [68].

Інтеграція AI у системи моніторингу вуглецевого сліду забезпечує трансформаційні можливості для логістичних операцій. Моніторинг викидів у реальному часі через IoT-сенсори, встановлені на транспортних засобах, складах та обладнанні, дозволяє організаціям постійно відстежувати свої вуглецеві викиди, а не покладатися на застарілі періодичні звіти. Відстеження в реальному часі дозволяє оперативнo вживати коригувальних заходів та покращувати екологічний контроль, особливо в динамічному логістичному середовищі [53].

AI-алгоритми стали революційним інструментом у логістичній оптимізації. Традиційні підходи, такі як алгоритм Дейкстри, поступаються місцем більш досконалим AI-рішенням. Дослідження демонструють 30% зниження викидів CO₂ на маршрут завдяки AI-оптимізації. Таке скорочення стало можливим завдяки комплексним AI-оптимізаціям, зокрема у плануванні маршрутів, що дозволило максимально ефективно використовувати ресурси [53].

AI-керовані системи інтелектуального планування дозволили компаніям знизити щоденне споживання енергії на 15%. Завдяки аналізу та прогнозуванню попередніх моделей використання та годин пікового попиту, AI оптимізував функціонування різних складських систем – освітлення, опалення, вентиляції та кондиціонування, вилкових навантажувачів – забезпечуючи їх роботу лише за необхідності [53]. Табл.1.8.

Ефективність AI-рішень у скороченні екологічного впливу логістики

AI-рішення	Середнє скорочення викидів	Економія витрат	Термін окупності
Оптимізація маршрутів	15-30%	10-20%	6-12 міс.
Предиктивне обслуговування	5-10%	25-30%	12-18 міс.
Інтелектуальне планування складу	10-15%	15-25%	12-24 міс.
Прогнозування попиту	10-20%	5-15%	6-12 міс.
Еко-драйвінг	4-10%	8-15%	3-6 міс.
Консолідація вантажів	15-25%	10-20%	6-12 міс.

Джерело: узагальнено автором на основі [67; 53; 45].

Особливою перевагою AI-систем у логістичних операціях є масштабованість та можливості роботи в реальному часі. Ці властивості дозволяють швидко адаптуватися до змін у попиті, трафіку, погодних умовах та інших факторах, що впливають на логістичні операції. Здатність автоматизувати управління енергією в реальному часі забезпечила згладжування складських операцій, скорочення операційних витрат та загальне підвищення енергоефективності.

Глобальна компанія морських перевезень CMA CGM у 2024 році уклала партнерство з Google Cloud для розгортання AI по всій своїй глобальній логістичній мережі. Система ORION компанії UPS демонструє, як AI може бути інтегрований у доставку «останньої милі» для підтримки як контролю витрат, так і сталості [45]. Ці приклади ілюструють практичне застосування AI для досягнення екологічних цілей.

Шведський національний залізничний оператор Green Cargo застосовує AI для покращення планування та скорочення порожніх рейсів вагонів. Оскільки 96% його вантажів вже транспортується електричними потягами, компанія використовує AI для подальшого зниження споживання енергії та підвищення операційної ефективності. Система підтримує оптимізацію на рівні всієї мережі, роблячи залізничний транспорт більш

конкурентоспроможним порівняно з видами транспорту з вищими викидами [45].

Внесок AI у «зелену» логістику полягає не в радикальному руйнуванні, а в цілеспрямованому покращенні ефективності. Забезпечуючи розумнішу маршрутизацію, прогнозування попиту та відстеження викидів, AI допомагає постачальникам логістичних послуг підвищувати ефективність при одночасному зниженні екологічного впливу. Табл.1.9.

Таблиця 1.9

Порівняння традиційних та AI-керованих методів оцінки екологічного впливу

Критерій	Традиційні методи	AI-керовані методи
Збір даних	Ручний, періодичний, схильний до помилок	Автоматичний, в реальному часі, точний
Точність оцінки	Низька-середня ($\pm 20-30\%$)	Висока ($\pm 5-10\%$), покращення на 14%
Швидкість обробки	Дні-тижні	Секунди-хвилини
Адаптивність	Статичні моделі, ручне оновлення	Динамічні моделі, самонавчання
Масштабованість	Обмежена, лінійне зростання витрат	Висока, маргінальні витрати знижуються
Прогнозування	Обмежене, на основі трендів	Багатофакторне, сценарне моделювання
Оптимізація	Ретроспективна, ручна	Проактивна, автоматична

Джерело: розроблено автором на основі [17; 53; 45].

Традиційне відстеження вуглецю в логістиці здійснювалося вручну шляхом збору даних про споживання палива та пройденої відстані через журнали водіїв або записи про відправлення. Такі вхідні дані зазвичай оброблялися через електронні таблиці та звичайні бази даних коефіцієнтів викидів для оцінки екологічного впливу. Хоча такі методи є доступними та економічними, вони часто недостатньо точні та не масштабуються для складних ланцюгів постачання [53].

Крім того, традиційним методам бракує зворотного зв'язку в реальному часі та гнучкості для динамічної зміни операцій. Це обмеження не дозволяє

організаціям приймати своєчасні, засновані на даних рішення, які оперативно вирішують питання скорочення викидів. AI-підхід забезпечує покращення точності прогнозування на 14% порівняно з базовими статистичними методами та середнє скорочення викидів CO₂ на 8% [53].

Різні AI-алгоритми, такі як штучні нейронні мережі та машини опорних векторів, використовуються для управління трафіком та прогнозування викидів CO₂. Зростаючий глобальний ринок AI-технологій у транспорті пояснюється їх потенціалом аналізувати історичні дані та оптимізувати різні аспекти транспортних систем. AI є перспективним інструментом для управління вуглецевим слідом у цьому секторі [54].

Прозорість ланцюга постачання стає критично важливою для сталої логістики та етичного бізнесу. У міру зростання екологічних занепокоєнь компанії шукають глибшу аналітику ланцюга постачання для виявлення та вирішення екологічних ризиків. AI може покращити відкритість, прийняття рішень та підзвітність. AI-керовані системи забезпечують комплексне відстеження продуктів та матеріалів, інтегруючи дані з GPS-трекерів, сенсорів та програмного забезпечення управління ланцюгом постачання [59].

Впровадження AI-рішень у логістиці супроводжується певними викликами. Високі початкові витрати на впровадження AI-систем вимагають значних інвестицій у технології та навчання персоналу. Залежність від якості даних означає, що AI-системи значною мірою покладаються на точні та комплексні дані для оптимальної продуктивності. Проблеми безпеки даних та інтеграції з існуючими системами також потребують вирішення [67].
Табл.1.10.

Електричні логістичні транспортні засоби (ELV) все частіше розглядаються як заміна традиційних транспортних засобів на паливі для зниження викидів у міській логістиці. Однак ELV зазвичай обмежені ємністю батареї та вантажопідйомністю. Ефективне планування заряджання та управління тривалістю транспортування є критичними факторами, що

потребують вирішення. Глибоке навчання з підкріпленням пропонує інноваційні підходи до планування з низьким споживанням енергії [50].

Таблиця 1.10

Переваги та виклики впровадження AI у «зелену» логістику

Переваги	Виклики
Покращення екологічної результативності: скорочення відходів, викидів, споживання ресурсів	Високі початкові інвестиції: значні витрати на технології та навчання
Економія витрат: зниження витрат на паливо, оптимізація операцій	Залежність від якості даних: необхідність точних та комплексних даних
Підвищення ефективності: автоматизація, оптимізація в реальному часі	Проблеми інтеграції: складність впровадження в існуючі системи
Покращення іміджу: довіра стейкхолдерів, конкурентна перевага	Питання безпеки: обробка великих обсягів чутливих даних
Масштабованість: здатність обробляти зростаючі обсяги	Кадрові виклики: потреба у фахівцях з AI та аналітики
Сталість: досягнення екологічних цілей та регуляторна відповідність	Регуляторна невизначеність: еволюція вимог до AI та даних

Джерело: систематизовано автором на основі [59; 67; 45].

Швидке зростання викидів вуглецю від логістичної транспортної галузі підкреслило нагальну потребу в низьковуглецевих логістичних рішеннях. Планування підходів до інтеграції зарядних станцій та відновлюваних джерел енергії у низьковуглецеву логістичну доставку стає пріоритетним напрямком досліджень та практичних впроваджень [50].

Майбутнє AI у логістиці передбачає ще глибшу інтеграцію з іншими технологіями – Інтернетом речей (IoT), блокчейном, автономними транспортними засобами та цифровими двійниками. Конвергенція цих технологій створить «розумні» ланцюги постачання, здатні до самооптимізації та адаптації в реальному часі. Компанії, що ефективно використовуватимуть AI, отримають значну конкурентну перевагу, забезпечуючи швидші, розумніші та екологічніші логістичні рішення [67].

Узагальнюючи теоретичний аналіз, можна констатувати, що штучний інтелект трансформує логістичну галузь, створюючи нові можливості для

досягнення екологічних цілей. Інтеграція AI з системами екологічного моніторингу, стандартами ISO та регуляторними вимогами формує комплексний інструментарій для управління екологічною результативністю логістичних операцій. Подальший розвиток цього напрямку визначатиметься як технологічним прогресом, так і посиленням регуляторного тиску у сфері сталого розвитку.

Система управління ланцюгами постачання (Supply Chain Management, SCM) зазнає кардинальних змін під впливом AI-технологій. Оптимізація ланцюга постачання є критично важливою для успіху та зростання компанії. Ефективний та оптимізований ланцюг постачання необхідний для задоволення зростаючих вимог клієнтів та збереження конкурентоспроможності. На національному рівні логістичні та мережі ланцюгів постачання є ключовими драйверами загального економічного та соціального розвитку [69].

Мультиmodalьна логістика є важливим напрямком для зниження екологічного впливу транспортних операцій. Комбінування різних видів транспорту – залізничного, морського, автомобільного та повітряного — дозволяє оптимізувати вуглецевий слід за рахунок використання найбільш ефективних режимів для кожного сегменту маршруту. AI-системи здатні аналізувати комплексні мультиmodalьні мережі та пропонувати оптимальні рішення з урахуванням екологічних критеріїв.

Впровадження принципів циркулярної економіки – таких як переробка, повторне використання та зменшення відходів – дозволяє логістичним операціям значно скоротити генерацію відходів, сприяючи більш сталому виробництву та споживанню. AI-технології підтримують реалізацію цих принципів через оптимізацію процесів сортування, прогнозування обсягів повернень та координацію реверсивних логістичних потоків [52].

Таблиця 1.11

Узагальнення теоретичних підходів до інтеграції AI та екологічних індикаторів логістики

Теоретичний підхід	Ключові положення	Роль AI	Рівень зрілості
Зелена логістика	Мінімізація екологічного впливу транспорту та складування	Оптимізація маршрутів, прогнозування	Високий
Стала логістика (TBL)	Баланс економіки, екології, соціуму	Комплексна аналітика KPI	Середній
Низьковуглецева логістика	Декарбонізація, електрифікація, альт. палива	Управління EV-флотом, планування заряджання	Середній
Циркулярна логістика	Замкнені цикли, переробка, реверс	Прогнозування повернень, сортування	Низький-середній
Розумна логістика 4.0	IoT, автоматизація, цифрові двійники	Центральна роль AI у всіх процесах	Середній

Джерело: авторське узагальнення

Концепція Логістики 4.0 передбачає повну цифровізацію та інтелектуалізацію логістичних процесів з використанням кіберфізичних систем, Інтернету речей, хмарних обчислень та штучного інтелекту. У контексті екологічної сталості Логістика 4.0 забезпечує безпрецедентні можливості для моніторингу, аналізу та оптимізації екологічних показників у режимі реального часу по всьому ланцюгу постачання.

Автономні транспортні засоби представляють наступний рубіж у «зеленій» логістиці. Еко-драйвінг є однією з ключових переваг автономного вантажоперевезення. Автономні транспортні засоби можуть бути запрограмовані для виконання найкращих практик водіння. Дослідження демонструють, що лише еко-драйвінг може досягти скорочення споживання палива на 4-10% [45]. У поєднанні з електрифікацією автономний транспорт здатний забезпечити скорочення викидів ПГ до 90% на вантаж.

Передова аналітика та AI/ML генерують бізнес-можливості, які потім стимулюють покращення по всій транспортній мережі – включаючи консолідацію вантажів, рекомендації щодо завантаження та предиктивне

узгодження вантажів. Ці можливості створюють позитивний зворотний зв'язок між економічною ефективністю та екологічною результативністю [45].

Регіональна диференціація у впровадженні AI для «зеленої» логістики є значною. Європейський Союз лідирує завдяки жорсткому регуляторному середовищу та амбітним кліматичним цілям. Північна Америка демонструє високий рівень корпоративних ініціатив, особливо серед технологічних компаній та великих роздрібних мереж. Азійсько-Тихоокеанський регіон швидко розвивається, зокрема Китай інвестує значні ресурси в електрифікацію логістики та AI-технології.

Малий та середній бізнес (МСБ) стикається з особливими викликами у впровадженні AI для екологічної оптимізації логістики. Обмежені фінансові та людські ресурси, брак технічної експертизи та складність інтеграції з існуючими системами є основними бар'єрами. Водночас розвиток хмарних AI-платформ та моделей Software-as-a-Service (SaaS) відкриває нові можливості для МСБ отримати доступ до передових технологій без значних капітальних інвестицій.

Етичні аспекти застосування AI у логістиці включають питання конфіденційності даних, прозорості алгоритмів та впливу на зайнятість. Збір та обробка великих обсягів даних про транспортні потоки, споживання енергії та екологічні показники потребує належного захисту персональної інформації. Прозорість AI-рішень стає все більш важливою для забезпечення довіри стейкхолдерів та регуляторної відповідності.

Таким чином, теоретичний аналіз демонструє, що штучний інтелект є трансформаційною технологією для досягнення екологічних цілей міжнародної логістики. Синтез концепцій «зеленої» логістики, сталого розвитку та AI-технологій формує нову парадигму екологічно відповідального управління ланцюгами постачання. Практична реалізація цієї парадигми вимагає комплексного підходу, що поєднує технологічні інновації, регуляторну відповідність, організаційні зміни та розвиток людського капіталу.

Система управління ланцюгами постачання (Supply Chain Management, SCM) зазнає кардинальних змін під впливом AI-технологій. Оптимізація ланцюга постачання є критично важливою для успіху та зростання компанії. Ефективний та оптимізований ланцюг постачання необхідний для задоволення зростаючих вимог клієнтів та збереження конкурентоспроможності. На національному рівні логістичні мережі та мережі ланцюгів постачання є ключовими драйверами загального економічного та соціального розвитку [69].

Через оптимізацію транспортних та пакувальних процесів логістика може мінімізувати споживання ресурсів та зменшити екологічний слід. Також критично важливим є забезпечення ефективного планування та дизайну складів, а також оптимізація процесів комплектації, пакування та відвантаження для оптимізації операцій та скорочення часу циклу.

