

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-85-77>

УДК 330.341.1:004.75:502.131.1

## ЕКОНОМІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ БЛОКЧЕЙНУ У ПРОТИДІЇ ЗМІНАМ КЛІМАТУ

## ECONOMIC POTENTIAL OF BLOCKCHAIN IN COMBATING CLIMATE CHANGE

**Садовий Роман Ярославович**

аспірант,

Національний лісотехнічний університет України

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7138-1420>**Sadovyi Roman**

Ukrainian National Forestry University

У статті досліджено економічний потенціал блокчейн-технологій як інструменту протидії глобальним змінам клімату. Проаналізовано реальний екологічний вплив криптовалют, зокрема порівняно енергоспоживання мереж Bitcoin та Ethereum після переходу на Proof-of-Stake. Розглянуто механізми токенизації вуглецевих кредитів, роль децентралізованих фінансів (DeFi) та децентралізованих автономних організацій (DAO) у кліматичному фінансуванні. Висвітлено практичні кейси застосування блокчейну в секторі відновлюваної енергетики та ризику грінвошингу. Окремо проаналізовано внесок вітчизняних науковців у дослідження впливу блокчейну на екологічну стійкість та формування «зеленої» цифрової економіки в Україні. Визначено перспективи інтеграції штучного інтелекту та Web3-технологій у кліматичні ініціативи до 2030 року.

**Ключові слова:** блокчейн, зміна клімату, токенизація вуглецевих кредитів, Proof-of-Stake, децентралізовані фінанси, регенеративні фінанси, ESG, смарт-контракти, кліматичне фінансування, «зелена» економіка.

This article examines the economic potential of blockchain technology as a tool for combating global climate change. The study is motivated by the growing contradiction between the high energy consumption of cryptocurrency networks and the need for transparent, efficient climate-finance instruments. The research methodology combines systematic literature review, comparative analysis of consensus mechanisms, and case-study evaluation of real-world blockchain-based climate projects. Data from the Cambridge Centre for Alternative Finance, the Crypto Carbon Ratings Institute, Bloomberg Intelligence, and MarketsandMarkets are used to quantify energy consumption, carbon footprints, and market projections. The key findings demonstrate that while Bitcoin's Proof-of-Work mechanism consumes approximately 211 TWh per year (around 0.83 % of global electricity), Ethereum's transition to Proof-of-Stake has reduced its energy use by over 99.99 %, to just 0.0026 TWh annually. The tokenized carbon-credit market is projected to grow from USD 414.8 billion in 2023 to USD 1.6 trillion by 2028, creating substantial new economic opportunities. Decentralized Autonomous Organizations such as KlimaDAO and protocols like Toucan have processed over 20 million tonnes of CO<sub>2</sub> credits on-chain. Practical applications include peer-to-peer renewable energy trading platforms (Powerledger), green-energy certificates (Energy Web Foundation), and solar-panel tokenization projects. The article also analyses contributions by Ukrainian researchers to the study of blockchain's environmental impact and green digital economy formation. Risks including greenwashing, credit-quality concerns, and regulatory uncertainty under the EU's MiCA framework are critically evaluated. The practical value lies in providing economic actors and policymakers with a structured assessment of blockchain's climate-action potential and recommendations for integrating Web3 and artificial intelligence into climate initiatives by 2030.

**Key words:** blockchain, climate change, carbon credit tokenization, Proof-of-Stake, decentralized finance, regenerative finance, ESG, smart contracts, climate financing, green economy.

**Постановка проблеми.** Згідно зі звітами Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC), для утримання глобального потепління на рівні 1,5 °C необхідно скоротити антропогенні викиди парникових газів щонайменше на 50 % до 2030 року та досягти нетто-

нульових викидів до 2050 року. Водночас традиційні механізми кліматичного фінансування (державні субсидії, вуглецеві податки, ринки дозволів на викиди) зазнають критики через непрозорість, високі транзакційні витрати та схильність до маніпулювання. У цьому кон-



