

DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2025-57-3>

УДК 336.76:504.75

Намонюк В.Є.*кандидат економічних наук,
доцент кафедри міжнародних фінансів
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9454-6658>E-mail: vasyl.namoniuk@knu.ua

ТОКЕНІЗАЦІЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЛІКВІДНОСТІ РИНКУ ВУГЛЕЦЕВИХ КРЕДИТІВ

Досліджено токенизацію вуглецевих кредитів як інструмент подолання системних дисфункцій добровільного ринку вуглецю. Показано, що традиційний ринок страждає від критичної фрагментації інфраструктури, непрозорості ціноутворення та низької ліквідності активів, що створює бар'єри для його масштабування. Проаналізовано інноваційну proof-of-concept модель на базі Toucan Protocol та KlimaDAO, яка перетворює традиційні кредити у програмовані цифрові активи (токени) на блокчейні. Доведено, що ця DeFi-екосистема продемонструвала здатність мобілізувати значний капітал (понад 17 млн тонн CO₂) та створити ончейн-ліквідність для кліматичних активів. Водночас, ідентифіковано три ключові виклики для інституційного масштабування: проблема верифікації якості базових активів, спекулятивна волатильність протокольних токенів та регуляторна невизначеність.

Ключові слова: токенизація активів, вуглецеві кредити, добровільний ринок вуглецю (VCM), ліквідність, фрагментація, блокчейн, цифрові активи, віртуальні активи, DeFi, KlimaDAO, фінансовий інжиніринг.

Namoniuk Vasyl. CARBON CREDIT TOKENIZATION AS AN INSTRUMENT FOR ENHANCING MARKET LIQUIDITY

The paper investigates the tokenization of carbon credits as a systemic innovation to overcome structural dysfunctions of the Voluntary Carbon Market (VCM). Despite rapid growth, the VCM remains critically fragmented, non-transparent, and illiquid, posing significant barriers to scaling climate finance. The study conceptualizes how Distributed Ledger Technology (DLT) and blockchain infrastructure offer a fundamental architectural shift, transforming isolated off-chain registry entries into programmable on-chain digital assets. The research focuses on the proof-of-concept model developed by Toucan Protocol and KlimaDAO. It details three primary stages: (1) "Bridging" – off-chain credits (e.g., from Verra) are verified, retired, and minted as on-chain TCO₂ tokens; (2) "Pooling" – individual non-fungible tokens are aggregated into standardized fungible composite tokens like Base Carbon Tonne (BCT), creating a benchmark asset; (3) "DeFi Integration" – tokens become tradable on decentralized exchanges and used as collateral in algorithmic reserve currencies. The analysis highlights the model's initial success: KlimaDAO mobilized over 17 million tokenized tonnes of CO₂ (18% of annual VCM volume in December 2021), demonstrating the potential for creating on-chain liquidity. However, three critical challenges limit institutional adoption: asset quality verification issues (tokenization automates but does not solve underlying environmental integrity problems), extreme speculative volatility of protocol tokens (KLIMA lost 99.9% of value), and fragmented regulatory landscape (MiCA in EU, SEC scrutiny in US) creating compliance uncertainty. The article concludes that while tokenization provides powerful proof-of-concept for transitioning VCM from fragmented network to integrated liquid ecosystem, its future depends on solving quality verification, speculative volatility, and regulatory clarity challenges.

Key words: asset tokenization, carbon credits, Voluntary Carbon Market (VCM), liquidity, fragmentation, blockchain, digital assets, virtual assets, DeFi, KlimaDAO, financial engineering.

Постановка проблеми. Посилення кліматичних викликів формує безпрецедентний тиск на механізми фінансування низьковуглецевої економіки. Понад 11 800 компаній оголосили про зобов'язання щодо скорочення викидів, з них 2 782 – досягти вуглецевої нейтральності до 2050 р. [19], створюючи великий попит на верифіковані інструменти компенсації викидів.

У цьому контексті добровільний ринок вуглецю (Voluntary Carbon Market, VCM), обсяг якого у 2024 р. перевищив 11,3 млрд дол. США та демонструє стійку

тенденцію до зростання, залишається одним з ключових каналів фінансування кліматичних проєктів, особливо у країнах, що розвиваються [25]. Водночас, попри динамічне розширення, ринок функціонує в умовах структурних дисфункцій. Критична фрагментація інфраструктури реєстрів, непрозорість ціноутворення, інформаційна асиметрія між учасниками та низька ліквідність активів формують системні бар'єри для масштабування, обмежують залучення фінансових інститутів і підривають довіру інвесторів до екологіч-

ної цілісності торгованих вуглецевих кредитів [12].