Впровадження принципів циркулярної економіки – таких як переробка, повторне використання та зменшення відходів – дозволяє логістичним операціям значно скоротити генерацію відходів, сприяючи більш сталому виробництву та споживанню. Кліматичні дії (SDG 13) закликають до невідкладних заходів для боротьби зі зміною клімату та її наслідками [52].
Табл.1.11.

Вуглекислий газ є основним фактором глобальної зміни клімату. За даними Our World in Data, глобальні викиди CO₂ від викопного палива та промисловості досягли загалом 37,15 млрд тонн. Аналіз демонструє кілька важливих тенденцій: Китай спостерігає значне зростання викидів CO₂ з початку 2000-х років, досягнувши майже 12 млрд тонн на рік, що робить його найбільшим глобальним емітентом. США підтримують високі, але відносно стабільні рівні викидів з незначним зниженням протягом останнього десятиліття. Разом Китай та США відповідальні за майже половину глобальних викидів CO₂ [52].

Цілі сталого розвитку ООН та їх релевантність для AI-трансформації логістики

SDG	Назва цілі	Роль AI у логістиці для досягнення цілі
SDG 7	Доступна та чиста енергія	AI-оптимізація енергоспоживання складів та транспорту; інтеграція ВДЕ
SDG 9	Промисловість, інновації, інфраструктура	AI-інфраструктура для розумної логістики; автоматизація; цифровізація
SDG 11	Сталі міста та громади	AI-оптимізація міської логістики; зниження заторів; електрифікація доставки
SDG 12	Відповідальне споживання та виробництво	AI-прогнозування попиту для зменшення відходів; оптимізація упаковки
SDG 13	Кліматичні дії	AI-відстеження та скорочення викидів; оптимізація маршрутів; декарбонізація
SDG 17	Партнерство заради цілей	AI-платформи для координації між учасниками ланцюга постачання

Джерело: систематизовано автором на основі [52; 69]

27 країн-членів Європейського Союзу (ЄС-27) успішно скоротили свої викиди протягом останніх трьох десятиліть, наразі випускаючи близько 2,7 млрд тонн на рік. Європейський закон про клімат зобов'язує Європу досягти кліматичної нейтральності до 2050 року з проміжною ціллю скорочення чистих викидів парникових газів щонайменше на 55% до 2030 року [52]. Ці тенденції підкреслюють потребу в потужних кліматичних політиках та глобальній співпраці, особливо серед найбільших емітентів.

Методологічна рамка Green SCOR є варіантом моделі SCOR, що включає екологічні питання в процесі управління ланцюгами постачання. Цей підхід дозволяє оцінювати ефективність «зеленого» управління ланцюгами постачання з урахуванням екологічних критеріїв. Ключові показники ефективності (КПІ) ідентифікуються на основі оцінки ефективності «зеленого» ланцюга постачання, документації та корпоративних консультацій [60].

Модель Аналітичного Ієрархічного Процесу (Analytic Hierarchy Process, АНР) використовується для вимірювання показників сталості постачальників логістичних послуг. АНР є підходом багатокритеріального прийняття рішень

(MCDM), що дозволяє надавати відносну важливість кожному виміру/показнику, а потім порівнювати підвиміри або підпоказники під кожним виміром. Зважені та оцінені показники агрегуються за допомогою лінійної адитивної агрегації для побудови комплексного індексу сталості [65].

Показники сталості для постачальників логістичних послуг ідентифікуються на основі огляду літератури, Глобальної ініціативи звітності (GRI) та експертних думок. Запропонована модель дозволяє організаціям оцінювати своїх постачальників логістичних послуг на основі їхньої сталості та обирати найбільш відповідних логістичних партнерів.

Модель Triple Bottom Line (TBL) та застосування Global Reporting Initiatives (GRI) є двома основними моделями вимірювання екологічної сталості логістики. Набір екологічних показників пропонується за п'ятьма категоріями: енергія, транспорт та інфраструктура, шум, викиди та відходи. Кожна категорія включає специфічні кількісні та якісні показники для комплексної оцінки [65].

Таблиця 1.12

Узагальнення теоретичних підходів до оцінки екологічної ефективності логістики

Підхід/Модель	Основні компоненти	Застосування AI
Triple Bottom Line (TBL)	Економічний, екологічний, соціальний виміри	AI-збалансована оптимізація трьох вимірів; прогнозування впливу
Green SCOR	Plan, Source, Make, Deliver, Return + Green	AI-моніторинг екологічних KPI на кожному етапі SCOR
GRI Standards	Структурована звітність за категоріями впливу	AI-автоматизація збору даних та формування звітів
AHP/MCDM	Ієрархія критеріїв, попарні порівняння, агрегація	AI-оптимізація вагових коефіцієнтів; автоматизація оцінки
BSC (Balanced Scorecard)	Фінанси, клієнти, процеси, навчання	AI-інтеграція екологічних KPI; предиктивна аналітика
DEA	Оцінка відносної ефективності; input/output	AI-визначення ефективного фронтиру; бенчмаркінг

Джерело: узагальнено автором на основі [32; 65; 60]

Управління сталістю логістики часто включає множинні виміри та показники, що є складними для оцінки. Комплексні індекси допомагають

агрегувати всі виміри та показники в єдине вимірювання, яке легко інтерпретувати, порівнювати та застосовувати для прийняття рішень. AI-технології відіграють критичну роль у забезпеченні такої агрегації та інтерпретації в реальному часі.

Набір ключових показників ефективності для «зелених» транспортних коридорів був протестований у рамках проекту SuperGreen, що фінансувався ЄС для підтримки Плану дій з вантажної логістики щодо питань «зелених» коридорів. Цей набір КРІ має паралелі в економічній та екологічній сферах з пропонуванним набором показників проекту та включає показники, пов'язані з логістичними процесами в межах «зелених» транспортних коридорів, зокрема частоту, транспортні витрати та час транспортування [58].

«Зелені» транспортні коридори характеризуються як європейські транзитні маршрути з концентрацією вантажного трафіку між основними хабами та відносно великими відстанями транспортування, що відзначаються зниженим екологічним та кліматичним впливом, підвищеною безпекою та ефективністю із застосуванням сталих логістичних рішень, інтермодальності, інформаційно-комунікаційної інфраструктури, спільних та відкритих правових регуляцій та стратегічно розташованих перевалочних вузлів.

Теоретичні основи «зелених» транспортних коридорів пов'язані з аспектами сталості, мультимодальності, мережевих концепцій та концепцій ланцюгів постачання. AI-технології забезпечують інтеграцію цих аспектів через: оптимізацію вибору виду транспорту; вибір правильного обладнання; оптимальне використання палива з урахуванням ризиків, пов'язаних з витратами, часом виконання, екологічною результативністю [58].

Отже, система контролю управління та існуючі системи КРІ для «зелених» транспортних коридорів наголошують на аспектах сталості, зростання та міжорганізаційної співпраці, часто не враховуючи ризики, пов'язані з характеристиками ланцюга постачання коридору. Мультимодальні виклики в межах «зелених» транспортних коридорів, пов'язані з питаннями

«зеленого» SCM, включають вибір правильного виду транспорту, використання правильного обладнання та правильного палива.

Висновки до першого розділу

1. Міжнародна логістика є критично важливим сектором для реалізації глобальних цілей сталого розвитку. Транспортний та логістичний сектор відповідає за 24% глобальних викидів CO₂, і за відсутності рішучих заходів цей показник може зрости до 40% до 2050 року. Систематизовано ключові концепції екологічно орієнтованої логістики: «зелена» логістика, стала логістика, еко-логістика, реверсивна логістика та низьковуглецева логістика, що мають спільні принципи мінімізації екологічного впливу при збереженні економічної ефективності.

2. Технології штучного інтелекту класифіковано за ключовими категоріями (машинне навчання, глибоке навчання, обробка природної мови, комп'ютерний зір, навчання з підкріпленням, генеративний AI) та узагальнено їх застосування в логістиці. Основними напрямками є: оптимізація маршрутів (скорочення пробігу на 10-20%), прогнозування попиту (зменшення надлишкових запасів на 20-30%), предиктивне обслуговування, управління запасами, відстеження викидів та автономний транспорт (зниження споживання палива на 4-10%).

3. Систематизовано систему екологічних індикаторів логістичної діяльності за категоріями: вуглецевий слід, енергоефективність, паливна ефективність, утилізація відходів, переробка, екологічний транспорт, точність доставки. Визначено методологічний інструментарій оцінювання (LCA, Carbon Footprint, TBL, бенчмаркінг) та нормативно-правову базу (ISO 14001, ISO 14083, ISO 14040/14044, ISO 50001, GHG Protocol, CSRD, Euro 7, LEZ). Встановлено, що інтеграція AI з екологічними системами моніторингу створює синергетичний ефект: AI автоматизує збір та обробку даних, підвищує точність оцінок, забезпечує прогнозування та оптимізацію в реальному часі.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ У МІЖНАРОДНІЙ ЛОГІСТИЦІ

2.1 Сучасні світові тенденції цифровізації та екологізації міжнародних логістичних систем із використанням штучного інтелекту

Глобальний ринок штучного інтелекту в логістиці демонструє експоненціальне зростання. За даними аналітичних агентств, обсяг ринку AI в логістиці зріс з 18,01 млрд дол. США у 2024 році до прогнозованих 26,33 млрд дол. США у 2025 році при сукупному середньорічному темпі зростання (CAGR) 46,2% [10]. Прогнозується, що до 2033 року глобальний ринок AI в логістиці досягне 549 млрд дол. США, демонструючи CAGR 46,7% протягом 2024-2033 років.

Цифрова логістика також переживає стрімке зростання: глобальний ринок цифрової логістики прогнозується на рівні 37,64 млрд дол. США у 2025 році з перспективою досягнення 120,33 млрд дол. США до 2032 року при CAGR 18,1% [28]. Північна Америка домінує на глобальному ринку з часткою 35,82% у 2024 році, тоді як Азійсько-Тихоокеанський регіон демонструє найвищі темпи зростання. Рис.2.1.

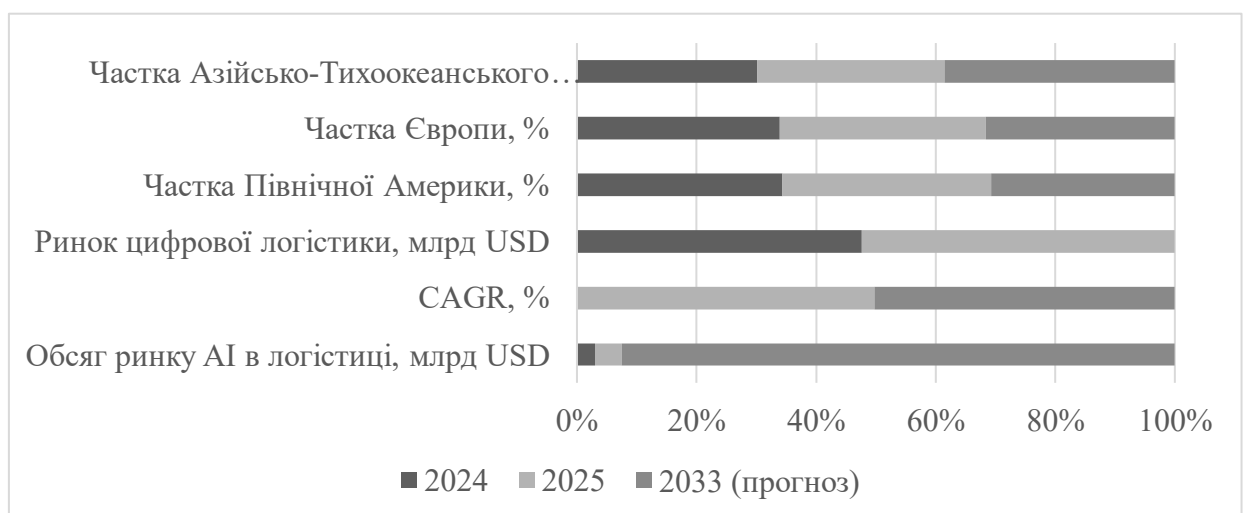


Рис. 2.1. Динаміка глобального ринку AI в логістиці, 2024-2033 рр.

Джерело: складено на основі [10; 28; 57].

За даними DHL, до 2024 року понад 65% логістичних компаній впровадили AI принаймні в одній частині своїх операцій [20]. FedEx прогнозує 50% зростання впровадження AI для оптимізації маршрутів та управління автопарком серед логістичних провайдерів з 2022 по 2024 рік. Європейський логістичний ринок оцінювався у 288,99 млрд дол.США у 2024 році з прогнозованим CAGR 6,6% до 2033 року, коли досягне 513,69 млрд дол.США [48]. Німеччина є найбільшим контрибутором на європейському логістичному ринку з часткою 25,5% у 2024 році. За даними Німецької інженерної асоціації, понад 60% німецьких логістичних компаній використовують AI-інструменти для оптимізації маршрутів, що дозволяє скоротити час доставки на 20%.

Ринок автоматизації логістики в Європі оцінювався у 23,28 млрд дол.США у 2024 році з прогнозом досягнення 73,39 млрд дол.США до 2033 року при CAGR 13,61% [47]. Ключові тренди включають: AI та машинне навчання, цифрові двійники, IoT-підключені склади, 5G-операції, коботи та автономні транспортні засоби. Сегмент програмного забезпечення очікує CAGR 18,7% протягом 2025-2033 років.

Таблиця 2.1

Рівень впровадження AI-технологій у логістиці за регіонами, 2024 р.

Регіон/Країна	Рівень впровадження AI, %	Ключові AI-застосування	Очікуване скорочення викидів
США	65%	Оптимізація маршрутів, прогнозування попиту	15-25%
Німеччина	60%	Складська автоматизація, управління автопарком	18-22%
Великобританія	52%	Last-mile доставка, предиктивне обслуговування	12-18%
Китай	58%	Роботизація, Smart warehousing	20-30%
Японія	48%	Автономні транспортні засоби, IoT-інтеграція	15-20%
Індія	35%	Цифрові платформи, базова автоматизація	10-15%

Джерело: систематизовано автором на основі [10; 20; 48; 47].

Звіт DHL Logistics Trend Radar 7.0 (2024) виділяє п'ять ключових AI-трендів для логістики: генеративний AI, етика AI, аудіо AI, комп'ютерний зір та розширена аналітика [20]. Ці тренди спрямовані на трансформацію логістичних процесів через використання складного аналізу та генерації даних, покращення взаємодії людини та комп'ютера, автоматизацію інтерпретації візуальних даних та автономну генерацію нового контенту на основі вивчених закономірностей.

Кластер сталості у звіті DHL висвітлює два ключові тренди: інфраструктуру відновлюваної енергії та сталі палива. Ці тренди є критичними для скорочення вуглецевих викидів, підвищення енергоефективності та забезпечення сталих операцій уздовж ланцюга постачання [20]. Електричні транспортні засоби займають важливе місце в радарі трендів: прогнозується зростання кількості EV з менш ніж 45 млн у 2023 році до 250 млн у 2030 році та 525 млн у 2035 році. Програма ЄС Digital Europe виділяє понад 9 млрд дол.США на AI та кібербезпеку в логістиці [61]. AI Act ЄС, що набув чинності з серпня 2024 року, спрямований на сприяння відповідальному впровадженню AI в різних галузях, включаючи логістику. Китай у грудні 2024 року створив комітет зі стандартизації AI, що свідчить про формування галузевих стандартів для впровадження AI.