тексті технологія розподіленого реєстру (блокчейн) пропонує принципово нову інфраструктуру для створення прозорих, верифікованих і автоматизованих кліматичних інструментів. Проте саме криптовалютна індустрія, побудована на блокчейні, водночас є об'єктом серйозної екологічної критики: мережа Bitcoin у 2025 році споживає приблизно 211,58 ТВт·год електроенергії на рік, що становить близько 0,83 % глобального електроспоживання і порівнянне з енергетичними потребами Таїланду або В'єтнаму [1]. Цей парадокс, коли технологія з потенціалом рятувати клімат водночас суттєво навантажує енергосистему, визначає актуальність поглибленого дослідження можливостей і обмежень застосування блокчейну у контексті кліматичної політики.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Проблематика екологічного впливу блокчейн-технологій активно досліджується у світовій науковій літературі. Кембриджський центр альтернативних фінансів (CCAF) регулярно оновлює індекс споживання електроенергії Bitcoin (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index), фіксуючи у 2025 році рівень 211,58 ТВт·год/рік, з яких 52,4 % припадає на сталі джерела (42,6 % відновлювана енергія, 9,8 % атомна) [1]. Одним із перших проблему зростаючого енергоспоживання Bitcoin обґрунтував де Фрізе, оцінивши екологічні наслідки механізму Proof-of-Work [2]. Седлмайр та ін. провели системний аналіз енергоспоживання блокчейн-технологій, результати якого продемонстрували, що альтернативні консенсус-механізми потребують на кілька порядків менше енергії [3]. Кількісні оцінки впливу майнінгу Bitcoin на енергетичні та водні ресурси в контексті енергетичного переходу мітяться в роботі (2025) [4]. Економіко-екологічні наслідки переходу Ethereum на Proof-of-Stake, досліджені у роботі МакДоналд та ін. для Інституту вуглецевих рейтингів криптовалют (CCRI), яка підтвердила результативне зниження споживання енергії більш ніж на 99,988 % [5]. Системний підхід до ідентифікації ролі блокчейну в системах торгівлі викидами та проєктах вуглецевого офсету розвинено в праці [6]. Сіпторп та ін. проаналізували 39 організацій, що розробляють блокчейн-рішення для вуглецевих ринків, і дійшли висновку, що ці рішення досить обґрунтовані [7]. Проте П. Гаусон у своїй статті критично оцінив перспективи та ризики застосування блокчейну для кліматичних дій [8], а у роботі [9] на прикладі KlimaDAO критично досліджені токенизовані вуглецеві кредити.

Вагомий внесок у дослідження означеної проблематики здійснюють і вітчизняні науковці. Рябоконт І. О., Пузько С. Г. та Статешна О. В. дослідили можливості блокчейн-технологій для підвищення прозорості та ефективності торгівлі вуглецевими кредитами, проаналізувавши досвід ОАЕ та Китаю, та визначивши блокчейн як перспективний механізм подолання проблем обліку й розподілу вуглецевих квот, що виникли після Кіотського протоколу та Паризької угоди [10]. Роль криптовалют та блокчейну у фінансуванні «зелених» технологій обґрунтували О. Івасик, Д. Вільчинська та О. Горбовий, акцентуючи увагу на тому, що такі проєкти переслідують передусім екологічні, а не економічні цілі [11]. Гуцуляк А. проаналізував динаміку хешрейту Bitcoin (2017–2025), кількісно оцінив енергоспоживання мережі (150–175 ТВт·год у 2024 році) та обчислив, що одна транзакція Bitcoin потребує приблизно 911 кВт·год – еквівалент 613 тисяч операцій Visa [12]. Формування стратегії еколого-відповідального маркетингу в умовах цифрової економіки і роль блокчейну у забезпеченні довіри споживачів до «зелених» продуктів досліджена в роботі Чернишова О. та Постнікова О. [13], а Дмитришин Л. та Стасенко З. проаналізували фінтех як економічний механізм стимулювання малого та середнього підприємництва у сфері циркулярної та «зеленої» економіки [14]. Ці роботи формують наукове підґрунтя для подальшого дослідження економічного потенціалу блокчейну в кліматичній політиці.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Незважаючи на значний обсяг зарубіжних досліджень окремих аспектів блокчейну для кліматичних цілей (енергоспоживання, токенизація кредитів, P2P-торгівля енергією), у науковій літературі відсутній комплексний міждисциплінарний аналіз, який би одночасно охоплював технологічні, фінансові, регуляторні та поведінкові виміри проблеми. У вітчизняній економічній науці питання інтеграції блокчейн-технологій у кліматичну політику залишається практично не дослідженим.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є комплексний аналіз потенціалу блокчейн-технологій як інструменту протидії змінам клімату, що передбачає дослідження реального екологічного впливу консенсус-механізмів, токенизації вуглецевих кредитів, аналіз практичних кейсів та ідентифікацію ризиків і перспектив до 2030 року.