Технологія розподілених реєстрів (Distributed Ledger Technology, DLT) та блокчейн-інфраструктура пропонують можливість фундаментальної зміни архітектури добровільного ринку вуглецю через механізм токенизації – перетворення традиційних вуглецевих кредитів у програмовані цифрові активи з вбудованою прозорістю та можливістю безпосередньої торгівлі на децентралізованих платформах [13]. Емерджентні криптоекономічні моделі, зокрема екосистема Toucan Protocol та децентралізована автономна організація KlimaDAO, продемонстрували концептуальну спроможність мобілізувати значні обсяги капіталу для реалізації кліматичних цілей: у період пікової активності, у грудні 2021 р., протокольна скарбниця KlimaDAO акумулювала понад 17 млн токенизованих тонн CO₂, що становило близько 18 % річного обсягу традиційного добровільного вуглецевого ринку. [1]. Проте критичний аналіз виявляє суттєві обмеження цієї моделі, включаючи проблеми якості базових активів, спекулятивну волатильність протокольних токенів та регуляторну невизначеність, що гальмує інституційне впровадження [15].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковому дискурсі існує прогалина у розумінні того, як саме токенизація трансформує системну архітектуру добровільного ринку вуглецю з фрагментованої мережі в інтегровану екосистему. Більшість досліджень аналізують окремі аспекти токенизації. Зокрема, A. Gupta, M. Mason [7], а також N. Deknatel, A. van der Loos [4] досліджують критичну фрагментацію реєстрів, інформаційну асиметрію та непрозорість ціноутворення, що створюють бар'єри для масштабування ринку. Технологічні механізми блокчейн-токенизації через двотокенні системи та смарт-контракти, що дозволяють автоматизувати верифікацію та розподіл доходів, детально розглянуто в працях S. Evro, B. A. Oni, O. S. Tomomewo [5], J. Woo et al. [26], а також В. Намонюка та В. Матея [14]. Вплив токенизації на ліквідність через дробове володіння та зниження транзакційних витрат, демонструючи потенціал підвищення доступності для роздрібних інвесторів, аналізують A. Siphthorpe et al. [16], U. Tanveer, S. Ishaq, T. G. Hoang [18]. Децентралізовані автономні організації (DAOs) як інноваційну модель управління

кліматичним фінансуванням з підвищеною прозорістю досліджують С. Bellavitis, P. P. Momtaz [3], A. Hsu et al. [8]. Критична прогалина полягає у суперечливих емпіричних свідченнях: Н. Tlili [20] виявляє парадоксальний негативний ціновий ефект токенизації, що суперечить теоретичним очікуванням підвищення ефективності ринку. Водночас залишаються недостатньо дослідженими питання якості базових активів, регуляторної невизначеності та довгострокового впливу на структуру VCM.

Мета дослідження є обґрунтування можливостей токенизації вуглецевих кредитів як інструменту подолання структурних обмежень добровільного ринку вуглецю.

Виклад матеріалу дослідження та його основні результати. Добровільний ринок вуглецю, незважаючи на експоненційне зростання обсягів торгівлі протягом останніх років (див. Рис. 1), залишається фрагментованим та неефективним. На відміну від регульованих систем торгівлі викидами (EU ETS), VCM є мережею розрізнених реєстрів (Verra, Gold Standard, ACR) з власними стандартами верифікації та методологіями обліку [25]. Ця фрагментація створює множинні бар'єри для масштабування ринку.

По-перше, інформаційна непрозорість унеможливорює ефективне ціноутворення на добровільному ринку вуглецю. Історичні дані свідчать, що ціна на кредити, ідентичні за методологією, може відрізнятись на 300-500 % залежно від географії проєкту, року vintage та репутації розробника, навіть за умови верифікації одним стандартом [23]. Брокерські платформи, які домінують у торгівлі (наприклад, ClimateTrade, Xpansiv CBL), працюють із закритими книгами ордерів, що унеможливорює формування консолідованої ринкової ціни. Лише 23 % угод на VCM укладаються за публічно оголошеними цінами, тоді як решта відбувається через двосторонні переговори з непрозорими умовами [6].

По-друге, неліквідність активів залишається критичною проблемою. Середній термін утримання вуглецевого кредиту від моменту емісії до остаточного погашення становить 4,7 року, що є аномально високим показником для фінансового інструменту [6]. Це зумовлено відсутністю розвинених вторинних ринків: більшість кредитів купуються корпораціями для негайного погашення у звітності, а не з інвестиційною метою. Така структура попиту блокує формування глибоких і

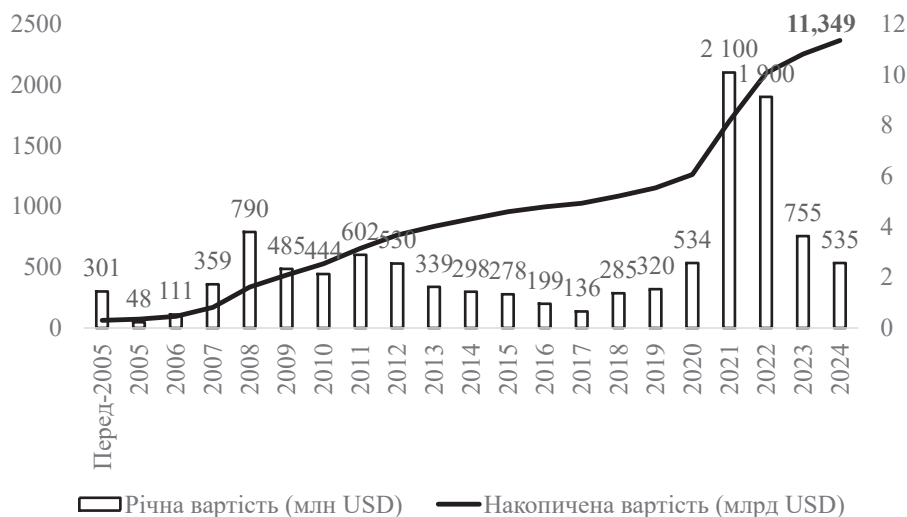


Рис. 1. Річна та накопичена вартості VCM, перед-2005–2024 рр.