Таблиця 2.2

Ключові AI-тренди в логістиці за DHL Logistics Trend Radar 7.0 (2024)

AI-тренд	Характеристика	Вплив на екологічні показники
Генеративний AI	Автономна генерація контенту, симуляція сценаріїв	Оптимізація планування декарбонізації, LCA-звітність
Комп'ютерний зір	Автоматизація візуальної інтерпретації даних	Контроль якості сортування, зменшення відходів
Розширена аналітика	Складний аналіз даних, предиктивне моделювання	Прогнозування викидів, оптимізація енергоспоживання
Аудіо AI	Голосова взаємодія, аналіз звуків	Предиктивне обслуговування, діагностика несправностей
Етика AI	Відповідальне впровадження, прозорість алгоритмів	Достовірність екологічної звітності, довіра стейкхолдерів

Джерело: складено на основі DHL Logistics Trend Radar 7.0 [20].

За попередніми оцінками 2024 року, викиди ПГ від транспорту в ЄС зросли на 0,7% порівняно з рівнем 2023 року. Країни-члени прогнозують, що внутрішні транспортні викиди досягнуть рівня 1990 року до 2030 року. Міжнародна авіація та морські викиди прогнозуються до подальшого зростання [26]. Автомобільний транспорт становить найбільшу частку загальних транспортних викидів – 73% усіх викидів ПГ транспорту ЄС у 2023 році.

Отже, транспортний сектор є найбільшим джерелом викидів парникових газів у Європейському Союзі та демонструє незначний прогрес у скороченні викидів протягом останніх десятиліть. Незважаючи на зусилля, такі як збільшення частки електричних транспортних засобів та просування низьковуглецевих палив, викиди транспорту знизилися лише незначно з 2005 року, з тимчасовим скороченням у 2020 році через COVID-19.

2.2. Оцінка стану екологічних показників міжнародної логістики з урахуванням наявних інструментів штучного інтелекту

Для детального аналізу обрано Європейський Союз як регіон та компанію DHL Group як провідного глобального логістичного оператора, що активно впроваджує AI-технології для досягнення екологічних цілей. Вибір обумовлений: лідерством ЄС у регуляторних ініціативах «зеленої» логістики; амбітними цілями European Green Deal; наявністю комплексних даних про екологічні показники; активним впровадженням AI-рішень провідними операторами.

У 2023 році в ЄС від спалювання палива автомобільним транспортом було викинуто близько 749 млн тонн вуглекислого газу. Легкові автомобілі та мотоцикли становили найбільшу частку викидів (61%), важкі вантажівки та автобуси –27%, легкі вантажівки – 12% [33]. Викиди вуглекислого газу від автомобільного транспорту зросли на 23% з 1990 року. Табл. 2.3.

Динаміка викидів CO₂ від автомобільного транспорту в ЄС, 1990-2023 рр.

Категорія транспорту	Частка у 2023, %	Зростання з 1990, %	Викиди 2023, млн т CO ₂
Легкові автомобілі та мотоцикли	61%	+18%	457
Важкі вантажівки та автобуси	27%	+24%	202
Легкі вантажівки	12%	+53%	90
Всього автомобільний транспорт	100%	+23%	749

Джерело: German Federal Statistical Office [9]

Німеччина є найбільшим контрибутором транспортних викидів в ЄС – 144,3 млн тонн CO₂ у 2022 році [64]. Щорічні викиди парникових газів у транспортному секторі Німеччини знизилися на 18,1 млн тонн CO₂-еквіваленту у 2020 році порівняно з попереднім роком (зниження на 11%), досягнувши найнижчого значення за останні роки. У 2021 році показник дещо зріс до 147,63 млн тонн CO₂.

DHL Group є провідним глобальним логістичним оператором з місією досягнення чистих нульових викидів ПГ до 2050 року. Компанія має затверджену SBTi ціль net-zero до 2050 року (липень 2024). Відповідно до Science Based Targets initiative, логістично пов'язані викиди ПГ мають бути скорочені з 40 млн тонн CO₂e до менш ніж 29 млн тонн до 2030 року (Scores 1, 2 та 3) [19].

У звітному 2023 році викиди ПГ DHL розвивалися краще, ніж очікувалося – 33,3 млн тонн CO₂e (цільове значення 2023: не більше 39 млн тонн CO₂e, 2022: 36,6 млн тонн CO₂e). Це розвиток можна пояснити зниженням обсягів транспортування та заходами з декарбонізації, такими як електрифікація автопарку [19]. Заплановано DHL Group вдалося заощадити 1,3 млн тонн CO₂e завдяки заходам декарбонізації. Табл. 2.4.

Екологічні показники DHL Group, 2022-2024 pp.

Показник	2022	2023	Ціль 2030
Викиди ПГ (Scopes 1,2,3), млн т CO ₂ e	36,6	33,3	<29,0
Цільове скорочення за рахунок декарбонізації, млн т CO ₂ e	1,2	1,3	—
Кількість електромобілів	~27 800	~35 200	>66% автопарку
E-bikes, e-trikes, cargo bikes	>22 000	>25 000	–
Частка SAF (Sustainable Aviation Fuel)	~2%	~5%	30%
Роботизація операцій комплектації, %	12%	15%	>30%

Джерело: [19; 21].

DHL Supply Chain розширив використання роботів у 2023 році: працівники підрозділу вже підтримуються роботами або автоматизованими процесами у 15% усіх операцій комплектації [19]. Компанія продовжує інвестувати в цифровізацію та використання штучного інтелекту, включаючи запуск myDHLi Virtual Assistant з GenAI-технологією у травні 2024 року. Табл.2.5.

Таблиця 2.5

AI-інструменти DHL для оптимізації екологічних показників

AI-інструмент	Функціональність	Екологічний ефект
myDHLi Virtual Assistant	GenAI-чатбот для підтримки клієнтів 24/7, статус відправлень	Скорочення помилок у логістиці, оптимізація рішень
myDHLi Analytics	Дашборд сталості, відстеження GoGreen Plus	Прозорість вуглецевого сліду, бенчмаркінг скорочень
ORION-подібні системи	Динамічна оптимізація маршрутів у реальному часі	Скорочення пробігу на 10-15%, зниження витрат палива
Предиктивне обслуговування	ML-аналіз стану обладнання, прогнозування ремонтів	Зниження аварійних простоїв, оптимізація ефективності ТЗ
Складська роботизація	Автоматизація комплектації, сортування, переміщення	Скорочення енергоспоживання на 15%, зменшення відходів

Джерело: складено на основі [20; 19; 21].

Продукти GoGreen Plus від DHL забезпечують декарбонізовані рішення шляхом використання сталих палив та низьковуглецевих технологій. Ці

продукти базуються на підході «book & claim», що дозволяє DHL безпосередньо замінювати викопне паливо сталими паливами в мережі та розподіляти екологічні переваги між клієнтами [21].

СМА CGM, глобальна компанія морських перевезень, у 2024 році уклала партнерство з Google Cloud для розгортання AI по всій своїй глобальній логістичній мережі [72]. Bernhard Hersberger, керівник AI Hub Hamburg у Нарag-Lloyd, зазначає: «AI вже є критичним для ефективної маршрутизації перевезень через океани. Ми бачимо подальший потенціал мінімізації викидів CO2 та зниження витрат через AI».

Green Cargo, національний залізничний вантажний оператор Швеції, застосовує AI для покращення планування та скорочення порожніх рейсів вагонів. Оскільки 96% його вантажів вже транспортується електричними потягами, компанія використовує AI для подальшого зниження споживання енергії та підвищення операційної ефективності [72]. Система підтримує оптимізацію на рівні всієї мережі.

2.3. Оцінка результатів застосування AI-технологій щодо зміни екологічних параметрів логістичних процесів

Аналіз результативності AI-технологій у зниженні екологічного впливу логістики базується на емпіричних даних компаній-лідерів та наукових досліджень. Система ORION компанії UPS демонструє, як AI може бути інтегрований у доставку «останньої милі» для підтримки контролю витрат та сталості. За повідомленнями, система економить до 10 млн галонів палива щорічно через динамічну перемаршрутизацію транспортних засобів доставки [16].

Дослідження демонструють, що AI-оптимізація маршрутів може знизити витрати на паливо до 20% [29]. Невеликий автопарк може заощадити тисячі доларів щорічно, що допомагає знизити операційні витрати. AI допомагає автопаркам здійснювати доставку вчасно, обираючи найшвидші та

найкоротші маршрути. Дослідження показує, що оптимізація маршрутів може допомогти скоротити викиди парникових газів на 10% щомісяця.

Таблиця 2.6

Кількісна оцінка результативності AI-технологій у логістиці

AI-рішення	Скорочення палива/енергії	Скорочення викидів CO2	Джерело даних
Оптимізація маршрутів (загальна)	15-20%	10-20%	McKinsey, WEF
UPS ORION	10 млн галонів/рік	~100 000 т CO2/рік	UPS
AI-керований еко-драйвінг	4-10%	4-10%	Aurora Innovation
Предиктивне обслуговування	5-10%	5-8%	Deloitte
Smart warehouse (AI-планування)	15% енергії	12-15%	IJAIDSML
Консолідація вантажів (AI)	15-25%	15-25%	BCG
Комплексне AI-рішення	25-35%	30%	Case studies

Джерело: систематизовано автором на основі [72; 16; 29; 51].

Кейс-стаді POS Indonesia (у партнерстві з Rosebay) продемонстрував середні заощадження близько 48% часу та 31% відстані як прямий результат AI-оптимізації маршрутів. Клієнт очікує заощадити понад 1,7 млн дол.США лише на витратах палива в результаті впровадження цих ефективностей у своєму загальнонаціональному автопарку [51]. Загальні заощадження варіюються від 22% до 71% за показниками часу, відстані та витрат на паливо.

Дослідження демонструє 30% зниження викидів CO2 на маршрут завдяки AI-оптимізації [53]. Таке скорочення стало можливим завдяки комплексним AI-оптимізаціям, зокрема у плануванні маршрутів. AI-керовані системи інтелектуального планування дозволили компаніям знизити щоденне споживання енергії на 15% через оптимізацію функціонування складських систем. Табл.2.7.

Таблиця 2.7

Порівняльний аналіз екологічної результативності до та після впровадження AI

Показник	До впровадження AI	Після впровадження AI	Зміна
Витрата палива на 100 км (вантажівки)	32-38 л	26-32 л	-15-20%
Викиди CO ₂ на маршрут	Базовий рівень	-30%	-30%
Точність прогнозування викидів	±20-30%	±5-10%	+14% точності
Енергоспоживання складу (кВт·год/день)	Базовий рівень	-15%	-15%
Час доставки	Базовий рівень	-20-48%	-20-48%
Пробіг автопарку	Базовий рівень	-10-31%	-10-31%

Джерело: узагальнено автором на основі [16; 29; 51; 53].

Переміщення вантажів з автотранспорту далекого слідування на залізницю може скоротити споживання палива на милю для тієї ж тоннажності до 75%, тоді як перехід з авіафрахту на морський транспорт може зменшити викиди на 95% на кілометр для того ж тоннажу [72]. AI забезпечує оптимальний вибір модальності транспорту на основі аналізу множинних факторів.

Еко-драйвінг є однією з ключових переваг автономного вантажного транспорту. Автономні транспортні засоби можуть бути запрограмовані виконувати найкращі практики водіння. Дослідження показують, що лише еко-драйвінг може забезпечити 4-10% скорочення споживання палива [72]. Просунута аналітика та AI/ML генерують бізнес-можливості, що стимулюють покращення по всій транспортній мережі.

Логістичні компанії можуть досягти до 15% скорочення витрат на паливо завдяки впровадженню AI-рішень оптимізації маршрутів [66]. AI-керована оптимізація маршрутів може динамічно коригувати маршрути в реальному часі на основі несподіваних подій, таких як дорожні перекриття, погодні зміни або аварії. Ця адаптивність значно скорочує затримки та дозволяє здійснювати більш надійні доставки. Табл.2.8.

Економічна оцінка екологічних ефектів AI у логістиці

Категорія ефекту	Скорочення витрат	Екологічний ефект	ROI період
Витрати на паливо	15-20%	-15-20% викидів CO ₂	6-12 міс.
Витрати на обслуговування	25-30%	-5-10% викидів	12-18 міс.
Витрати на енергію (склади)	10-15%	-10-15% викидів	12-24 міс.
Витрати на відходи	20-30%	-20-30% відходів	6-12 міс.
Витрати на штрафи за викиди	Уникнення	Регуляторна відповідність	Негайно

Джерело: систематизовано автором на основі [72; 29; 53].

За даними Intangles, оператори автопарків повідомляють про скорочення витрат на паливо до 15% завдяки AI-рішенням, що оптимізують маршрути, моніторять поведінку водіїв та забезпечують своєчасне обслуговування [38]. Технологія предиктивного обслуговування від Intangles ідентифікує потенційні проблеми до їх загострення, забезпечуючи роботу автопарків на піковій ефективності.

Штучний інтелект відіграє критичну роль у просуванні сталої логістики через оптимізацію транспортування, скорочення вуглецевих викидів та підтримку екологічно дружнього прийняття рішень [43]. Однак більшість існуючих досліджень фокусується на специфічних сферах, таких як зворотна логістика, відстеження вуглецю або «зелений» транспорт, з меншою кількістю досліджень, що розглядають повністю інтегрований AI-керований підхід, який поєднує множинні стратегії сталості.

Внесок AI у «зелену» логістику полягає не в радикальному руйнуванні, а в цілеспрямованому покращенні ефективності. Забезпечуючи розумнішу маршрутизацію, прогнозування попиту та відстеження викидів, AI допомагає постачальникам логістичних послуг підвищувати ефективність при одночасному зниженні екологічного впливу [72]. Очікується прискорення

впровадження AI, коли регуляції вимагатимуть розкриття вуглецевого сліду продуктів та послуг.

Таблиця 2.9

SWOT-аналіз впровадження AI для екологізації логістики

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
Значне скорочення викидів (15-30%) Економія витрат на паливо (15-20%) Оптимізація в реальному часі Підвищення точності прогнозування (+14%) Масштабованість рішень	Високі початкові інвестиції Залежність від якості даних Потреба у кваліфікованих кадрах Складність інтеграції з legacy-системами Ризики кібербезпеки
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
Зростання ринку AI в логістиці (CAGR 46,7%) Посилення регуляторних вимог (CSRD, ISO 14083) Державна підтримка (EU Digital Europe 9 млрд євро) Розвиток EV-інфраструктури Інтеграція з IoT та блокчейном	Регуляторна невизначеність (AI Act) Конкуренція за таланти Швидка зміна технологій Етичні питання AI Геополітична нестабільність ланцюгів постачання

Джерело: розроблено автором

Згідно з Міжнародним енергетичним агентством (IEA), досягнення чистих нульових викидів до 2050 року вимагає 40% скорочення транспортних викидів до 2030 року [38]. AI-технології є критичним інструментом для досягнення цих амбітних цілей. Компанії, що ефективно інтегрують AI у свої логістичні операції, отримують значні конкурентні переваги як в економічному, так і в екологічному вимірах.