**Методологія дослідження.** Дослідження базується на поєднанні кількох методів. Систематичний огляд літератури проведено за базами Scopus, Web of Science та Google Scholar за ключовими словами «blockchain AND (climate change OR carbon credits OR renewable energy OR green finance)» за період 2018–2026 рр., що дозволило ідентифікувати понад 120 релевантних публікацій, з яких відібрано 20 джерел для поглибленого аналізу. Порівняльний аналіз консенсус-механізмів здійснено на основі кількісних даних Кембриджського центру альтернативних фінансів, Інституту вуглецевих рейтингів криптовалют (CCRI) та рецензованих публікацій у Joule, Business & Information Systems Engineering та Scientific Reports. Для оцінки ринкового потенціалу використано прогнозні звіти MarketsandMarkets та Bloomberg Intelligence. Метод кейс-стаді застосовано для аналізу практичних блокчейн-проектів у сфері відновлюваної енергетики та токенизації вуглецевих кредитів. Критичний аналіз ризиків ґрунтується на зіставленні оптимістичних прогнозів індустрії з незалежними оцінками якості токенизованих кредитів та з аналізом регуляторних документів (MiCA, SEC).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Найпоширенішим міфом є отождоження екологічного впливу всієї блокчейн-індустрії з енергоспоживанням Bitcoin. Насправді ж проблема стосується переважно одного консенсус-механізму – Proof-of-Work (PoW), що вимагає виконання складних обчислювальних задач для валідації тран-

закцій. Як зазначають Седлмайр та ін., PoW-блокчейни «становлять лише невелику підмножину блокчейн-рішень, тоді як більшість нових мереж використовують значно ефективніші підходи» [3, с. 602]. Bitcoin у 2025 році споживав приблизно 211 ТВт·год/рік, а його вуглецевий слід у 2022 році становив 0,33 % глобальних викидів CO<sub>2</sub> з прогнозом зростання до 0,7 % до 2027 року [12]. Радулеску та ін. у Scientific Reports (2025) додатково підтвердили, що майнінг Bitcoin чинить значний тиск не лише на енергосистему, а й на водні ресурси, оскільки охолодження обладнання потребує суттєвих обсягів води [4]. Однак згідно з даними Cambridge, 52,4 % енергії майнінгу Bitcoin надходить зі сталих джерел, включаючи 42,6 % відновлюваної та 9,8 % атомної енергії, а прогнози свідчать про можливе досягнення частки відновлюваних джерел у 70 % до 2030 року [1].

Водночас мережі на основі Proof-of-Stake (PoS) демонструють кардинально інший рівень споживання. Ethereum споживає лише 0,0026 ТВт·год/рік – майже у 80 000 разів менше за Bitcoin, що еквівалентно енергоспоживанню 200–250 домогосподарств США [5]. Порівняльний аналіз показників наведено у таблиці 1. «Зелені» криптовалюти – Algorand (вуглецево-негативний з 2021 р.), Cardano, Chia (Proof-of-Space-and-Time), Hedera Hashgraph (hashgraph-консенсус), Solana, Tezos, Celo – сукупно сформували ринковий сегмент із капіталізацією понад 2 млрд дол. США у 2023 році, що свідчить про економічну доцільність енергоефективних підходів [15].

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика енергоспоживання та екологічного впливу блокчейн-мереж**

Параметр	Bitcoin (PoW)	Ethereum (PoS)	Solana (PoH+PoS)	Cardano (PoS)	Chia (PoST)
Річне споживання, ТВт·год	211,58	0,0026	0,0005	0,0006	0,024
Енергія на транзакцію, кВт·год	911	0,03	0,00051	0,5	0,023
Частка відновлюваної енергії, %	42,6	н/д (мінім.)	н/д (мінім.)	н/д (мінім.)	н/д (мінім.)
Консенсус-механізм	Proof-of-Work	Proof-of-Stake	PoH + PoS	Ouroboros PoS	Proof-of-Space-and-Time
Вуглецевий статус	Вуглецемний	Близький до нуля	Близький до нуля	Близький до нуля	Низький

Джерело: сформовано на основі [1; 3–5; 12; 15]

Перехід Ethereum на PoS є найбільш масштабним прикладом «позеленення» блокчейну. Оновлення The Merge (вересень 2022 р.) усунуло потребу в енергоємних обчисленнях, замінивши їх фінансовим стейкінгом. Подальше оновлення у 2025 р. зменшило вимоги до пропускної здатності валідаторів на приблизно 85 %, забезпечило зниження витрат Layer-2 рішень на 40–60 % та підвищило сукупну пропускну спроможність до понад 100 000 транзакцій/сек через rollups без шкоди децентралізації [15].

