

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Навчально-науковий інститут економіки та менеджменту
Кафедра економіки підприємства і міжнародного бізнесу

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи (проекту)
другого магістерського рівня
(освітній ступінь)

на тему

“Глобальні виміри вуглецевого сліду цифрової економіки”

Виконав: студент 6 курсу групи МЕ-61м
напряму підготовки (спеціальності)
292 «Міжнародні економічні відносини»

Тинщук А.П.

Керівник к.е.н., доцент **Вашай Ю.В.**

Рецензент д.е.н., професор **Ханін І.Г.**

Рівне 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Навчально-науковий інститут:	<i>Економіки та менеджменту</i>
Кафедра:	<i>Економіки підприємства і міжнародного бізнесу</i>
Освітній ступінь:	<i>Другий (магістерський)</i>
Спеціальність (напрямок підготовки)	<i>292 "Міжнародні економічні відносини"</i>

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

В.о. завідувача кафедри
економіки підприємства і міжнародного бізнесу
О.М. Гарнага
„_____” _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (ПРОЕКТУ) СТУДЕНТА

Тинищуку Артему Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Глобальні виміри вуглецевого сліду цифрової економіки»

Керівник роботи: к.е.н., доцент Вашай Ю. В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом університету від _____ 2025 С №-

2. Строк подання студентом закінченої роботи: 10.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: *статті зарубіжних та вітчизняних науковців, аналітичні звіти міжнародних агенцій; матеріали навчальних посібників та підручників, відповідні сайти в Internet; дані Державної служби статистики України.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЛОБАЛЬНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

1.1. Цифрова економіка як глобальний феномен: сутність, структура та еволюція

1.2. Концепція вуглецевого сліду: теоретичні підходи та міжнародні стандарти вимірювання

1.3. Глобальні підходи до оцінювання вуглецевого сліду цифрової економіки та світові тенденції декарбонізації ІКТ-сектору

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ГЛОБАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

2.1. Світові тренди викидів CO₂, пов'язаних із цифровою інфраструктурою

2.2. Порівняльний аналіз провідних цифрових корпорацій (Google, Amazon, Microsoft, Meta)

2.3. Україна в глобальних процесах цифровізації: екологічні ризики та можливості

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

3.1. Глобальні стратегії декарбонізації цифрової економіки

3.2. Інноваційні технології зменшення CO₂-викидів у цифровій економіці

3.3. Пропозиції щодо зменшення вуглецевого сліду цифрової економіки України

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

ДОДАТКИ

5. *Перелік графічного матеріалу: Роздатковий матеріал*

6. *Консультанти розділів роботи:*

Розділ	Прізвище, ініціали і посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Вашай Ю.В.		
Розділ 2	Вашай Ю.В.		
Розділ 3	Вашай Ю.В.		

7. *Дата видачі завдання:* _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проекту)	Строк виконання етапів роботи (проекту)	Примітка
1	Збір інформації для написання дипломної роботи	06.10.2025	
2	Обробка літературних джерел та статистичних матеріалів по темі дипломної роботи	12.10.2025	
3	Написання теоретичного розділу роботи	20.10.2025	
4	Розробка аналітичного розділу дипломної роботи та формулювання висновків	07.11.2025	
5	Обґрунтування рекомендацій та прогнозування міжнародної міграції робочої сили	17.11.2025	
6	Оформлення дипломної роботи	13.12.2025	
7	Створення презентації для мультимедійного супроводу на захисті кваліфікаційної роботи	19.12.2025	
8	Підготовка доповіді	20.12.2025	

Студент

А.П. Тиншук

Керівник роботи (проекту)

Ю.В. Вашай

АКТ

перевірки випускної кваліфікаційної роботи (магістерської роботи) на наявність текстових збігів

Відповідно до даних сервісу Strike Plagiarism файл Tynshchuk_Globalni vymiry cyfrovoi ekonomіci_Vashai, автор: Тинщук А.П., містить 93,1% авторського тексту.

Доцент кафедри
економіки підприємства і міжнародного бізнесу,
к.е.н., доцент

Ю.В. Вашай

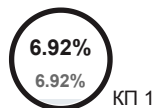
Звіт подібності

Метадані

Назва організації		підрозділ		
National University of Water and Environmental Engineering		National University of Water and Environmental Engineering		
Заголовок				
Tynshchuk_Globalni vymiry cyfrovoi economicu_Vashai1.docx				
Автор		Науковий керівник / Експерт		
Тинщук Артем Павлович		Тинщук Артем Павлович		
Кількість слів	Кількість символів	Дата звіту	Дата редагування	ІД документу
15988	129508	12/19/2025	---	332909689

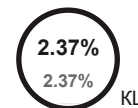
Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



15988

Кількість слів



129508

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		0
Інтервали		0
Мікропробіли		2
Білі знаки		13
Парафрази (SmartMarks)		32

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	Матеріали конференції_05.05.2025 p_макет 5/7/2025 V. N. Karazin Kharkiv National University (KKNU) (ННІ КІМБ та ТБ - кафедра світової політики, дипломатії та туристичного бізнесу)	260 1.63 %
2	Матеріали конференції_05.05.2025 p_макет 5/7/2025 V. N. Karazin Kharkiv National University (KKNU) (ННІ КІМБ та ТБ - кафедра світової політики, дипломатії та туристичного бізнесу)	173 1.08 %

РЕФЕРАТ

Робота містить 83 сторінки, 3 таблиці, 15 рисунків, список використаних джерел – 74 найменування.

Глобальні виміри вуглецевого сліду цифрової економіки

Об’єктом дослідження є цифрова економіка як складова сучасної глобальної економічної системи та її вплив на навколишнє природне середовище.

Предметом дослідження є вуглецевий слід цифрової економіки, методи його оцінювання, джерела формування та інструменти зменшення викидів парникових газів у процесі цифровізації.

Мета роботи полягає в комплексному дослідженні глобальних вимірів вуглецевого сліду цифрової економіки, аналізі світових тенденцій його формування, оцінюванні екологічного впливу цифрової інфраструктури та розробці практичних рекомендацій щодо зменшення вуглецевого навантаження цифрового сектору, зокрема в контексті розвитку цифрової економіки України.

Ключові слова: цифрова економіка, вуглецевий слід, декарбонізація, дата-центри, цифрова інфраструктура, енергоефективність, сталий розвиток.

У роботі досліджено теоретичні основи формування цифрової економіки та концепції вуглецевого сліду, узагальнено міжнародні підходи та стандарти вимірювання викидів парникових газів у сфері інформаційно-комунікаційних технологій. Проаналізовано глобальні тенденції зростання енергоспоживання та CO₂-викидів, пов’язаних із розвитком цифрової інфраструктури, а також здійснено порівняльний аналіз екологічних стратегій провідних цифрових корпорацій. Окрему увагу приділено ролі України в глобальних процесах цифровізації, визначено екологічні ризики та потенційні можливості зменшення вуглецевого сліду цифрового сектору.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих рекомендацій органами державної влади, підприємствами цифрового сектору та іншими зацікавленими сторонами для формування екологічно орієнтованої цифрової політики, впровадження енергоефективних технологій, зменшення викидів парникових газів та забезпечення сталого розвитку цифрової економіки України в умовах глобальних кліматичних викликів.

ABSTRACT

The thesis consists of 83 pages, 3 tables, 15 figures, and a list of references comprising 74 sources.

Global Dimensions of the Carbon Footprint of the Digital Economy

The object of the research is the digital economy as a component of the modern global economic system and its impact on the natural environment.

The subject of the research is the carbon footprint of the digital economy, methods of its assessment, sources of its formation, and tools for reducing greenhouse gas emissions in the process of digitalization.

The purpose of the thesis is to conduct a comprehensive study of the global dimensions of the carbon footprint of the digital economy, analyze global trends in its formation, assess the environmental impact of digital infrastructure, and develop practical recommendations for reducing the carbon burden of the digital sector, particularly in the context of the development of Ukraine's digital economy.

Keywords: digital economy, carbon footprint, decarbonization, data centers, digital infrastructure, energy efficiency, sustainable development.

The thesis examines the theoretical foundations of the digital economy and the concept of the carbon footprint, and summarizes international approaches and standards for measuring greenhouse gas emissions in the field of information and communication technologies. Global trends in energy consumption and CO₂ emissions associated with the development of digital infrastructure are analyzed, and a comparative assessment of environmental strategies of leading digital corporations is conducted. Special attention is paid to Ukraine's role in global digitalization processes, identifying environmental risks and potential opportunities for reducing the carbon footprint of the digital sector.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed recommendations by public authorities, digital sector enterprises, and other stakeholders to develop environmentally oriented digital policies, implement energy-efficient technologies, reduce greenhouse gas emissions, and ensure the sustainable development of Ukraine's digital economy in the context of global climate challenges.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЛОБАЛЬНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ	11
1.1. Цифрова економіка як глобальний феномен: сутність, структура та еволюція	11
1.2. Концепція вуглецевого сліду: теоретичні підходи та міжнародні стандарти вимірювання	15
1.3. Глобальні підходи до оцінювання вуглецевого сліду цифрової економіки та світові тенденції декарбонізації ІКТ-сектору	19
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ГЛОБАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ	24
2.1. Світові тренди викидів CO ₂ , пов'язаних із цифровою інфраструктурою..	24
2.2. Порівняльний аналіз провідних цифрових корпорацій (Google, Amazon, Microsoft, Meta)	43
2.3. Україна в глобальних процесах цифровізації: екологічні ризики та можливості.....	55
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ	60
3.1. Глобальні стратегії декарбонізації цифрової економіки	60
3.2. Інноваційні технології зменшення CO ₂ -викидів у цифровій економіці.....	63
3.3. Пропозиції щодо зменшення вуглецевого сліду цифрової економіки України.....	67
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	76
ДОДАТКИ.....	82

ВСТУП

Стрімкий розвиток цифрових технологій, що охоплює усі сфери глобальної економіки, формує нові моделі виробництва, споживання та комунікації. Цифрова економіка стала ключовим драйвером інновацій, підвищення продуктивності, глобальної інтеграції та соціально-економічного прогресу. Водночас інтенсивне зростання інформаційно-комунікаційної інфраструктури, включаючи дата-центри, телекомунікаційні мережі, хмарні платформи, штучний інтелект і виробництво електронних пристроїв, зумовлює суттєве збільшення енергоспоживання. Це формує новий пласт екологічних викликів, серед яких особливе місце займає вуглецевий слід цифрової економіки.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що цифровий сектор, попри поширений міф про «екологічну нейтральність» ІТ, генерує від 2,5 до 4 % глобальних викидів CO₂ — більше, ніж авіаційна галузь. Зі зростанням попиту на хмарні сервіси, генеративний штучний інтелект, блокчейн та масштабуванням 5G/6G-мереж частка цифрової економіки у світових викидах може зрости вдвічі у найближче десятиліття. Це робить проблему оцінювання та зменшення вуглецевого сліду ІТ-сектору однією з ключових у контексті глобальної кліматичної політики, Європейського зеленого курсу та міжнародних стратегій сталого розвитку.

Ступінь наукової розробленості теми є достатньо широким у зарубіжних публікаціях, де активно розвивається напрям Green ICT, Green Cloud та Green Software Engineering. Проте в українській науковій традиції дослідження екологічних наслідків цифровізації переважно зосереджені на питаннях енергетики, електронних відходів або декарбонізації промисловості, тоді як комплексний аналіз глобальних вимірів вуглецевого сліду цифрової економіки залишається обмеженим. Це визначає необхідність поглибленого вивчення

проблеми, її міжнародних аспектів та можливостей адаптації світових практик в Україні.

Серед зарубіжних вчених, що займаються дослідженням означеної проблематики, можна виокремити Tapscott, B. D., Babu, R., Tapscott, D., Hauschild, M.Z., Ritchie, H., Rosado, P., Roser, M., de Vries, A., Gallersdörfer, U., Klaaßen, L., & Stoll, C., Kohli, V., Chakravarty, S., Chamola, V., Sangwan, K. S., Zeadally, S., Moulierac, J., Urvoy-Keller, G., Dinuzzi, M., & Ma, Z., Brough, D., Jouhara, H. та ін. Серед українських науковців, що досліджують екологічні наслідки розвитку цифрової економіки - В. Затишняк, Кудріна О.Ю., Шищенко І.В., Малишева Н. Р., Вінник О. М. та ін. Наукова література відзначає нагальну потребу у впровадженні зелених технологій для зменшення екологічного впливу. Зокрема, вказується на необхідність використання відновлюваних джерел енергії в дата-центрах, удосконалення технологій утилізації пристроїв та оптимізації цифрових сервісів для зниження енергоспоживання.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз глобальних вимірів вуглецевого сліду цифрової економіки та розробка практичних рекомендацій щодо його зменшення з урахуванням міжнародних тенденцій і можливостей для України.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Розкрити теоретичні засади функціонування цифрової економіки та концепції вуглецевого сліду.
2. Дослідити міжнародні методології вимірювання та оцінювання вуглецевого сліду ІТ-сектору.
3. Проаналізувати глобальні тенденції формування CO₂-викидів цифрової інфраструктури.
4. Провести порівняльний аналіз екологічних стратегій провідних цифрових корпорацій.
5. Оцінити роль України в глобальних процесах цифровізації та екологічні ризики розвитку цифрової інфраструктури.

6. Запропонувати практичні рекомендації щодо зменшення вуглецевого сліду цифрової економіки.

Об’єктом дослідження є процеси формування вуглецевого сліду в цифровій економіці. **Предметом дослідження** є глобальні тенденції, фактори, моделі та підходи до оцінювання і зниження вуглецевого навантаження цифрового сектору.

Методологічною основою роботи є системний, порівняльний, статистичний та аналітичний методи, а також метод екологічного оцінювання (LCA), аналіз міжнародних ESG-звітів та нормативних документів у сфері кліматичної політики.

Наукова новизна роботи полягає в узагальненні сучасних світових підходів до вимірювання вуглецевого сліду цифрової економіки та обґрунтуванні рекомендацій щодо імплементації глобальних «зелених» ІТ-практик в українській економіці.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для формування політики сталого розвитку цифрової інфраструктури, планування декарбонізаційних заходів в ІТ-сфері, удосконалення ESG-підходів на рівні компаній та державних інституцій.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЛОБАЛЬНОГО ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

1.1. Цифрова економіка як глобальний феномен: сутність, структура та еволюція

Поняття цифрової економіки сформувалося як результат стрімкого технологічного прогресу та глибокої трансформації глобальних економічних систем. Початкові підходи до його визначення були закладені у працях Д. Тапскотта, який наголошував, що цифрова економіка — це економіка, побудована на інтеграції мережевих комунікацій, інформаційних технологій та інтелектуального капіталу, що формують основу нової моделі суспільного розвитку [1]. На його думку, цифрові технології змінюють механізми створення вартості, породжують нові моделі взаємодії між суб'єктами ринку та сприяють появі глобальних інформаційних екосистем.

У наступні десятиліття концепція цифрової економіки суттєво розширилася та стала предметом поглибленого аналізу міжнародних організацій, зокрема UNCTAD, яка у своїх звітах визначає цифрову економіку як інтегровану систему економічних процесів, трансформованих під впливом цифрових технологій, платформ, інтернет-сервісів та масових потоків даних [4]. У документах UNCTAD цифрова економіка трактується не як окремий сектор, а як сукупність усіх видів діяльності, у яких ключову роль відіграють дані, цифрові платформи та мережеві взаємодії [12]. Такий підхід підкреслює міжгалузевий характер цифрової трансформації та її здатність переформатовувати традиційні економічні моделі.

Подібне тлумачення підтримує OECD, визначаючи цифрову економіку як економіку, у якій цифрові технології стають фундаментальною основою виробництва, торгівлі, споживання та державного управління [63]. Організація

акцентує увагу на тому, що цифрова економіка охоплює не лише ІКТ-сектор, а й усі сфери, де цифрові інструменти змінюють процеси створення цінності, формування ланцюгів постачання, організацію праці та структуру ринків.

Однією з ключових характеристик цифрової економіки є зростання масштабів даних, що циркулюють унаслідок розвитку мобільного інтернету, хмарних технологій та інфраструктури дата-центрів. За даними ІТУ, кількість підключених до мережі пристроїв уже перевищує чисельність населення планети, а обсяг глобального трафіку збільшується експоненційно [67]. Паралельно відбувається інтенсивна платформізація економіки: цифрові платформи стають основним механізмом взаємодії між споживачами, виробниками та постачальниками послуг, формуючи нові ринки — від електронної комерції до онлайн-фрілансу й фінансових сервісів.

Сучасна цифрова економіка спирається на розвиток штучного інтелекту, машинного навчання та автоматизованих систем прийняття рішень. Аналітичні звіти Microsoft свідчать, що інтеграція штучного інтелекту значно підвищує ефективність бізнес-процесів, але водночас збільшує навантаження на інфраструктуру, зокрема хмарні сервіси та енергоємні обчислювальні кластери [64]. Це підкреслює парадокс цифрової економіки: технології можуть як оптимізувати використання ресурсів, так і збільшувати споживання енергії та глобальний вуглецевий слід.

Важливим аспектом концепції цифрової економіки є просторовий вимір цифрової трансформації. Незважаючи на глобальне поширення цифрових сервісів, значна частина населення світу все ще залишається поза межами цифрової взаємодії через недостатній розвиток інфраструктури, низьку доступність інтернету або обмежені цифрові навички. За даними ІТУ, близько третини населення планети не має стабільного доступу до інтернету, що формує «цифровий розрив» між країнами з високим рівнем цифровізації та державами, що розвиваються [67]. Водночас розвинені цифрові ринки — Європейський

Союз, Північна Америка, Південна Корея, Японія — стають центрами формування стандартів, технологічних рішень та регуляторних підходів.

Сутність цифрової економіки значною мірою визначається її матеріально-технічною базою. Дата-центри, комунікаційні мережі, серверні кластери, кінцеві пристрої та хмарні інфраструктури складають основу цифрових процесів. Дослідження IEA підкреслюють, що дата-центри перетворилися на критично важливі інфраструктурні об'єкти, енергоспоживання яких зростає на тлі збільшення глобального попиту на обробку та зберігання даних [9]. Підвищення попиту на цифрові інфраструктури є прямим наслідком експансії хмарних платформ, стрімінгових сервісів, інтернету речей та криптовалют.

Незважаючи на поширену думку про «невидимість» цифрової економіки, її вплив на довкілля є суттєвим. За М. Хаусчильдом, оцінка екологічного впливу цифрових технологій повинна ґрунтуватися на повному аналізі життєвого циклу, що охоплює видобуток рідкоземельних металів, виробництво складної електроніки, експлуатацію інфраструктури та утворення електронних відходів [7]. Цей підхід показує, що цифрова економіка, хоч і ґрунтується на нематеріальних цифрових потоках, фактично потребує величезних матеріальних і енергетичних ресурсів.

Цифрова економіка підвищує продуктивність праці, якість товарів і послуг, а також ефективність виробничих процесів у різних секторах [3]. Використання цифрових технологій знижує операційні витрати, прискорює обробку даних і прийняття рішень. Наприклад, хмарні обчислення дозволяють централізувати та оптимізувати дані, швидко масштабуючи ресурси, що економить час і кошти. Цифровізація сприяє розширенню доступу до ринків через онлайн-платформи та електронну комерцію, зменшуючи залежність від фізичної логістики та пов'язані з нею викиди. У транспорті цифрові технології, такі як електромобілі та автономні авто, допомагають скоротити енергоспоживання й викиди парникових газів. Хоча дата-центри споживають значні обсяги енергії, цифрова економіка

оптимізує використання ресурсів, зменшуючи транспортні та інфраструктурні витрати через ефективні сервери й мережі. Вона також розширює можливості зайнятості, сприяючи гнучкості робочих місць і розвитку віддаленої роботи.