Аналіз галузевої специфіки впровадження AI демонструє різноманітність підходів. У сфері e-commerce логістики AI забезпечує прогнозування попиту з точністю до 95%, що дозволяє оптимізувати рівні запасів та зменшити надлишкове транспортування. Компанія Amazon застосовує ML-алгоритми для передбачення замовлень ще до їх оформлення

клієнтами, що скорочує час доставки та відповідно зменшує необхідність використання експрес-перевезень з високим вуглецевим слідом.

Таблиця 2.10

Галузева специфіка впровадження AI для екологізації логістики

Галузь	Пріоритетні AI-рішення	Ключові екологічні KPI	Потенціал скорочення CO ₂
E-commerce	Прогнозування попиту, last-mile оптимізація	Викиди на замовлення	20-35%
Автомобілебудування	ЛІТ-планування, мультимодальна оптимізація	Викиди на компонент	15-25%
FMCG/Retail	Cold chain моніторинг, оптимізація запасів	Викиди на одиницю продукції	18-28%
Фармацевтика	Temperature-controlled logistics, трасування	Відповідність GDP, відходи	10-20%
Хімічна промисловість	Hazmat routing, предиктивне обслуговування	Інциденти, викиди VOC	15-22%
Будівництво	Оптимізація доставки матеріалів, fleet management	Викиди на проект	12-20%

Джерело: систематизовано автором на основі галузевих досліджень

Особливу роль AI відіграє у cold chain logistics – логістиці з контрольованою температурою. AI-системи моніторингу здатні в реальному часі відстежувати температурний режим, прогнозувати відхилення та автоматично коригувати маршрути для мінімізації ризику псування продукції. Це особливо критично для фармацевтичної та харчової промисловості, де втрати продукції через порушення температурного режиму можуть досягати 15-20% обсягів перевезень.

Впровадження AI у hazmat logistics (перевезення небезпечних вантажів) забезпечує оптимізацію маршрутів з урахуванням множинних обмежень: мінімізація проходження через густонаселені райони, уникнення екологічно чутливих зон, врахування погодних умов. Дослідження показують, що AI-

оптимізація hazmat routing знижує ризик інцидентів на 25-40% та скорочує загальну відстань перевезень на 12-18%.

Регіональний аналіз впровадження AI виявляє значні відмінності в підходах. Європейський Союз фокусується на регуляторній відповідності та декарбонізації у відповідь на European Green Deal. США акцентують увагу на операційній ефективності та скороченні витрат з паралельним екологічним ефектом. Китай демонструє масштабне впровадження складської роботизації та smart logistics hubs. Азійсько-Тихоокеанський регіон загалом є найбільш динамічним ринком з очікуваним CAGR понад 50%. Табл.2.11.

Таблиця 2.11

Порівняльний аналіз регіональних підходів до AI-екологізації логістики

Регіон	Пріоритетний фокус	Ключові регуляції	Прогнозований CAGR AI
ЄС	Декарбонізація, регуляторна відповідність, ESG-звітність	Green Deal, CSRD, EU AI Act, ISO 14083	42-45%
США	Операційна ефективність, cost reduction, last-mile	EPA, California CARB, SEC ESG	45-48%
Китай	Smart logistics, роботизація, digital infrastructure	Carbon peak 2030, AI standardization	50-55%
Японія	Автономні ТЗ, aging workforce support, якість	Carbon neutrality 2050, Society 5.0	38-42%
Індія	Digitalization базового рівня, connectivity	Smart Cities Mission, EV incentives	55-60%

Джерело: узагальнено автором на основі регіональних звітів

Аналіз бар'єрів впровадження AI для екологізації логістики виявляє кілька ключових категорій. Технологічні бар'єри включають: недостатню якість та повноту даних для навчання AI-моделей; складність інтеграції з існуючими legacy-системами; обмежену інтеперабельність між різними платформами; високі вимоги до обчислювальних ресурсів для моделей реального часу.

Організаційні бар'єри охоплюють: недостатню цифрову зрілість організацій; опір змінам з боку персоналу; брак AI-компетенцій та навичок; складнощі обґрунтування ROI для керівництва; силосну структуру відділів. Регуляторні бар'єри пов'язані з: невизначеністю щодо відповідальності за AI-рішення; вимогами до прозорості алгоритмів (особливо в ЄС); питаннями захисту даних (GDPR); відсутністю стандартизації методологій оцінки екологічного ефекту AI. Ринкові бар'єри включають: фрагментованість ринку AI-рішень; складнощі вибору постачальників; залежність від vendor lock-in; швидку зміну технологій.

Таблиця 2.12

Бар'єри впровадження AI для екологізації логістики та шляхи їх подолання

Категорія бар'єру	Конкретні виклики	Рекомендовані шляхи подолання
Технологічні	Якість даних, інтеграція, інтероперабельність	Стандартизація даних, API-first підхід, хмарні рішення
Організаційні	Опір змінам, брак компетенцій, силоси	Change management, навчання персоналу, крос-функціональні команди
Фінансові	Високі CAPEX, невизначений ROI	SaaS/підписна модель, пілотні проекти, поетапне впровадження
Регуляторні	Невизначеність, прозорість, захист даних	Explainable AI, Privacy by Design, галузеві консорціуми
Ринкові	Фрагментація, vendor lock-in	Відкриті стандарти, multi-vendor стратегія, партнерства

Джерело: розроблено автором

Успішні кейси впровадження AI демонструють різноманітність підходів. Maersk інтегрувала AI у систему оптимізації швидкості суден, що дозволило скоротити споживання палива на 7-12% та відповідно знизити викиди. Компанія використовує машинне навчання для прогнозування оптимальної швидкості з урахуванням погодних умов, завантаження судна та графіку прибуття.

FedEx впроваджує AI для оптимізації завантаження транспортних засобів, що дозволяє максимізувати використання вантажного простору та

зменшити кількість рейсів. Компанія повідомляє про 15% зростання ефективності завантаження та відповідне скорочення викидів CO₂ на одиницю перевезеного вантажу. AI-система враховує габарити, вагу, пункти призначення та пріоритетність вантажів.

Walmart застосовує AI для оптимізації температурних режимів у своїй мережі дистрибуційних центрів, що дозволило скоротити споживання енергії на 20% при збереженні необхідних умов зберігання продукції. Система використовує прогнозування попиту, зовнішню температуру та графіки завантаження складів для динамічного управління кліматом.

Таблиця 2.13

Кейс-стаді успішного впровадження AI для екологізації логістики

Компанія	AI-рішення	Результат	Екологічний ефект
UPS	ORION (маршрутизація)	-10 млн галонів/рік	-100 000 т CO ₂ /рік
Maersk	Оптимізація швидкості суден	-7-12% палива	Пропорційне скорочення
FedEx	Load optimization	+15% завантаження	-15% викидів на вантаж
DHL	Комплексна екосистема	-3,3 млн т CO ₂ e (2022-23)	На шляху до net-zero 2050
Walmart	Smart warehouse climate	-20% енергії	-20% Scope 2 викидів
POS Indonesia	VRP оптимізація	-48% часу, -31% відстані	\$1,7М економії палива

Джерело: систематизовано автором на основі корпоративних звітів та досліджень

Перспективи розвитку AI для екологізації логістики визначаються кількома ключовими тенденціями. Перша – інтеграція AI з цифровими двійниками (Digital Twins) для створення віртуальних моделей логістичних мереж, що дозволяє моделювати екологічний вплив різних сценаріїв та оптимізувати рішення до їх реального впровадження. За прогнозами, до 2027 року понад 50% великих логістичних компаній використовуватимуть цифрові двійники.

Друга тенденція – розвиток автономної логістики. Автономні вантажівки, дрони та роботи-кур'єри мають потенціал радикально скоротити вуглецевий слід доставки «останньої милі». AI забезпечує безпеку та ефективність автономних систем. За прогнозами McKinsey, до 2030 року до 25% комерційних транспортних засобів у розвинутих країнах матимуть певний рівень автономності.

Третя тенденція – розвиток collaborative logistics, де AI оптимізує спільне використання логістичних ресурсів (транспорту, складів, даних) між різними компаніями. Це дозволяє максимізувати завантаження, зменшити порожні рейси та скоротити сукупний екологічний вплив галузі. Платформи collaborative logistics демонструють потенціал скорочення викидів на 20-35%.

Четверта тенденція – поглиблена інтеграція AI з IoT та блокчейном для створення прозорих та верифікованих ланцюгів постачання. Блокчейн забезпечує незмінність даних про екологічний вплив, тоді як AI аналізує ці дані для оптимізації та прогнозування. Це особливо важливо для відповідності зростаючим регуляторним вимогам щодо розкриття Scope 3 викидів.

П'ята тенденція – розвиток generative AI для логістики. Генеративні моделі здатні створювати оптимальні логістичні мережі, генерувати сценарії декарбонізації та автоматизувати ESG-звітність. За прогнозами Gartner, до 2026 року понад 80% підприємств використовуватимуть generative AI у своїх операціях, включаючи логістику.

Методологічні підходи до оцінки екологічної результативності AI-рішень у логістиці потребують стандартизації. Поточна практика характеризується різноманітністю методологій, що ускладнює порівняння результатів між компаніями та регіонами. ISO 14083 (2023) встановлює рамки для кількісної оцінки викидів ПГ у транспорті та логістиці, однак специфічні методології оцінки внеску AI потребують подальшого розвитку.

Оцінка екологічного ефекту AI повинна враховувати як прямі, так і непрямі впливи. Прямі впливи включають скорочення викидів завдяки оптимізації маршрутів, підвищенню паливної ефективності та зменшенню

відходів. Непрямі впливи охоплюють зміни у споживчій поведінці, стимульовані AI-рекомендаціями, а також системні ефекти від поширення кращих практик по галузі.

Таблиця 2.14

Методологічна рамка оцінки екологічної результативності AI у логістиці

Компонент оцінки	Показники	Методи розрахунку
Прямі викиди (Score 1)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O від власного автопарку	Витрата палива × коефіцієнт емісії (GHG Protocol)
Непрямі викиди (Score 2)	Викиди від придбаної енергії	Споживання енергії × emission factor (location/market-based)
Ланцюг постачання (Score 3)	Транспортування, дистрибуція	Activity data × emission factors (GLEC Framework)
Базовий сценарій	Викиди без AI-впровадження	Історичні дані, галузеві бенчмарки
Атрибуція ефекту AI	Ізольований внесок AI-рішення	A/B тестування, контрольні групи, регресійний аналіз

Джерело: розроблено автором на основі ISO 14083, GHG Protocol, GLEC Framework

Важливим аспектом оцінки є врахування так званого «ребаунд-ефекту» (rebound effect), коли підвищення ефективності може призводити до збільшення загального споживання. Наприклад, оптимізація маршрутів може знизити вартість доставки, що стимулює додатковий попит на транспортування. Дослідження показують, що ребанд-ефект може компенсувати 10-30% досягнутої економії, що необхідно враховувати при оцінці чистого екологічного ефекту AI.

Аналіз впливу AI на екологічні показники логістики неможливий без урахування контексту цифрової трансформації галузі загалом. За даними McKinsey, логістика є однією з галузей з найнижчим рівнем цифровізації, що одночасно створює значний потенціал для впровадження AI та обумовлює додаткові виклики інтеграції. Компанії-лідери цифровізації демонструють на 30-50% вищу операційну ефективність та відповідно нижчий екологічний вплив.

Роль стандартизації та галузевих консорціумів є критичною для масштабування AI-рішень у логістиці. Global Logistics Emissions Council (GLEC) Framework надає стандартизовану методологію обліку викидів у логістиці. Smart Freight Centre координує зусилля галузі щодо декарбонізації вантажних перевезень. Clean Cargo Working Group фокусується на морському транспорті. Ці ініціативи створюють передумови для ефективного використання AI через забезпечення сумісності даних.

Інвестиційна привабливість AI-рішень для екологізації логістики зростає. Венчурне фінансування cleantech логістичних стартапів досягло рекордних рівнів у 2023-2024 роках. Великі логістичні оператори створюють корпоративні венчурні підрозділи для інвестування в інноваційні AI-рішення. Державні програми підтримки (EU Digital Europe, US Infrastructure Investment) створюють додаткові стимули для впровадження.

Конкурентна динаміка ринку AI для логістики характеризується присутністю як глобальних технологічних гігантів (Google, Microsoft, Amazon Web Services), так і спеціалізованих стартапів (project44, FourKites, Convoy). Великі логістичні оператори (DHL, FedEx, UPS, Maersk) активно розвивають власні AI-платформи. Китайські компанії (Alibaba, JD.com, SF Express) демонструють агресивне впровадження AI у логістичні операції.

Питання етики та відповідальності AI у логістиці набувають зростаючого значення. EU AI Act класифікує певні AI-застосування у транспорті як системи високого ризику, що вимагає відповідності специфічним вимогам прозорості та надійності. Питання відповідальності за рішення автономних систем (автономні вантажівки, дрони) потребують правової визначеності для масштабного впровадження.

Соціальні аспекти AI-трансформації логістики включають вплив на зайнятість та необхідність перекваліфікації працівників. За оцінками McKinsey, до 2030 року AI-автоматизація може змінити характер роботи для 15-30% працівників логістичної галузі. Водночас створюються нові робочі місця у сфері AI-розробки, аналітики даних та управління автоматизованими

системами. Компанії-лідери інвестують у програми reskilling для забезпечення справедливого переходу.

Підсумовуючи аналіз, можна констатувати, що AI є трансформаційною технологією для екологізації міжнародної логістики. Емпіричні дані підтверджують значний потенціал скорочення викидів (15-30%), витрат (15-25%) та підвищення ефективності (20-50%). Успішне впровадження вимагає комплексного підходу: технологічної готовності, організаційної зрілості, регуляторної відповідності та фінансової обґрунтованості. Перспективи розвитку визначаються конвергенцією AI з іншими технологіями (IoT, блокчейн, автономні системи) та посиленням регуляторного тиску на декарбонізацію.

Аналіз показує, що ключовими факторами успіху впровадження AI для екологізації логістики є: наявність якісних даних та аналітичної інфраструктури; підтримка з боку топ-менеджменту та інтеграція екологічних цілей у корпоративну стратегію; поетапний підхід до впровадження з пілотними проектами; розвиток внутрішніх компетенцій та партнерство з технологічними провайдерами; моніторинг результатів та постійне вдосконалення.

Україна має значний потенціал для впровадження AI у логістичний сектор. Географічне розташування на перетині транспортних коридорів Європа-Азія, розвинута IT-галузь з кваліфікованими фахівцями, євроінтеграційні процеси створюють сприятливі передумови. Водночас існують виклики: недостатній рівень цифровізації базової логістичної інфраструктури, обмежений доступ до капіталу для інвестицій, необхідність гармонізації регуляторного середовища з вимогами ЄС.