Альтернативні консенсус-механізми розширюють спектр енергоефективних рішень. Proof-of-History (PoH) у Solana забезпечує криптографічну часову мітку для кожної транзакції, дозволяючи валідаторам працювати паралельно без очікування синхронізації; Proof-of-Space-and-Time (PoST) у мережі Chia використовує вільний дисковий простір замість обчислювальної потужності; Directed Acyclic Graph (DAG) в IOTA та Hedera Hashgraph взагалі усуває послідовну структуру блоків, забезпечуючи масштабованість з мінімальним енергоспоживанням. Proof-of-Authority (PoA), застосований у Energy Web Chain, довіряє валідацію обмеженому колу верифікованих вузлів, що ідеально підходить для корпоративних кліматичних рішень [3; 15].

Смарт-контракти відкривають можливості автоматизації екологічних процесів: автоматичне списання вуглецевих кредитів при перевищенні лімітів викидів, прозорий розподіл коштів екологічних фондів за досягненням конкретних KPI, умовне фінансування лісовідновлення з верифікацією через супутникові дані та оракули. Блокчейн для відстеження вуглецевого сліду продукції вже впроваджується через концепцію цифрових продуктових паспортів (Digital Product Passports), що набуває особливого значення в світі розвитку регуляторних вимог ЄС [16].

Нову парадигму кліматичного фінансування створюють децентралізовані фінанси (DeFi) та регенеративні фінанси (ReFi). «Зелені» DeFi-проекти дозволяють формувати пули ліквідності, забезпечені токенованими вуглецевими кредитами, надавати «зелені» кредити під заставу екологічних активів та створювати децентралізовані ринки, де будь-який учасник може придбати чи продати верифіковані вуглецеві одиниці без посередників [6; 7]. Токенізація вуглецевих кредитів передбачає конвертацію сертифікатів з реєстрів Verra або Gold Standard у цифрові токени на блокчейні, що забезпечує фракційну

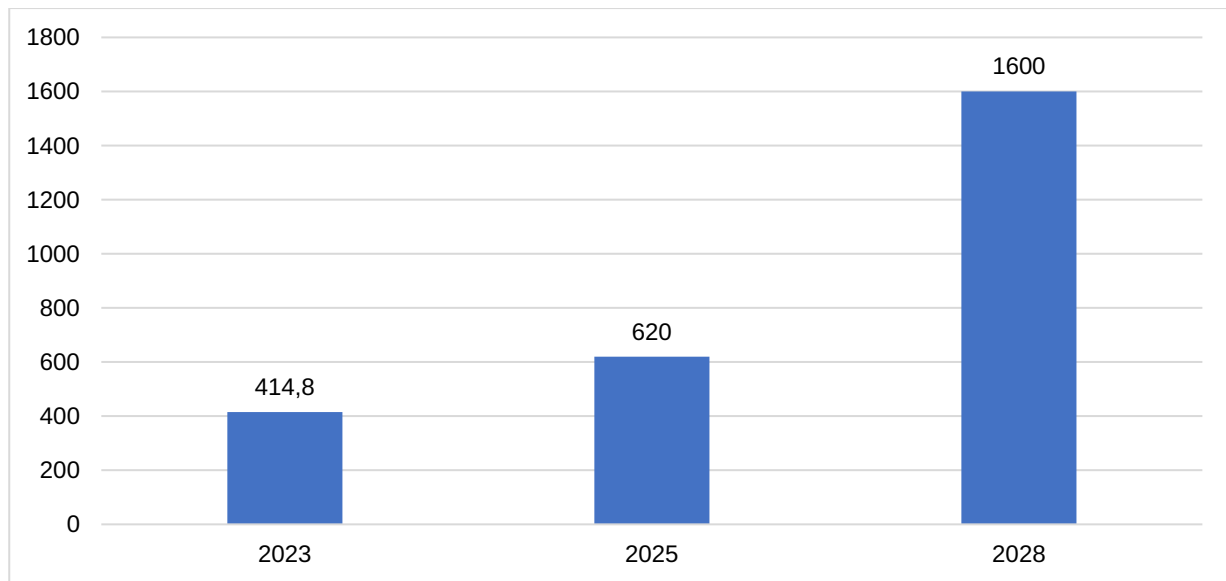
власність, миттєву верифікацію та глобальну доступність. Toucan Protocol обробив понад 20 млн тонн CO<sub>2</sub>-еквівалентних кредитів, створивши інфраструктуру для їхньої інтеграції у DeFi-протоколи [9]. KlimaDAO функціонує як децентралізована автономна організація, що систематично скуповує та «спалює» (вилучає з обігу) вуглецеві кредити, штучно створюючи дефіцит і стимулюючи зростання їхньої ціни, що теоретично збільшує вартість реальних скорочень викидів [9]. Прогнозний обсяг ринку токенованих вуглецевих кредитів наведено на рис. 1.