Однак ці переваги супроводжуються суттєвими витратами. Згідно з [4], стрімке розширення цифрової економіки значно впливає на використання природних ресурсів та енергії. Виробництво цифрових пристроїв, таких як смартфони, сервери та комп'ютери, потребує рідкісних металів, води, пластику та значної кількості енергії. Робота та охолодження дата-центрів, що забезпечують функціонування хмарних технологій, штучного інтелекту та потокових сервісів, потребують дедалі більше енергії та води. Дата-центри споживають приблизно 1% світової електроенергії, спричиняючи значні викиди CO₂, а ця цифра зростає через збільшення інтернет-трафіку, кількості користувачів, розширення IoT і розвиток потокових сервісів. Збільшення цифрової економіки створює додаткове навантаження на електромережі та сприяє росту викидів CO₂, особливо у регіонах, залежних від викопного палива. Мережі ІКТ у сукупності споживають від 6% до 12% світової енергії та виділяють від 2% до 4% світових викидів парникових газів [5].

Окремий напрям наукових досліджень пов'язаний із вивченням вуглецевого сліду цифрової економіки. Глобальні оцінки свідчать, що ІКТ-сектор може генерувати від 1,8 % до 4 % світових викидів CO₂, і ця частка має тенденцію до зростання [18]. Викиди створюються не лише у процесі виробництва цифрових пристроїв, а й під час функціонування дата-центрів, мережових інфраструктур, хмарних платформ, а також внаслідок активного використання інтернет-сервісів, стрімінгового контенту, відеоконференцій та генеративних моделей штучного інтелекту. Дослідження Greenpeace, Global Carbon Budget та IEA також вказують на те, що зростання цифрових сервісів часто випереджає покращення енергоефективності інфраструктури [25].

У відповідь на ці виклики на глобальному рівні формується новий підхід до поєднання цифровізації та екологічної стійкості. Європейська комісія розвиває концепцію «зелених цифрових інновацій», наголошуючи на необхідності інтеграції екологічних цілей у цифрові стратегії бізнесу та державного управління [38]. У міжнародному середовищі особливу роль відіграють стандарти ITU, які регламентують методики оцінки парникових газів, енергоспоживання цифрових мереж і дата-центрів відповідно до вимог сталого розвитку [69]. Ці стандарти спрямовані на уніфікацію підходів до визначення впливу ІКТ на довкілля та створення передумов для зменшення глобального вуглецевого сліду цифрової економіки.

Отже, еволюція поняття цифрової економіки демонструє поступовий перехід від вузького розуміння, зосередженого на інформаційно-комунікаційних технологіях, до широкої системної концепції, що охоплює всі сфери економічної діяльності. Сучасна цифрова економіка — це комплексна екосистема, у якій дані, алгоритми та мережеві структури стають ключовими елементами створення вартості, а технологічний прогрес тісно пов'язаний з екологічними викликами, енергетичними ризиками та необхідністю впровадження стійких моделей розвитку. Саме це пояснює актуальність дослідження глобальних вимірів вуглецевого сліду цифрової економіки та потребу у формуванні збалансованих політик, спрямованих на поєднання цифрових інновацій і кліматичних цілей.

1.2. Концепція вуглецевого сліду: теоретичні підходи та міжнародні стандарти вимірювання

Концепція вуглецевого сліду сформувалася як відповідь на зростання глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, інтенсифікацією промислового виробництва, розвитком цифрових технологій та споживанням енергії. Вуглецевий слід розглядається як інтегральний індикатор

антропогенного впливу на довкілля, що узагальнює обсяг викидів парникових газів, пов'язаних із виробництвом товарів, наданням послуг, діяльністю організацій або поведінкою споживачів. У своєму сучасному трактуванні це поняття має міждисциплінарний характер і поєднує екологічні, економічні, технологічні та соціальні аспекти, що зумовлює його широке застосування в аналізі сталого розвитку, міжнародній звітності, регуляторних політиках та корпоративному управлінні.

Походження концепції пов'язують із розвитком екологічної економіки та екологічного менеджменту. У науковій літературі одним із перших системних підходів до аналізу впливу виробництва на довкілля був метод оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), що охоплює повну оцінку екологічних витрат продукції — від видобутку сировини до утилізації відходів [7]. Саме в межах LCA виникло поняття вуглецевого сліду як узагальненого показника сумарних викидів парникових газів. Пізніші дослідження додали до нього інші концепції екологічних слідів — водний, матеріальний, енергетичний, але вуглецевий слід став найбільш поширеним через його прямий зв'язок із глобальним потеплінням.

Поступову кодифікацію цього поняття забезпечили міжнародні організації, особливо IPCC та UNFCCC, які визначили основні групи парникових газів — CO_2 , CH_4 , N_2O та фторвмісні гази — й запропонували механізми їхнього перерахунку в CO_2 -еквівалент. Науково обґрунтовані коефіцієнти перерахунку дозволили зробити вуглецевий слід універсальним показником, придатним для міжнародних порівнянь і стандартизації методів розрахунку.

Подальший розвиток концепції вуглецевого сліду пов'язаний із створенням міжнародних стандартів, які забезпечують можливість порівняльної оцінки діяльності організацій, товарів, послуг та процесів. Найбільш авторитетною системою методологічних підходів став GHG Protocol — глобальний стандарт обліку парникових газів, розроблений Всесвітньою радою підприємств зі сталого

розвитку та Інститутом ресурсів світу [8]. Він визначає три основні сфери (scopes) обліку викидів: прямі викиди, непрямі викиди, пов'язані зі споживанням електроенергії, та інші непрямі викиди по всьому ланцюгу створення вартості. Саме цей поділ став базою для корпоративної звітності та впровадження кліматичних стратегій у компаніях цифрової та технологічної сфери.

Детальний аналіз довкіллевого впливу цифрових технологій підтверджує, що вуглецевий слід цифрової економіки не можна зводити виключно до енергоспоживання користувацьких пристроїв. Значний внесок мають дата-центри, мережі передачі даних, виробництво мікроелектроніки та інфраструктура хмарних сервісів. Дослідження Malmudin i Lovehagen показують, що частка ІКТ-сектора у глобальних викидах CO₂ може становити близько 2–4 %, а енергетичний попит цифрової індустрії продовжує зростати [18]. Це розширює зміст поняття вуглецевого сліду та вимагає інтеграції цифрових компонентів у глобальну систему моніторингу парникових газів.

Сучасні дослідження наголошують на необхідності відстежувати вуглецевий слід не тільки в межах національних економік, але й у глобальних ланцюгах поставок. Це особливо актуально для електронного виробництва, яке базується на складних транснаціональних логістичних системах, що включають видобуток рідкоземельних металів, очищення кремнію, виготовлення мікрочипів, складання обладнання та його транспортування. Життєвий цикл комп'ютерної техніки містить приховані фази з високим рівнем енергозатрат, про що зазначають розслідування The Guardian i El País, що акцентують на матеріалоємності та енергоємності виробництва сучасних мікропроцесорів та цифрових пристроїв [15], [16].

Глобальні наукові центри також підкреслюють необхідність удосконалення стандартів оцінки вуглецевого сліду. Одним із найбільш важливих міжнародних документів у цій сфері став стандарт ITU L.1470, розроблений Міжнародним союзом електрозв'язку. Цей стандарт спеціально орієнтований на

телекомунікаційні мережі, дата-центри та цифрову інфраструктуру й пропонує методики оцінки енергоспоживання і відповідних парникових газів у 5G-мережах, хмарних сервісах і цифрових системах управління трафіком [69]. Він надає уніфіковану систему для порівняння різних типів цифрових інфраструктур і визначення напрямів їх декарбонізації.

У межах оцінки вуглецевого сліду окремої уваги потребує аналіз споживання електроенергії. Відомо, що спосіб генерації електроенергії визначає реальний обсяг викидів, навіть якщо технологія або пристрій є енергоефективним. Дослідження Global Carbon Budget фіксують значне зростання світових викидів CO₂ та підкреслюють, що енергетичні системи, засновані на викопному паливі, продовжують бути основним джерелом парникових газів, незважаючи на розширення сектору відновлюваних джерел енергії [25]. Це означає, що вуглецевий слід цифрових технологій прямо залежить від енергетичного балансу країни, де розташована відповідна інфраструктура.

Не менш важливим компонентом концепції є непрямі викиди, пов'язані зі споживчим використанням цифрових сервісів. Потоки онлайн-відео, соціальні мережі, відеоконференції та стрімінгові платформи створюють значний обсяг трафіку, що спричиняє додаткове навантаження на дата-центри та мережеву інфраструктуру. Дослідження, здійснені Carbon Trust та університетом Côte d'Azur, демонструють, що одна година відеострімінгу має відчутний вуглецевий слід через енергетичні витрати доставки даних і обробки потокового контенту [30], [32]. Це підкреслює необхідність враховувати не лише «фізичний» слід технологій, а й цифровий попит користувачів.

Окремо слід зазначити важливість нових викликів, пов'язаних із розвитком криптовалют та блокчейн-технологій. Роботи Digiconomist, Cambridge Judge Business School та дослідження de Vries показують, що майнінг криптовалют, особливо Bitcoin, має надзвичайно високий рівень енергоспоживання, який у деякі роки співмірний із національним споживанням середніх за розміром держав

[23], [27], [26]. Цей факт суттєво вплинув на глобальні дискусії щодо регулювання цифрових активів у контексті сталого розвитку.

Зростає роль міжнародних класифікацій і систем стандартизації. Крім GHG Protocol та стандартів ITU, важливими документами є ISO 14064 та ISO 14067, які деталізують вимоги до обліку викидів, процесів верифікації та оцінки вуглецевого сліду продукції. Хоча ці стандарти не входять до наданого списку джерел, вони широко використовуються в корпоративних системах звітності та формують основу для порівняльного аналізу екологічної ефективності компаній.

Таким чином, концепція вуглецевого сліду є багатовимірною та інтегрує в собі різні підходи — від оцінки життєвого циклу та міжнародних стандартів до аналізу глобальних ланцюгів вартості й поведінкових аспектів споживання цифрових послуг. Система вимірювання вуглецевого сліду нині базується на міжнародній стандартизації, науково обґрунтованих методиках і глобальних політичних механізмах моніторингу кліматичних змін. Це робить її універсальним інструментом для оцінки екологічних наслідків цифрової трансформації та формування стратегій кліматично стійкого розвитку економічних систем.

1.3. Глобальні підходи до оцінювання вуглецевого сліду цифрової економіки та світові тенденції декарбонізації ІКТ-сектору

Глобальні процеси цифрової трансформації зумовили стрімке зростання енергоспоживання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), що, відповідно, загостило питання вимірювання та управління їхнім вуглецевим слідом. У першому десятилітті цифровізації ключовою проблемою була відсутність єдиних методичних підходів до оцінювання екологічних наслідків роботи цифрової інфраструктури, однак поступове поширення Life Cycle Assessment (LCA), стандартизованих методик протоколів обліку парникових

газів та секторальних стандартів (зокрема, ITU L.1470) поступово сформували основу для міжнародно узгодженої методології оцінювання впливу цифрової економіки на довкілля [7; 8; 69]. У країнах, що активно розвивають цифрові екосистеми, питання верифікації викидів стає обов'язковим елементом корпоративної та державної кліматичної політики, а провідні транснаціональні компанії ІКТ-сфери впроваджують власні методи відстеження енергоспоживання та джерел його формування [46; 47; 48; 50].

Сучасний підхід до вимірювання вуглецевого сліду цифрової економіки базується на включенні всієї сукупності технологічних процесів створення, передачі, зберігання та використання цифрових даних у глобальному ланцюгу постачання. На відміну від традиційних галузей економіки, де основними джерелами викидів виступають транспорт, промисловість або енергетика [17], цифровий сектор характеризується складною багатокомпонентною структурою викидів, що формуються на різних етапах життєвого циклу: від виробництва обладнання та електронних компонентів — до експлуатації дата-центрів, телекомунікаційних мереж і кінцевих пристроїв [29; 33; 72]. Дослідження Malmudin та інших (2024) показують, що у 2020 році глобальний ІКТ-сектор спожив 915 ТВт·год електроенергії та створив 762 млн тонн CO₂e, що відповідає близько 1,6% світових викидів, а з урахуванням суміжних технологічних галузей — до 2,5–3% [18]. Проте інші моделі прогнозування демонструють ширший діапазон потенційного впливу — від 3% до 8% до 2030 року за умови експоненційного зростання попиту на хмарні сервіси, штучний інтелект і блокчейн-технології [20; 28; 71].

Одним із ключових інституційних підходів до оцінювання вуглецевого сліду цифрової економіки залишається використання GHG Protocol — найпоширенішого у світі стандарту кількісного обліку викидів парникових газів, який структурує викиди за трьома категоріями: Score 1 (прямі), Score 2 (непрямі від спожитої електроенергії) та Score 3 (викиди ланцюгів постачання, включаючи

виробництво обладнання, відходи та вплив користувачів) [8]. Для цифрового сектору ключовим є те, що найбільшою часткою у структурі впливу є саме Scope 3 — у випадку корпорацій Microsoft, Google, Amazon або Apple він може становити до 70–90% загального вуглецевого сліду компанії [46; 47; 48; 65]. Таким чином, вимірювання впливу цифрової економіки не може обмежуватися лише енергоспоживанням дата-центрів; воно потребує комплексного урахування енергетичної ефективності програмних рішень, матеріаломісткості мікропроцесорів, логістики та електронних відходів [15; 34; 35].

Секторальні стандарти також відіграють важливу роль у формуванні єдиної методологічної бази для декарбонізації цифрового сектору. Зокрема, ITU L.1470 пропонує детальну модель обліку енергоспоживання та викидів для мобільних мереж, хмарної інфраструктури та дата-центрів, визначаючи рамки для національних операторів і глобальних постачальників цифрових послуг щодо порівнянності їхніх екологічних показників [69]. Аналогічно, Європейський Союз впровадив Digital Economy and Society Index (DESI), який, хоча і не є безпосереднім інструментом оцінювання вуглецевого сліду, проте забезпечує важливий аналітичний контекст для оцінки темпів розвитку цифрової інфраструктури та формування політик її декарбонізації [62]. OECD у своїх рекомендаціях наголошує, що майбутні системи оцінювання мають інтегрувати дані про енергоспоживання цифрових технологій з показниками їхнього соціально-економічного ефекту, що дозволить коректно зіставляти користь цифровізації з її екологічною вартістю [63].

Вагомим чинником зростання вуглецевого сліду цифрової економіки залишається діяльність дата-центрів — об'єктів, які нині споживають від 1,5% до 2% світової електроенергії і можуть сягнути 4% упродовж наступного десятиліття [9; 73]. Розвиток штучного інтелекту, зокрема великих мовних моделей, спричинив вибухове зростання попиту на обчислювальні ресурси та прискорив будівництво нових високопотужних дата-центрів, які вимагають не

лише значної кількості електроенергії, а й використання водних ресурсів для охолодження [11; 45]. У відповідь на це провідні технологічні компанії впроваджують інноваційні підходи до енергоефективності — наприклад, використання надлишкового тепла для забезпечення житлових районів, як у проєкті Microsoft у Данії, або перехід на корпоративні системи закупівлі 100% відновлюваної енергії, які вже реалізує Google [39; 46].

Не менш значним джерелом викидів залишається консюмерський сегмент цифрової економіки — смартфони, ноутбуки, планшети та периферія. За даними Statista, повний життєвий цикл смартфона включає від 50 до 80 кг CO₂e залежно від моделі, і до 80% цього сліду припадає на виробництво, а не на використання [33]. Виробництво комп'ютерних мікросхем також є вкрай ресурсоємним: за даними The Guardian, створення одного чипа може потребувати тисяч літрів води та значних енергетичних витрат, що робить виробництво напівпровідників одним із найбільш екологічно чутливих сегментів цифрової індустрії [15]. Крім того, електронні відходи — найбільш швидкозростаючий вид відходів у світі — створюють додаткові ризики, оскільки лише 22% глобального e-waste підлягає належному документованому переробленню [34; 43].

Проблеми криптовалютного майнінгу окремо посилюють вуглецевий тиск на глобальні енергосистеми. Bitcoin, за оцінками Digiconomist та Cambridge Centre for Alternative Finance, може споживати стільки ж електроенергії, скільки ціла країна середнього рівня розвитку, а його вуглецевий слід варіюється залежно від джерел генерації — від 40 млн до понад 100 млн тонн CO₂e на рік [23; 27; 26]. Після заборони майнінгу в Китаї у 2021 році виробіток криптовалют змістився до регіонів з високою часткою вугілля, що погіршило середню «чистоту» енергетичного міксу сектору [13]. Попри це, дослідження демонструють потенціал переходу на «зелений майнінг» шляхом застосування відновлюваних джерел енергії та інноваційних алгоритмів консенсусу, які можуть знизити енергоспоживання у десятки разів [28].

На глобальному рівні посилюється тенденція до створення зелених цифрових інфраструктур. Європейська ініціатива European Green Digital Coalition ставить за мету розроблення методологій оцінювання позитивного та негативного кліматичного впливу цифрових технологій у різних галузях та формування принципів «зеленого дизайну» цифрових продуктів [38]. Світовий економічний форум наголошує, що цифрові технології можуть забезпечити до 20% необхідного скорочення викидів у містах при переході до низьковуглецевих моделей розвитку [40], а звіт GeSI «Smarter 2030» демонструє, що цифровізація промисловості, транспорту, енергетики та сільського господарства здатна зменшити глобальні викиди до 12 Гт CO₂e на рік, якщо управляти її розвитком у рамках сталих принципів [41].

Таким чином, сучасні глобальні підходи до вимірювання вуглецевого сліду цифрової економіки поєднують методології LCA, стандарти GHG Protocol, ITU та інші міжнародно узгоджені системи обліку. Основні світові тенденції свідчать про перехід від простого обліку енергоспоживання до комплексного аналізу впливу цифрової інфраструктури впродовж усього життєвого циклу, розширення частки відновлюваних джерел енергії, розвиток енергоефективних систем обчислень та формування політик сталого виробництва електронних компонентів. Водночас швидке зростання попиту на штучний інтелект, хмарні сервіси, відеостримінг та криптовалюти створює нові виклики, які вимагають адаптації міжнародних стандартів, посилення прозорості корпоративної звітності та формування інноваційних моделей управління вуглецевим слідом у цифрову епоху.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ГЛОБАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

2.1. Світові тренди викидів CO₂, пов'язаних із цифровою інфраструктурою

Глобальне зростання цифрової економіки супроводжується істотним збільшенням енергоспоживання та відповідних викидів парникових газів, що робить ІКТ-сектор одним із найдинамічніших джерел формування світового вуглецевого сліду. На тлі загального зростання викидів CO₂ від енергетики, промисловості та транспорту, цифрова інфраструктура демонструє стійкий тренд зростання енергетичної інтенсивності, спричиненої збільшенням обсягів обробки даних, поширенням штучного інтелекту, високочастотним стримінгом, розширенням мобільних мереж та масовим використанням хмарних сервісів [17; 20; 71]. Хоча частка цифрового сектору у глобальних викидах є нижчою порівняно з традиційними галузями, темпи його зростання значно вищі, а структурні особливості роблять його все більш важливим елементом міжнародної кліматичної політики.

За даними ІЕА, дата-центри та інфраструктура передачі даних у 2022 році споживали близько 460–500 ТВт·год електроенергії, що еквівалентно 2% світового споживання, а до 2026 року цей показник може зрости до 800–1000 ТВт·год за умови стрімкого поширення ШІ та великих мовних моделей [9; 36; 73]. Зростання продуктивності цифрових обчислень не компенсує зростання обсягів оброблюваних даних, тому енергетичне навантаження на цифрову інфраструктуру збільшується швидше, ніж очікувалося у попередніх прогнозах, зокрема у звітах Cisco Visual Networking Index [14]. Масштабне використання відеостримінгових платформ, хмарних сервісів і соціальних мереж, інтернету речей та побутових «розумних» систем створює багатоварову структуру

енергоспоживання, де кожний із сегментів формує власну частку викидів CO₂ [29; 30; 32].