Джерело: [6]

ліквідних ринкових пулів, необхідних для залучення фінансових інститутів та інвестиційних фондів.

По-третє, високі транзакційні витрати та бар'єри входу суттєво обмежують доступ до ринку. Мінімальна сума покупки на більшості брокерських платформ становить 10 000 дол. США, що фактично виключає з ринку малі та середні підприємства [9]. Операційні витрати, пов'язані з верифікацією, реєстрацією та передачею прав власності, сягають 15–30 % від номінальної вартості кредиту, що робить невеликі угоди економічно недоцільними.

Технологія розподілених реєстрів пропонує фундаментальний підхід до усунення цих структурних дефектів VCM шляхом створення єдиного, програмованого рівня представлення активів. Ключовою інновацією виступає токенизація – процес перетворення традиційного вуглецевого кредиту, що існує як запис у централізованому реєстрі (типу *Verra*), у цифровий токен на публічному блокчейні. Кожен токен представляє право власності на одну верифіковану тону компенсованого CO₂-еквіваленту [11].

Механізм токенизації складається з трьох головних етапів. Перший етап – верифікація та бриджинг. Власник кредиту переносить його з реєстру *Verra* в ончейн-середовище через *Toucan Protocol* (*Polygon*), що автоматизовано верифікує атрибути кредиту та виводить його з обігу для запобігання подвійному обліку [22]. Протокол карбує еквівалентну кількість токенів TCO₂ (*Tokenized Carbon Tonne*): один токен = одна тонна CO₂.

На другому етапі, створенні стандартизованих пулів ліквідності, індивідуальні токени TCO₂, що представляють кредити з різних проєктів, агрегуються у композитні токени на основі спільних характеристик. Базовий композитний токен BCT (*Base Carbon Tonne*) об'єднує кредити, що відповідають мінімальним критеріям якості: *vintage* не старший за 2008 рік, верифікація *Verra VCS* або аналогічним стандартом, виключення проєктів з високим ризиком неперманентності (наприклад, REDD+ без додаткових гарантій) [24]. Ця стандартизація створює фунгібельний актив, придатний для торгівлі на децентралізованих біржах типу *Uniswap* або *SushiSwap*.

Третій етап – інтеграція з DeFi-екосистемою. Токенізовані вуглецеві кредити стають «грошовим лего» (*money legos*), що можна використовувати як заставу для отримання кредитів, компонент індексних фондів або базовий актив для деривативів. Протокол *KlimaDAO* використовує BCT-токени як забезпечення для емісії власного протокольного токена *KLIMA*, створюючи таким чином перший «вуглецево-забезпечений» актив у крипто-економіці [11].

KlimaDAO, запущений у жовтні 2021 р., представляє радикальний експеримент у створенні синтетичного попиту на вуглецеві кредити через механізми крипто-економічних стимулів. На піку активності у грудні 2021 р. протокольна скарбниця утримувала понад 17,2 млн TCO₂, що становило приблизно 18 % від річного обсягу торгівлі на традиційному VCM [11] (див. Рис. 3). На початок осені 2025 р. скарбниця *KlimaDAO*

оперує одним з найбільших у світі портфелів токенизованих вуглецевих кредитів, що складає близько 17,9 млн тон CO₂. Це відповідає сумарній вартості понад 31 млн дол. США у поточних ринкових цінах. Основну частку резерву становлять токени BCT (Base Carbon Tonne), які охоплюють понад 16 млн тон CO₂, або 89 % портфеля. Решту активів складають токени інших стандартів (NCT, MCO2, UBO, NBO, CCO2), що доповнюють структуру скарбниці і диверсифікують ризики. Розподіл активів за типами свідчить, що 83,8 % tokenів знаходяться у статусі резервів протоколу, а ще 16,2 % формують ліквідність інструментів для автоматизованих ринкових операцій на різних DeFi-платформах. За токенами найбільшу вагу мають BCT (61,3 %), далі йдуть MCO2 та NCT (близько 10 % кожен). Така концентрація токенизованих кредитів у скарбниці KlimaDAO ілюструє як потужність DeFi-моделі для мобілізації капіталу в екологічних цілях, так і можливу вразливість протоколу до ринкової волатильності та якості базових активів, враховуючи, що більшість кредитів BCT належать до старших та дешевших вуглецевих проектів. Сукупно, ці цифри підтверджують вплив KlimaDAO на цифрову екосистему добровільного ринку вуглецю [10].