Роль DAO у кліматичному фінансуванні полягає у забезпеченні колективного прийняття рішень щодо розподілу ресурсів: власники governance-токенів голосують за фінансування конкретних проєктів лісовідновлення, відновлюваної енергетики чи збереження біорізноманіття. Це усуває «агентську проблему» традиційних фондів та забезпечує повну прозорість руху коштів.

У секторі відновлюваної енергетики виділяються кілька показових кейсів практичного застосування блокчейну. Пауерледжер (Powerledger) (Австралія) розробив платформу uGrid для peer-to-peer торгівлі надлишковою відновлюваною енергією між сусідами, інтегровану з мережею Solana, що забезпечує високу швидкість та низькі комісії транзакцій; проєкт діє в Австралії, Індії, Японії та Європі [18]. Фонд «Енергетична мережа» (Energy Web Foundation) створив спеціалізований блокчейн (Energy Web Chain) на основі PoA для управління сертифікатами зеленої енергії, що дозволяє компаніям верифікувати походження спожитої електроенергії [15]. Класифікацію основних напрямів практичного застосування наведено у таблиці 2.

Блокчейн також дозволяє підтримувати «зелені» стартапи через механізми токенованого краудфандингу, забезпечує прозорість екологічних фондів через незмінний публічний реєстр транзакцій і створює цифрові токени для стимулювання еколого-відповідальної поведінки. Наприклад, SolarCoin винагороджує власників сонячних панелей за кожний вироблений мегават-годину чистої енергії, а програми «earn-to-green» нараховують токени за використання громадського транспорту, сортування відходів чи зменшення водоспоживання.

Найсерьознішою загрозою для репутації блокчейн-кліматичних ініціатив залишається грінвошинг. У контексті вуглецевих ринків це явище досліджували Шлетц та ін., зауважуючи,



**Рис. 1. Прогнозна динаміка глобального ринку вуглецевих кредитів, млрд дол. США**

*Джерело: сформовано автором на основі [17]*

Таблиця 2

**Класифікація напрямів застосування блокчейну для кліматичних цілей**

Напрямок застосування	Приклади проєктів	Консенсус	Основний ефект
P2P-торгівля енергією	Powerledger (uGrid)	PoS (Solana)	Зменшення втрат у мережі, монетизація надлишків
Сертифікати зеленої енергії	Energy Web Chain	PoA	Верифікація походження електроенергії
Токенізація вуглецевих кредитів	Toucan, KlimaDAO, Moss	PoS (Polygon)	Прозорість, фракційна власність, ліквідність
Стимулювання поведінки	SolarCoin, earn-to-green	Різні	Нагородження за еколого-відповідальну поведінку
Прозорість екофондів	DAO-моделі	PoS	Публічний реєстр руху коштів

*Джерело: сформовано автором на основі [6; 7; 15; 18]*

що «блокчейн забезпечує прозорість транзакцій, але не може гарантувати якість базового екологічного активу» [6, с. 12]. Ван дер Берг та ін. підтвердили, що блокчейн-trasування знижує ризики грінвошингу, проте потребує інтеграції з офлайн-верифікацією [19]. Crypto Climate Accord, підписаний десятками компаній, зазнав критики як PR-ініціатива без зобов'язуючих механізмів верифікації. Характеристики сталості «зелених» крипто-проєктів також під питанням: багато з них залежать від волатильних моделей токенізації і падіння ціни governance-токену може зруйнувати економічну модель DAO.