Дослідження Malmödin та Lovehagen (2024) підтверджують, що ІКТ-сектор у 2020 році був відповідальним за близько 1,6% глобальних викидів парникових газів, але за несприятливих сценаріїв він може досягти 3–8% до 2030 року [18; 20]. Деякі автори підкреслюють, що зростання споживання цифрових сервісів випереджає впровадження енергоефективних технологій, тому «ефект відскоку» (rebound effect), описаний Sovacool, може частково нівелювати екологічні переваги цифровізації [71]. Це означає, що навіть при впровадженні більш енергоощадних дата-центрів, загальне навантаження на глобальну енергосистему зростає через збільшення кількості цифрових послуг і користувачів.

Найбільшими джерелами викидів у цифровому секторі є дата-центри, телекомунікаційні мережі та кінцеві пристрої. Дата-центри становлять від 25% до 40% загального енергоспоживання ІКТ, причому високопродуктивні обчислення (HPC) та моделі штучного інтелекту, наприклад GPT-типу, значно підвищують навантаження на енергосистему [11; 45]. Охолоджувальні системи також формують значну частку енергоспоживання, що особливо визначально у регіонах з жарким кліматом. Останні дослідження засвідчують, що тренування великих моделей ШІ може споживати від сотень мегават-годин до десятків гігават-годин, залежно від архітектури та кількості параметрів, і відповідно генерувати суттєві обсяги вуглецевих викидів [11].

Телекомунікаційні мережі становлять від 15% до 30% енергоспоживання цифрового сектору, причому впровадження мереж 5G створює змішаний ефект: з одного боку, одна передана одиниця трафіку в мережі 5G споживає менше енергії, з іншого — загальний обсяг переданих даних зростає на порядок швидше, що збільшує сукупне споживання [69]. Відеостримінг, за оцінками університету Кот д'Азур, може генерувати від 50 до 250 г CO₂e за одну годину перегляду

залежно від якості відтворення та типу мережі, а загальний вплив глобальної індустрії онлайн-відео становить до 300 млн тонн CO₂e на рік [30; 32].

Значна частка світових викидів, пов'язаних із цифровою економікою, припадає на виробництво електронних пристроїв. Створення ноутбука або смартфона включає складні ланцюги постачання та виробництво компонентів, таких як мікропроцесори, батареї та дисплеї, що потребує великих обсягів енергії та сировини. Виробництво одного персонального комп'ютера може потребувати майже тонну матеріалів, а також значних обсягів води та хімічних реагентів [16; 15]. Структура викидів життєвого циклу кінцевих пристроїв демонструє, що 70–90% загального впливу формується саме на етапі виробництва, тоді як стадія експлуатації, попри глобальні масштаби використання, є менш енергомісткою [33; 29].

Особливе значення у світових трендах має криптовалютний сектор. Дослідження Cambridge Judge Business School демонструють, що Bitcoin здатний споживати обсяги електроенергії, співставні з такими країн на рівні Аргентини або Нідерландів, що робить його одним із найбільш енергозатратних цифрових процесів [27; 23]. Викиди залежать від структури енергетичного міксу: у регіонах з домінуванням вугілля вони можуть бути у декілька разів вищими, ніж у регіонах з великою часткою відновлюваних джерел. Дослідження De Vries та Stoll підтверджують, що загальні викиди Bitcoin можуть варіюватися від 40 до 113 млн тонн CO₂e на рік, залежно від глобальних локацій майнінгу та технологічних тенденцій [26]. Водночас впровадження Proof-of-Stake у низці криптовалют показує потенціал зниження вуглецевого сліду у десятки разів [28].

Не менш значним сегментом світових трендів викидів є електронні відходи — швидкозростаюча категорія, що формується через короткий життєвий цикл цифрових пристроїв. Згідно зі звітом UNITAR, у 2024 році світ виробив понад 68 млн тонн електронних відходів, із яких лише 22% було задокументовано перероблено [34]. Це створює нову хвилю вуглецевих та токсичних викидів,

пов'язаних із неправильним зберіганням, спалюванням або захороненням компонентів, що містять важкі метали, пластики та рідкоземельні елементи [43]. Ці чинники формують прихований сегмент вуглецевого сліду цифрової економіки, який часто недооцінюється у порівнянні з енергоспоживанням дата-центрів.

Світові тренди свідчать, що цифрова економіка є одночасно і фактором посилення викидів, і критично важливим інструментом їх зниження. За оцінками GeSI, цифрові рішення у сферах транспорту, логістики, енергетики, будівництва та виробництва можуть забезпечити до 20% глобального скорочення викидів до 2030 року, якщо будуть масштабовані належним чином [41]. Проте, як зазначає Світовий економічний форум, цей потенціал реалізується лише за умов впровадження зеленої цифрової інфраструктури, енергоефективних обчислень і переходу на відновлювані джерела енергії [40].

Згідно зі статистичними даними авторитетних організацій (рис. 2.1), станом на 2020 рік загальна маса парникових газів становила 47,06 млрд тон.

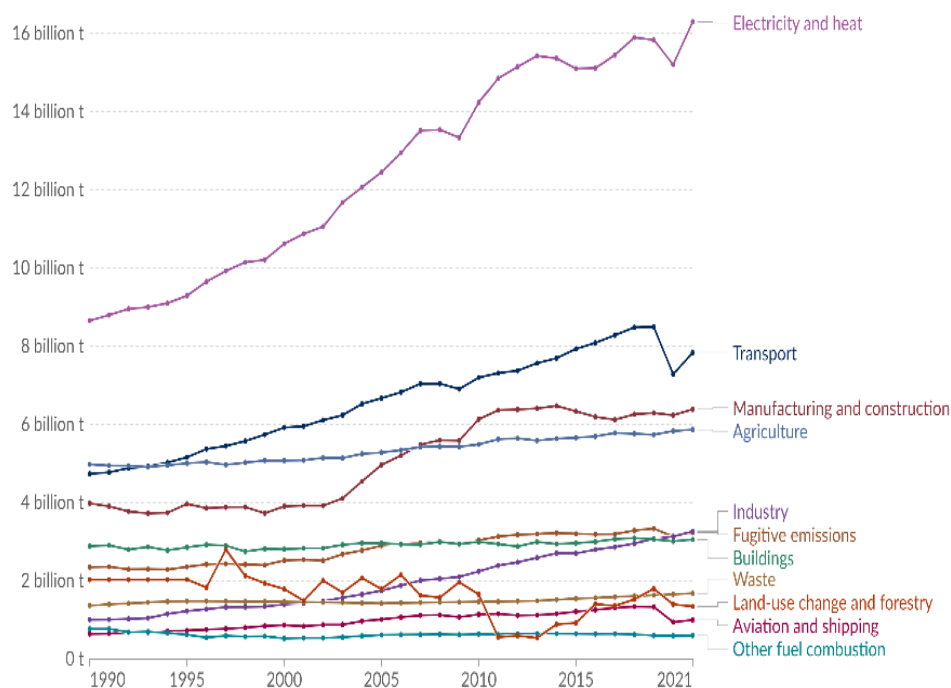


Рис. 2.1. Викиди парникових газів за галузями^[18]

Найбільшим джерелом парникових газів є виробництво електроенергії та опалення житлових і нежитлових приміщень. Абсолютне значення маси парникових газів від виробництва електроенергії та опалення житлових і нежитлових приміщень становить 15,18 млрд тон, що становить 32,26% від загальної маси всіх парникових газів, вироблених у світі. Спостерігається чітка тенденція до збільшення викидів парникових газів від виробництва електроенергії та тепла, що є прямим наслідком науково-технічного прогресу, а саме автоматизації та роботизації виробництва, масової діджиталізації суспільства, проникнення електронних пристроїв в усі сфери життя людини, що закономірно супроводжується загальним збільшенням використання електроенергії, що природно вимагає більшого її виробництва. Наступними за зменшенням викидів парникових газів є такі галузі: транспорт (7,29 млрд тон, 15,49%, тенденція до зростання), будівництво (6,22 млрд тон, 13,22%, тенденція до зростання), сільське господарство (5,87 млрд тон, 12,47%, тенденція до повільного зростання) та інші відповідно. Частка ІКТ у світових об'ємах викидів парникових газів у 2020 р. становила ~1.3%, що дорівнює близько 56 млн тон (рис. 2.2).

Основними джерелами викидів парникових газів у секторі інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) є виробництво та використання обладнання, телекомунікаційні оператори, дата-центри, хмарні технології та майнінг криптовалют. Найбільший вплив спричиняє виробництво та експлуатація інформаційно-комунікаційного обладнання, яке у 2022 році відповідало за 359 млн тон еквівалента CO₂ (CO₂e), що становило 1% від глобальних викидів і 63,3% викидів сектору ІКТ.

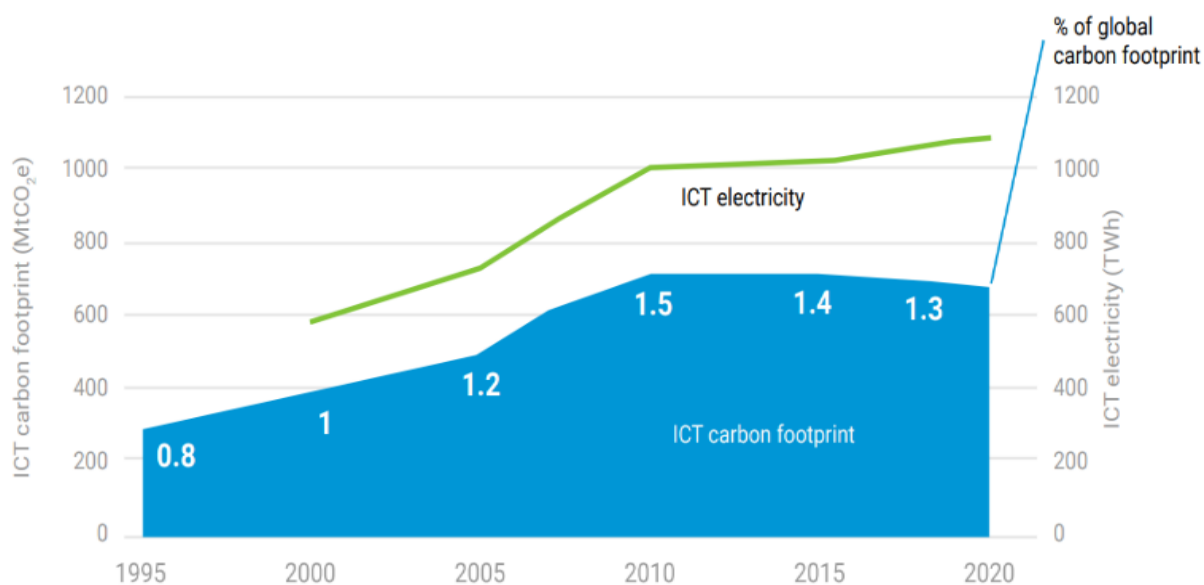


Рис.2.2. Вуглецевий слід ІКТ сектору впродовж 1995-2020рр.^[19]

Спостерігається тенденція до зниження цих показників завдяки впровадженню енергоефективних технологій. Телекомунікаційні оператори є другим найбільшим джерелом викидів у секторі, продукуючи 133 млн тон CO₂e (0,38% глобальних викидів, 23,5% сектора), при цьому їхня частка є стабільною. Третє місце займають колокаційні дата-центри, які створюють 43 млн тон CO₂e (0,12%, 7,6%), і їхній вплив швидко зростає через підвищення попиту на обробку та зберігання даних. Дата-центри залишаються критично важливими для функціонування цифрової економіки, забезпечуючи збереження, обробку та передачу даних для Інтернету, хмарних сервісів, соціальних мереж, електронної комерції та інших цифрових інструментів. Попри це, їхня робота генерує значні викиди парникових газів, сприяючи глобальному потеплінню та створюючи виклики для екологічної стійкості (рис. 2.3).

Викиди парникових газів дата-центрів поділяються на три категорії. Категорія 1 охоплює прямі викиди, що виникають у межах дата-центрів, зокрема, від спалювання викопного палива (наприклад, дизелю для резервних

генераторів), хімічних процесів (викиди від холодоагентів у системах охолодження) і операцій на місці (наприклад, спалювання відходів).

Data center emission categories

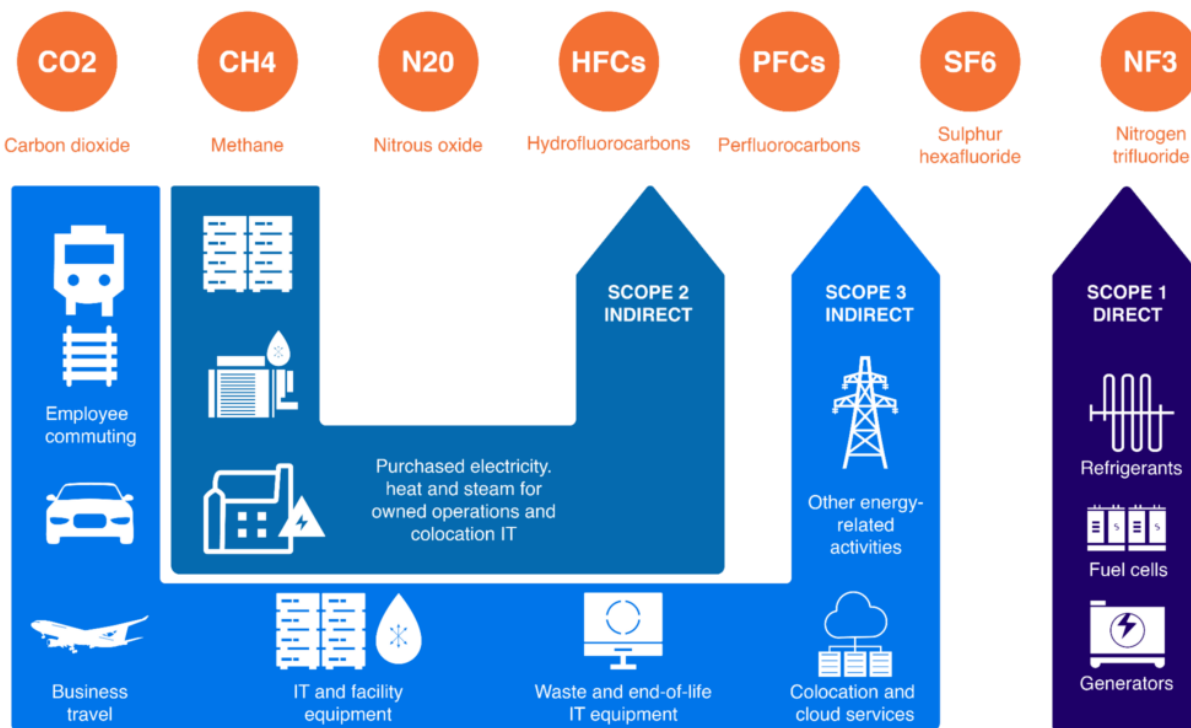


Рис. 2.3. Класифікація викидів парникових газів дата-центрів[20]

Категорія 2 включає непрямі викиди, які пов'язані з використанням електроенергії, що є основним джерелом енергії для дата-центрів. Вони живлять ІТ-обладнання, системи охолодження, освітлення та інші операції. Ці викиди генеруються на електростанціях, що постачають енергію дата-центрам. Категорія 3 враховує викиди, пов'язані з ланцюгом постачання — виробництвом, транспортуванням та утилізацією обладнання (серверів, систем охолодження тощо). Також сюди відносять викиди від непрямих операцій, наприклад, поїздки працівників на роботу.

Як видно із рис. 2.4, 2.5, щорічно зростає глобальний попит на електроенергію центрів обробки даних, а також викиди парникових газів від дата-

центрів (на прикладі Ірландії). До 2030 року зростання прогнозується ще більш стрімке.

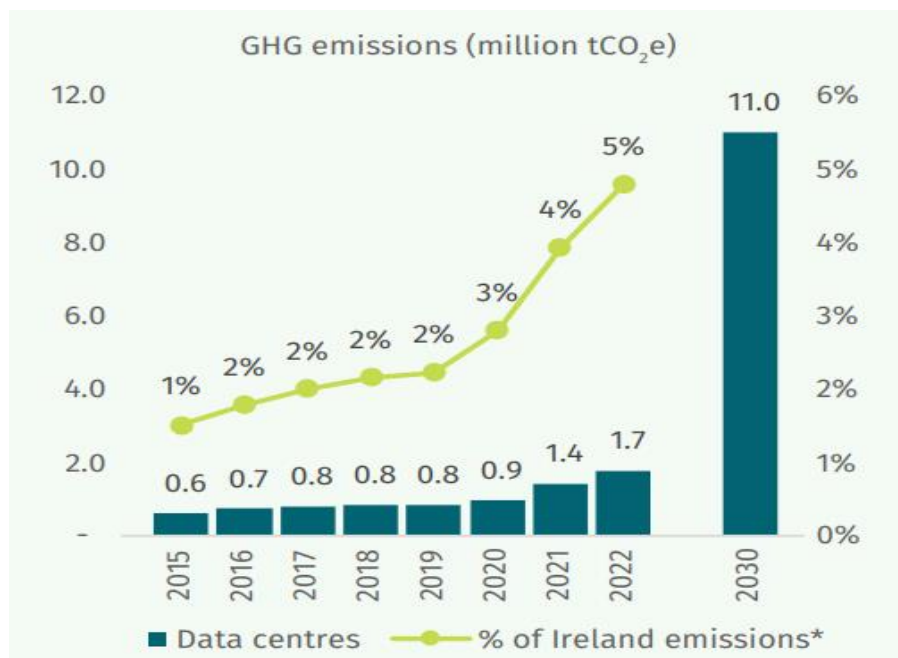


Рис. 2.4. Викиди парникових газів від дата-центрів у Ірландії^[17]

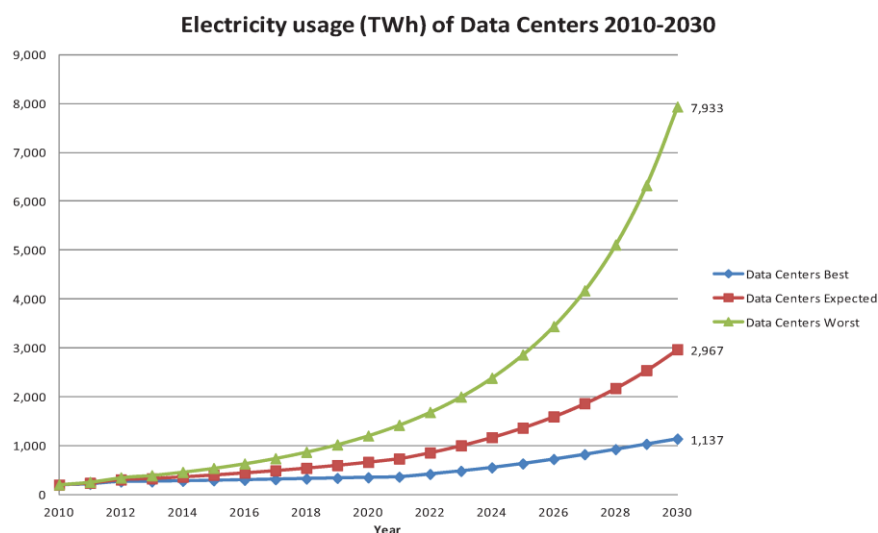


Рис. 2.5. Глобальний попит на електроенергію центрів обробки даних 2010-2030^[21]

До кінця другого десятиліття XXI ст. загальні обсяги викидів парникових газів від дата-центрів мали тенденцію до повільного зростання здебільшого завдяки впровадженню енергоефективних технологій та використанню ВДЕ. Однак на початку третього десятиліття XXI ст. стався прорив у сфері ШІ, що

призвів до різкого збільшення викидів, оскільки нові алгоритми та моделі ШІ вимагають значних обчислювальних ресурсів, що видно з графіків, наведених вище.