Бізнес-модель KlimaDAO базується на трьох механізмах: (1) бондинг – продаж BCT протоколу зі знижкою 5-15% в обмін на KLIMA, що забезпечує купівельний тиск; (2) стейкінг – блокування KLIMA за нарахування rebase (початкова ставка 40 000% APY); (3) алгоритмічна резервна валюта – кожен KLIMA забезпечений

≥1 тонною CO₂, з викупом tokenів протоколом при цінових просіданнях [11]. Така конструкція створює унікальний ефект: попит на KLIMA трансформується у попит на базові вуглецеві кредити, що ефективно підвищує їхню ціну на традиційному ринку.

У результаті діяльності протоколу спостерігалися три помітні ефекти. По-перше, ефект ліквідності: середній денний обсяг торгівлі пулом BCT/USDC на Uniswap у грудні 2021 р. перевищував 2,5 млн дол. США, що є порівняним із показниками найбільших традиційних брокерів [21]. По-друге, ціновий ефект: активна скупівля кредитів протоколом спричинила зростання середньої ціни на ринку Verra на 40–60 % у період жовтень 2021 – березень 2022 р., сигналізуючи виробникам кредитів про підвищення вартості їхніх активів. По-третє, ефект стандартизації: створення BCT як бенчмарк-активу стимулювало розробників проєктів орієнтуватися на критерії, необхідні для включення до цього пулу, що підвищило середню якість кредитів на ринку.

Незважаючи на трансформаційний потенціал, екосистема токенизованих вуглецевих кредитів стикається з викликами, що обмежують її масштабування. Першим фундаментальним викликом є проблема якості та верифікації базових активів. Бريدжинг автоматизує перевірку метаданих, але не аудит екологічної цілісності. Розслідування 2022 р. виявило, що понад 90% REDD+-кредитів Verra не відповідають критеріям додатковості [9]. Оскільки такі кредити становили значну частку BCT-пулу, це підірвало довіру до токена.

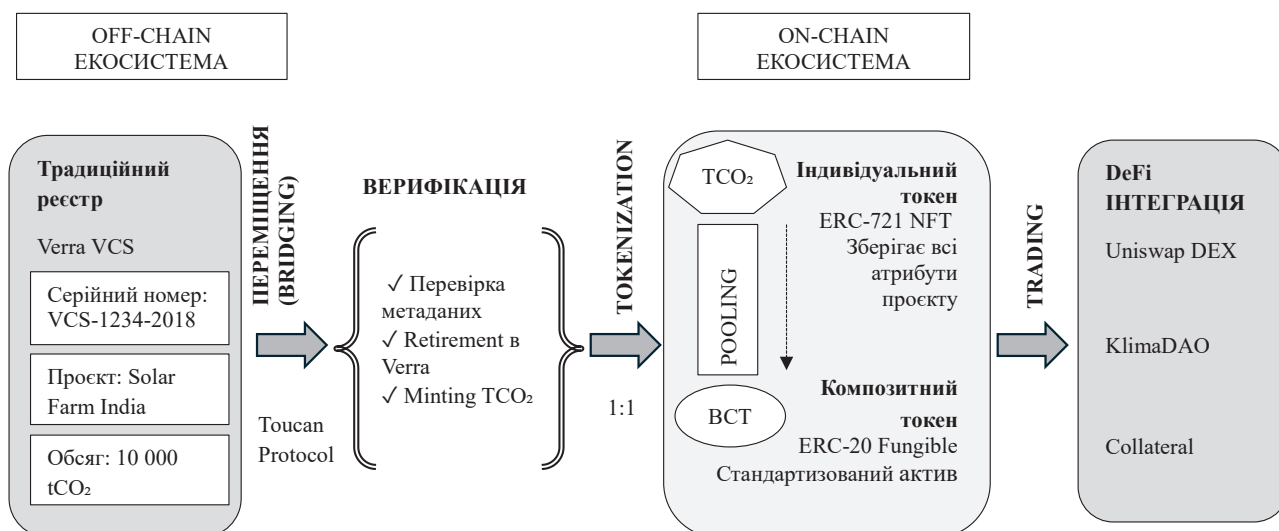


Рис. 2. Схема процесу токенизації вуглецевих кредитів через Toucan Protocol

Джерело: [17]

У відповідь на критику протокол запровадив більш жорсткі критерії формування пулів: токен NCT (Nature Carbon Tonne) виключає кредити з vintage старшим за 2014 рік та обмежується виключно природно-кліматичними рішеннями з підвищеними вимогами до моніторингу [22]. Водночас це створює парадокс: чим жорсткіші критерії відбору, тим менша кількість кредитів може бути токенизована, що обмежує масштаб ончейн-ліквідності. Оптимальний баланс між інклюзивністю та якістю залишається невирішеним завданням для протокольних розробників.

Другим критичним викликом є волатильність та спекулятивна динаміка крипторинків. Ціна токена KLIMA, що на піку у листопаді 2021 р. досягала 3500 дол. США, до червня 2023 р. впала до 2,3 долара, втративши 99,93 % вартості [10]. Водночас вартість базового активу ВСТ демонструвала значно меншу волатильність (див. Рис. 3). Цей обвал був спричинений комбінацією факторів: нестійкість понци-подібної моделі з надзвичайно високими ставками rebase, загальний ведмежий ринок у криптосекторі та вихід ранніх інвесторів після досягнення короткострокових прибутків. Така волатильність унеможлиблює використання KLIMA як стабільного інструменту для корпоративного хеджування вуглецевих зобов'язань.