Ця проблема потребує ефективного регулювання, яке наразі перебуває на етапі формування. Регламент ЄС MiCA вимагає від

емітентів крипто-активів розкривати інформацію про енергоспоживання, а SEC (США) запровадила вимоги до кліматичного розкриття інформації для публічних компаній у 2024 році. Водночас відсутність єдиних стандартів верифікації токенізованих вуглецевих кредитів створює регуляторні прогалини.

Фундаментальна дилема «децентралізація проти енергоефективності» виявляється у тому, що найбільш енергоефективні механізми (PoA, delegated PoS) передбачають вищий ступінь централізації, що суперечить базовому принципу блокчейну. PoW забезпечує найвищий рівень безпеки, але за неприємної екологічної ціни; тоді як PoS економить енергію, але концентрує вплив серед великих стейкхолдерів. Цей компроміс не має

ідеального рішення і потребує контекстуального підходу залежно від конкретного кліматичного застосування [3]. Ці тренди вказують на формування цілком «зеленої» криптоіндустрії до кінця десятиліття. Algorand та Hedera вже досягли вуглецевої негативності, а провідні мережі (Ethereum, Solana, Cardano) демонструють мінімальне споживання. До 2030 року частка відновлюваної енергії у майнінгу Bitcoin може досягти 70 %, а сам механізм PoW може поступово трансформуватися під регуляторним тиском [1].

Інтеграція Web3-технологій у кліматичні ініціативи набуває системного характеру: після COP30 блокчейн-рішення для верифікації кліматичних зобов'язань отримали міжнародне визнання, а ринок Web3 прогнозується на рівні 38,6 млрд дол. США до 2030 року із середньорічним темпом зростання (CAGR) 43,6 % [20]. Синергія штучного інтелекту та блокчейну відкриває перспективи автоматизованого управління вуглецевими ринками: AI-алгоритми оптимізують параметри консенсусу для мінімізації енергоспоживання, прогнозують попит на вуглецеві кредити, аналізують супутникові дані для верифікації лісовідновлення та автоматично активують смарт-контракти при досягненні екологічних показників [20].

**Висновки.** Проведений аналіз дозволяє зробити такі висновки. По-перше, екологіч-

ний вплив блокчейну не є однорідним: різниця у енергоспоживанні між Bitcoin (PoW) та Ethereum (PoS) перевищує 80 000 разів, що спростовує узагальнену критику блокчейну як «ворога клімату». По-друге, блокчейн надає унікальні інструменти для кліматичної дії – прозорі реєстри вуглецевих кредитів, автоматизовані смарт-контракти, децентралізовані ринки зеленої енергії та DAO-моделі колективного кліматичного фінансування, ринковий потенціал яких оцінюється у 1,6 трлн дол. США до 2028 року на ринку вуглецевих кредитів та 38,6 млрд дол. США на ринку Web3 до 2030 року. По-третє, ризики грінвошингу, волатильності та регуляторної невизначеності є реальними і потребують розробки стандартів верифікації, посилення регуляторних вимог та інституційної підтримки. По-четверте, інтеграція AI та блокчейну може стати каталізатором нової хвилі кліматичних інновацій, забезпечуючи автоматизацію, прогнозування та масштабування «зелених» фінансових інструментів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на емпіричний аналіз ефективності конкретних блокчейн-кліматичних проєктів в українському контексті, розробку нормативної бази для токенизації вуглецевих кредитів в Україні та оцінку потенціалу інтеграції вітчизняного енергоринку з децентралізованими платформами peer-to-peer торгівлі зеленою енергією.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Cambridge Centre for Alternative Finance. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. URL: <https://ccaf.io/cbeci/>.
2. de Vries A. Bitcoin's Growing Energy Problem. *Joule*. 2018. Vol. 2. № 5. P. 801–805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.016>
3. Sedlmeir J., Buhl H. U., Fridgen G., Keller R. The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering*. 2020. Vol. 62. № 6. P. 599–608. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>
4. Radulescu M. et al. Evaluating the environmental effects of bitcoin mining on energy and water use in the context of energy transition. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 8230. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92314-z>
5. ConsenSys. Ethereum Blockchain Eliminates 99.99 % of Its Carbon Footprint Overnight After a Successful Merge According to New Report by CCRI. 2022. URL: <https://consensys.io/blog/ethereum-blockchain-eliminates-99-99-of-its-carbon-footprint-overnight-after-a-successful-merge-according-to-new-report>.
6. Schletz M., Franke L., Salomo S. Blockchain's Scope and Purpose in Carbon Markets: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. № 11. Article 8495. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15118495>
7. Siphthorpe A., Brink S., Van Leeuwen T., Staffell I. Blockchain solutions for carbon markets are nearing maturity. *One Earth*. 2022. Vol. 5. № 7. P. 779–791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.004>
8. Howson P. Tackling climate change with blockchain. *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. № 9. P. 644–645. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0567-9>
9. Ballesteros-Rodríguez P., Lucio F. Tokenized carbon credits in voluntary carbon markets: the case of KlimaDAO. *Frontiers in Blockchain*. 2024. Vol. 7. Article 1474540. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbloc.2024.1474540>