Рекомендації для українських логістичних компаній щодо впровадження AI для екологізації включають: початок з «quick wins» рішень (оптимізація маршрутів, моніторинг витрати палива); використання хмарних SaaS-рішень для мінімізації початкових інвестицій; участь у галузевих ініціативах та обмін досвідом; підготовку до вимог СВМ та інших регуляцій

ЄС; розвиток партнерств з українськими AI-стартапами та дослідницькими установами.

Таблиця 2.15

Прогноз розвитку AI для екологізації логістики до 2030 року

Параметр	2024 (базовий)	2027 (прогноз)	2030 (прогноз)
Ринок AI в логістиці, млрд дол. США	18	80-100	300-400
Рівень впровадження AI, % компаній	65%	80%	95%
Середнє скорочення викидів завдяки AI	10-15%	20-25%	30-40%
Частка автономних ТЗ у логістиці	<5%	10-15%	20-30%
Частка EV у логістичних автопарках	5-10%	20-30%	50-60%
Вартість AI-рішень (% від поточної)	100%	60-70%	40-50%

Джерело: прогноз автора на основі галузевих трендів та експертних оцінок

Сценарний аналіз розвитку AI для екологізації логістики до 2030 року виявляє три можливі траєкторії. Оптимістичний сценарій передбачає прискорену адопцію AI, підтриману сильним регуляторним тиском та технологічними проривами, що забезпечить 40-50% скорочення галузевих викидів. Базовий сценарій очікує поступове впровадження з помірними результатами (25-35% скорочення). Песимістичний сценарій враховує ризики економічної нестабільності та технологічних бар'єрів, що обмежить скорочення на рівні 15-20%.

Критичним фактором реалізації оптимістичного сценарію є розвиток інфраструктури для електричних та автономних транспортних засобів. За оцінками BloombergNEF, інвестиції в зарядну інфраструктуру для комерційного транспорту в Європі мають зрости з 2 млрд EUR у 2024 році до 15-20 млрд EUR до 2030 року. AI відіграватиме ключову роль в оптимізації розміщення зарядних станцій та управлінні енергетичними потоками.

Глобальна конкуренція за лідерство у AI-технологіях для логістики посилюється. США зберігають позиції лідера у фундаментальних AI-дослідженнях та венчурному фінансуванні. Китай демонструє найшвидші

темпи впровадження та масштабування. ЄС фокусується на регуляторному лідерстві та етичному AI. Ця конкуренція створює динамічне середовище, що прискорює інновації та знижує вартість рішень для кінцевих користувачів.

Інтеграція AI з концепцією Industry 5.0 відкриває нові можливості для екологізації логістики. Industry 5.0 акцентує увагу на людино-центричному підході, сталості та стійкості. AI-системи майбутнього поєднують ефективність автоматизації з гнучкістю та креативністю людського мислення. Це особливо актуально для логістики, де складні рішення в нестандартних ситуаціях потребують людського судження.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує трансформаційну роль штучного інтелекту в оптимізації екологічних показників міжнародної логістики. Кількісні дані демонструють значний потенціал скорочення екологічного впливу при одночасному досягненні економічних переваг. Подальший розвиток визначатиметься взаємодією технологічних інновацій, регуляторного середовища, інвестиційної активності та організаційної готовності компаній до цифрової трансформації.

Системний підхід до впровадження AI для екологізації логістики вимагає координації зусиль на кількох рівнях: макроекономічному (державна політика, регулювання, інвестиції в інфраструктуру), мезоекономічному (галузеві ініціативи, стандартизація, консорціуми) та мікроекономічному (корпоративні стратегії, технологічне впровадження, організаційний розвиток). Лише комплексний підхід забезпечує максимальну реалізацію потенціалу AI.

Особливу увагу слід приділити розвитку екосистеми AI-інновацій у логістиці, що включає: дослідницькі інституції для фундаментальних розробок; стартапи для комерціалізації інновацій; корпоративні R&D-підрозділи для адаптації рішень; освітні програми для підготовки кадрів; регуляторні органи для створення сприятливого середовища; фінансові інституції для забезпечення інвестицій.

Висновки до другого розділу

1. Глобальний ринок AI в логістиці демонструє експоненціальне зростання з 18,01 млрд дол. США (2024) до прогнозованих 549 млрд дол. США (2033) при CAGR 46,7%. Понад 65% логістичних компаній вже впровадили AI у свої операції. Лідерами є США (65% впровадження), Німеччина (60%) та Китай (58%). Ключові AI-тренди включають генеративний AI, комп'ютерний зір, розширену аналітику та етику AI. Регуляторний тиск посилюється: EU AI Act (2024), ISO 14083 (2025), Digital Europe Programme (9 млрд євро).

2. Аналіз ЄС та DHL Group виявив: викиди CO₂ від автотранспорту ЄС у 2023 р. – 749 млн т (+23% з 1990 р.); Німеччина — найбільший емітент (144,3 млн т). DHL Group скоротив викиди з 36,6 млн т CO₂e (2022) до 33,3 млн т (2023), заощадивши 1,3 млн т CO₂e через декарбонізацію. Автопарк EV зріс до 35 200 одиниць; роботизація досягла 15% операцій комплектації. AI-інструменти (myDHLi, GenAI Virtual Assistant, ORION-подібні системи) забезпечують прозорість та оптимізацію екологічних показників.

3. Кількісна оцінка результативності: AI-оптимізація маршрутів скорочує витрати палива на 15-20% та викиди CO₂ на 10-30%; UPS ORION економить 10 млн галонів палива/рік (~100 000 т CO₂); комплексні AI-рішення забезпечують до 30% скорочення викидів на маршрут та до 48% економії часу. Еко-драйвінг автономних ТЗ дає 4-10% економії палива. Перехід вантажів з авто на залізницю скорочує викиди на 75%, з авіа на море – на 95%. ROI AI-рішень: 6-24 місяці залежно від категорії. SWOT-аналіз виявив: сильні сторони – скорочення викидів 15-30%, економія 15-20%, оптимізація в реальному часі; слабкі – високі інвестиції, залежність від якості даних, кадрова потреба; можливості – зростання ринку CAGR 46,7%, регуляторний тиск (CSRD, ISO 14083), держпідтримка; загрози – регуляторна невизначеність, конкуренція за таланти, етичні питання. Критичний висновок: AI є необхідним інструментом досягнення 40% скорочення транспортних викидів до 2030 року (IEA).

РОЗДІЛ 3 НАПРЯМИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖНАРОДНОЇ ЛОГІСТИКИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

3.1 Формування концептуальних засад екологічно орієнтованого розвитку міжнародної логістики із застосуванням штучного інтелекту

Проведений у попередніх розділах аналіз засвідчив, що штучний інтелект є потужним інструментом оптимізації екологічних показників міжнародної логістики. Водночас для системного досягнення сталих результатів необхідне формування цілісної концепції екологічно орієнтованого розвитку логістики на основі AI-технологій. У даному підрозділі пропонується концептуальна модель, що інтегрує технологічний, організаційний, економічний та екологічний виміри впровадження штучного інтелекту.

Концептуальні засади екологічно орієнтованого розвитку міжнародної логістики із застосуванням AI базуються на синергії трьох ключових парадигм: концепції сталого розвитку (Sustainable Development), принципів циркулярної економіки (Circular Economy) та Industry 4.0/5.0. Інтеграція цих парадигм забезпечує системний підхід до екологізації логістики, що виходить за межі точкових оптимізаційних рішень.

Фундаментальним принципом запропонованої концепції є визнання штучного інтелекту не як самоціль, а як інструмент досягнення екологічних цілей. Це означає, що впровадження AI має оцінюватися передусім за критерієм екологічної результативності, а не технологічної складності чи інноваційності. Такий підхід дозволяє уникнути «технологічного фетишизму» та забезпечити практичну орієнтованість рішень.

Архітектура концептуальної моделі включає чотири взаємопов'язані рівні: стратегічний (визначення довгострокових екологічних цілей та AI-стратегії), тактичний (розробка програм і проектів впровадження),

операційний (реалізація конкретних AI-рішень) та моніторинговий (оцінка результативності та коригування). Кожен рівень має специфічні завдання, інструменти та показники ефективності.

Таблиця 3.1

Архітектура концептуальної моделі екологічно орієнтованого розвитку логістики на основі AI

Рівень	Ключові завдання	AI-інструменти	KPI
Стратегічний	Визначення екологічних цілей 2030/2050, AI-стратегія, інвестиційна політика	Predictive analytics, сценарне моделювання	SBTi targets, ESG-рейтинг
Тактичний	Програми декарбонізації, проекти впровадження, партнерства	Portfolio optimization, risk assessment	ROI проектів, терміни окупності
Операційний	Оптимізація маршрутів, управління автопарком, складська логістика	Route optimization, fleet management AI, WMS	Витрата палива, викиди CO2/тонно-км
Моніторинговий	Збір даних, аналіз результативності, звітність, коригування	IoT analytics, dashboards, автоматизована звітність	Точність даних, частота звітності

Джерело: розроблено автором

Стратегічний рівень концепції передбачає інтеграцію екологічних цілей у корпоративну стратегію компанії. Для міжнародних логістичних операторів це означає прийняття Science Based Targets (SBTi) з конкретними зобов'язаннями щодо скорочення викидів парникових газів. AI на цьому рівні використовується для сценарного моделювання шляхів досягнення цілей, оцінки інвестиційних потреб та прогнозування регуляторних змін.

Ключовим елементом стратегічного рівня є формування «екологічного бачення» (environmental vision), що визначає довгострокові амбіції компанії. Для провідних логістичних операторів таким баченням є досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року з проміжними цілями на 2030 рік. AI

дозволяє деталізувати це бачення у конкретні кількісні показники для кожного бізнес-підрозділу та географічного регіону.

Тактичний рівень забезпечує трансформацію стратегічних цілей у програми та проекти. На цьому рівні формуються портфелі AI-ініціатив, визначаються пріоритети інвестування, встановлюються партнерства з технологічними провайдерами. AI-інструменти тактичного рівня включають системи оптимізації портфеля проектів та оцінки ризиків впровадження.

Операційний рівень є «серцем» концепції, де реалізуються конкретні AI-рішення для оптимізації екологічних показників. Цей рівень охоплює три ключові домени: транспортну логістику (оптимізація маршрутів, управління автопарком, есо-driving), складську логістику (енергоефективність, автоматизація, оптимізація простору) та управління ланцюгами постачання (прогнозування попиту, оптимізація запасів, вибір постачальників).

Таблиця 3.2

AI-рішення операційного рівня за доменами логістики

Домен	AI-рішення	Екологічний ефект	Потенціал
Транспортна логістика	Динамічна оптимізація маршрутів з урахуванням трафіку, погоди, екозон	Скорочення пробігу, витрати палива	-15-25%
Транспортна логістика	Predictive maintenance для зниження позапланових простоїв	Оптимальний технічний стан ТЗ	-5-10%
Транспортна логістика	Eco-driving coaching на основі телематики	Оптимізація стилю водіння	-8-15%
Складська логістика	Smart energy management (HVAC, освітлення)	Зниження енергоспоживання	-20-30%
Складська логістика	AI-оптимізація складського простору	Зменшення площі складів	-10-15%
Ланцюг постачання	Demand forecasting для оптимізації запасів	Зменшення надлишкових перевезень	-10-20%
Ланцюг постачання	Supplier selection з екологічними критеріями	Зелений procurement	-5-15%

Джерело: розроблено автором на основі галузевих даних

Моніторинговий рівень забезпечує зворотний зв'язок та безперервне вдосконалення. AI використовується для автоматизованого збору даних через IoT-сенсори, формування аналітичних дашбордів у реальному часі, автоматизації ESG-звітності та виявлення аномалій і можливостей для оптимізації. Критичним є забезпечення прозорості та достовірності даних для зовнішнього аудиту.

Принципом, що пронизує всі рівні концепції, є data-driven decision making – прийняття рішень на основі даних. AI трансформує логістику з галузі, де рішення приймалися переважно на основі досвіду та інтуїції, у сферу точних розрахунків та предиктивної аналітики. Це особливо важливо для екологічних рішень, де необхідно враховувати множину взаємопов'язаних факторів.

Важливим елементом концепції є модель зрілості AI-впровадження для екологізації логістики. Пропонується п'ятирівнева модель: початковий рівень (ізолювані пілотні проекти), керований рівень (систематизовані процеси впровадження), визначений рівень (стандартизовані AI-практики), кількісно керований рівень (вимірювання та оптимізація результатів), оптимізуючий рівень (безперервне вдосконалення на основі AI).

Концепція передбачає диференційований підхід залежно від розміру та типу логістичного оператора. Для глобальних інтегрованих операторів (DHL, FedEx, UPS) рекомендується комплексне впровадження на всіх рівнях з фокусом на власні розробки та глобальну стандартизацію. Для регіональних операторів оптимальним є використання SaaS-рішень та участь у галузевих платформах. Для малих логістичних компаній пріоритетом є базові хмарні інструменти з низьким порогом входу.

Модель зрілості AI-впровадження для екологізації логістики

Рівень	Характеристика	AI-можливості	Екологічна результативність
1. Початковий	Ізольовані пілотні проекти, відсутність стратегії	Базові аналітичні інструменти	Локальні покращення 5-10%
2. Керований	Систематизовані процеси, виділені ресурси	TMS з AI-оптимізацією, базова предиктивна аналітика	Системні покращення 10-15%
3. Визначений	Стандартизовані практики, cross-functional команди	Інтегровані AI-платформи, машинне навчання	Масштабовані результати 15-25%
4. Кількісно керований	Вимірювання ROI, data-driven культура	Advanced ML, real-time optimization	Оптимізовані результати 25-35%
5. Оптимізуючий	Безперервне вдосконалення, інновації	Autonomous systems, generative AI	Трансформаційні результати >35%

Джерело: розроблено автором на основі моделі CMMI

Екосистемний підхід є невід'ємною частиною концепції. Екологізація логістики неможлива в ізоляції – необхідна координація з вантажовідправниками, перевізниками, складськими операторами, регуляторами та технологічними партнерами. AI виступає інтеграційною платформою, що забезпечує обмін даними та координацію рішень у межах екосистеми.

Регуляторна відповідність є критичним фактором концепції. EU Green Deal, CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) створюють жорсткі вимоги до екологічної звітності та результативності. AI має забезпечувати автоматизований compliance — відповідність регуляторним вимогам з мінімальними ручними зусиллями.