Проте важливо розрізняти ціну протокольного токена KLIMA та вартість базового активу ВСТ. Навіть після обвалу курсу KLIMA, обсяги ВСТ у скарбниці залиши-

лися стабільними на рівні 15+ млн тон, а ціна самого ВСТ-токена демонструвала значно меншу волатильність, коливаючись у діапазоні 0,8-3,5 дол. за тону [11]. Це свідчить про те, що токенизовані вуглецеві кредити, без спекулятивних обгортів типу KLIMA, можуть функціонувати як відносно стабільні ончейн-активи.

Ще одним бар'єром є фрагментований регуляторний ландшафт. Токенизовані вуглецеві кредити опиняються на перетині трьох юрисдикцій: ринків вуглецю (підпадають під регулювання екологічних агенцій), ринку цінних паперів (якщо токен класифікується як security) та регулювання цифрових активів (наприклад, MiCA в ЄС). У жовтні 2023 р. Комісія з цінних паперів та бірж США (SEC) ініціювала розслідування щодо KlimaDAO щодо можливого використання незареєстрованих цінних паперів, що створило прецедент регуляторного ризику для галузі [23].

Європейський регламент MiCA (Markets in Crypto-Assets), що набув чинності у січні 2025 р., класифікує токенизовані реальні активи як Asset-Referenced Tokens (ART) і передбачає для емітентів ліцензування, вимоги до капіталу та регулярну звітність перед наглядовими органами [6]. Для протоколів типу Toucan це означає необхідність трансформації з децентралізованої інфраструктури у регульовану фінансову установу, що суперечить ідеології DeFi. Альтернативним шляхом є партнерство з регульованими кастодіанами, як це реалізовано у проєкті Carbonplace – консорціуму

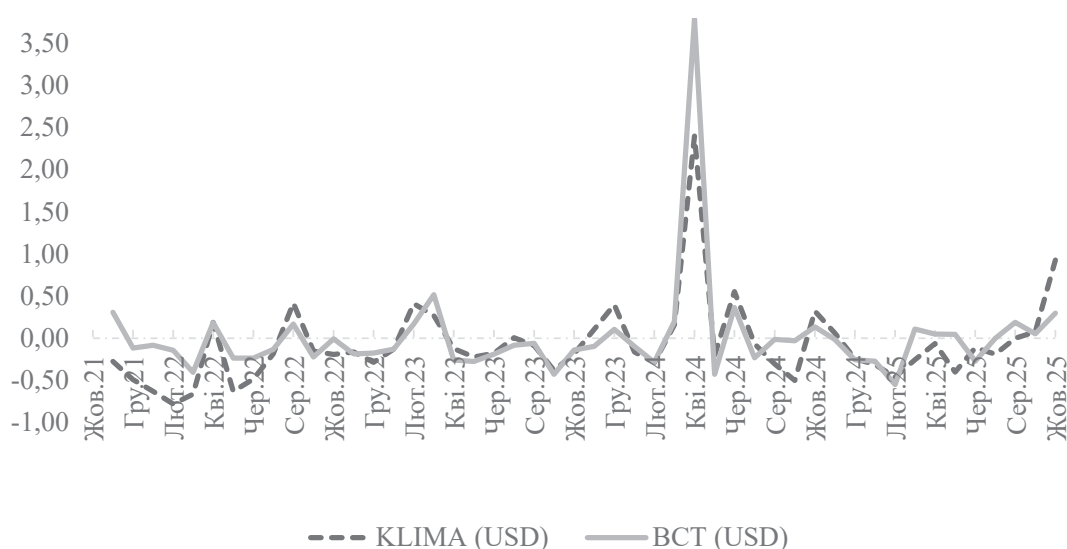


Рис. 3. Порівняння волатильності: ціна KLIMA vs. ціна ВСТ (листопад 2021 – жовтень 2025)

Джерело: [2; 10]

дев'яти глобальних банків, що розробляють інституційну платформу для токенизації вуглецевих кредитів на приватному блокчейні.

Важливою для інституційного впровадження є також інтеграція з існуючими системами корпоративного обліку та звітності. Стандарти GHG Protocol, що використовуються для розрахунку викидів Score 1–3, поки не мають чітких методологічних вказівок щодо обліку токенизованих кредитів [21]. Невизначеність стосується питань можливості корпорацією погасити BCT-токен безпосередньо для звітності або необхідності спочатку розбриджити його назад у традиційний реєстр; способу відображення в балансі волатильності вартості утримуваних токенів. Ці технічні, але критично важливі питання гальмують прийняття рішень корпоративними ESG-департаментами.

Для корпорацій токенизація пропонує три переваги: (1) динамічне хеджування через поступову акумуляцію BCT за середньозваженою ціною; (2) автоматизація комплаєнсу – смарт-контракти погашають токени при перевищенні порогів викидів (експеримент Microsoft з Chainlink-оракулами); (3) прозорість для маркетингу – NFT з посиланням на ончейн-запис про погашення (B2C-

платформа Offsetra) [6]. Однак репутаційні та регуляторні ризики вимагають консервативного підходу: паралельне утримання традиційних і токенизованих кредитів з поступовим збільшенням ончейн-частки.