10. Рябоконт І. О., Пузько С. Г., Статешна О. В. Застосування блокчейну на ринку вуглецевих кредитів як інструмент соціальної відповідальності бізнесу. *Економіка та підприємництво*. 2024. № 53. DOI: [https://doi.org/10.33111/EE.2024.53.RyabokonI\\_PuzkoS\\_StateshnaO](https://doi.org/10.33111/EE.2024.53.RyabokonI_PuzkoS_StateshnaO)
11. Івасик О. П., Вільчинська Д. В., Горбовий О. В. Інноваційні підходи до фінансування зелених технологій: роль блокчейн-технологій та криптовалют. *Наукові перспективи*. 2024. № 3(45). С. 510–521. DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-3\(45\)-510-521](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-3(45)-510-521)
12. Гуцуляк А. Вплив інноваційних технологій на навколишнє середовище та екологічний аспект Proof-of-Work консенсусу. *Економічний дискурс*. 2024. Вип. 3–4. С. 36–48. DOI: <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-2-4>
13. Чернишов О., Постніков О. Формування стратегії еколого-відповідального маркетингу в умовах цифрової економіки. *Економіка та суспільство*. 2025. № 81. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-81-79>
14. Дмитришин Л. І., Стасенко З. В. Фінтех як економічний механізм стимулювання МСП у сфері циркулярної та зеленої економіки. *Економіка та суспільство*. 2025. № 82. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-82-66>
15. The Best Green Blockchain Initiatives To Watch In 2026. *Forbes*. 21.11.2025. URL: <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2025/11/21/the-best-green-blockchain-initiatives-to-watch-in-2026/>
16. Green Blockchain Trade-Offs: Energy, Security, and Decentralization. *Forbes*. 04.12.2025. URL: <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2025/12/04/green-blockchain-consensus-balancing-energy-efficiency-security-and-decentralization/>
17. MarketsandMarkets. Carbon Offset / Carbon Credit Trading Service Market. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/carbon-offset-credit-market-85350774.html> (дата звернення: 18.03.2026).
18. Powerledger. P2P Energy Trading Solutions. URL: <https://powerledger.io/solutions/need/p2p/> (дата звернення: 18.03.2026).
19. Charfi I., Zouari A., Dalhoum S. Utilizing blockchain-based traceability to mitigate greenwashing. *Management Decision*. 2025. Vol. 64. № 2. P. 516–540. DOI: <https://doi.org/10.1108/MD-04-2024-0956>
20. AI, Sustainability, and Blockchain: How It Is Building the Green Web3. *Impakter*. 20.06.2025. URL: <https://impakter.com/ai-sustainability-and-blockchain-how-it-is-building-the-green-web3>