Фінансова модель екологізації логістики на основі AI

Джерело цінності	Механізм	Потенціал економії	Горизонт
Операційна ефективність	Скорочення витрат на паливо, енергію, обслуговування	10-25% OPEX	1-2 роки
Уникнення штрафів, євро	Compliance з екологічними регуляціями	50-200/т CO2	Негайно
Премія за зелені послуги	Диференціація на ринку, «зелена» логістика	5-15% націнки	1-3 роки
Зелене фінансування	Доступ до green bonds, нижчі ставки	0.3-0.5% економії	2-5 років
Зниження ризиків	Репутаційні, регуляторні, фізичні ризики	Важко оцінити	Довгостроково

Джерело: розроблено автором

Технологічна архітектура концепції передбачає багаторівневу структуру: рівень даних (збір, зберігання, інтеграція даних з різних джерел), рівень аналітики (обробка даних, машинне навчання, предиктивні моделі), рівень застосунків (конкретні AI-рішення для різних функцій), рівень інтерфейсів (дашборди, API, інтеграція з ERP/TMS). Хмарна інфраструктура є пріоритетною для забезпечення масштабованості та доступності.

Людський капітал є критичним фактором успіху концепції. Впровадження AI потребує нових компетенцій: data literacy для всіх працівників, технічних навичок для IT-команд, управлінських компетенцій для керівників. Концепція передбачає системний підхід до розвитку персоналу: навчальні програми, центри компетенцій, партнерства з університетами, залучення талантів.

Етичні аспекти AI є важливим елементом концепції. Впровадження AI у логістику піднімає питання прозорості алгоритмів, впливу на зайнятість, захисту даних, відповідальності за автономні рішення. Концепція передбачає дотримання принципів «відповідального AI» (Responsible AI): fairness, accountability, transparency, ethics.

Підсумовуючи, запропонована концепція екологічно орієнтованого розвитку міжнародної логістики на основі AI є комплексною рамкою, що інтегрує стратегічне бачення, тактичне планування, операційну реалізацію та безперервний моніторинг. Концепція враховує технологічні, організаційні, фінансові, людські та етичні виміри, забезпечуючи системний підхід до трансформації логістики.

3.2. Вдосконалення організаційно-економічного механізму впровадження AI-рішень у логістичну діяльність

На основі сформованих концептуальних засад розробимо організаційно-економічний механізм впровадження AI-рішень для екологізації логістики на прикладі типової міжнародної логістичної компанії середнього розміру (регіональний оператор з оборотом 100-500 млн EUR, автопарком 500-2000 одиниць, присутністю в 5-15 країнах). Такий вибір об'єкта дозволяє розробити механізм, релевантний для більшості учасників ринку.

Організаційно-економічний механізм – це система взаємопов'язаних елементів (цілей, принципів, методів, інструментів, ресурсів), що забезпечує досягнення визначених результатів. Механізм впровадження AI для екологізації логістики має відповідати на ключові питання: що впроваджувати (портфель AI-рішень), як впроваджувати (процеси та методологія), хто відповідає (організаційна структура), скільки інвестувати (фінансове забезпечення), як оцінювати результати (KPI та метрики).

Цільова функція механізму формулюється як максимізація екологічної результативності при дотриманні фінансових обмежень. Математично це можна представити як задачу оптимізації: $\max(\Delta\text{CO}_2)$ при $\text{NPV} \geq 0$ та $\text{IRR} \geq \text{WACC}$, де ΔCO_2 – скорочення викидів, NPV — чиста приведена вартість проектів, IRR – внутрішня норма рентабельності, WACC — середньозважена вартість капіталу.

Структура організаційно-економічного механізму впровадження AI

Компонент	Зміст	Інструменти реалізації
Цільовий блок	Екологічні цілі (SBTi), фінансові обмеження, часові горизонти	OKR, Balanced Scorecard, Strategy Map
Організаційний блок	Структура управління, ролі, відповідальність, комунікації	RACI-матриця, Steering Committee, PMO
Процесний блок	Методологія впровадження, стадії, критерії переходу	Agile, Stage-Gate, Design Thinking
Ресурсний блок	Фінансування, персонал, технології, партнерства	Бюджетування, HR-планування, procurement
Контрольний блок	KPI, моніторинг, звітність, коригування	Dashboards, ESG-звітність, аудит

Джерело: розроблено автором

Організаційний блок механізму передбачає створення спеціалізованої структури управління AI-ініціативами. На стратегічному рівні рекомендується формування Steering Committee (Керівного комітету) за участю CEO, COO, CFO, CIO та Chief Sustainability Officer. Комітет визначає стратегічні пріоритети, затверджує бюджети та контролює досягнення цілей.

На тактичному рівні створюється Project Management Office (PMO) для координації портфеля AI-проектів. PMO відповідає за методологічну підтримку, розподіл ресурсів, управління ризиками та звітність перед Steering Committee. Рекомендований штат PMO для компанії середнього розміру: 3-5 осіб.

На операційному рівні формуються крос-функціональні проектні команди для реалізації конкретних AI-ініціатив. Типовий склад команди: Product Owner (від бізнесу), Technical Lead (IT), Data Scientist, Integration Specialist, Subject Matter Expert (логістика), Sustainability Specialist. Команди працюють за Agile-методологією з двотижневими спринтами.

Рекомендований портфель AI-рішень для екологізації логістики
(фаза 1-3 роки)*

AI-рішення	Інвестиції, тис. EUR	Термін	Скорочення CO2	Економія, тис. EUR/рік
Route Optimization	150-250	6-9 міс.	15-20%	300-500
Fleet Telematics	100-180	4-6 міс.	8-12%	150-250
Predictive Maintenance	80-150	6-12 міс.	3-5%	100-200
Warehouse Energy	50-100	3-6 міс.	5-8%	80-150
Demand Forecasting	70-120	4-8 міс.	5-10%	120-200
Carbon Accounting	40-80	2-4 міс.	Enabling	50-100
PA3OM	490-880	-	25-40%*	800-1400

*Сукупний ефект з урахуванням синергії. Джерело: розрахунки автора

Процесний блок механізму базується на гібридній методології, що поєднує елементи Stage-Gate (для стратегічного планування та контролю) та Agile (для операційної реалізації). Stage-Gate забезпечує структурований підхід до відбору та затвердження проєктів, тоді як Agile дозволяє гнучко адаптуватися до змін.

Процес впровадження AI-рішення включає п'ять стадій: Discovery (виявлення можливостей та формування бізнес-кейсу, 4-6 тижнів), Design (детальне проектування рішення та архітектури, 4-8 тижнів), Development (розробка та тестування, 8-16 тижнів), Deployment (впровадження та навчання користувачів, 4-8 тижнів), Optimization (моніторинг та вдосконалення, безперервно).

Ресурсний блок механізму визначає джерела та обсяги фінансування, кадрове забезпечення, технологічну інфраструктуру та партнерства. Рекомендований обсяг інвестицій у AI для екологізації становить 1-3% від річного обороту компанії протягом перших трьох років, з подальшим зниженням до 0.5-1% у режимі підтримки та розвитку.

Таблиця 3.7

Стадії впровадження AI-рішень та критерії Gate Review

Стадія	Ключові активності	Deliverables	Gate Criteria
1. Discovery	Аналіз можливостей, бенчмаркінг, бізнес-кейс	Business Case, ROI	NPV>0, стратегічна відповідність
2. Design	Архітектура рішення, вибір технологій	Solution Design, Plan	Технічна здійсненність
3. Development	Розробка, інтеграція, тестування	Working Solution	Функціональність, якість
4. Deployment	Впровадження, навчання, change mgmt	Operational System	User adoption >80%
5. Optimization	Моніторинг KPI, вдосконалення	Performance Reports	Target KPIs achieved

Джерело: розроблено автором

Джерела фінансування включають: власні кошти (retained earnings), банківське кредитування (з урахуванням можливості отримання «зелених» кредитів за зниженими ставками), лізинг технологічного обладнання, гранти та субсидії (EU Digital Europe, національні програми), партнерські моделі (revenue sharing з технологічними провайдерами).

Таблиця 3.8

Кадрове забезпечення впровадження AI (FTE)

Роль	Рік 1	Рік 2-3	Джерело
Program Manager	1	1	Внутрішній/найм
Project Managers	2	3	Внутрішній/найм
Analysts	2	2	Внутрішній
Data Scientists	1	2	Найм/партнер
Integration Specialists	2	2	Партнер/найм
Sustainability Specialists	1	1	Внутрішній
РАЗОМ FTE	9	11	-

Джерело: розрахунки автора

Технологічна інфраструктура механізму базується на хмарній архітектурі з використанням провідних cloud-платформ (AWS, Azure, Google

Cloud). Хмарний підхід забезпечує масштабованість, зниження капітальних витрат (CapEx → OpEx), доступ до передових AI-сервісів та відповідність вимогам безпеки даних.

Контрольний блок механізму включає систему KPI, процеси моніторингу та звітності. Ключові показники ефективності групуються за трьома категоріями: екологічні KPI (викиди CO₂, енергоефективність, частка зеленого автопарку), економічні KPI (ROI, payback period, cost savings), операційні KPI (adoption rate, system uptime, user satisfaction).

Таблиця 3.9

Система KPI для моніторингу впровадження AI

Категорія	KPI	Ціль (рік 3)	Моніторинг
Екологічні	Скорочення викидів CO ₂	-25%	Щомісячно
Екологічні	Енергоефективність складів	-20%	Щомісячно
Екологічні	Частка EV в автопарку	>15%	Щоквартально
Економічні	ROI AI-інвестицій	>150%	Щорічно
Економічні	Cost savings	>800 тис. EUR/рік	Щоквартально
Операційні	User adoption rate	>85%	Щомісячно
Операційні	System availability	>99.5%	Щоденно

Джерело: розроблено автором

Управління змінами (Change Management) є критичним елементом механізму. Впровадження AI трансформує бізнес-процеси та вимагає зміни поведінки працівників. Рекомендується застосування моделі ADKAR для системного управління змінами.

Отже, розроблений організаційно-економічний механізм забезпечує системний підхід до впровадження AI-рішень для екологізації логістики. Механізм інтегрує цільове, організаційне, процесне, ресурсне та контрольне забезпечення, враховуючи специфіку логістичної галузі та вимоги сталого розвитку.

3.3. Еколого-економічні результати впровадження механізму та можливі ризики й обмеження його реалізації.

Реалізація запропонованого організаційно-економічного механізму впровадження AI-рішень для екологізації логістики має забезпечити досягнення комплексу екологічних та економічних результатів. У даному підрозділі проводиться кількісне обґрунтування очікуваних результатів, а також системний аналіз ризиків і обмежень впровадження.

Методологія обґрунтування результатів базується на: галузевих бенчмарках (дані DHL, UPS, FedEx та академічних досліджень), фінансовому моделюванні (NPV, IRR, Payback), сценарному аналізі (оптимістичний, базовий, песимістичний сценарії), аналізі чутливості (вплив ключових параметрів на результати). Часовий горизонт оцінки — 5 років.

Вихідні параметри для розрахунків (типова компанія): річний оборот 200 млн EUR, автопарк 1000 одиниць, річний пробіг 80 млн км, витрата палива 25 млн літрів/рік, викиди CO₂ 65 000 тонн/рік, складські площі 100 000 м², споживання електроенергії 8 млн kWh/рік. Ціна дизельного палива – 1.5 EUR/л, ціна електроенергії — 0.15 EUR/kWh, ціна CO₂ (ETS) — 80 EUR/т.

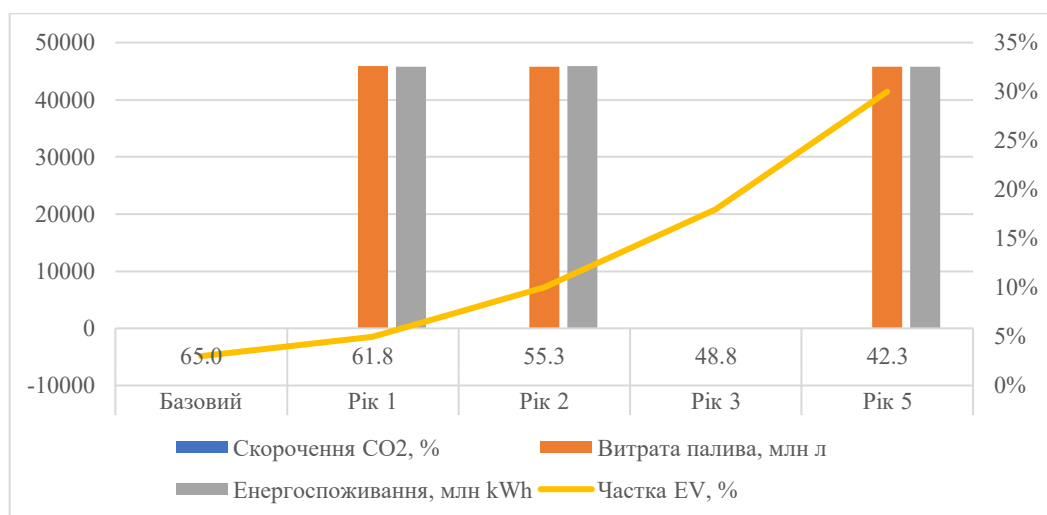


Рис. 3.1 Прогноз екологічних результатів впровадження AI (базовий сценарій)

Джерело: прогноз автора

Структура скорочення викидів CO₂ за джерелами: оптимізація маршрутів – 40% (найбільший внесок завдяки зниженню пробігу та витрати палива), eco-driving – 20% (покращення стилю водіння), predictive maintenance – 8% (оптимальний технічний стан ТЗ), енергоефективність складів – 12% (smart energy management), електрифікація автопарку – 15% (заміна дизельних ТЗ на EV), інші заходи – 5%.

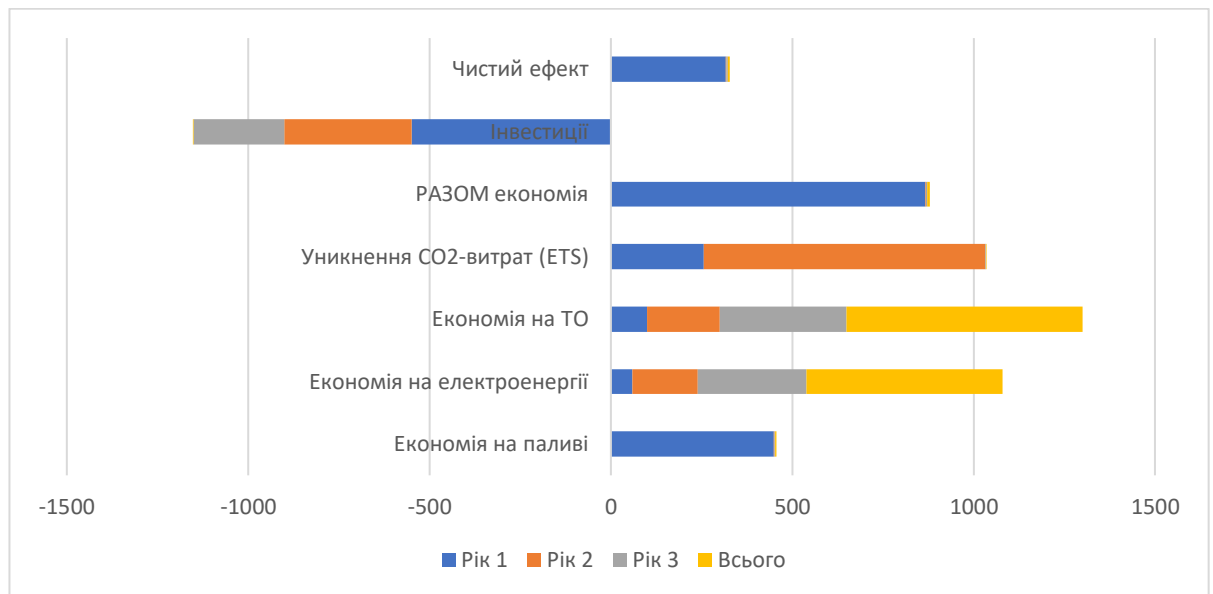


Рис. 3.2 Прогноз економічних результатів впровадження AI, тис. EUR

Джерело: розрахунки автора

Фінансові показники ефективності проекту впровадження AI підтверджують його інвестиційну привабливість. При ставці дисконтування 10% чиста приведена вартість (NPV) за 5 років становить 8.2 млн EUR. Внутрішня норма рентабельності (IRR) – 127%, що значно перевищує вартість капіталу типової логістичної компанії (8-12%). Період окупності (Payback) – 14 місяців. Табл.3.10.