Для систематизації потенціалу та обмежень доцільно узагальнити ключові відмінності між традиційною та ончейн-моделлями функціонування VCM (див. Табл. 1).

Критична відмінність полягає у зміні архітектури довіри: традиційна модель покладається на централізованих посередників (реєстри, брокери, аудиторі), тоді як ончейн-модель переносить довіру на рівень криптографічно захищеного протоколу та публічної верифікованості транзакцій. Це не усуває необхідність первинної верифікації екологічної цілісності проєктів, але радикально підвищує прозорість та придатність до аудиту усіх подальших операцій з кредитами після їх токенизації.

Висновки. Токенизація вуглецевих кредитів є системною інновацією, що трансформує добровільний ринок вуглецю з фрагментованої мережі непрозорих двосторонніх угод у інтегровану, програмовану екосистему з ончейн-ліквідністю. Кейс Toucan Protocol та KlimaDAO демонструє концептуальне підтвердження можливості мобілізації значних обсягів капіталу

Таблиця 1

Порівняльна характеристика традиційного та токенизованого добровільного ринку вуглецю

Критерій порівняння	Традиційний VCM	Токенизований VCM
Інфраструктура обліку	Фрагментовані централізовані реєстри (Verra, Gold Standard, ACR)	Єдиний програмований рівень представлення на публічному блокчейні
Прозорість ціноутворення	23% угод за публічними цінами; закриті books of orders	100% транзакцій публічно верифіковані; real-time price discovery на DEX
Мінімальна сума інвестиції	10 000 USD (бар'єр для МСП)	Від 1 USD (фракційна власність)
Транзакційні витрати	15–30% від номінальної вартості	0,1–2% (gas fees + protocol fees)
Ліквідність активів	Критично низька; утримання 4,7 роки до retirement	Підвищена завдяки DEX-пулам; 24/7 trading
Час розрахунків	5–14 днів (міжбанківські перекази, paperwork)	5–30 секунд (on-chain settlement)
Верифікація екологічної цілісності	Ex-post аудит сторонніми верифікаторами; непрозорі методології	Ex-post + потенціал real-time моніторингу через IoT-оракули
Ризик подвійного рахунку	Можливий при недосконалому обліку між реєстрами	Усунений завдяки обов'язковому retirement перед bridging
Стандартизація активів	Відсутня; кожен кредит унікальний	Композитні токени (BCT, NCT) створюють fungible benchmarks
Регуляторна визначеність	Висока у рамках існуючих протоколів	Низька; evolving frameworks (MiCA, SEC)

Джерело: складено автором на основі аналізу [21; 24]