## REFERENCES:

1. Cambridge Centre for Alternative Finance. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. Available at: <https://ccaf.io/cbeci/> (accessed March 18, 2026).
2. de Vries A. (2018) Bitcoin's Growing Energy Problem. *Joule*, vol. 2, no. 5, pp. 801–805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.016>
3. Sedlmeir J., Buhl H. U., Fridgen G., Keller R. (2020) The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering*, vol. 62, no. 6, pp. 599–608. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>
4. Radulescu M. et al. (2025) Evaluating the environmental effects of bitcoin mining on energy and water use in the context of energy transition. *Scientific Reports*, vol. 15, article 8230. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92314-z>
5. ConsenSys (2022) Ethereum Blockchain Eliminates 99.99 % of Its Carbon Footprint Overnight After a Successful Merge According to New Report by CCRI. Available at: <https://consensys.io/blog/ethereum-blockchain-eliminates-99-99-of-its-carbon-footprint-overnight-after-a-successful-merge-according-to-new-report> (accessed March 18, 2026).
6. Schletz M., Franke L., Salomo S. (2023) Blockchain's Scope and Purpose in Carbon Markets: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, vol. 15, no. 11, article 8495. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15118495>
7. Siphorpe A., Brink S., Van Leeuwen T., Staffell I. (2022) Blockchain solutions for carbon markets are nearing maturity. *One Earth*, vol. 5, no. 7, pp. 779–791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.004>
8. Howson P. (2019) Tackling climate change with blockchain. *Nature Climate Change*, vol. 9, no. 9, pp. 644–645. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0567-9>
9. Ballesteros-Rodríguez P., Lucio F. (2024) Tokenized carbon credits in voluntary carbon markets: the case of KlimaDAO. *Frontiers in Blockchain*, vol. 7, article 1474540. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbloc.2024.1474540>
10. Riabokon I. O., Puzko S. H., Stateshna O. V. (2024) Zastosuvannia blokcheynu na rynku vuhletsevykh kredytiv yak instrument sotsialnoi vidpovidalnosti biznesu [Application of blockchain to the carbon credits market as a tool of business social responsibility]. *Економіка та підприємництво*, no. 53. DOI: [https://doi.org/10.33111/EE.2024.53.RyabokonI\\_PuzkoS\\_StateshnaO](https://doi.org/10.33111/EE.2024.53.RyabokonI_PuzkoS_StateshnaO) (in Ukrainian)

11. Ivasyk O. P., Vilchynska D. V., Horbovyi O. V. (2024) Innovatsiini pidkhody do finansuvannia zelenykh tekhnolohii: rol blokchein-tekhnolohii ta kryptovaliut [Innovative approaches to financing green technologies: The role of blockchain technologies and cryptocurrencies]. *Naukovi perspektyvy*, no. 3(45), pp. 510–521. DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-3\(45\)-510-521](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2024-3(45)-510-521) (in Ukrainian)
12. Hutsuliak A. (2024) Vplyv innovatsiinykh tekhnolohii na navkolyshnie seredovyshe ta ekolohichni aspekt Proof-of-Work konsensusu [The impact of innovative technologies on the environment and the ecological aspect of Proof-of-Work consensus]. *Ekonomichniy dyskurs*, vol. 3–4, pp. 36–48. DOI: <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-2-4> (in Ukrainian)
13. Chernyshov O., Postnikov O. (2025) Formuvannia stratehii ekolooho-vidpovidalnoho marketynhu v umovakh tsyfrovoy ekonomiky [Formation of an eco-responsible marketing strategy in the digital economy]. *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 81. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-81-79> (in Ukrainian)
14. Dmytryshyn L. I., Stasenko Z. V. (2025) Fintekh yak ekonomichniy mekhanizm stymuliuвання MSP u sferi tsyrkuliarnoi ta zelenoi ekonomiky [Fintech as an economic mechanism for stimulating SMEs in the circular and green economy]. *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 82. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-82-66> (in Ukrainian)
15. The Best Green Blockchain Initiatives To Watch In 2026 (2025, November 21). *Forbes*. Available at: <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2025/11/21/the-best-green-blockchain-initiatives-to-watch-in-2026/> (accessed March 18, 2026).
16. Green Blockchain Trade-Offs: Energy, Security, and Decentralization (2025, December 4). *Forbes*. Available at: <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/2025/12/04/green-blockchain-consensus-balancing-energy-efficiency-security-and-decentralization/> (accessed March 18, 2026).
17. MarketsandMarkets. Carbon Offset / Carbon Credit Trading Service Market. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/carbon-offset-credit-market-85350774.html> (accessed March 18, 2026).
18. Powerledger. P2P Energy Trading Solutions. Available at: <https://powerledger.io/solutions/need/p2p/> (accessed March 18, 2026).
19. Charfi I., Zouari A., Dalhoum S. (2025) Utilizing blockchain-based traceability to mitigate greenwashing. *Management Decision*, vol. 64, no. 2, pp. 516–540. DOI: <https://doi.org/10.1108/MD-04-2024-0956>
20. AI, Sustainability, and Blockchain: How It Is Building the Green Web3 (2025, June 20). *Impakter*. Available at: <https://impakter.com/ai-sustainability-and-blockchain-how-it-is-building-the-green-web3/> (accessed March 18, 2026).

Дата надходження статті: 04.04.2026

Дата прийняття статті: 24.04.2026

Дата публікації статті: 04.05.2026