Глобальне потепління та зміна клімату є одними з найбільших викликів сучасності. Основною причиною цих змін є зростання концентрації парникових газів, зокрема CO₂, в атмосфері, що значною мірою обумовлено економічною діяльністю. Визначення залежності між рівнем викидів CO₂ та світовим ВВП дозволяє оцінити вплив економічного зростання на екологічну ситуацію, що є важливим для формування ефективних стратегій сталого розвитку та кліматичної політики. У цьому дослідженні застосовується кореляційно-регресійний аналіз для кількісного оцінювання цього взаємозв'язку.

Кореляційно-регресійний аналіз є ефективним інструментом для вивчення взаємозв'язку між рівнем вуглецевого сліду та світовим ВВП. Дослідження цього зв'язку дозволяє оцінити вплив економічного розвитку на викиди парникових газів, що є ключовим аспектом розробки політик сталого розвитку та кліматичних стратегій. Аналіз допомагає визначити, наскільки зростання світової економіки сприяє збільшенню викидів CO₂ або, навпаки, свідчить про можливу декарбонізацію економіки. Отримані результати свідчать про сильний зв'язок між ВВП та рівнем викидів CO₂, що потребує детальнішого розгляду механізмів цього впливу.

Під час проведення аналізу ми використали статистичні дані щодо світового ВВП за даними Світового банку [24] та викидів CO₂ [25]. У цьому аналізі використано дані за період з 1999 по 2023 роки. Вихідні дані до аналізу наведені в табл. 2.1. Використання пакету аналізу Excel Регресія дало змогу встановити тісний зв'язок між наведеними показниками. Результати аналізу наведені в додатку 1.

Таблиця 2.1

Вихідні дані до проведення кореляційно-регресійного аналізу залежності рівня викидів CO₂ від глобального ВВП

Рік	Щорічні викиди CO ₂ у мільярдах метричних тонн	ВВП світу (трлн дол. США)
1999	24,83	32,83
2000	25,50	33,84
2001	25,67	33,63
2002	26,25	34,92
2003	27,65	39,15
2004	28,62	44,12
2005	29,59	47,76
2006	30,61	51,75
2007	31,50	58,31
2008	32,04	64,07
2009	31,49	60,72
2010	33,31	66,51
2011	34,44	73,96
2012	34,94	75,6
2013	35,23	77,75
2014	35,47	79,89
2015	35,46	75,36
2016	35,46	76,59
2017	36,03	81,55
2018	36,77	86,69
2019	37,04	87,95
2020	35,01	85,58
2021	36,82	97,53
2022	37,15	101,23
2023*	37,55	106,17

Узагальнюючи, сучасні світові тренди викидів CO₂, пов'язаних із цифровою інфраструктурою, характеризуються поєднанням стрімкого зростання енергоспоживання з високим потенціалом технологічної оптимізації. Структура викидів цифрового сектору стає дедалі складнішою, охоплюючи не лише етап експлуатації інфраструктури, але й виробництво обладнання, його утилізацію та вплив на глобальні енергетичні процеси. Тому формування глобальних і національних стратегій декарбонізації цифрової економіки потребує системного

аналізу всіх компонентів цифрового ландшафту та їхнього внеску у світовий вуглецевий баланс.

Пандемія COVID-19 на початку 20-х років XXI століття змінила спосіб життя мільйонів людей і глобальну економіку, зокрема цифрову. Вона призвела до збільшення попиту на хмарні технології через перехід багатьох компаній на віддалену роботу, що спричинило зростання викидів парникових газів. Хмарні платформи стали основою для обробки великих даних, необхідних для алгоритмів ШІ, що додатково підвищує енергоспоживання та викиди (рис. 2.6, 2.7).

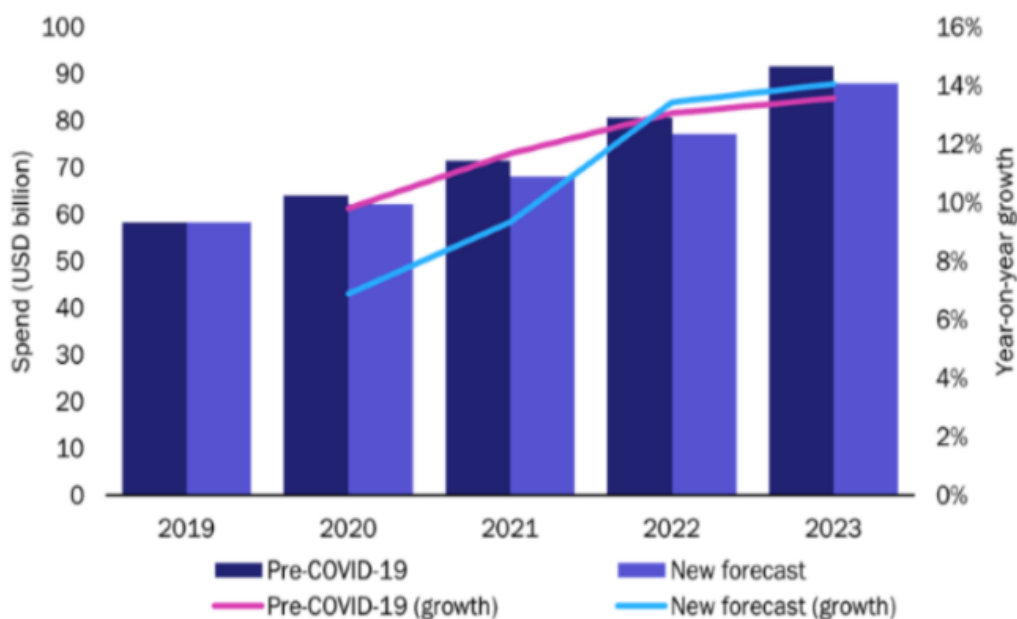


Рис. 2.6. Витрати СМБ на сервери та річне зростання, до та після змін, спричинених COVID-19, у всьому світі, 2019-2023 рр.^[22]

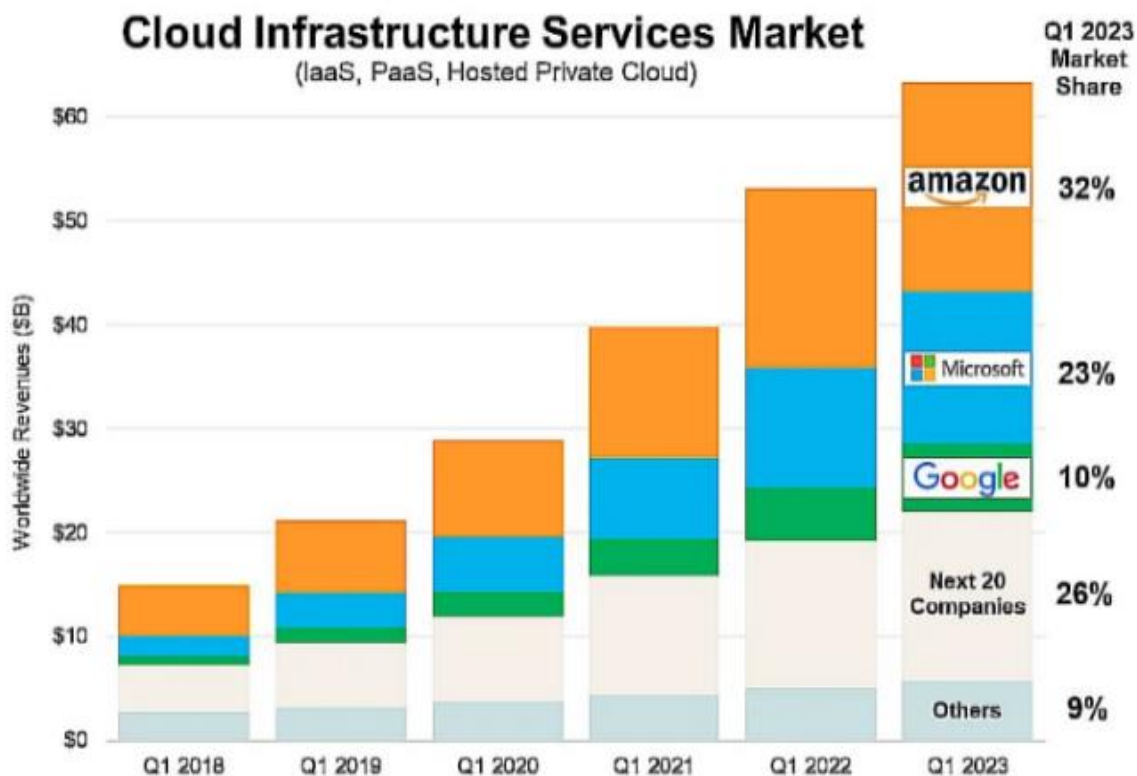


Рис. 2.7. Ринок послуг хмарної інфраструктури^[23]

“Поява технології блокчейну та криптовалют зробила революцію в різних секторах – від фінансів до управління ланцюгами поставок. Однак ця цифрова революція не позбавлена негативних екологічних наслідків. Процес майнінгу криптовалют, що є фундаментальним для створення та перевірки транзакцій у блокчейн-мережах, викликає серйозні занепокоєння через значне споживання енергії та пов'язаний з цим вуглецевий слід. Станом на сьогодні енергоспоживання одного лише Bitcoin становить 172.26 ТВт/рік, що можна зрівняти з споживанням електроенергії у всій Польщі” [16]. Простежується тренд до збільшення споживаної електроенергії (рис. 2.8).

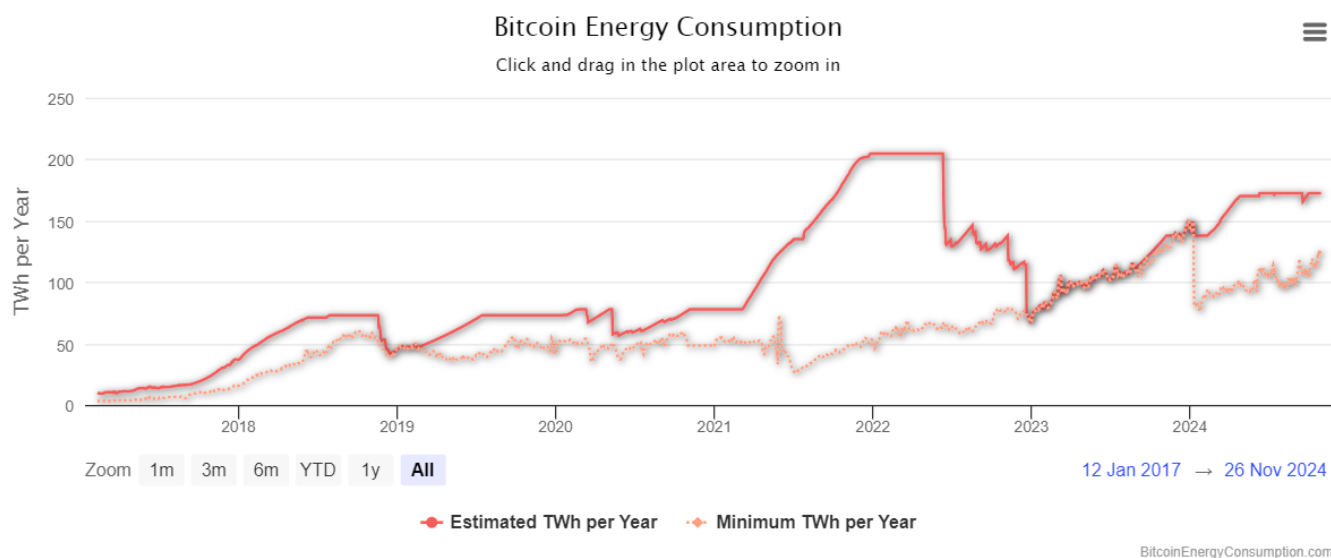


Рис. 2.8. Споживання енергії Bitcoin[26]

Майнінг більшості найпоширеніших криптовалют, в першу чергу Bitcoin, заснований на консенсусі proof-of-work (PoW), що передбачає вирішення складних математичних задач. Цей механізм забезпечує безпеку і цілісність блокчейн-мереж, але вимагає величезних обчислювальних потужностей. Високе енергоспоживання майнінгу пов'язане насамперед з необхідністю безперервної роботи високопродуктивного обладнання, такого як спеціалізовані інтегральні схеми (ASIC) і графічні процесори (GPU), які розв'язують ці задачі.

“Переважна більшість енергії, яку споживає майнінг, використовується для живлення цих машин і систем охолодження для запобігання перегріву. Найбільшим джерелом цієї енергії є невідновлювальні джерела, такі як викопні корисні копалини, а саме вугілля (30%), нафта (0.9%) та природний газ (31.3%) станом на серпень 2021-го року. Невеликою є частка атомної енергії (12.7%). Загальний обсяг викидів парникових газів, продукуваних криптовалютою Bitcoin, станом на сьогодні складає 96.08 Мт CO₂/рік, що приблизно дорівнює загальному обсягу викидів парникових газів усієї країни Узбекистан” [16]. Також простежується тренд до збільшення обсягів викидів парникових газів від Bitcoin

(рис. 2.9., 2.10).

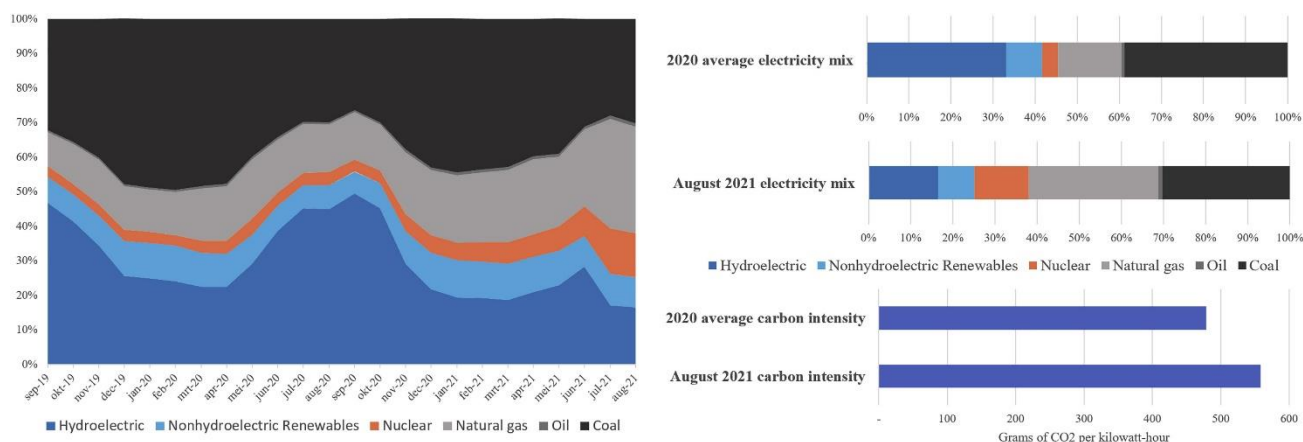


Рис. 2.9. Орієнтовна структура електроенергії, яка живила мережу Bitcoin з вересня 2019 року по серпень 2021 року[27]

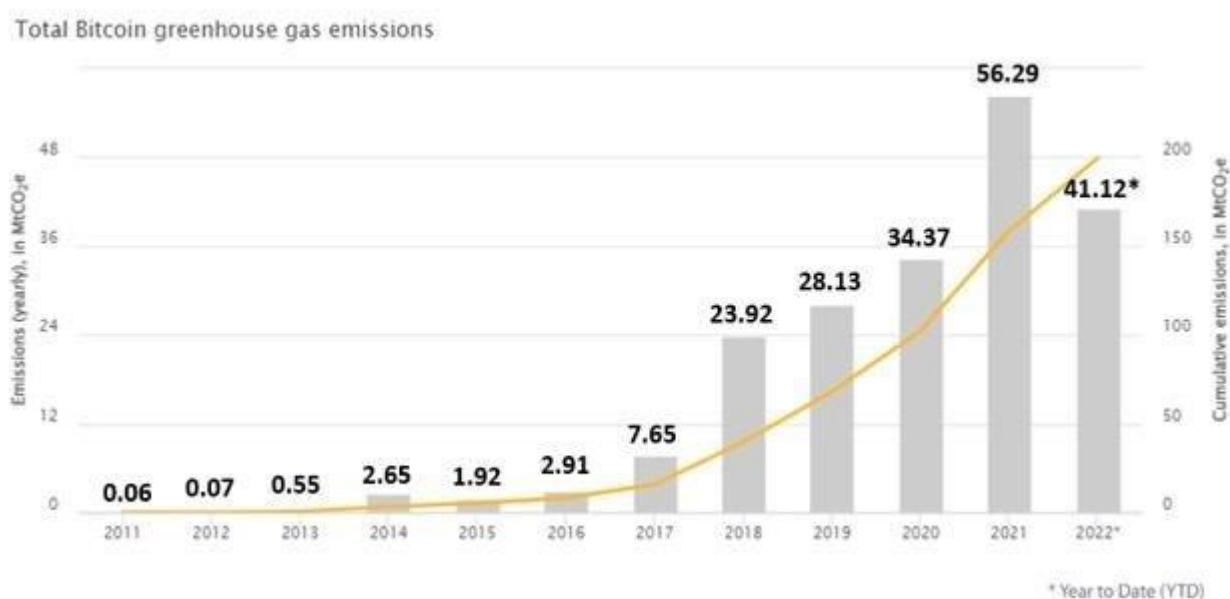


Рис. 2.10. Загальний обсяг викидів парникових газів Bitcoin[28]

Згідно з прогнозами науковців вплив майнінгу криптовалют на навколишнє середовище зростатиме й далі через постійну популяризацію криптовалют і розширення області їхнього використання. Водночас зростає інтерес до переходу до більш сталих методів майнінгу. Такі інновації, як механізм консенсусу на основі proof-of-stake (PoS), який потребує значно менше енергії, ніж PoW,

розглядаються різними блокчейн-мережами для зменшення впливу на навколишнє середовище. Для прикладу, із 2022 року друга за популярністю криптовалюта Ethereum перейшла на механізм консенсусу PoS. Можемо бачити зміни в енергоспоживанні та викидах парникових газів між Bitcoin та Ethereum (рис. 2.11).

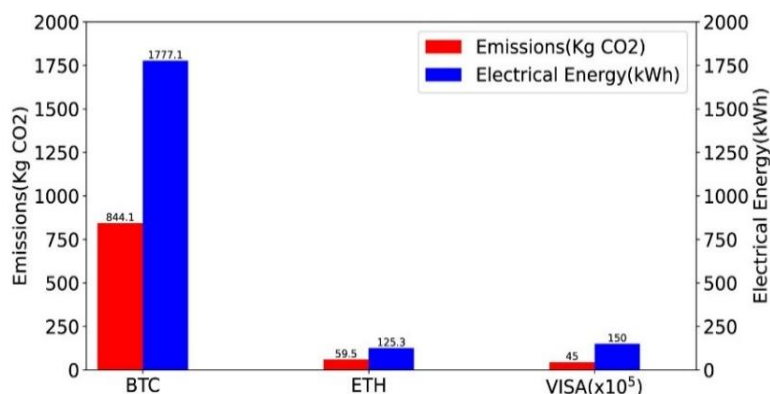


Рис. 2.11. Споживання електроенергії та викиди CO2 на транзакцію для Bitcoin, Ethereum та Visa [29]

“Популярність потокових платформ, таких як Netflix і YouTube, різко зросла, що суттєво вплинуло на інтернет-трафік. На відео зараз припадає приблизно 65% загального трафіку, і ця частка зростає. Потокові сервіси, хоча й стали важливою частиною цифрової економіки, мають значний вуглецевий слід через енергоспоживання та пов’язані викиди парникових газів” [30, 31]. Аналіз енергетичних витрат цих сервісів є ключовим для розуміння їхнього впливу на довкілля.