для кліматичних цілей через крипто-економічні стимули. Механізми бондингу, стейкінгу та алгоритмічного забезпечення створили прецедент синтетичного попиту на вуглецеві активи, підвищивши їхню ринкову ціну на 40–60% у період активної фази проєкту. Водночас існуюча модель має обмеження. По-перше, автоматизація процесу бриджингу не вирішує фундаментальної проблеми якості базових кредитів – токенизація низькоякісного активу створює низькоякісний токен. По-друге, волатильність крипто-ринків та спекулятивна динаміка протокольних токенів типу KLIMA створюють ризики для корпоративних користувачів, що потребують стабільних інструментів хеджування. По-третє, регуляторна невизначеність, особливо у контексті класифікації токенів як цінних паперів згідно з МіСА, гальмує інституційне впровадження та вимагає від протоколів балансувати між децентралізацією та комплаєнсом. Стратегічні імплікації для корпорацій з екологічними зобов'язаннями включають можливості динамічного хеджування через dollar-cost averaging, автоматизації комплаєнсу через смарт-контракти та інноваційного маркетингу через ончейн-прозорість, проте ці переваги повинні зважуватися проти репутаційних та регуляторних ризиків раннього впровадження.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Ballesteros-Rodríguez A., De-Lucio J., Sicilia M.-Á. Tokenized carbon credits in voluntary carbon markets: the case of KlimaDAO. *Frontiers in Blockchain*. 2024. № 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbloc.2024.1474540>
2. Base Carbon Tonne price today, BCT to USD live price. CoinMarketCap. URL: <https://coinmarketcap.com/currencies/toucan-protocol-base-carbon-tonne/> (дата звернення: 14.11.2025).
3. Bellavitis C., Momtaz P. P. Voting governance and value creation in decentralized autonomous organizations (DAOs). *Journal of Business Venturing Insights*. 2025. № 23. P.5–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2025.e00537>
4. Deknatel N., van der Loos A. The intangible technological innovation system: The role and influence of voluntary and compliance carbon markets on carbon dioxide removal in the European Union. *Energy Research & Social Science*. 2025. № 119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103851>
5. Evro S., Oni B. A., Tomomewo O. S. Global strategies for a low-carbon future: Lessons from the US, China, and EU's pursuit of carbon neutrality. *Journal of Cleaner Production*. 2024. № 461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142635>
6. Forest Trends' Ecosystem Marketplace. State of the Voluntary Carbon Market 2025. Washington DC: Forest Trends, 2025. 96 p.
7. Gupta A., Mason M. Disclosing or obscuring? The politics of transparency in global climate governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2016. № 18. P. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.11.004>
8. Hsu A. et al. Next-Generation Digital Ecosystem for Climate Data Mining and Knowledge Discovery: A Review of Digital Data Collection Technologies. *Frontiers in Big Data*. 2020. № 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdata.2020.00029>
9. Integrity Issues in the Voluntary Carbon Markets. Market-based initiatives emerge to address risks. KPMG. 2025. URL: <https://kpmg.com/xx/en/our-insights/regulatory-insights/integrity-issues-in-the-voluntary-carbon-markets.html>. (дата звернення: 14.11.2025).
10. KlimaDAO price today, KLIMA to USD live price. CoinMarketCap. URL: <https://coinmarketcap.com/currencies/klimadao/> (дата звернення: 14.11.2025).
11. KlimaDAO: a catalyst for innovation within the Voluntary Carbon Market. KlimaDAO. URL: <https://www.klimadao.finance/resources/klimadao-a-catalyst-for-innovation-within-the-voluntary-carbon-market> (дата звернення: 14.11.2025).
12. Mak W. Enhancing the Voluntary Carbon Market: Gaps and Solutions. CFA Institute Research & Policy Center. URL: https://rpc.cfainstitute.org/sites/default/files/docs/research-reports/voluntary-carbon-markets-report_online.pdf (дата звернення: 13.11.2025).
13. Marchant G., Cooper Z., Gough-Stone P. Bringing Technological Transparency to Tenebrous Markets: The Case for Using Blockchain to Validate Carbon Credit Trading Markets. *NAT. RES. J*. 2022. № 159. URL: <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol62/iss2/2> (дата звернення: 14.11.2025).
14. Namoniuk V., Matei V. Digital Innovation in Green Finance: Assessing the Impact of Hong Kong's Pioneering Initiatives in Tokenized Green Bonds. *Hong Kong Review of Belt and Road Studies*. 2025. 3, № 1(6). P. 6–22. DOI: <https://doi.org/10.63596/oborjournal.3.1.2025.6-22>
15. Schwahn J. Tokenized Carbon Credits for Investors: 2025 Insights. *CryptoBit Mag*. URL: <https://www.cryptobitmag.com/tokenized-carbon-credits-for-investors/> (дата звернення: 13.11.2025).
16. Siphthorpe A. et al. Blockchain solutions for carbon markets are nearing maturity. *One Earth*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.004>
17. Step-by-Step Guide: How to Tokenize Real-World Assets and Profit in 2025. *Medium*. URL: <https://medium.com/coinmonks/step-by-step-guide-how-to-tokenize-real-world-assets-and-profit-in-2025-47b49772f86f> (дата звернення: 14.11.2025).
18. Tanveer U., Ishaq S., Hoang T. G. Tokenized Assets in a Decentralized Economy: Balancing Efficiency, Value, and Risks. *International Journal of Production Economics*. 2025. № 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109554>
19. Target dashboard. Science Based Targets Initiative. URL: <https://sciencebasedtargets.org/target-dashboard> (дата звернення: 13.11.2025).
20. Tlili H. Blockchain and tokenized carbon markets: Empirical evidence on market efficiency and transaction dynamics. *Sustainable Futures*. 2025. № 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sft.2025.101109>
21. Tokenized Green Bonds: The Smart Way to Invest in a Greener Future. Asset Tokenization Platform. *Spydra*. URL: <https://www.spydra.app/blog/tokenized-green->