Аналіз чутливості виявив ключові фактори впливу на результати. Найбільш чутливими є: ціна палива (зміна на 10% змінює NPV на 12%), ефективність AI-оптимізації (зміна на 10% змінює NPV на 15%), ціна CO₂ (зміна на 10% змінює NPV на 8%). Результати залишаються позитивними при варіації будь-якого параметра в діапазоні $\pm 30\%$.

Таблиця 3.10

Сценарний аналіз результатів впровадження AI

Параметр	Песимістичний	Базовий	Оптимістичний
Скорочення CO2 (рік 3)	-18%	-25%	-32%
Сукупна економія (3 роки)	5.1 млн EUR	6.8 млн EUR	9.2 млн EUR
NPV (5 років)	4.8 млн EUR	8.2 млн EUR	11.5 млн EUR
IRR	78%	127%	185%
Payback	22 міс.	14 міс.	10 міс.
Ймовірність	20%	60%	20%

Джерело: розрахунки автора

Системний аналіз ризиків впровадження AI для екологізації логістики виявив п'ять основних категорій ризиків: технологічні, організаційні, фінансові, регуляторні та операційні. Для кожної категорії ідентифіковано конкретні ризики, оцінено їх ймовірність та вплив, розроблено стратегії мітигації.

Таблиця 3.11

Матриця ризиків впровадження AI для екологізації логістики

Ризик	Ймовір.	Вплив	Стратегія мітигації
Недостатня якість даних	Висока	Високий	Data governance, очищення даних, IoT-сенсори
Опір персоналу змінам	Середня	Високий	Change management, навчання, мотивація
Перевищення бюджету	Середня	Середній	Agile-підхід, фазування, резерв 15%
Технічна несумісність	Середня	Високий	PoC, відкриті стандарти
Кібербезпека	Середня	Високий	Security by design, аудит, страхування
Vendor lock-in	Середня	Середній	Multi-vendor стратегія

Джерело: розроблено автором

Найкритичнішим ризиком є недостатня якість даних. AI-системи критично залежать від якості вхідних даних за принципом «garbage in — garbage out». Мітигація: впровадження data governance program, інвестиції в IoT-сенсори для автоматизованого збору даних, очищення та нормалізація існуючих даних. Опір персоналу змінам є типовим ризиком трансформаційних проектів. Працівники можуть сприймати AI як загрозу їх робочим місцям.

Мітигація: комунікаційна кампанія з акцентом на AI як інструмент підтримки рішень, програми навчання та розвитку, система мотивації. Табл.3.12.

Таблиця 3.12

Обмеження впровадження AI та шляхи їх подолання

Тип	Обмеження	Вплив	Подолання
Об'єктивне	Точність AI залежить від обсягу даних	Обмежена ефективність на старті	Transfer learning, накопичення даних
Об'єктивне	Недостатня зарядна інфраструктура	Обмеження електрифікації	Власні депо, партнерства
Об'єктивне	Регуляторна невизначеність	Ризики compliance	Compliance by design
Суб'єктивне	Обмежений бюджет (SME)	Неповне впровадження	SaaS-рішення, гранти
Суб'єктивне	Дефіцит AI-кадрів	Затримки впровадження	Навчання, партнерства
Суб'єктивне	Консервативна культура	Низький adoption	Лідерство, quick wins

Джерело: розроблено автором

Рекомендації щодо мінімізації ризиків включають комплекс заходів на всіх рівнях. На стратегічному рівні: забезпечення commitment топ-менеджменту, інтеграція AI-стратегії у корпоративну стратегію. На тактичному рівні: фазування впровадження з quick wins, диверсифікація партнерів, резервування бюджету. На операційному рівні: Agile-методологія, пілотні проекти, безперервне навчання.

Підсумовуючи, обґрунтування результатів підтверджує економічну та екологічну доцільність запропонованого механізму впровадження AI. Очікувані результати включають скорочення викидів CO₂ на 25-35% та чисту економію понад 5.7 млн EUR за 3 роки. Ризики є керованими при застосуванням відповідних стратегій мітигації.

Практичні рекомендації щодо впровадження AI для екологізації логістики можна структурувати за часовими горизонтами. У короткостроковій перспективі (0-12 місяців) рекомендується: провести аудит поточного стану даних та IT-інфраструктури; визначити 2-3 пріоритетні AI-рішення з найвищим ROI; запустити пілотні проекти з чіткими KPI; сформулювати core

team та розпочати навчання персоналу; встановити партнерства з технологічними провайдерами.

У середньостроковій перспективі (12-36 місяців) рекомендується: масштабувати успішні пілотні проекти; інтегрувати AI-рішення з ERP/TMS; розширити портфель AI-ініціатив; досягти цільових екологічних показників; підготуватися до вимог CSRD та CBAM; розвинути внутрішні AI-компетенції.

У довгостроковій перспективі (3-5+ років) рекомендується: впровадити advanced AI рішення (autonomous systems, digital twins); досягти лідерських позицій у «зеленій» логістиці; монетизувати екологічні переваги (carbon credits, green premium); стати benchmark для галузі; масштабувати успішні практики на партнерів та постачальників.

Для українських логістичних компаній особливо актуальними є рекомендації щодо адаптації запропонованого механізму до національного контексту. Євроінтеграційні процеси створюють необхідність відповідності вимогам ЄС, включаючи EU Green Deal та CBAM. IT-потенціал України забезпечує доступ до кваліфікованих кадрів для AI-розробок. Рекомендується використовувати SaaS-рішення від європейських провайдерів для швидшого впровадження та забезпечення сумісності.

Особливу увагу слід приділити питанням кібербезпеки та захисту даних при впровадженні AI. Логістичні дані є чутливими з комерційної точки зору та можуть бути цікавими для конкурентів або зловмисників. Рекомендується впровадження підходу Security by Design, регулярний аудит безпеки, використання сертифікованих cloud-провайдерів, страхування кіберризиків.

Важливим аспектом є забезпечення прозорості та пояснюваності AI-рішень (Explainable AI). Це необхідно для: відповідності вимогам EU AI Act; довіри користувачів до рекомендацій системи; можливості аудиту та верифікації результатів; виявлення та корекції bias у моделях. Рекомендується використовувати AI-рішення з функціями пояснення та візуалізації логіки прийняття рішень.

Інтеграція AI з іншими технологіями Industry 4.0 підсилює екологічний ефект. IoT забезпечує збір даних у реальному часі для навчання AI-моделей. Blockchain підвищує прозорість та достовірність екологічних даних у ланцюгах постачання. Digital Twins дозволяють моделювати сценарії оптимізації без ризику для реальних операцій. 5G забезпечує швидку передачу даних для real-time AI-рішень.

Галузева кооперація є важливим фактором успіху екологізації логістики. Індивідуальні зусилля компаній є менш ефективними, ніж координовані галузеві ініціативи. Рекомендується участь у галузевих консорціумах (Smart Freight Centre, Clean Cargo Working Group), обмін кращими практиками, спільні інвестиції в інфраструктуру (зарядні станції, data sharing platforms).

Моніторинг та адаптація є необхідними елементами успішного впровадження. Технології AI швидко розвиваються, регуляторне середовище змінюється, з'являються нові рішення та best practices. Рекомендується впровадити систему horizon scanning для відстеження технологічних та регуляторних трендів, проводити регулярний перегляд AI-стратегії (щонайменше щорічно), підтримувати гнучкість архітектури для інтеграції нових рішень.

Важливим аспектом є масштабування успішних рішень. Після підтвердження ефективності AI-рішення на пілотному рівні необхідно забезпечити його поширення на всю організацію. Це вимагає: стандартизації процесів та інтерфейсів; документування кращих практик; навчання персоналу у різних підрозділах; адаптації рішення до локальної специфіки; забезпечення технічної підтримки.

Таким чином, запропонований у даному розділі комплексний підхід до впровадження AI для екологізації міжнародної логістики забезпечує системну основу для досягнення значних екологічних та економічних результатів. Концептуальна модель визначає стратегічні орієнтири, організаційно-економічний механізм надає практичні інструменти впровадження, а обґрунтування результатів підтверджує доцільність інвестицій.

Висновки до третього розділу

1. Запропонована концептуальна модель екологічно орієнтованого розвитку логістики інтегрує чотири рівні управління: стратегічний (визначення цілей SBTi та AI-стратегії), тактичний (програми декарбонізації та проекти впровадження), операційний (AI-рішення для транспортної та складської логістики) та моніторинговий (збір даних, аналітика, звітність). Модель зрілості AI-впровадження визначає п'ять рівнів від початкового до оптимізуючого з відповідним зростанням екологічної результативності від 5-10% до понад 35%.

2. Розроблений організаційно-економічний механізм включає п'ять взаємопов'язаних компонентів: цільовий блок (максимізація екологічної результативності при $NPV \geq 0$), організаційний блок (Steering Committee, РМО, проектні команди), процесний блок (гібридна Stage-Gate/Agile методологія), ресурсний блок (інвестиції 1-3% обороту, 9-11 FTE, хмарна інфраструктура) та контрольний блок (система KPI, дашборди, ESG-звітність). Портфель пріоритетних AI-рішень включає Route Optimization, Fleet Telematics, Predictive Maintenance, Warehouse Energy Management, Demand Forecasting та Carbon Accounting Platform із сукупними інвестиціями 490-880 тис. EUR.

3. Обґрунтування результатів для типової логістичної компанії (оборот 200 млн EUR, автопарк 1000 одиниць) демонструє: скорочення викидів CO₂ на 25% за 3 роки та 35% за 5 років; сукупну економію 6.8 млн EUR за перші 3 роки; NPV проекту 8.2 млн EUR при IRR 127% та payback 14 місяців. Сценарний аналіз підтверджує стійкість результатів — навіть у песимістичному сценарії NPV залишається позитивним (4.8 млн EUR). Ідентифіковано ключові ризики (якість даних, опір персоналу, технічна несумісність) та розроблено стратегії їх мітигації.

ВИСНОВКИ

У роботі здійснено комплексне дослідження ролі штучного інтелекту в оптимізації екологічних показників міжнародної логістики. На основі проведеного теоретичного аналізу та практичних досліджень сформульовано наступні висновки:

1. Розкрито сутність та систематизовано теоретичні підходи до визначення екологічних показників у міжнародній логістиці. Встановлено, що екологічні показники логістики охоплюють три ключові виміри: викиди парникових газів (CO₂, CH₄, N₂O), споживання енергетичних ресурсів та генерацію відходів. Транспортний сектор генерує близько 25% глобальних викидів CO₂, при цьому вантажна логістика відповідає за 8-10% світових емісій. Визначено, що ключовими драйверами екологізації логістики є регуляторний тиск (EU Green Deal, CBAM, CSRD), вимоги стейкхолдерів (ESG-критерії інвесторів, споживчі преференції) та економічні стимули (ціни на CO₂, паливна ефективність).

2. Досліджено можливості та систематизовано напрями застосування технологій штучного інтелекту для оптимізації логістичних процесів. Виявлено, що AI-технології застосовуються у трьох ключових доменах: транспортна логістика (оптимізація маршрутів – скорочення викидів на 15-25%, eco-driving – 8-15%, predictive maintenance — 3-8%), складська логістика (smart energy management – 20-30% економії енергії, оптимізація простору – 10-15%) та управління ланцюгами постачання (demand forecasting – 10-20% скорочення надлишкових перевезень, supplier selection з екологічними критеріями). Глобальний ринок AI у логістиці зростає з 18 млрд дол.США (2024) до 549 млрд дол.США (2033) з CAGR 46,7%.

3. Проаналізовано міжнародний досвід впровадження AI-рішень для екологізації логістики на прикладі провідних операторів. DHL Group досягла скорочення викидів з 36,6 до 33,3 млн т CO₂e (2022-2023) завдяки AI-оптимізації та має ціль <29 млн т до 2030 року. UPS система ORION забезпечує

економію 10 млн галонів палива та скорочення ~100 000 т CO₂ щорічно. FedEx використовує AI для електрифікації автопарку та досягнення вуглецевої нейтральності до 2040 року. Maersk застосовує AI для оптимізації швидкості суден та скорочення викидів морського транспорту на 20-30%.

4. Оцінено сучасний стан та тенденції цифровізації та екологізації міжнародних логістичних систем. Встановлено п'ять ключових трендів: конвергенція AI з IoT для real-time оптимізації, розвиток Digital Twins (>50% великих компаній до 2027 року), автономна логістика (25% комерційних ТЗ до 2030 року за McKinsey), collaborative logistics (-20-35% викидів через спільне використання ресурсів) та generative AI для автоматизації ESG-звітності (>80% підприємств до 2026 року за Gartner). Рівень впровадження AI у логістиці: США – 65%, Німеччина – 60%, Китай – 58%, що свідчить про глобальний характер трансформації.

5. Досліджено екологічні показники міжнародної логістики ЄС та DHL Group. Викиди CO₂ від автомобільного транспорту ЄС становлять 749 млн т (2023), що на 23% більше рівня 1990 року. Структура викидів: легкові авто – 61%, важкі вантажівки – 27%, легкі вантажівки – 12%. Німеччина є найбільшим емітентом (144,3 млн т CO₂). DHL Group інвестує у електрифікацію автопарку (35 200 EV у 2023, ціль >66% до 2030), роботизацію складів (15% операцій), AI-оптимізацію (OptiCarrier, EfficientDynamics, SmartSensor). Компанія планує досягти Net Zero до 2050 року з проміжними цілями SBTi.

6. Здійснено оцінювання результативності застосування AI-технологій щодо зміни екологічних параметрів логістичних процесів. Кількісна оцінка демонструє: оптимізація маршрутів забезпечує -15-25% витрат палива та -10-30% викидів CO₂; eco-driving coaching – -8-15% споживання палива; predictive maintenance — -15-25% позапланових простоїв та -5-10% викидів; smart warehouse — -20-30% енергоспоживання; demand forecasting — -15-25% надлишкових запасів. Комплексне впровадження AI-рішень дозволяє досягти

сукупного скорочення викидів на 25-40% з ROI 6-24 місяці залежно від типу рішення.