Для зручності обчислення вуглецевого сліду перегляду відео на стрімінгових платформах найчастіше ведуть в еквіваленті вуглецевого газу в годину CO₂e/год. Найпоширенішими є наступні чотири методи обчислення обсягів викидів парникових газів від перегляду відео на стрімінгових платформах (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2.

Порівняння методів розрахунку викидів CO₂ [32]

Автор	Короткий опис	Методологія	Результати, CO ₂ е/год
Anders and Andrae	Розраховано споживання електроенергії мереж та оцінено світове споживання ІКТ	Вони оцінили найгірший і найкращий сценарії такі як 1 ГБ/год і 3 ГБ/год. Споживання електроенергії включає виробництво, дата-центри, мережі та пристрої. Використовуючи світову електроенергію та припущення про 3 ГБ даних на годину. Загалом 2 мільярди людей - це 5230 екзабайт і 570 ТВт-год. Це означає, що 1 година відео вимагає 0,304 кВт-год електроенергії. У перерахунку на CO ₂ , перегляд 1 години відео в найкращому випадку виробляє 72 г вуглекислого газу.	72 г – 216 г
Obringer	Враховує водний та земельний слід, зосереджується на відеоконференціях та 7 додатках для соціальних мереж.	Вони підраховали, що 1 година потокового відео потребує 7 ГБ і 441 г CO ₂ е. У розрахунках використовується стандартна роздільна здатність 3 ГБ. Вони виміряли CO ₂ на основі HD або 4K відео і заявили, що 1 ГБ = 28-63 г CO ₂	84 г – 252 г
Shift Project	Оцінений загальний вплив перегляду відео в Інтернеті включає в себе вплив на центр обробки даних, мережу та пристрої.	Вони використовують середньозважене значення, що враховує час перегляду, пристрої, мережу та регіон. 1 петабайт ~72 мВт-год, бітрейт 3 Мбіт/с і 0,519 кг CO ₂ е/кВт-год. Гіпотеза - 10 хвилин перегляду відео з якістю 1080р. За їхніми розрахунками: перегляд 1 години відео споживає 0,519 кг CO ₂ е/кВт-год, що становить 280 г CO ₂ е.	280г
Hintemann and Hinterholze	Розраховано споживання електроенергії дата-центрами.	Вони використовували фіксовані мережі низької якості. Відео з роздільною здатністю 720 пікселів споживає 280 Вт-год енергії, що еквівалентно 130 г CO ₂ . Їхній метод був низхідним, тобто вони розраховували енергію центрів обробки даних і мереж, а потім порівнювали її з обсягом потокового відео. Так, за їхніми підрахунками, 1 год відео споживає 220-370 Вт-год.	100 г - 175 г

Середній розмір викидів від перегляду 1 год потокового відео у Європі станом на 2020 рік становив 56 г (рис. 2.12). Основними джерелами викидів парникових газів при перегляді потокових відео є: дата-центри, на яких ці відео зберігаються (1%); мережа передачі інтернет-трафіку (10%); домашній роутер (38%); телевізійні периферійні пристрої (5%) та екрани (46%) (рис. 2.9). Однак ці дані можуть значно коливатися в залежності від таких факторів як пристрій перегляду, роздільна здатність екрану, частота оновлення, бітрейт, платформа перегляду. Тому в різних умовах матимемо різні результати. Бачимо, що зі збільшенням розміру екрану та роздільної здатності у викидах зростає частка пристрою для перегляду (рис. 2.13).

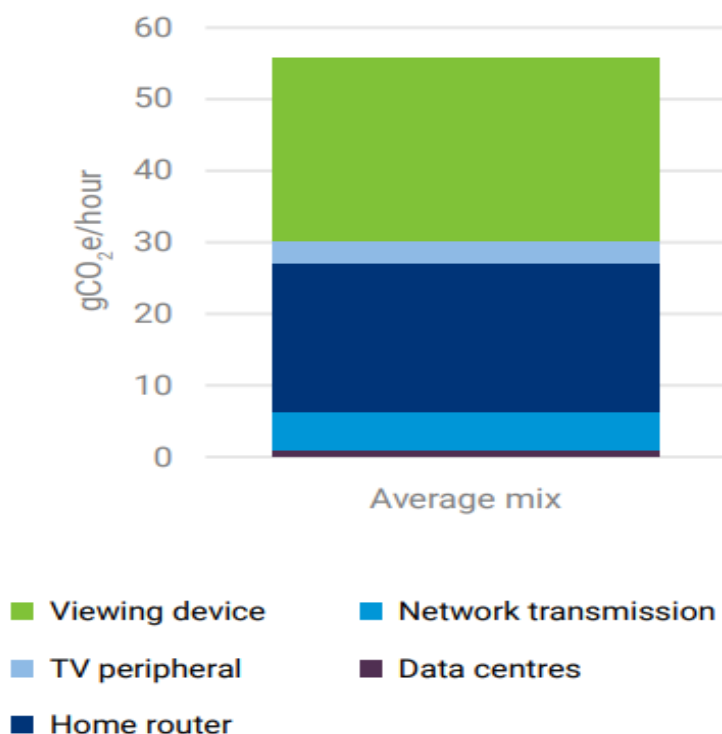


Рис. 2.12. Орієнтовний обсяг викидів від однієї години потокового відео (середній показник по Європі у 2020 році)^[33]

Video streaming component stage	Emissions (gCO ₂ e/hour streaming)	Energy consumption (Wh/hour streaming)	% of total
Data Centres	<1	1	1%
Transmission Network	6	20	10%
Home Router	21	71	38%
TV Peripheral	3	10	5%
Screens	25	86	46%
Total	56	188	100%

Рис. 2.13. Розподіл викидів та споживання енергії за компонентами процесу потокового відео в Європі у 2020 році^[33]

Іншим важливим параметром є платформа перегляду. Вуглецевий слід різних стрімінгових платформ та онлайн-сервісів також значно варіюється. Деякі платформи, такі як Netflix та YouTube, відповідають за значну частину викидів парникових газів через їх високу популярність та великий обсяг трафіку. Також розуміло, що різні компанії по-різному розпоряджаються своїми ресурсами, отже й перегляд потокового контенту на їх платформах матиме різний вуглецевий слід.

Вуглецевий слід електронних пристроїв складається з двох основних компонентів: вуглецевий слід їх виробництва та слід, що виникає під час використання. Дослідження показують, що для більшості пристроїв, таких як смартфони та ноутбуки, основний вуглецевий слід формується саме на етапі виробництва через потребу у видобуванні рідкісноземельних елементів, обробці металів і використанні води та електроенергії, однак за тривалого використання кількість викидів парникових газів, що виділилися впродовж використання пристрою, може перевершувати вуглецевий слід, що формується на етапі виробництва.

Для пристроїв, що вимагають постійного підключення до джерела електроенергії, наприклад серверів, споживання енергії під час використання має більшу вагу, що призводить до різних екологічних наслідків залежно від типу пристрою (табл. 2.3, рис. 2.14.).

Таблиця 2.3

Глобальні оцінки викидів сектору ІКТ, 2022 рік [10]

Індустрія	Викиди 2022/2020 (млн т CO ₂ e)			Зміна 2022/2020, %
	2020	2021	2022	
ІКТ-обладнання загалом	154	173	154	0.5%
- Персональні комп'ютери	62	71	65	4.8%
- Смартфони	60	64	57	-5.1%
- Мережа	32	38	33	2.4%
Використання обладнання	222	215	205	-7.5%
- Персональні комп'ютери	203	197	187	-7.9%
- Смартфони	19	18	18	-3.4%
ВСЬОГО	375	388	359	-4.2%

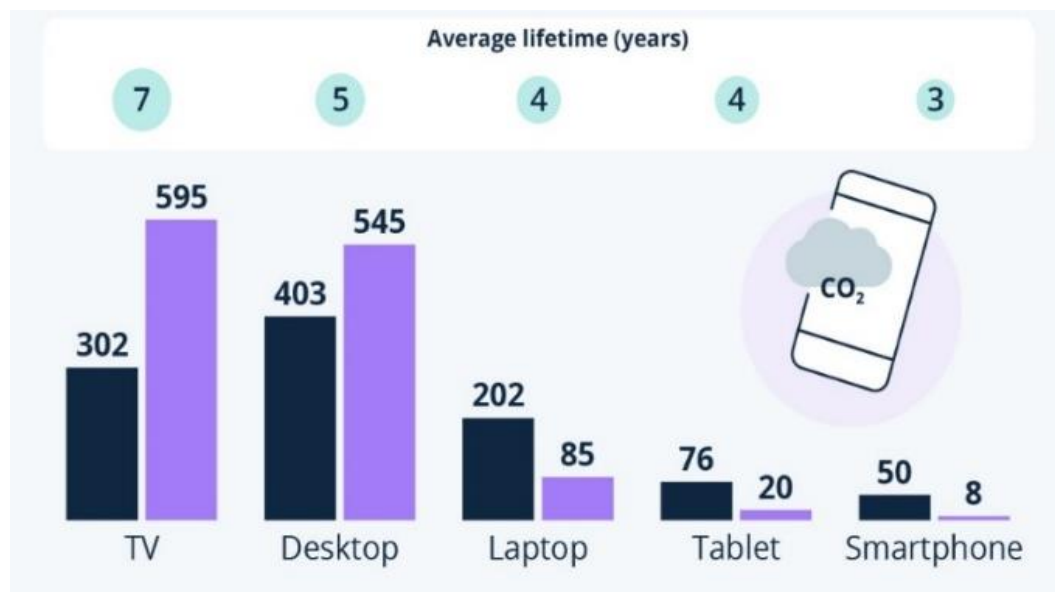


Рис. 2.14. Оціночні викиди парникових газів протягом життєвого циклу електронних пристроїв у 2020 році (в кг еквіваленту CO₂)^[34]

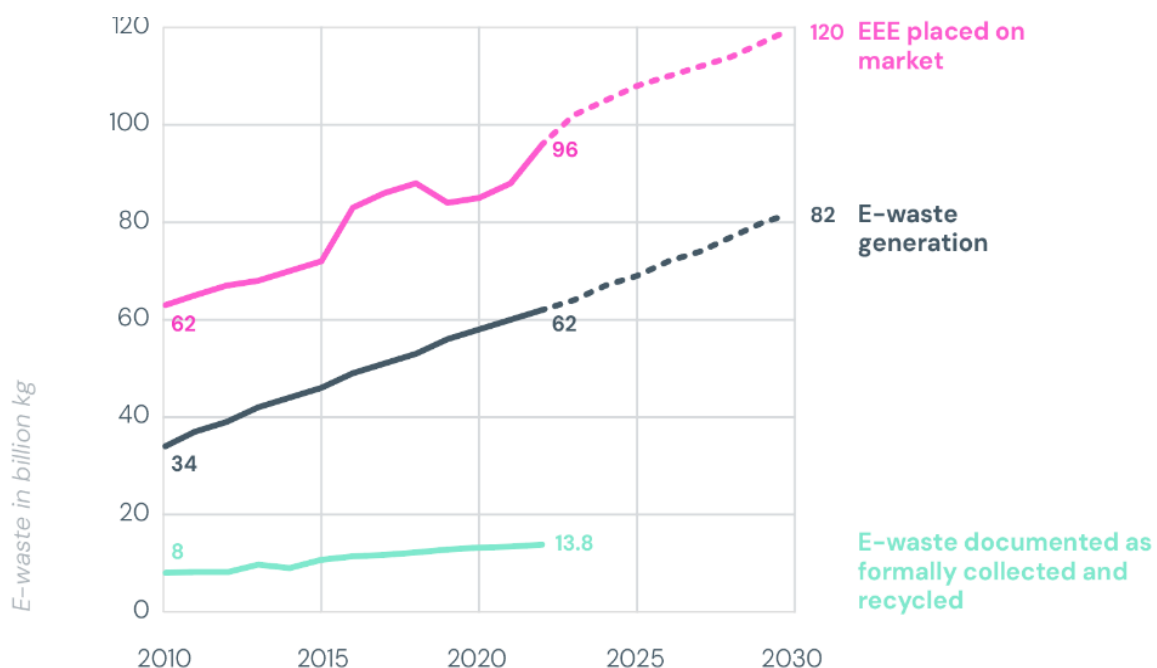


Рис. 2.15. Кількість утворених електронних відходів упродовж 2010-2022 років із прогнозом до 2030 року^[35]

Бачимо тренд до спадання викидів в останні роки завдяки впровадженню нових енергоефективних технологій.

2.2. Порівняльний аналіз провідних цифрових корпорацій (Google, Amazon, Microsoft, Meta)

Глобальні цифрові корпорації — Google, Amazon, Microsoft і Meta — є ключовими акторами у формуванні світового вуглецевого сліду цифрової економіки. Вони забезпечують більшу частину глобальних хмарних обчислень, є найбільшими власниками дата-центрів і телекомунікаційних інфраструктур, визначають стандарти цифрової трансформації та задають напрями екологічної відповідальності для всього ІКТ-сектору. Сукупний вплив цих компаній на глобальні викиди CO₂ вимірюється десятками мільйонів тонн щороку, що робить їх одними з найважливіших суб'єктів у контексті декарбонізації цифрової

економіки [36; 41]. Порівняльний аналіз дозволяє оцінити ефективність їхніх підходів до скорочення вуглецевого сліду, структуру енергоспоживання, динаміку використання відновлюваних джерел енергії та масштаби інвестицій у кліматичні технології.

“За останні п’ять років екологічні стратегії Google, Amazon, Microsoft і Meta стали основою глобальних «зелених» трендів ІКТ-індустрії. Однак їхня кліматична динаміка є різною: Google декларує прагнення стати компанією з нульовими викидами на всіх операційних рівнях до 2030 року, в той час як Microsoft заявила ціль стати «вуглецево негативною» (carbon-negative), тобто видаляти більше CO₂, ніж генерує, — це найбільш амбітна стратегія серед ІКТ-гігантів [64]. Amazon, попри те, що володіє найбільшим у світі портфелем дата-центрів через AWS, відстає від конкурентів за темпами декарбонізації, тоді як Meta демонструє високий відсоток використання ВДЕ, але має значно нижчу прозорість щодо непрямих викидів (Scope 3) порівняно з іншими корпораціями” [47; 48].

Викиди Google, Amazon, Microsoft і Meta значною мірою визначають глобальну структуру вуглецевого сліду цифрової економіки, оскільки їхня діяльність охоплює критично важливі сегменти: хмарні сервіси, генеративний штучний інтелект, відеостримінг, соціальні платформи та сфери електронної комерції. За звітами компаній, Amazon є найбільшим корпоративним джерелом викидів серед «великої четвірки», що зумовлено масштабами логістичних, транспортних та складських операцій, які значно перевищують енергетичний профіль суто цифрових сервісів [47]. У 2022–2023 рр. загальні викиди Amazon перевищували 60 млн тонн CO₂e на рік, що робить її однією з найбільш «вуглецеємних» корпорацій світу. Найбільша частка припадає на Scope 3 — виробництво товарів для маркетплейсу, логістику та постачальників.

Google демонструє протилежну динаміку: попри різке зростання потреб ІІІ, компанія намагається зберегти стабільний рівень викидів і активно

компенсує непрямі викиди завдяки системам відновлюваної генерації та інвестиціям у енергетичні технології [46]. Проте у 2023 р. Google повідомила про суттєве збільшення Score 2 і Score 3 через енергоємність моделей машинного навчання, що стало однією з головних проблем сектору.

Microsoft утримує значно менший рівень викидів порівняно з Amazon, проте, за даними Sustainability Report, компанія у 2023 р. зафіксувала зростання Score 3 майже на 30% через різке збільшення інвестицій у хмарні обчислення та інфраструктуру, необхідну для ШІ, зокрема для моделі GPT [64]. Це демонструє характерну світову тенденцію: зростання цифровізації практично завжди веде до збільшення непрямих викидів.

Meta вирізняється тим, що більшість її викидів формується кінцевими пристроями користувачів та виробничими ланцюгами партнерів, а операційні викиди дата-центрів є відносно низькими завдяки повному переходу інфраструктури на відновлювану енергію. Проте прозорість Meta щодо Score 3 нижча, ніж у Google та Microsoft, а екологічний слід таких продуктів, як Meta Quest, має недооцінені складові у сфері ланцюгів постачання.

Дата-центри цих чотирьох компаній є основними споживачами електроенергії в цифровому секторі. За даними ІЕА, до 40% глобальної інфраструктури хмарних обчислень припадає саме на Google, Amazon, Microsoft і Meta [9]. Тенденції розвитку штучного інтелекту та високопродуктивних обчислень створили безпрецедентне навантаження на їхні енергетичні системи. Наприклад, Google зазначає, що тренування однієї моделі великих масштабів може збільшити енергоспоживання дата-центру на 8–12% у пікові періоди, що прямо впливає на обсяги викидів [11].

Amazon Web Services (AWS), як найбільший провайдер хмарних обчислень у світі, має понад 200 дата-центрів у глобальній мережі, і їхнє сукупне енергоспоживання перевищує аналогічні показники Google Cloud та Microsoft Azure [47]. Значна частина потужностей AWS працює у регіонах із невисокою

часткою ВДЕ, що підвищує вуглецеву інтенсивність дата-центрів та відтерміновує досягнення кліматичних цілей компанії.

Microsoft активно модернізує інфраструктуру Azure, використовуючи системи рідинного охолодження та оптимізовану архітектуру серверних кластерів. За даними Sustainability Report, компанія впровадила нове покоління високоефективних дата-центрів, здатних зменшувати енергоспоживання на 10–15% у порівнянні з традиційними серверами [64]. Проте потреби ШІ практично нівелюють ці переваги: за оцінками незалежних дослідників, кожна нова генерація ШІ-моделей подвоює енергетичні потреби інфраструктури [11].

Meta, на відміну від інших корпорацій, робить ставку на регіональне розміщення дата-центрів у зонах з холодним кліматом та дешевою відновлюваною енергією. Це дозволило компанії знизити енергоспоживання на одиницю обчислювальної потужності та досягти майже 100% переходу на ВДЕ для операційної діяльності.

Порівняння підходів компаній до енергетичного забезпечення демонструє, що використання відновлюваної енергії є ключовим фактором скорочення операційних викидів. Google ще у 2017 році заявила про повний перехід на ВДЕ для покриття енергоспоживання глобальних дата-центрів та офісів, ставши першою корпорацією такого масштабу, що досягла енергетичної нейтральності на основі прямих закупівель зеленої електрики та довгострокових контрактів РРА [46]. У 2024 році Google оголосила про намір повністю перейти на «24/7 carbon-free energy», тобто забезпечення кожної години роботи дата-центрів енергією з нульовими викидами. Це найамбітніша стратегія декарбонізації серед цифрових корпорацій, але її реалізація залежить від розвитку локальних енергосистем, технологій зберігання електроенергії та розширення ринку зеленої генерації.

Microsoft також активно розвиває портфель угод РРА, інвестує в офшорні вітрові станції та технології акумуляції енергії. Компанія планує не лише досягти нульових викидів, а й компенсувати всі історичні викиди з моменту заснування у

1975 році, що робить її кліматичну стратегію найбільш комплексною серед провідних ІКТ-компаній [64]. Microsoft інвестує у системи уловлювання вуглецю, лісові проєкти та технології Direct Air Capture, що підкреслює прагнення до системного підходу до декарбонізації.

На відміну від Google і Microsoft, Amazon перебуває у значно складнішій ситуації через масштаб своєї логістичної інфраструктури: складські комплекси, центри сортування, парки електровантажівок і авіаційні підрозділи створюють величезний обсяг Scope 1 і Scope 3. Водночас Amazon є одним із найбільших корпоративних інвесторів у відновлювану енергетику у світі: компанія має понад 500 ВДЕ-проєктів у 27 країнах, що робить її найбільшим покупцем зеленої електрики серед приватних компаній [47; 48]. Утім, попри масштабні інвестиції, загальні викиди Amazon зростають, що демонструє структурні обмеження у декарбонізації бізнес-моделі.