- bonds-the-smart-way-to-invest-in-a-greener-future (date of access: 14.11.2025).
22. Toucan Protocol. Toucan.earth. URL: <https://toucan.earth>. (дата звернення: 14.11.2025).
 23. Voluntary Carbon Markets. IOSCO. 2024. 52p. URL: <https://www.iosco.org/library/pubdocs/pdf/IOSCOPD774.pdf> (дата звернення: 14.11.2025).
 24. What Are Tokenized Green Bonds? *Neo-Banking for global businesses*. URL: <https://www.onesafe.io/blog/tokenized-green-bonds-sustainable-investing> (дата звернення: 14.11.2025).
 25. What is the voluntary carbon market? *First Mover Fund*. URL: <https://firstmoverfund.com/blog/what-is-the-voluntary-carbon-market> (дата звернення: 13.11.2025).
 26. Woo J. et al. Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (MRV) and the carbon credit market: A review of the literature. *Building and Environment*. 2021. № 205. P.108–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108199>.
-
- REFERENCES:**
1. Ballesteros-Rodríguez, A., De-Lucio, J., & Sicilia, M.-Á. (2024). Tokenized carbon credits in voluntary carbon markets: The case of KlimaDAO. *Frontiers in Blockchain*, vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbloc.2024.1474540>
 2. Bellavitis, C., & Momtaz, P. P. (2025). Voting governance and value creation in decentralized autonomous organizations (DAOs). *Journal of Business Venturing Insights*, vol. 23, pp. 5–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2025.e00537>
 3. CoinMarketCap. (2025). Base Carbon Tonne price today, BCT to USD live price. Available at: <https://coinmarketcap.com/currencies/toucan-protocol-base-carbon-tonne/> (accessed 14 November 2025).
 4. CoinMarketCap. (2025). KlimaDAO price today, KLIMA to USD live price. Available at: <https://coinmarketcap.com/currencies/klimadao/> (accessed 14 November 2025).
 5. Deknatel, N., & van der Loos, A. (2025). The intangible technological innovation system: The role and influence of voluntary and compliance carbon markets on carbon dioxide removal in the European Union. *Energy Research & Social Science*, vol. 119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103851>
 6. Evro, S., Oni, B. A., & Tomomewo, O. S. (2024). Global strategies for a low-carbon future: Lessons from the US, China, and EU's pursuit of carbon neutrality. *Journal of Cleaner Production*, vol. 461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142635>
 7. First Mover Fund. (n.d.). What is the voluntary carbon market? Available at: <https://firstmoverfund.com/blog/what-is-the-voluntary-carbon-market> (accessed 13 November 2025).
 8. Forest Trends' Ecosystem Marketplace. (2025). State of the voluntary carbon market 2025. Washington DC: Forest Trends, 96 p.
 9. Gupta, A., & Mason, M. (2016). Disclosing or obscuring? The politics of transparency in global climate governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 18, pp. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.11.004>
 10. Hsu, A., et al. (2020). Next-generation digital ecosystem for climate data mining and knowledge discovery: A review of digital data collection technologies. *Frontiers in Big Data*, vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/fdata.2020.00029>
 11. IOSCO. (2024). Voluntary carbon markets, 52 p. Available at: <https://www.iosco.org/library/pubdocs/pdf/IOSCOPD774.pdf> (accessed 14 November 2025).
 12. KlimaDAO. (2025). KlimaDAO: A catalyst for innovation within the voluntary carbon market. Available at: <https://www.klimadao.finance/resources/klimadao-a-catalyst-for-innovation-within-the-voluntary-carbon-market> (accessed 14 November 2025).
 13. KPMG. (2025). Integrity issues in the voluntary carbon markets: Market-based initiatives emerge to address risks. Available at: <https://kpmg.com/xx/en/our-insights/regulatory-insights/integrity-issues-in-the-voluntary-carbon-markets.html> (accessed 14 November 2025).
 14. Mak, W. (2025). Enhancing the voluntary carbon market: Gaps and solutions. CFA Institute Research & Policy Center. Available at: https://rpc.cfainstitute.org/sites/default/files/docs/research-reports/voluntary-carbon-markets-report_online.pdf (accessed 13 November 2025).
 15. Marchant, G., Cooper, Z., & Gough-Stone, P. (2022). Bringing technological transparency to tenebrous markets: The case for using blockchain to validate carbon credit trading markets. *Natural Resources Journal*, vol. 62, is. 2, pp. 159. Available at: <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol62/iss2/2> (accessed 14 November 2025).
 16. Medium. (2025). Step-by-step guide: How to tokenize real-world assets and profit in 2025. Available at: <https://medium.com/coinmonks/step-by-step-guide-how-to-tokenize-real-world-assets-and-profit-in-2025-47b49772f86f> (accessed 14 November 2025).
 17. Namoniuk, V., & Matei, V. (2025). Digital innovation in green finance: Assessing the impact of Hong Kong's pioneering initiatives in tokenized green bonds. *Hong Kong Review of Belt and Road Studies*, vol. 3, no. 1 (6), pp. 6–22. DOI: <https://doi.org/10.63596/oborjournal.3.1.2025.6-22>
 18. OneSafe. (2025). What are tokenized green bonds? Neo-banking for global businesses. Available at: <https://www.onesafe.io/blog/tokenized-green-bonds-sustainable-investing> (accessed 14 November 2025).
 19. Schwahn, J. (2025). Tokenized carbon credits for investors: 2025 insights. *CryptoBit Mag*. Available at: <https://www.cryptobitmag.com/tokenized-carbon-credits-for-investors/> (accessed 13 November 2025).
 20. Science Based Targets Initiative. (2025). Target dashboard. Available at: <https://sciencebasedtargets.org/target-dashboard> (accessed 13 November 2025).
 21. Siphthorpe, A., et al. (2022). Blockchain solutions for carbon markets are nearing maturity. *One Earth*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.06.004>
 22. Spydra. (n.d.). Tokenized green bonds: The smart way to invest in a greener future. Available at: <https://www.spydra.app/blog/tokenized-green-bonds-the-smart-way-to-invest-in-a-greener-future> (accessed 14 November 2025).
 23. Tanveer, U., Ishaq, S., & Hoang, T. G. (2025). Tokenized assets in a decentralized economy: Balancing efficiency, value, and risks. *International Journal of Production Economics*, vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109554>

24. Tlili, H. (2025). Blockchain and tokenized carbon markets: Empirical evidence on market efficiency and transaction dynamics. *Sustainable Futures*, vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101109>
25. Toucan Protocol. (2025). Toucan.earth. Available at: <https://toucan.earth> (accessed 14 November 2025).
26. Woo, J., et al. (2021). Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (MRV) and the carbon credit market: A review of the literature. *Building and Environment*, vol. 205, pp. 108–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108199>

Стаття надійшла: 14.10.2025

Стаття прийнята: 05.11.2025

Стаття опублікована: 28.11.2025