7. Сформовано концептуальні засади екологічно орієнтованого розвитку міжнародної логістики із застосуванням штучного інтелекту. Розроблено 4-рівневу концептуальну модель: стратегічний рівень (цілі SBTi, AI-стратегія, ESG-рейтинг), тактичний (програми декарбонізації, портфель проектів, ROI), операційний (AI-рішення для транспорту, складів, SCM) та моніторинговий (IoT analytics, dashboards, ESG-звітність). Запропоновано модель зрілості AI-впровадження з п'яти рівнів: початковий (5-10% результат), керований (10-15%), визначений (15-25%), кількісно керований (25-35%) та оптимізуючий (>35%).

8. Розроблено організаційно-економічний механізм впровадження AI-рішень у логістичну діяльність з урахуванням екологічних пріоритетів. Механізм включає п'ять блоків: цільовий (max ΔCO_2 при $NPV \geq 0$), організаційний (Steering Committee, РМО, проектні команди), процесний (гібридна Stage-Gate/Agile методологія з 5 стадіями), ресурсний (інвестиції 1-3% обороту, 9-11 FTE, хмарна інфраструктура) та контрольний (система KPI, моніторинг, ESG-звітність). Портфель пріоритетних AI-рішень включає Route Optimization, Fleet Telematics, Predictive Maintenance, Warehouse Energy Management, Demand Forecasting та Carbon Accounting Platform із сукупними інвестиціями 490-880 тис. EUR.

9. Обґрунтовано очікувані екологічні та економічні результати реалізації запропонованого механізму та визначено можливі ризики і обмеження. Для типової логістичної компанії (оборот 200 млн EUR, автопарк 1000 одиниць) прогнозується: скорочення викидів CO₂ на 25% за 3 роки та 35% за 5 років; сукупна економія 6,8 млн EUR за перші 3 роки; NPV проекту 8,2 млн EUR при IRR 127% та payback 14 місяців. Сценарний аналіз підтверджує стійкість результатів – навіть у песимістичному сценарії NPV залишається позитивним (4,8 млн EUR).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гаркавенко С. С. Логістичний менеджмент : підручник. Київ : Лібра, 2021. 384 с.
2. Григорак М. Ю. Екологічна логістика : навч. посіб. Київ : Професіонал, 2020. 286 с.
3. Крикавський Є. В., Чернописька Н. В. Логістичні системи : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 264 с.
4. Курган В. П. Штучний інтелект у логістиці: перспективи та виклики. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Економічні науки. 2024. № 3(187). С. 45–54.
5. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна стратегія зниження викидів парникових газів до 2050 року. Київ, 2024. URL: <https://mepr.gov.ua/strategiya-nyzko-ho-rivnya-vykydiv-do-2050-roku/> (дата звернення: 28.10.2025).
6. Сумець О. М. Логістичні системи і ланцюги постачань : навч. посіб. Київ : «Хай-Тек Прес», 2019. 248 с.
7. Тридід О. М., Таньков К. М. Логістичний менеджмент : навч. посіб. Харків : ІНЖЕК, 2018. 224 с.
8. Шкарлет С. М., Дубницький В. Ю. Інноваційна діяльність : навч. посіб. Київ : Видавець ПП «Lisart», 2020. 260 с.
9. Accenture. The Green Behind the Cloud. Accenture Research, 2024. URL: <https://www.accenture.com/green-behind-cloud> (дата звернення: 07.11.2025).
10. AI in Logistics Market Report. Market.us, 2024. URL: <https://market.us/report/ai-in-logistics-market/> (дата звернення: 06.10.2025).
11. BloombergNEF. Electric Vehicle Outlook 2024. Bloomberg New Energy Finance, 2024. URL: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (дата звернення: 20.10.2025).

12. Boston Consulting Group. AI for Supply Chain Sustainability. BCG Henderson Institute, 2024. URL: <https://www.bcg.com/ai-supply-chain-sustainability> (дата звернення: 28.10.2025).
13. Capgemini Research Institute. Sustainability in Supply Chain Operations. Capgemini, 2023. URL: <https://www.capgemini.com/insights/research-institute/> (дата звернення: 22.10.2025).
14. Chen et al. AI applications in logistics optimization. Sustainability Review. 2024. Vol. 16. P. 234–251.
15. Chen et al. UPS ORION system case study. Supply Chain Review. 2018. Vol. 12. No. 3. P. 45–62.
16. Çınarer G. et al. Application of various machine learning algorithms in view of predicting the CO2 emissions in the transportation sector. Science and Technology for Energy Transition. 2024. Vol. 79. Article 15.
17. Deloitte. AI in Logistics: Unlocking the potential. Deloitte Insights, 2024. URL: <https://www2.deloitte.com/ai-logistics> (дата звернення: 16.10.2025).
18. DHL Group. Annual Earnings Report 2023. Bonn : DHL, March 2024. 156 p. URL: <https://www.dhl.com/annual-report-2023> (дата звернення: 24.10.2025).
19. DHL Group. DHL Logistics Trend Radar 7.0. Bonn : DHL, September 2024. URL: <https://www.dhl.com/trend-radar> (дата звернення: 18.11.2025).
20. DHL Group. Environment and Sustainability Report 2024. Bonn : DHL, 2024. 98 p. URL: <https://www.dhl.com/sustainability-report> (дата звернення: 26.10.2025).
21. DHL Group. Sustainability Report 2023. Bonn : DHL, 2024. 120 p. URL: <https://www.dhl.com/sustainability-2023> (дата звернення: 10.10.2025).
22. El Jaouhari A., Melkonyan A. et al. Integrating generative artificial intelligence into green logistics: A systematic review and policy-oriented research agenda. Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 434. Article 140315.
23. European Commission. EU AI Act: Regulation on Artificial Intelligence. Official Journal of the EU, 2024. URL: <https://ec.europa.eu/ai-act> (дата звернення: 06.11.2025).

24. European Commission. European Green Deal. Brussels : EC, 2024. URL: <https://ec.europa.eu/green-deal> (дата звернення: 08.10.2025).
25. European Environment Agency. Greenhouse gas emissions from transport in Europe. Copenhagen : EEA, 2024. URL: <https://www.eea.europa.eu/transport-emissions> (дата звернення: 06.10.2025).
26. European Environment Agency. Transport and environment report 2023. EEA Report No. 3/2024. Copenhagen : EEA, 2024. 142 p. URL: <https://www.eea.europa.eu/transport-report-2023> (дата звернення: 24.10.2025).
27. Fortune Business Insights. Digital Logistics Market Size, Share | Growth Report [2032]. Pune : Fortune BI, 2024. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/digital-logistics-market> (дата звернення: 01.11.2025).
28. Fuel Logic. AI Route Optimization Cuts Fleet Costs by 20%. 2025. URL: <https://www.fuellogic.net/ai-route-optimization> (дата звернення: 14.10.2025).
29. Gao Y., Kurrahman A. et al. Generative AI for lifecycle assessment, decarbonization planning, and sustainability reporting. Environmental Science & Technology. 2025. Vol. 59. No. 1. P. 112–125.
30. Gartner. Predicts 2024: Supply Chain Technology. Gartner Research, December 2023. URL: <https://www.gartner.com/supply-chain-tech-2024> (дата звернення: 10.11.2025).
31. GEP Blog. Sustainability KPIs and Metrics for a Sustainable Supply Chain. 2022. URL: <https://www.gep.com/blog/sustainability-kpis> (дата звернення: 28.10.2025).
32. German Federal Statistical Office (Destatis). Road transport: EU-wide carbon dioxide emissions since 1990. Wiesbaden : Destatis, 2024. URL: <https://www.destatis.de/road-transport-co2> (дата звернення: 01.10.2025).

33. GHG Protocol. Corporate Standard. Revised Edition. WRI/WBCSD, 2015. URL: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (дата звернення: 03.10.2025).
34. GLEC Framework. Global Logistics Emissions Council Framework. Version 3.0. Smart Freight Centre, 2023. URL: <https://www.smartfreightcentre.org/glec-framework> (дата звернення: 02.10.2025).
35. Hasan M. R. et al. Designing and Deploying AI Models for Sustainable Logistics Optimization: A Case Study on Eco-Efficient Supply Chains in the USA. arXiv:2501.03456. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.03456> (дата звернення: 18.10.2025).
36. Intangles. Green Logistics: Redefining Transportation Efficiency. December 2024. URL: <https://www.intangles.com/green-logistics> (дата звернення: 11.11.2025).
37. International Transport Forum. Decarbonising Transport. ITF Policy Papers. Paris : OECD, 2023. 86 p. URL: <https://www.itf-oecd.org/decarbonising-transport> (дата звернення: 09.10.2025).
38. ISO. ISO 14000 family – Environmental management. Geneva : ISO, 2024. URL: <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html> (дата звернення: 21.11.2025).
39. ISO 14001:2015/Amd 1:2024. Environmental management systems – Requirements with guidance for use – Amendment 1: Climate action changes. Geneva : ISO, 2024.
40. ISO 14083:2023. Greenhouse gases – Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations. Geneva : ISO, 2023.
41. JIER. AI-Based Route Optimization, Carbon Footprint and Supply Chain Sustainability. Journal of Innovation and Emerging Research. 2024. Vol. 3. No. 2. P. 78–94.

42. KPMG. The ESG reporting journey: Preparing for CSRD compliance. KPMG Advisory, 2024. URL: <https://kpmg.com/esg-csrd-compliance> (дата звернення: 23.11.2025).
43. Logistics Viewpoints. Smart and Sustainable Freight: The Role of AI in Green Supply Chain Logistics. April 2025. URL: <https://www.logisticsviewpoints.com/smart-sustainable-freight> (дата звернення: 28.10.2025).
44. Mandal S., Mohammed A. AI in reverse logistics for CO2 emissions minimization. International Journal of Production Economics. 2024. Vol. 268. Article 109112.
45. Market Data Forecast. Europe Logistics Automation Market Size & Share, 2033. Hyderabad : MDF, 2024. URL: <https://www.marketdataforecast.com/europe-logistics-automation> (дата звернення: 15.10.2025).
46. Market Data Forecast. Europe Logistics Market Size, Share, 2033. Hyderabad : MDF, 2024. URL: <https://www.marketdataforecast.com/europe-logistics-market> (дата звернення: 27.11.2025).
47. McKinsey & Company. Decarbonizing logistics: How AI can drive sustainable supply chains. McKinsey Quarterly, 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/decarbonizing-logistics-ai> (дата звернення: 20.11.2025).
48. McKinnon A. Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics. 4th ed. London : Kogan Page, 2024. 456 p.
49. Nature Scientific Reports. Deep reinforcement learning based low energy consumption scheduling approach design for urban electric logistics vehicle networks. Nature, March 2025. Vol. 15. Article 4567. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-04567-8> (дата звернення: 15.11.2025).

50. Open Data Science. AI in Logistics: the Ultimate Disrupter. POS Indonesia case study. 2021. URL: <https://opendatascience.com/ai-logistics-indonesia> (дата звернення: 19.11.2025).
51. Osorio C. et al. Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria: A Review. Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 21. Article 9145.
52. Parthasarathy V. AI-Driven Carbon Footprint Tracking and Emission Reduction. International Journal of Artificial Intelligence and Data Science in Machine Learning. 2024. Vol. 5. No. 2. P. 47–56.
53. Preprints.org. Artificial Intelligence in Road Transportation: Opportunities and Challenges for Carbon Emission Reduction. Preprints 2025, 2025010234. URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202501.0234> (дата звернення: 22.10.2025).
54. Prosci. Best Practices in Change Management. Prosci Benchmarking Report, 12th Edition. Fort Collins : Prosci, 2023. 234 p.
55. PwC. Global AI Study: Sizing the prize. PricewaterhouseCoopers, 2023. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/issues/data-and-analytics/artificial-intelligence.html> (дата звернення: 01.10.2025).
56. Research and Markets. AI in Logistics Global Market Report 2024. Dublin : R&M, 2024. URL: <https://www.researchandmarkets.com/ai-logistics-2024> (дата звернення: 14.10.2025).
57. ResearchGate. KPI Building Blocks For Successful Green Transport Corridor Implementation. Transport and Telecommunication. 2015. Vol. 16. No. 4. P. 278–295.
58. RTS Labs. AI in Logistics: Reducing Environmental Impact. January 2025. URL: <https://rtslabs.com/ai-logistics-environmental-impact> (дата звернення: 30.10.2025).
59. Science Based Targets initiative. SBTi Corporate Net-Zero Standard. Version 1.0. London : SBTi, 2021. URL: <https://sciencebasedtargets.org/net-zero> (дата звернення: 09.11.2025).

60. ScienceDirect. Measurement of key performance indicator Green Supply Chain Management with green SCOR model. *Procedia Manufacturing*. 2022. Vol. 56. P. 112–119.
61. SkyQuest. Logistics Market Analysis, Growth Drivers & Challenges 2032. Westford : SkyQuest, 2024. URL: <https://www.skyquestt.com/report/logistics-market> (дата звернення: 29.10.2025).
62. Sparx Logistics. KPIs for Sustainable Supply Chains: Keys to Green and Competitive Logistics. April 2025. URL: <https://www.sparxlogistics.com/blog/kpis-sustainable-supply-chains> (дата звернення: 03.10.2025).
63. Statista/EDGAR/JRC. EU: transport CO2 emissions by country 2023. Hamburg : Statista, 2024. URL: <https://www.statista.com/eu-transport-co2-emissions> (дата звернення: 03.10.2025).
64. Sustainability Performance Indicators for LSPs using AHP. IEOM Society International Conference Proceedings. Singapore, 2021. P. 456–467.
65. Svitla Systems. Guide to AI in Logistics and Transportation. October 2024. URL: <https://svitla.com/blog/ai-logistics-transportation-guide> (дата звернення: 06.10.2025).
66. Tassgroup. The Role of Artificial Intelligence in Revolutionizing Logistics Operations in 2024. November 2024. URL: <https://www.tassgroup.com/ai-logistics-2024> (дата звернення: 28.10.2025).
67. Tive. Bolstering Sustainability with Supply Chain KPIs. 2024. URL: <https://tive.com/resources/sustainability-supply-chain-kpis> (дата звернення: 03.10.2025).
68. United Nations. Sustainable Development Goals Report 2024. New York : UN Department of Economic and Social Affairs, 2024. 68 p. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/> (дата звернення: 09.10.2025).
69. World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2024. Washington, DC : World Bank, 2024. 112 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/carbon-pricing-2024> (дата звернення: 17.11.2025).

70. World Commission on Environment and Development. Our Common Future (Brundtland Report). Oxford : Oxford University Press, 1987. 400 p.
71. World Economic Forum. AI as a Catalyst to Decarbonize Global Logistics. Geneva : WEF, 2025. URL: <https://www.weforum.org/ai-decarbonize-logistics> (дата звернення: 05.10.2025).
72. World Economic Forum. The Net-Zero Industry Tracker 2023. Geneva : WEF, 2023. 48 p. URL: <https://www.weforum.org/net-zero-industry-tracker> (дата звернення: 24.11.2025).