Meta демонструє високий рівень відновлюваної енергії, але її кліматичні зобов'язання є менш конкретними порівняно з конкурентами: компанія не ставить формалізованої мети щодо «24/7 carbon-free energy», але досягла 100% відновлюваної енергії для власних операцій, що суттєво знижує Scope 2. Проте непрямі викиди, пов'язані з виробництвом пристроїв, цифровою рекламою та апаратними комплектами для VR/AR, залишаються недостатньо структурованими в її звітності, що знижує прозорість для аналізу загального впливу [30].

Оцінка кліматичних стратегій провідних корпорацій вимагає аналізу не лише джерел енергії, а й інновацій у сфері енергоефективності. Google є одним із лідерів у застосуванні штучного інтелекту для оптимізації роботи дата-центрів. Системи управління енергією на основі DeepMind дозволили компанії знизити витрати на охолодження приблизно на 30%, а загальне енергоспоживання — на 10–15%, що є одним із наймасштабніших прикладів енергоефективного

застосування ІІІ у світі [46]. Цей підхід створив галузевий стандарт, який почали наслідувати інші хмарні провайдери.

Microsoft розробляє системи рідинного охолодження, адаптовані до високої щільності обчислень, необхідної для ІІІ та моделей GPT. Нове покоління серверів Azure оснащено двофазним рідинним охолодженням, яке зменшує теплове навантаження у 6–10 разів порівняно з традиційним повітряним охолодженням. Це критично важливо, адже тренування великих мовних моделей може збільшувати пікове енергоспоживання кластерів у десятки разів [11; 64].

Amazon, попри свої логістичні особливості, інвестує у модульні дата-центри та нові архітектури процесорів (Graviton), які є на 40% енергоефективнішими, ніж традиційні CPU на базі x86. Це дає змогу зменшити викиди на одиницю обчислювальної потужності, хоча загальний масштаб споживання енергії продовжує зростати [47].

Meta концентрується на оптимізації алгоритмів потокового відео та передачі даних, що є ключовим для її соціальних платформ. За оцінками дослідників, відеоконтент Facebook та Instagram генерує значну частку глобального трафіку, тому зменшення енергетичної інтенсивності трансляцій є стратегічним напрямом для компанії [29; 30]. Meta також розвиває «холодні» дата-центри у Скандинавії з низькою потребою в активному охолодженні.

Незважаючи на спільні тенденції, кліматичні стратегії корпорацій суттєво різняться за рівнем амбіцій, прозорістю та структурою.

Google ставить ціль забезпечити повністю вуглецево-нейтральну роботу у режимі 24/7 до 2030 року. Це означає, що компанія планує повністю усунути використання викопного палива у будь-якій годині доби. Такий підхід є технологічно складним, потребує масштабного розвитку систем зберігання енергії та гнучких мережеских рішень, однак він визначає нові стандарти для цифрового сектору [46].

Microsoft планує не лише стати вуглецево-негативною до 2030 року, але й повністю компенсувати всі викиди з 1975 року. Програма включає масштабні інвестиції у технології уловлювання вуглецю та природоорієнтовані рішення. Проте зростання енергоспоживання Azure і збільшення викидів Scope 3 ставлять під сумнів реалістичність цієї мети у заявлені строки [64].

Amazon має ціль досягти нульових викидів до 2040 року. Компанія активно розвиває власний портфель ВДЕ та електричний транспорт, проте викиди продовжують зростати через розширення інфраструктури AWS, що свідчить про складність декарбонізації компанії з гібридною — цифровою і логістичною — структурою бізнесу [47; 48].

Meta декларує нульові операційні викиди, але не встановлює чіткої довгострокової мети щодо Scope 3. Це знижує загальну прозорість та ускладнює оцінку реального внеску корпорації у глобальну декарбонізацію.

Структурний аналіз підходів до скорочення викидів у цих корпораціях дозволяє виділити ключові сфери, які формують загальну ефективність кліматичних стратегій: прозорість обліку Scope 3, інноваційність технологічних рішень, інвестиційна активність у зелені технології та інтеграція декарбонізації в бізнес-модель.

Однією з найбільш проблемних ділянок для всіх чотирьох компаній є облік непрямих викидів (Scope 3). Ця категорія включає постачальників, виробництво обладнання, транспортування, утилізацію пристроїв і навіть енергоспоживання користувачів, залежно від обраної методики обліку. Саме Scope 3 становить найбільшу частку вуглецевого сліду цифрових корпорацій, інколи перевищуючи 90% загальних викидів — особливо у випадку виробництва електроніки, хмарної інфраструктури та інтернет-платформ [33; 34].

Microsoft найбільш докладно звітує про Scope 3, детально описуючи вплив кожного сегмента: придбання обладнання, створення серверів, виробництво пристроїв Surface, логістичні операції та використання продуктів кінцевими

споживачами [64]. У 2023 році викиди Microsoft у категорії Scope 3 збільшилися майже на 30%, що свідчить про зростання запиту на обчислювальні потужності Azure та масштабування ШІ. Це підкреслює структурну проблему: попит на цифрові послуги зростає швидше, ніж інновації, здатні скоротити їхній вуглецевий вплив.

Google має порівняно стабільний рівень Scope 3, але у 2023 році повідомила про різке зростання цієї категорії через експансію штучного інтелекту, збільшення виробництва апаратних пристроїв Pixel та Nest, а також розширення ланцюгів постачання для хмарних сервісів [46]. Компанія визнає, що впровадження ШІ має «негативний вплив на короткострокові кліматичні цілі», і фактично попереджає про ризик невиконання цілі «24/7 carbon-free energy» у визначені строки.

Meta найменше деталізує Scope 3. Компанія зосереджує увагу на операційних показниках і кліматичних ініціативах, але надає менше інформації про постачальників, виробництво апаратних пристроїв і вплив екосистеми рекламних сервісів. Низька прозорість Scope 3 робить складним об'єктивне порівняння Meta з іншими корпораціями у контексті декарбонізації [29; 30].

Amazon має найбільший Scope 3 серед аналізованих корпорацій через логістичні, транспортні, виробничі та складські процеси своєї глобальної екосистеми. У 2020–2023 рр. Amazon декілька разів переглядала методики обліку, що вплинуло на зміну динаміки заявлених викидів, однак у цілому структура Scope 3 залишається найскладнішою серед провідних цифрових компаній. Викиди AWS, хоч і є лише частиною загального профілю Amazon, суттєво впливають на світовий хмарний сектор [47; 48].

Цифрові корпорації виступають найбільшими інвесторами у розвиток кліматичних технологій, включаючи відновлювану енергетику, уловлювання вуглецю, енергоефективні мікропроцесори, системи зберігання енергії та інноваційні методи охолодження.

Google інвестує у розвиток сонячної та вітрової генерації, у модернізацію енергетичної інфраструктури регіонів, де розміщені її дата-центри, та впровадження технологій прогнозування навантаження на основі ШІ. Компанія реалізує проекти з відбору CO₂ з атмосфери, розширює модель PPA-контрактів у країнах, де відсутні зрілі ринки зеленої енергетики, і підтримує енергетичні інновації через власні фонди інвестицій [46].

Microsoft має найбільший у світі портфель корпоративних контрактів PPA та інвестує в найсучасніші технології уловлювання вуглецю, включаючи Direct Air Capture та мінералізацію CO₂. Компанія бере участь у міжнародних програмах, спрямованих на створення глобального ринку високоякісних вуглецевих кредитів, і активно фінансує енергетичні стартапи [64].

Amazon є найбільшим корпоративним покупцем відновлюваної енергії у світі. Компанія бере участь у розвитку вітрових та сонячних електростанцій у Європі, США, Індії та Південній Америці, інвестує в електротранспорт (Rivian, електровантажівки), а також підтримує наукові дослідження у сфері енергоефективних процесорів та систем охолодження [47].

Meta інвестує у локальні енергетичні системи, включаючи великі сонячні електростанції в США, а також бере участь у розвитку інфраструктури передачі енергії в регіонах, де компанія будує нові дата-центри. Компанія робить акцент на зниженні енергетичного навантаження мереж через оптимізацію алгоритмів потокового відео та зменшення енергоспоживання серверів завдяки переходу на внутрішні апаратні рішення.

Сучасні рейтинги сталого розвитку, такі як S&P Global ESG Index, MSCI ESG Ratings, CDP Disclosure та Corporate Sustainability Assessment, дозволяють систематизувати дані та порівнювати компанії за рівнем екологічної відповідальності. За результатами незалежних оцінок Google і Microsoft демонструють високі рейтинги завдяки детальній звітності, амбітним кліматичним цілям та інвестиціям у технології скорочення викидів [36; 40]. Meta

має добрі показники Score 2, однак нижча прозорість Score 3 знижує рейтингові оцінки. Amazon, попри значні інвестиції у ВДЕ, отримує нижчі рейтинги через складність декарбонізації логістичної моделі та зростання викидів.

Узагальнені результати свідчать, що ефективність кліматичних стратегій провідних цифрових корпорацій залежить не лише від рівня інвестицій у відновлювану енергетику, але й від структурних аспектів їхніх бізнес-моделей. Компанії, які мають чисто цифровий профіль (Google і Meta), демонструють вищу швидкість декарбонізації, ніж корпорації з гібридними структурами (Amazon), де непрямі викиди залежать від матеріальних ланцюгів постачання. Microsoft, завдяки комплексному підходу та високій прозорості, вирізняється серед інших компаній, але також стикається зі зростанням викидів через масштабування хмарних сервісів та ШІ.

З позицій глобальних кліматичних тенденцій діяльність чотирьох провідних цифрових корпорацій демонструє, що розвиток цифрової економіки є одночасно джерелом зростання викидів та інструментом їхнього скорочення. Значна частина інновацій у сфері енергетичної ефективності та декарбонізації генерується саме цими компаніями. Тому їхні кліматичні стратегії мають не лише локальний корпоративний ефект, а й формують стандарти та орієнтири для всього ІКТ-сектору та суміжних галузей.

Узагальнюючи результати аналізу, можна виділити три домінантні моделі декарбонізації, які використовують Google, Amazon, Microsoft і Meta.

Перша модель — енергетична нейтралізація через ВДЕ та оптимізацію енергоспоживання, яку найуспішніше реалізують Google та Meta. Висока частка відновлюваних джерел енергії, використання інтелектуальних систем керування навантаженням і розташування дата-центрів у регіонах із сприятливими кліматичними умовами дозволяють цим компаніям суттєво скорочувати операційні викиди (Score 1 і Score 2). При цьому Google вирізняється найбільш амбітною ціллю — забезпечення роботи дата-центрів на 100% безвуглецевої

енергії у режимі 24/7, тоді як Meta зосереджується на регіональній оптимізації та автоматизації енергетичних систем [30; 46].

Друга модель — компенсаційно-технологічна, яку реалізує Microsoft. Компанія поєднує скорочення викидів із масштабними інвестиціями у проекти уловлювання та зберігання вуглецю, а також у природоорієнтовані рішення. Такий підхід є найбільш комплексним, але потенційно найризикованішим: він залежить від майбутньої ефективності технологій уловлювання CO₂, які поки що не досягли масового промислового рівня. Microsoft демонструє найвищий рівень прозорості та системності кліматичної політики серед аналізованих компаній, але швидке зростання хмарного сектору, машинного навчання та серверних кластерів для ШІ суттєво ускладнює виконання задекларованих цілей [64].

Третя модель — масштабне інвестування у відновлювану енергетику без достатньої трансформації операційної моделі, яку репрезентує Amazon. Попри те, що компанія володіє найбільшим приватним портфелем ВДЕ-проектів у світі, її загальні викиди продовжують зростати через специфіку бізнес-моделі, орієнтованої на логістику, виробництво товарів і глобальне транспортування. Цей приклад демонструє обмеження виключно інвестиційного підходу без глибокої структурної декарбонізації основних бізнес-процесів [47; 48].

Хоча аналізовані компанії є лідерами у впровадженні кліматичних інновацій, їхні стратегії стикаються з рядом глобальних викликів. Одним з основних є різке зростання енергетичних потреб, пов'язаних із розвитком штучного інтелекту. Тренування великих мовних моделей, на зразок тих, що використовуються у Google, OpenAI чи Microsoft, потребує колосальних енергетичних ресурсів. За сучасними дослідженнями, енергоспоживання ШІ росте експоненційно: кожне нове покоління моделей збільшує навантаження на дата-центри в 10–100 разів, що ставить під загрозу довгострокові кліматичні цілі цифрових корпорацій [11; 36].

Іншим важливим викликом є недостатня глобальна інтеграція відновлюваних джерел у енергетичні системи багатьох країн. Відсутність доступу до низьковуглецевої електрики у ряді регіонів Європи, Південної Азії, Африки та Південної Америки ускладнює розміщення екологічно чистих дата-центрів. Цей фактор впливає на можливості реалізації амбітних цілей Google і Microsoft, особливо у країнах, де частка викопного палива у генерації залишається домінантною [36; 58].

Ще однією проблемою є екологічний вплив ланцюгів постачання: виробництво серверів, мережевого обладнання, мікročипів, батарей і систем охолодження супроводжується значними викидами CO₂ та утворенням електронних відходів. За даними UNITAR, глобальні обсяги електронного брухту продовжують зростати швидше, ніж технології його переробки, а переробляється менше 25% електронних відходів, що створює додатковий прихований вуглецевий тягар для цифрових корпорацій [34; 35; 43]. Це означає, що навіть компанії з високою часткою відновлюваної енергії не можуть повністю усунути свій непрямий екологічний вплив без фундаментальної трансформації виробничих ланцюгів.

Проблемою також залишається невизначеність у сфері міжнародних стандартів вимірювання вуглецевого сліду цифрових технологій. Попри наявність GHG Protocol, ISO 14064 та ITU L.1470, відсутність єдиної методології призводить до нерівномірності даних у корпоративних звітах. У результаті компанії часто використовують різні системи обліку Scope 3, що ускладнює порівняння їхнього екологічного впливу на глобальному рівні [7; 8; 69].

Порівняльний аналіз Google, Amazon, Microsoft і Meta дозволяє зробити кілька ключових висновків:

1. Microsoft та Google демонструють найамбітніші та найструктурованіші кліматичні стратегії, спрямовані як на скорочення прямих і непрямих викидів, так і на інвестування у довгострокові технології декарбонізації.

2. Meta досягла найбільшого успіху в операційній декарбонізації, але залишається найменш прозорою у сфері Scope 3, що ускладнює оцінку її реального кліматичного впливу.
3. Amazon володіє найбільшим абсолютним вуглецевим слідом через гібридну логістично-цифрову модель бізнесу, і попри рекордні інвестиції у відновлювану енергетику, залишається компанією з найвищою динамікою зростання викидів.
4. Усі чотири компанії стикаються зі зростанням енергоспоживання, викликаним ШІ, що ставить під питання реалістичність досягнення їхніх кліматичних цілей у 2030–2040 роках.
5. Фундаментальним обмеженням є ланцюги постачання та виробництво електроніки, які формують до 90% непрямих викидів і залишаються найменш контрольованим елементом у корпоративних екологічних стратегіях.
6. Попри виклики, ці компанії задають темп глобальної декарбонізації цифрової економіки, інвестуючи у ВДЕ, енергоефективні процесори, системи охолодження, інтелектуальне керування дата-центрами та інноваційні технології уловлювання CO₂.

Узагальнюючи, Google, Amazon, Microsoft і Meta є не просто учасниками цифрової економіки, а її системними архітекторами, від яких залежить формування глобальних екологічних стандартів, структура енергоспоживання ІКТ-сектору та динаміка світових викидів CO₂ у найближчі десятиліття.

2.3. Україна в глобальних процесах цифровізації: екологічні ризики та можливості

Участь України у глобальних процесах цифровізації визначається складним поєднанням внутрішніх трансформацій, зумовлених війною та економічною

кризою, і зовнішніх викликів, пов'язаних зі світовими тенденціями декарбонізації ІКТ-сектору. Упродовж останнього десятиліття Україна демонструвала стабільну динаміку цифрового розвитку: зростання частки ІТ-сектору в структурі ВВП, активний розвиток телекомунікаційної інфраструктури, впровадження електронного урядування, формування цифрових сервісів держави, зокрема екосистеми «Дія». Разом з тим цифровізація супроводжується нарощуванням енергетичного навантаження та збільшенням вуглецевого сліду цифрової інфраструктури, що робить питання сталості цифрового розвитку надзвичайно актуальним.

В умовах війни Україна переживає безпрецедентні трансформації в енергетиці, логістиці та промисловості, що прямо впливають на можливість екологічної модернізації цифрового сектору. Масштабні руйнування енергетичної інфраструктури підвищують залежність від мобільних та резервних джерел електроживлення, значна частина яких базується на дизельних генераторах. Це тимчасово збільшує операційний вуглецевий слід телекомунікаційних компаній, дата-центрів, ІТ-підприємств і державних цифрових сервісів, оскільки резервні джерела енергії не можуть забезпечити низьковуглецеві параметри, властиві централізованим електромережам з часткою ВДЕ [13; 14].

Водночас в Україні сформувалась одна з найстійкіших телекомунікаційних систем у Європі, яка продемонструвала високу адаптивність до кризових умов — оператори зв'язку здійснили масштабну перебудову мереж, впровадження енергозберігаючих режимів роботи, оптимізацію навантажень та використання інтелектуальних систем маршрутизації даних. Ці процеси мають прямий екологічний ефект, оскільки модернізація телекомунікаційних мереж зменшує енергоспоживання на рівні кожної базової станції, вузла передачі даних або сегмента оптичної інфраструктури [30; 69].

Український IT-сектор, попри виклики воєнного часу, продовжує інтегруватися у глобальні технологічні ланцюги доданої вартості. Зовнішні замовники дедалі частіше вимагають від українських компаній відповідності міжнародним екологічним стандартам — ISO 14064, GHG Protocol, Science Based Targets initiative (SBTi) та ITU L.1470. Насамперед це стосується підприємств, що працюють у сферах хмарних сервісів, розроблення ПЗ, дата-аналітики, інтернет-рішень та штучного інтелекту. Таким чином, ринок самостійно стимулює українські компанії до вимірювання та зменшення свого вуглецевого сліду, інтегруючи екологічні критерії в управлінські практики без прямого державного регулювання [7; 8].

Важливим компонентом розвитку цифрової економіки в Україні є зростання попиту на дата-центри та хмарні обчислення, які стають критично необхідними для бізнесу і держави. Проте українська інфраструктура дата-центрів історично не проектувалася з акцентом на енергоефективність. Значна частина існуючих центрів обробки даних має високі значення PUE (Power Usage Effectiveness) — від 1,7 до 2,2, що суттєво перевищує середньосвітові показники, які для провідних міжнародних операторів становлять 1,1–1,3 [36; 46]. Це означає, що українські дата-центри споживають більше електроенергії для забезпечення охолодження та підтримки інфраструктури, ніж їхні глобальні аналоги. Проте саме це створює значний потенціал для модернізації, оскільки перехід на сучасні системи охолодження (free cooling, liquid cooling), оптимізацію повітряних потоків, використання енергоефективних серверів та розподілених систем керування може зменшити вуглецевий слід цього сектору на 30–50% у середньостроковій перспективі.

Важливо, що Україна має природні передумови для розвитку екологічно орієнтованої цифрової інфраструктури, зокрема низькі температури протягом 6–8 місяців року, що створює можливості для «холодної інфраструктури», аналогічної до моделей, які застосовують учасники «північного технокластера»

— Норвегія, Швеція, Ісландія та Фінляндія. Проте реалізація таких проєктів та залучення іноземних інвестицій у високотехнологічні дата-центри залежить від стабільності енергосистеми та відбудови критичної інфраструктури [12; 13].

Окремий аспект — розвиток цифрових державних сервісів. Екосистема «Дія» стала одним із найбільш масштабних цифрових проєктів третього сектору у Східній Європі. Її масштабування потребує посилення операційної стабільності, збільшення серверних потужностей, створення відмовостійких дата-центрів і резервних майданчиків. Це зумовлює зростання енергоспоживання державного цифрового сектору. Проте саме державні ІТ-платформи можуть стати драйвером запровадження принципів «зелених» дата-центрів, адже кожна модернізація державної цифрової інфраструктури може бути розроблена відповідно до міжнародних стандартів енергоефективності [30; 69].

Україна також має потенціал інтегруватися у європейські екосистеми сталого цифрового розвитку. Європейський Союз активно впроваджує ініціативи щодо декарбонізації ІКТ — Європейський зелений курс, Digital Decade Policy Programme, вимоги щодо сталих ланцюгів постачання та екодизайну цифрових продуктів. Ці політики відкривають для України можливості участі у програмах модернізації, гармонізації стандартів та отримання доступу до кліматичних інвестицій. Зокрема, українські підприємства можуть приєднуватися до програм із підвищення енергоефективності дата-центрів, розвитку ВДЕ, створення систем моніторингу викидів цифрової інфраструктури та оптимізації державних ІТ-платформ [10; 58].

Водночас існує низка екологічних ризиків, які необхідно враховувати. По-перше, швидке зростання обсягів електронних відходів на внутрішньому ринку. Україна щорічно утворює понад 250–300 тис. тонн електронного та електротехнічного брухту, з яких лише близько 5–8% переробляється належним чином [34; 35]. Підвищення інтенсивності цифровізації, активне споживання ІТ-пристроїв та оновлення серверного обладнання поглиблюватимуть цю проблему.

Без створення інфраструктури для збирання та переробки електронних відходів Україна ризикує сформувати аналог проблеми, з якою стикаються країни Південної Азії та Африки, — накопичення токсичних відходів із високим вуглецевим навантаженням.

По-друге, ризики енергетичної нестабільності та залежності від викопного палива можуть гальмувати розвиток низьковуглецевих цифрових технологій. Хоча частка ВДЕ в Україні поступово зростає, її інтеграція у мережу в умовах воєнних руйнувань залишається обмеженою [12; 13]. Водночас цифрові технології можуть стати ключовим компонентом для зеленої відбудови енергетики — зокрема, за рахунок інтелектуальних мереж, систем керування навантаженням та автоматизованих модулів для прогнозування генерації.

Попри виклики, цифрова економіка України має значний потенціал для формування власної моделі сталості, інтегрованої у глобальні тенденції. Поєднання високої кваліфікації фахівців ІТ, наявності конкурентних переваг у хмарних сервісах, інтенсивного розвитку цифрової держави та можливостей для екологічної модернізації створює основу для того, щоб Україна стала регіональним центром низьковуглецевих цифрових технологій після завершення війни. Подальший розвиток цього сектору залежатиме від здатності держави та бізнесу впроваджувати міжнародні стандарти вимірювання та скорочення вуглецевого сліду, модернізувати ІТ-інфраструктуру та інтегрувати кліматичні критерії у стратегії цифрової трансформації.

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

3.1. Глобальні стратегії декарбонізації цифрової економіки

Світовий перехід до низьковуглецевої цифрової економіки відбувається на перетині двох масштабних трансформацій: глобальної цифровізації та декарбонізації, що визначають стратегічний напрям розвитку провідних держав і технологічних корпорацій. У відповідь на зростання енергоспоживання ІКТ-сектору, збільшення обсягів передавання даних, розширення хмарної інфраструктури та появу енергоємних технологій на кшталт штучного інтелекту формуються комплексні міжнародні підходи до зниження викидів CO₂. Ці глобальні стратегії поєднують регуляторні механізми, технологічні інновації та корпоративні клаузули сталості, що разом створюють нову парадигму сталого цифрового розвитку [70].

Одним із ключових міжнародних документів є Європейський зелений курс, який визначає цифровий сектор важливою частиною кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року. До цього пакету входять Digital Decade Policy Programme, Європейська зелена цифрова коаліція та екодизайн для цифрових продуктів, спрямований на зменшення енергоспоживання обладнання, продовження життєвого циклу пристроїв і збільшення частки переробки ІКТ-компонентів [38]. Ці ініціативи діють у тісному зв'язку з політиками енергоефективності, зокрема стандартами для дата-центрів, зобов'язанням щодо переходу на відновлювану енергію та впровадженням систем моніторингу викидів Scope 1–3 згідно з GHG Protocol [8].

Ключову роль у глобальній системі управління цифровими викидами відіграє Міжнародний союз електрозв'язку (ITU), який встановлює базові підходи до вимірювання та зменшення вуглецевого сліду телекомунікаційних

мереж, дата-центрів і хмарної інфраструктури. Стандарт ITU L.1470 визначає методологію оцінки викидів та цільові траєкторії скорочення CO₂ для провайдерів зв'язку та операторів цифрової інфраструктури, що робить його основою для глобальної гармонізації екологічної звітності [69]. Використання цього стандарту сприяє також запровадженню національних і корпоративних планів декарбонізації, які включають підвищення енергоефективності мереж, заміну обладнання, перехід на віртуалізацію та оптимізацію навантажень.

Важливим глобальним трендом є перехід цифрового сектору на ресурси з нульовими або мінімальними вуглецевими викидами. У цьому контексті провідні корпорації — Google, Microsoft, Amazon, Apple — впроваджують комплексні стратегії декарбонізації, що поєднують купівлю відновлюваної енергії (PPA), інвестиції у власні ВДЕ-проекти, розвиток систем накопичення енергії та оптимізацію розподілу навантажень у дата-центрах. Google одним із перших запровадив режим 24/7 безвуглецевого енергоживлення, що передбачає відповідність спожитої електроенергії фактичним показникам генерації ВДЕ в реальному часі [46]. Microsoft, у свою чергу, декларує досягнення негативного вуглецевого балансу до 2030 року, включаючи компенсацію всіх історичних викидів CO₂ з моменту заснування компанії [64]. Amazon інтегрує стратегії кліматичної нейтральності в масштабах глобальної логістики, хмарних сервісів AWS та дата-центрів, інвестуючи у системи охолодження з низьким PUE, модернізацію серверів і масштабні інфраструктурні рішення з відновлюваної енергетики [47; 48].

Міжнародні організації також відіграють визначальну роль у створенні рамкових умов для декарбонізації цифрової економіки. Міжнародне енергетичне агентство (IEA) веде системні дослідження щодо енергоспоживання дата-центрів, телекомунікаційних мереж і хмарних платформ, надаючи рекомендації з впровадження енергоефективних технологій та політик державного регулювання [36]. Організація економічного співробітництва та розвитку (OECD) розробляє

стандартизовані підходи до оцінювання цифрової трансформації та її впливу на екологічні показники, включаючи аналіз енергетичної інтенсивності ІКТ-сектору та рекомендації щодо формування цифрової політики сталого розвитку [63].

Окремим напрямом глобальних стратегій є скорочення викидів від виробництва цифрових пристроїв. На цьому етапі зосереджено увагу на енергоємних процесах виготовлення мікрочипів, серверного обладнання, смартфонів та комп'ютерів, які формують до 80% їхнього життєвого вуглецевого сліду [15; 33]. Вирішення цієї проблеми передбачає впровадження циркулярної економіки, екодизайну, збільшення частки вторинних матеріалів і створення глобальних систем переробки електронних відходів відповідно до Базельської конвенції [43].

Значний потенціал глобальних стратегій полягає у використанні цифрових технологій для декарбонізації інших секторів економіки, зокрема енергетики, транспорту, промисловості та міст. Застосування штучного інтелекту, цифрових двійників, IoT та smart grid дозволяє оптимізувати енергетичні потоки, прогнозувати навантаження, управляти генерацією ВДЕ та мінімізувати втрати в мережах [56; 70; 41]. За даними Global e-Sustainability Initiative, цифрові технології здатні скоротити глобальні викиди на 15–20% до 2030 року за рахунок їх інтеграції у традиційні галузі [41].

Таким чином, глобальні стратегії декарбонізації цифрової економіки формують багаторівневу систему, що включає міжнародні стандарти, національні політики, корпоративні ініціативи та технологічні інновації. Їхня ефективність залежить від здатності держав, корпорацій і технологічних секторів координувати свої дії, забезпечуючи поступовий перехід до цифрової економіки з мінімальним вуглецевим навантаженням. Для України ці стратегії мають особливе значення, оскільки створюють можливість інтегруватися у європейські та глобальні системи декарбонізації, модернізувати цифрову інфраструктуру та

забезпечити екологічно сталий розвиток цифрових технологій у процесі відбудови.

3.2. Інноваційні технології зменшення CO₂-викидів у цифровій економіці

Сучасний етап розвитку цифрової економіки характеризується стрімким зростанням енергоспоживання, пов'язаного з експоненційним збільшенням обсягів обробки даних, поширенням штучного інтелекту, масовою хмаризацією та розбудовою високошвидкісних мереж п'ятого покоління. На цьому тлі інноваційні технології стають ключовим інструментом зменшення вуглецевого сліду ІКТ-сектору, забезпечуючи перехід від енерго- та ресурсомістких рішень до ефективних, адаптивних і кліматично нейтральних цифрових систем. У провідних міжнародних корпорацій, держав та наукових інституцій формується нова технологічна парадигма, що поєднує електронну енергоефективність, циркулярність, віртуалізацію та інтелектуальне управління потоками даних.

У центрі інновацій для зменшення CO₂-викидів знаходиться модернізація дата-центрів, які щороку споживають до 2–3% світової електроенергії та генерують значні обсяги викидів на етапах будівництва, експлуатації та утилізації обладнання [18; 72]. Основним напрямом трансформації стала оптимізація енергоефективності через використання вдосконалених систем охолодження, зокрема рідинного, субмерсивного та гібридного охолодження, що дозволяють суттєво знизити показник PUE. Великі технологічні гравці інвестують у субмерсивне охолодження серверів, де обладнання повністю занурене у діелектричні рідини, що забезпечує стабільність температури та зменшує енергоспоживання систем кондиціонування. Microsoft успішно протестувала підводні модульні дата-центри, демонструючи потенціал розміщення обчислювальних потужностей у холодних водах з природним охолодженням та мінімізацією технічних збоїв [64].

Другим важливим стратегічним напрямом є повна або часткова декарбонізація енергоживлення цифрової інфраструктури за рахунок переходу до відновлюваних джерел енергії. Компанії Google, Amazon і Apple звітують про 100% відновлювану електроенергію для своїх дата-центрів і кампусів, водночас продовжуючи розбудову нових сонячних та вітрових станцій шляхом укладання довгострокових контрактів РРА [46; 47; 65]. Зростає роль систем локального виробництва енергії: мікромережі, розподілена генерація, енергетичні хаби та інтеграція накопичувачів дозволяють зменшувати пікові навантаження й оптимізувати баланс енергопостачання, особливо за умов зростання обчислювальних операцій штучного інтелекту [53]. Розвиток технологій зберігання енергії, включно з літій-залізо-фосфатними, твердотільними та високотемпературними батареями, створює основу для переходу до режимів 24/7 безвуглецевого енергоживлення, що вже активно впроваджується Google [46].

Окреме місце серед інновацій займає широке застосування інтелектуальних систем керування енергоспоживанням на основі штучного інтелекту. Алгоритми машинного навчання дозволяють прогнозувати навантаження на сервери, оптимізувати розподіл задач між обчислювальними вузлами, зменшувати частоту доступу до енергоємних модулів та автоматично регулювати системи охолодження відповідно до поточних умов. За даними ІЕА, застосування AI у керуванні дата-центрами може скоротити енергоспоживання на 10–20% без зниження продуктивності [36]. Також штучний інтелект використовується для оптимізації хмарних сервісів, адаптивного масштабування ресурсів та виявлення надлишкових даних, які не мають операційної цінності. Це особливо актуально з огляду на те, що до 60% корпоративних даних, за оцінками експертів, зберігається без активного використання, збільшуючи вуглецевий слід необґрунтованих хмарних сховищ [22].

Суттєву роль у зменшенні викидів відіграє віртуалізація і контейнеризація обчислювальних потужностей. Перехід до безсерверних архітектур,

використання Docker, Kubernetes та платформ для оптимізації робочих навантажень дозволяє підвищити ефективність роботи обладнання та зменшити кількість фізичних серверів. За оцінками Global e-Sustainability Initiative, завдяки віртуалізації підприємства можуть скоротити енергоспоживання ЦОДів на 40–70%, залежно від масштабів інфраструктури [41]. Хмаризація процесів також дає змогу переходити на моделі колективного використання, де одна інфраструктура обслуговує тисячі клієнтів, забезпечуючи оптимальні режими роботи та мінімізуючи надлишкові потужності.

Окремим технологічним блоком є інновації у виробництві цифрових пристроїв, оскільки 70–80% їхнього життєвого вуглецевого сліду припадає на стадію виготовлення чипів, матеріалів та компонентів [15; 33]. У відповідь на це компанії Samsung, TSMC та Intel впроваджують енергоефективні технології травлення, фотолітографії та очищення, зменшуючи використання фторвмісних газів, що мають значно вищий потенціал глобального потепління, ніж CO₂. Розширюється застосування вторинних матеріалів: алюмінію, пластику, рідкоземельних елементів, що дозволяє не лише зменшити викиди, але й подолати ресурсні обмеження. Реалізація принципів екодизайну, ремонтпридатності та модульності сприяє продовженню життєвого циклу техніки, зменшенню попиту на нові пристрої та розвитку світового ринку відновленої електроніки.

Циркулярна економіка у цифровому секторі доповнюється революційними інноваціями в управлінні електронними відходами. Глобальні дослідження показують, що темпи зростання e-waste у п'ять разів перевищують темпи збільшення їх переробки, що створює не лише екологічні ризики, а й величезні втрати ресурсів [34]. Міжнародні програми, що ґрунтуються на Базельській конвенції, стимулюють розвиток безпечних каналів збору, автоматизованих ліній сортування, роботизованих систем вилучення рідкоземельних металів та хімічно-нейтральних методів утилізації [43]. Нові технології переробки, включно з

біолужним вилуговуванням та плазмовою переробкою, дозволяють ідновлювати дорогоцінні та стратегічні метали, зменшуючи потребу у первинному видобутку та відповідні викиди.

Важливим напрямом інноваційного розвитку є енергоефективність мережевої інфраструктури. Упровадження мереж 5G забезпечує не лише зростання швидкості передачі даних, але й суттєве підвищення енергоефективності на один переданий біт інформації. Завдяки мікросегментації, beamforming та edge computing енергоспоживання на одиницю даних може зменшуватися у 10 разів порівняно з мережами 4G [69]. Розвиток edge computing також дозволяє зменшувати глобальні обсяги трафіку, знижувати потребу у великих ЦОДах та оптимізувати час відгуку систем штучного інтелекту [54]. Прогрес у мікромережах, інтелектуальних енергетичних системах і цифрових двійниках дозволяє створювати адаптивну, самокеровану цифрову інфраструктуру, що мінімізує вуглецевий слід у режимі реального часу [56].

Важливою технологічною групою інновацій є оптимізація хмарної інфраструктури. Існують спеціалізовані інструменти, такі як Google Cloud Carbon Footprint Tool, AWS Carbon Footprint Dashboard та Microsoft Emissions Impact Dashboard, які дають змогу клієнтам контролювати та зменшувати власні викиди, пов'язані з використанням хмарних сервісів [68; 64; 47]. Аналітичні платформи дозволяють виявляти енергетично неефективні сервіси, візуалізувати вуглецевий слід обчислювальних операцій, автоматизувати політики видалення невикористаних ресурсів і прогнозувати вплив обчислювальних навантажень на енергоспоживання.

Ще одним перспективним напрямом є повторне використання відпрацьованого тепла дата-центрів. Низка країн ЄС, включно з Данією та Нідерландами, впроваджують системи, які дозволяють подавати надлишкове тепло від серверів у центральні тепломережі, забезпечуючи опалення житлових кварталів та промислових об'єктів. Одним із прикладів є проєкт Microsoft, що

забезпечує опаленням до 6 000 датських домогосподарств за рахунок утилізації тепла з дата-центру [39]. Така інфраструктура не лише знижує прямі викиди CO₂, але й створює синергію між цифровими й енергетичними системами.

Значного поширення набувають інновації у відеострімінгу та соціальних мережах — двох найбільших сегментах інтернет-трафіку. Дослідження свідчать, що оптимізація алгоритмів кодування, впровадження форматів високої компресії та адаптивна передача потоків можуть знизити енергоспоживання стрімінгових платформ на 20–30% [30; 32]. Платформи на кшталт Netflix інвестують у більш ефективні CDN-мережі, а соціальні медіа оптимізують роботу алгоритмів рекомендацій, які є одним із найбільш енергоємних компонентів цифрової екосистеми [50; 29].

Таким чином, інноваційні технології зменшення CO₂-викидів у цифровій економіці охоплюють увесь життєвий цикл цифрових продуктів — від виробництва обладнання та експлуатації дата-центрів до оптимізації глобального трафіку й управління електронними відходами. Їх реалізація створює основу для формування низьковуглецевої цифрової інфраструктури, що здатна підтримувати зростання обчислювальних потужностей без пропорційного збільшення енергоспоживання. Інновації радикально змінюють підходи до організації цифрового сектору, сприяючи досягненню глобальних кліматичних цілей та підвищуючи енергоефективність технологічних систем у всьому світі.

3.3. Пропозиції щодо зменшення вуглецевого сліду цифрової економіки України

Трансформація цифрової економіки України в умовах масштабних викликів воєнного часу та швидкої інтеграції до європейського економічного простору вимагає системної, науково обґрунтованої та стратегічно орієнтованої політики зменшення вуглецевого сліду. В умовах зростання обсягу цифрових

послуг, активної хмаризації, розвитку телекомунікаційних мереж, функціонування дата-центрів та збільшення попиту на обчислювальні ресурси формується необхідність комплексної модернізації цифрової інфраструктури відповідно до глобальних екологічних стандартів і європейських кліматичних цілей. З огляду на структурні слабкості енергетичного сектору, високий рівень вуглецевої інтенсивності електрогенерації, постійні ризики для енергосистеми через військові атаки, а також обмежені можливості переробки електронних відходів, Україна має розробити комплекс дій, які дозволять мінімізувати екологічний вплив цифрової трансформації.

Одним із ключових напрямів є адаптація української цифрової політики до європейських екологічних стандартів, включаючи інтеграцію до Європейської зеленої цифрової коаліції, яка передбачає скорочення викидів цифрових компаній, впровадження енергоефективності та розвиток циркулярної економіки в ІКТ-секторі [38]. Це вимагає гармонізації методології оцінювання вуглецевого сліду із міжнародними стандартами, зокрема ITU L.1470 [69], GHG Protocol [8], європейською таксономією сталих інвестицій та національними стратегічними документами у сфері енергетики та цифровізації. Важливо, щоб українські компанії та державні установи здійснювали регулярний аудит цифрової інфраструктури за показниками Score 1–3, включно з непрямими викидами, які є найбільш складними для вимірювання, але становлять основну частку вуглецевого сліду цифрових продуктів та сервісів.

Другим критично важливим завданням є декарбонізація енергоживлення цифрового сектору. З огляду на високу енергетичну залежність дата-центрів, телекомунікаційних мереж та інфраструктури хмарних платформ, українські цифрові компанії мають переходити до використання відновлюваної енергії у формі прямих договорів РРА, інвестування у власні сонячні та вітрові станції та інтеграцію розподіленої генерації. Європейський досвід свідчить, що дата-центри Microsoft і Amazon у Данії, Швеції та Нідерландах уже працюють на 100%

ВДЕ, а надлишкове тепло використовується для централізованого теплопостачання [39]. Україна, яка прагне до відновлення енергетичної інфраструктури на нових принципах, може включити декарбонізоване енергоживлення цифрових об'єктів до стратегічних пріоритетів відбудови. У перспективі це дозволить не лише зменшити викиди, але й підвищити енергетичну автономність підприємств та зменшити вразливість цифрової інфраструктури до зовнішніх загроз.

Важливою складовою є модернізація українських дата-центрів відповідно до найкращих глобальних практик. Значна частина існуючих центрів обробки даних спроектована без урахування сучасних вимог енергоефективності, що призводить до завищеного PUE. Рекомендовано впроваджувати рідинні та гібридні системи охолодження, інтелектуальне керування температурними режимами, а також здійснювати модернізацію серверного обладнання. В Україні актуальною може стати модель регіональних модульних дата-центрів, що розгортаються у безпечних локаціях, працюють на ВДЕ й забезпечують низький рівень втрат при передачі даних. Додатковим потенціалом є створення центрів резервного копіювання, інтегрованих із європейськими хмарними платформами, що відповідають стандартам кібербезпеки та енергоефективності.

Ще одним важливим напрямом є стимулювання переходу бізнесу та державного сектору на хмарні рішення, які забезпечують більш ефективне використання ресурсів. Дослідження показують, що віртуалізація та контейнеризація дозволяють скоротити енергоспоживання інфраструктури на 40–70% [41]. Хмарні сервіси міжнародних провайдерів пропонують інструменти моніторингу вуглецевого сліду, такі як Google Cloud Carbon Footprint Tool, Microsoft Emissions Impact Dashboard та AWS Carbon Footprint Dashboard [68; 64; 47]. Розширення використання цих інструментів в Україні дозволить створити прозору систему обліку викидів та оптимізації цифрових робочих навантажень. Державні органи мають запровадити вимогу екологічної звітності для хмарних

сервісів, які використовуються в публічному секторі, а також формувати стимули для переходу місцевих дата-центрів на більш ефективні архітектури.

Окремим викликом для України є стрімке зростання електронних відходів в умовах широкої цифровізації. За даними UNITAR, глобальне утворення e-waste зростає у п'ять разів швидше за потужності переробки [34], і Україна є частиною цієї проблеми. Недостатній рівень збору, відсутність інфраструктури для відновлення компонентів, низька обізнаність населення та слабкі механізми контролю транскордонного переміщення електронних відходів створюють додаткове навантаження на довкілля. Пропонується адаптувати національне законодавство до вимог Базельської конвенції, створити мережу інноваційних центрів переробки, а також запровадити розширену відповідальність виробників. Стимулювання переробного сектору дозволить не лише зменшити викиди, але й створити додану вартість за рахунок повернення у виробничий цикл рідкоземельних металів, які є критично важливими для цифрової індустрії.

Перспективним напрямом є розвиток енергоефективних телекомунікаційних мереж. Впровадження 5G сприятиме зниженню енергії на одиницю переданих даних, хоча загальне споживання мережі зростатиме через підвищення кількості пристроїв і трафіку [69]. Тому для України важливо поєднати розвиток мереж нового покоління з оптимізацією їх енергоефективності, впровадженням edge computing для зменшення навантаження на центральні дата-центри, а також розвитком мікросегментації мереж, що дозволить економити енергію шляхом таргетованого керування трафіком. Національна стратегія цифрової інфраструктури має передбачати обов'язкове застосування еко-індикаторів під час будівництва нових мереж.

Україна має суттєвий потенціал для впровадження інновацій у сфері повторного використання тепла дата-центрів. Особливо це актуально у великих містах, де поєднання цифрової та теплової інфраструктури може створити синергію, подібну до проєктів у Данії, які забезпечують теплом тисячі

домогосподарств [39]. У процесі повоєнної відбудови тепломереж доцільно інтегрувати можливість підключення дата-центрів як джерел низькотемпературного тепла, що дозволить одночасно знизити викиди й підвищити енергофункціональність міської інфраструктури.

Також важливо розвивати цифрові інструменти підтримки декарбонізації у ключових галузях економіки — енергетиці, транспорті, виробництві, логістиці. Впровадження цифрових двійників, IoT, систем керування енергоспоживанням, автоматизованого моніторингу та прогнозування дозволить забезпечити скорочення викидів у секторах, які є найбільшими джерелами CO₂ в Україні [17; 56]. Використання штучного інтелекту для прогнозування пікових навантажень, оптимізації роботи теплових електростанцій та балансування ВДЕ є одним із ключових напрямів модернізації енергетичної системи.

З огляду на масштабну повоєнну відбудову, Україна має унікальний шанс сформувати цифрову економіку нового покоління — кліматично стійку, енергоефективну та інноваційну. Для цього держава має стимулювати інвестиції у зелені цифрові технології, забезпечити екологічні критерії у державних закупівлях, підтримувати наукові дослідження у сфері low-carbon digital infrastructure та створювати можливості для співпраці між бізнесом, університетами та міжнародними партнерами. У перспективі Україна може інтегруватися до європейського ринку кліматично нейтральних цифрових послуг, що стане важливим чинником економічного зростання, конкурентоспроможності та досягнення кліматичних цілей.

Таким чином, зменшення вуглецевого сліду цифрової економіки України вимагає системного, багаторівневого підходу, який охоплює декарбонізацію енергетики, модернізацію цифрової інфраструктури, розвиток циркулярної економіки, цифровізацію енергетичного менеджменту та інтеграцію у глобальні екологічні ініціативи. Реалізація цих пропозицій створить умови для сталого

цифрового розвитку та сприятиме формуванню конкурентної, кліматично орієнтованої української економіки.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило комплексно проаналізувати глобальні виміри вуглецевого сліду цифрової економіки, виявити ключові екологічні виклики, пов'язані зі стрімкою цифровізацією, і визначити стратегічні напрями скорочення викидів парникових газів у цьому секторі. У роботі обґрунтовано, що цифрова економіка, попри свій потенціал як драйвера інновацій та економічного розвитку, формує значне антропогенне навантаження на довкілля, насамперед через зростання енергоспоживання дата-центрів, мережевої інфраструктури, штучного інтелекту, хмарних сервісів і виробництва електронних пристроїв. Технологічна революція, яка трансформує всі сфери суспільного життя, супроводжується суттєвим збільшенням викидів CO₂, що потребує перегляду підходів до управління цифровою інфраструктурою на глобальному, національному та корпоративному рівнях.

У першому розділі дослідження поглиблено теоретичне розуміння цифрової економіки та її екологічних параметрів. Доведено, що сучасна цифровізація базується на високій енергоємності обчислювальних процесів, складності виробничих ланцюгів мікроелектроніки та швидкому зростанні обсягів трафіку. Встановлено, що вуглецевий слід цифрової економіки формується не лише під час споживання електроенергії, але й на всіх етапах життєвого циклу електронних пристроїв — від видобутку ресурсів до утилізації. Узагальнення підходів до вимірювання вуглецевого сліду засвідчило, що міжнародні стандарти, зокрема GHG Protocol та ITU L.1470, забезпечують методологічні рамки для точного обліку викидів у сфері ІКТ та створюють основу для глобальної гармонізації екологічної звітності. У роботі визначено, що цифрова економіка одночасно є частиною проблеми і частиною вирішення, оскільки здатна зменшувати викиди в інших секторах економіки завдяки

автоматизації, оптимізації енергоспоживання та розвитку інтелектуальних технологій.

У другому розділі на основі глобальних статистичних даних і порівняльного аналізу провідних технологічних корпорацій виявлено ключові тенденції світового зростання викидів CO₂, пов'язаних із цифровою діяльністю. Показано, що дата-центри, телекомунікаційні мережі та хмарні платформи є одними з найбільш швидкозростаючих джерел електроспоживання у світі, а розвиток штучного інтелекту, відеострімінгу та блокчейну суттєво прискорює цей тренд. Попри це, великі цифрові компанії, такі як Google, Microsoft, Amazon і Meta, демонструють ефективні інструменти звітності та декарбонізації, включно з переходом на 100% ВДЕ, будівництвом енергоефективних дата-центрів, оптимізацією алгоритмів і розвитком власних кліматичних ініціатив. Аналіз становища України засвідчив, що країна поступово інтегрується у глобальні процеси цифровізації, але стикається з низкою екологічних проблем: високою вуглецевою інтенсивністю енергетичного сектору, недостатнім рівнем розвитку мереж переробки електронних відходів, технічно застарілою цифровою інфраструктурою та нерівномірністю регіонального розвитку цифрових сервісів.

У третьому розділі сформовано комплекс практичних рекомендацій, спрямованих на зниження вуглецевого сліду цифрової економіки. Доведено, що інноваційні технології — рідинне охолодження дата-центрів, субмерсивні технології, edge computing, віртуалізація, циркулярна економіка, енергоефективні мікромережі, повторне використання тепла серверів, застосування штучного інтелекту для управління енергоспоживанням — є ключовими інструментами декарбонізації ІКТ-сектору. Розроблені пропозиції для України включають гармонізацію національних стандартів із європейськими екологічними вимогами, інтеграцію до міжнародних ініціатив, прискорення декарбонізації енергоживлення цифрової інфраструктури, створення мережі сучасних дата-центрів на ВДЕ, розвиток систем переробки електронних відходів,

стимулювання переходу бізнесу на хмарні рішення та цифровізацію енергетичного менеджменту в ключових секторах економіки. Особливий наголос зроблено на тому, що повоєнна відбудова України відкриває унікальну можливість створити цифрову інфраструктуру нового покоління, яка відповідає принципам енергоефективності, кліматичної нейтральності та стійкості.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що зменшення вуглецевого сліду цифрової економіки є стратегічною необхідністю як для світу загалом, так і для України зокрема. Цей процес вимагає системної координації державної політики, інституційної спроможності, інвестицій у цифрову інфраструктуру та впровадження інновацій. Глобальні тенденції свідчать, що цифровий сектор може стати рушієм декарбонізації, за умови, що його розвиток буде поєднаний із суворими екологічними стандартами, технологічними інноваціями та відповідальним управлінням життєвим циклом цифрових продуктів. Для України це відкриває перспективи підвищення конкурентоспроможності, інтеграції до європейського ринку сталих цифрових послуг і формування модерної екологічно нейтральної цифрової економіки, здатної підтримувати довгостроковий розвиток держави.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tapscott, B. D., Babu, R., & Tapscott, D. (2003). The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264701913>
2. Statistics Canada. URL: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/230725/dq230725a-eng.html>
3. IEA (2017), Digitalisation and Energy, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>, Licence: CC BY 4.0
4. UNCTAD. URL: <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2024>
5. Freitag, Charlotte; Berners-Lee, Mike (December 2020). "The climate impact of ICT: A review of estimates, trends and regulations". arXiv:2102.02622 [physics.soc-ph].
6. Carolyn C. Pertsova. (2007). Ecological Economics Research Trends. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=GCKU1p_6HNwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=carbon+footprint+definitions&ots=D2BYJLcfQs&sig=B1JHxAVAJaXSC3yBsU-FTIOO_WQ&redir_esc=y#v=onepage&q=carbon%20footprint%20definitions&f=false
7. Hauschild, M.Z. (2018). Introduction to LCA Methodology. In: Hauschild, M., Rosenbaum, R., Olsen, S. (eds) Life Cycle Assessment. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_6
8. GHG Protocol. URL: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
9. IEA. URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>
10. World Bank Group. URL: <https://documents.worldbank.org/pt/publication/documents-reports/documentdetail/099121223165540890/p17859702a98880540a4b70d57876048abb>
11. Time. URL: <https://time.com/7012753/sasha-luccioni/>
12. UN trade & development. URL: <https://unctad.org/publication/digital->

economy-report-2024?form=MG0AV3

13. Davies, Pascale (26 February 2022). "Bitcoin mining is worse for the environment now since China banned it"

14. Cisco. URL: Cisco (2020). Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2019–2024

15. "The computer chip industry has a dirty climate secret". the Guardian. 18 September 2021. Retrieved 18 September 2021

16. El Pais. URL: <https://elpais.com/tecnologia/2024-08-20/fabricar-un-ordenador-comun-requiere-casi-una-tonelada-de-materias-y-la-criptomonedatanta-energia-como-argentina.html>

17. Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser (2020) - "Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector" Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/emissions-by-sector' [Online Resource].

18. Malmödin, Jens & Lovehagen, Nina & Bergmark, Pernilla & Lundén, Dag. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome. Telecommunications Policy. 48. 102701. 10.1016/j.telpol.2023.102701.

19. Device42. URL: <https://www.device42.com/data-center-infrastructure-management-guide/data-center-carbon-footprint/>

20. Andrae, A.S.G.; Edler, T. On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. Challenges 2015, 6, 117-157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>

21. Analysys Mason. URL: https://www.analysysmason.com/contentassets/49e695a83e694d4486fb0c686d166312/analysys_mason_business_cloud_migration_aug2020_ren03.pdf

22. CloudZero. URL: <https://www.cloudzero.com/blog/cloud-computing-market-size/>

23. Digiconomist. URL: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

24. World Bank Data. URL:
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>
25. Global Carbon Budget 2023. URL:
<https://globalcarbonbudget.org/carbonbudget2023/>
26. de Vries, A., Gellersdörfer, U., Klaaßen, L., & Stoll, C. (2022). Revisiting Bitcoin's carbon footprint. *Joule*, 6(3), 498–502. URL:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.005>
27. University of Cambridge Judge Business School. URL:
<https://www.jbs.cam.ac.uk/2022/a-deep-dive-into-bitcoins-environmental-impact/>
28. Kohli, V., Chakravarty, S., Chamola, V., Sangwan, K. S., & Zeadally, S. (2023). An analysis of energy consumption and carbon footprints of cryptocurrencies and possible solutions. *Digital Communications and Networks*, 9(1), 79–89. URL:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.06.017>.
29. Batmunkh, Altanshagai. (2022). Carbon Footprint of The Most Popular Social Media Platforms. *Sustainability*. 14. 2195. 10.3390/su14042195.
30. Moulhierac, J., Urvoy-Keller, G., Dinuzzi, M., & Ma, Z. (2023). What is the carbon footprint of one hour of video streaming? [Techreport]. Université Côte d'Azur. URL: <https://hal.science/hal-04069500>
31. Batmunkh, Altanshagai. (2022). Carbon Footprint of The Most Popular Social Media Platforms. *Sustainability*. 14. 2195. 10.3390/su14042195.
32. The Carbon Trust. URL: <https://www.carbontrust.com/en-eu/our-work-and-impact/guides-reports-and-tools/carbon-impact-of-video-streaming>
33. Statista. URL: <https://www.statista.com/chart/32690/estimated-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-electronic-devices/>
34. UNITAR. URL: <https://unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling>
35. The Roundup. URL: <https://theroundup.org/global-e-waste-statistics/#References>

36. IEA. URL: <https://www.iea.org/news/power-system-digitalisation-is-crucial-for-clean-energy-transitions-and-security-in-developing-markets-but-investment-is-lagging>
37. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>
38. European Comission. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-green-digital-coalition>
39. Ministry of Foreign Affairs of Denmark. URL: <https://investindk.com/cases/microsoft-data-centre-set-to-provide-surplus-heating-for-6-000-danish-homes>
40. World Economic Forum. URL: <https://initiatives.weforum.org/net-zero-carbon-cities/home>
41. Global e-Sustainability Initiative. URL: <https://smarter2030.gesi.org/>
42. IEA. URL: <https://www.iea.org/>
43. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal. URL: <https://www.basel.int/>
44. Préfet de la Région Normandie. URL: <https://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/la-transition-ecologique-s-accelere-avec-le-fonds-a5608.html?lang=fr>
45. Fujitsu launches AI computing broker middleware to address global GPU shortages and enhance AI processing efficiency. Fijitsu. URL: <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2024/1022-01.html>
46. Google Sustainability. URL: <https://sustainability.google/progress/energy/>
47. Amazon Sustainability. URL: <https://sustainability.aboutamazon.com/climate-solutions/carbon-free-energy>
48. Amazon Sustainability. URL: <https://sustainability.aboutamazon.com/2023-amazon-sustainability-report.pdf>
49. Netflix. URL: https://s22.q4cdn.com/959853165/files/doc_downloads/2024/6/2023-Netflix-Environmental-Social-Governance-Report.pdf

50. Netflix. URL: <https://about.netflix.com/en/sustainability>
51. Brough, D., & Jouhara, H. (2020). The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1–2, 100007. URL: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007>
52. EPA. URL: <https://www.epa.gov/recycle/recycling-basics-and-benefits>
53. Saeed, Muhammad & Fangzong, Wang & Kalwar, Basheer & Iqbal, Sajid. (2021). A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2021.3135083.
54. Cao, K., Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. (2020). An Overview on Edge Computing Research. *IEEE Access*, 8, 85714–85728. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991734>
55. Florian, Geier. (2015). The differences between SSD and HDD technology regarding forensic investigations.
56. Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817-820. URL: <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>
57. United Nations Development Programme. URL: <https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals/affordable-and-clean-energy>
58. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2021/Oct/Renewable-Energy-Jobs-Reach-12-Million-Globally>
59. International Chamber of Commerce. URL: <https://iccwbo.org/wp-content/uploads/sites/3/2023/04/2023-ICC-Trade-report.pdf>
60. Затишняк В. В. Інституціоналізація та регулювання національної економіки в контексті інвестиційної та промислової політик. *Економічний вісник Донбасу. Макроекономіка, економічна теорія та історія*. 2022. № 3 (69). С. 4–14. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-3\(69\)-4-14](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-3(69)-4-14)

61. Малишева Н. Р., Вінник О. М. Екологія, економіка, цифровізація: правові проблеми взаємодії. Вісник Національної академії правових наук України. 2022. Т. 29. №2. С. 238–260.
62. European Commission (2023). The Digital Economy and Society Index (DESI). URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>
63. OECD (2023). Measuring the Digital Transformation. URL: <https://www.oecd.org/digital/measuring-digital-transformation/>
64. Microsoft Sustainability Report 2024. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/sustainability/emissions-impact-dashboard>
65. Apple Environmental Progress Report 2023. URL: https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Progress_Report_2023.pdf
66. GSMA (2023). The Mobile Economy 2023. URL: <https://www.gsma.com/mobileeconomy/>
67. ITU (2022). Measuring Digital Development: Facts and Figures. URL: https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2022/
68. Google Cloud Carbon Footprint Tool Documentation (2024). URL: <https://cloud.google.com/carbon-footprint/docs>
69. International Telecommunication Union (ITU). Greenhouse Gas Emissions Standard L.1470 (2020). URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1470/en>
70. World Economic Forum (2023). Digitalisation: A Green Transformation Opportunity. URL: <https://www.weforum.org/reports/>
71. Sovacool, B. K. (2021). "When Zombies Win: Digitalization and Environmental Rebound Effects." Energy Research & Social Science. URL: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102046>
72. Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). The environmental footprint of data centers and ICT: A global projection. Journal of Cleaner Production, 172, 1375–1388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.217>

73. Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., et al. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba3758>

ДОДАТКИ

Результати кореляційно-регресійного аналізу

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,972957774
R Square	0,946646831
Adjusted R Square	0,944327128
Standard Error	0,979745259
Observations	25

<i>ANOVA</i>					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	391,7255863	391,7255863	408,089667	3,88715E-16
Residual	23	22,07771775	0,959900772		
Total	24	413,803304			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	20,4712	0,6304904	32,4687	1,02101	19,1669	21,7755	19,1669	21,7755
ept	4892	54	6904	E-20	8005	178	8005	178
	0,18093	0,0089564	20,2012	3,88715	0,16240	0,19945	0,16240	0,19945
GNP	1039	37	2934	E-16	3237	8841	3237	8841