



I. Ю. Цимбалюк<sup>1</sup>, Ю. І. Грицюк<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

## ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОКЕНІЗОВАНИХ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ

Проаналізовано проблему цифрового обліку лісових ресурсів шляхом токенизації активів окремих одиниць деревних насаджень із застосуванням технологій розподілених реєстрів та децентралізованих фінансових засобів. Дослідження засноване на принципах проєктування архітектури програмного забезпечення з використанням відомих способів формулювання функціональних вимог, застосування структурних шаблонів та організації взаємодії програмних модулів. Формалізовано метод подання дерева як невзаємозамінного токена з подальшим інкрементальним оновленням його біометричних властивостей та економічної цінності, дії якого виконують смарт-контракти. Обґрунтовано спосіб поєднання фізичної ідентифікації стовбурів дерев із журналізацією їх життєвого циклу, що дає змогу побудувати цифрову модель природного об'єкта. Розроблено алгоритм генерування моделі екосистеми на рівні блокчейн-мережі як сукупність параметрів індивідуальних насаджень та таксономічних характеристик породи дерева без використання зовнішніх централізованих систем зберігання даних. Встановлено, що механізм автоматичного перерахунку цінності невзаємозамінного токена, через кореляцію з реальними природними процесами, розширює можливості токенизованих активів із детермінованою траєкторією зростання їх вартості. Розширено уявлення про оцінювання деревних насаджень шляхом введення адаптивних коефіцієнтів їхньої цінності, залежних від таксаційних параметрів та природної зони регіону, що надає змогу інтеграції до децентралізованих торгових платформ для отримання ними додаткових можливостей. Досліджено можливість перетворення цифрового активу, еквівалентно до зміни статусу сировини, відстежуючи формальні етапи у децентралізованій мережі. Результати дослідження утворюють методичні засади для розширення можливостей актуалізації цінності оцифрованих активів та пропонують доповнення до стандартів цифрової сертифікації.

**Ключові слова:** відстежуваність деревини засобами блокчейну; токенизація лісоматеріалів; блокчейн-рішення в лісовому господарстві; динамічні активи; управління лісовими ресурсами; програмні застосунки на підставі блокчейн.

### Вступ / Introduction

Оцифрування активів (англ. *Digitisation of Assets*) – масова тенденція, пов'язана із розвитком сфери децентралізованих фінансів. Ідея активів реального світу RWA (англ. *Real World Assets*) [22] полягає у тому, щоб перетворити права на фізичний актив у взаємозамінні токени, які подають частку права власності і надають змогу залучати ліквідність для активів, які фізично неможливо розділити без втрати цінності. Прозорість операцій та швидкість опрацювання даних забезпечується виконанням їх у мережі блокчейн засобами смарт-контрактів. Загальні принципи токенизації активів можуть бути універсальними, однак не бути однаково ефективними для їх різних типів, серед яких потрібно виділити природні. Тут під взаємозамінними токенами будемо розуміти цифрові активи, які можна обміняти один на іншого, оскільки кожен токен є ідентичним іншому.

Існує декілька підходів до застосування технології блокчейн у сфері лісового господарства. Один з основ-

них оперує так званими "вуглецевими кредитами" [18] – взаємозамінними токенами, які застосовують для подання частки цінності насадження у контексті очищення атмосфери від відходів спалювання палива. Тобто для ділянки лісу за певними коефіцієнтами обчислюють середній обсяг біомаси, здатної переробляти вуглекислий газ. Недоліком такого підходу є можливе зменшення обсягу біомаси, закладеного як похибка, і, потенційно, не відповідатиме реальним даним. Другим недоліком є обмеженість сфери застосування "вуглецевих кредитів", адже потреба у збереженні насаджень не відкидає ведення лісового господарства як такого, і необхідність обліку лісу як сировини.

Іншим прикладом застосування технології блокчейн у сфері лісового господарств є облік ланцюгів транспортування деревної сировини задля забезпечення прозорості та відстежуваності її поставок [1]. Акцент поставлено на безпеку даних та усунення деяких недоліків централізованих систем управління, що підвищує рівень реального дотримання екологічних норм.

### Інформація про авторів:

**Цимбалюк Ігор Юрійович**, магістр, асистент, кафедра інженерії програмного забезпечення. Email: [ihortsymbaliuk@nltu.edu.ua](mailto:ihortsymbaliuk@nltu.edu.ua);  
<https://orcid.org/0009-0008-8489-473X>

**Грицюк Юрій Іванович**, д-р техн. наук, професор, кафедра програмного забезпечення. Email: [yurii.i.hrytsiuk@lpnu.ua](mailto:yurii.i.hrytsiuk@lpnu.ua);  
<https://orcid.org/0000-0001-8183-3466>

**Цитування за ДСТУ:** Цимбалюк І. Ю., Грицюк Ю. І. Параметричне моделювання властивостей токенизованих деревних насаджень. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 6. С. 115–122.

**Citation APA:** Tsybaliuk, I. Yu., & Hrytsiuk, Yu. I. (2025). Parametric modelling of the properties of tokenised woodland plantations. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(6), 115–122. <https://doi.org/10.36930/40350614>

Потрібно зазначити, що оцифрування саме лісових ресурсів недостатньо висвітлена у наукових працях, хоча існують певні прикладні проекти, які застосовують принципи токенизації активів саме для лісового сектору економіки. Натомість у них не врахована ключова відмінність природного ресурсу, а саме – змінність. Під час використання токена як фінансового засобу, а саме – подання певної частки цінності активу, сама цінність не може визначитися як стала через природні процеси та зміни властивостей лісових насаджень упродовж певного часу, що не передбачали попередні дослідження.

На підставі зазначеного вище актуальним завданням є розроблення та впровадження програмного забезпечення в мережу блокчейн, яке буде виконувати:

1. Ідентифікацію окремих дерев як одиниці активу у контексті регіону, до якого вони належать, та відповідний взаємозв'язок між ними.
2. Динамічне обчислення цінності активу на підставі функцій моделювання росту дерев для визначення потенційного об'єму ресурсів.
3. Застосування відповідних таксаційних правил до груп активів задля актуалізації фінансових очікувань стосовно них.

Зазначене вище є необхідним для отримання актуальної інформації про цінність лісових активів у контексті децентралізованих фінансових систем.

*Об'єкт дослідження* – параметричне моделювання властивостей токенизованих деревних насаджень.

*Предмет дослідження* – методи і засоби токенизації лісових активів із недетермінованими властивостями, що базуються на імплементації їхньої взаємодії в межах множини невзаємозамінних токенів задля визначення похідної цінності деревних насаджень.

*Мета роботи* – здійснити параметричне моделювання властивостей токенизованих деревних насаджень з використанням технології блокчейн, результати якого дадуть можливість їх застосувати для актуалізації інформації про ціннісні властивості природних ресурсів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати наявні підходи до впровадження програм у мережі блокчейн для обліку лісових активів, що дасть змогу визначити їхні основні переваги та недоліки задля формування функціональних вимог до створення цільового програмного засобу;
- розробити архітектуру програмного забезпечення, яке імплементує взаємодію в межах множини невзаємозамінних токенів задля визначення похідної цінності конкретної одиниці лісового активу, яка детермінована змінними умовами середовища;
- реалізувати прототип програмного засобу та провести його тестування, щоби визначити його придатність до використання порівняно з наявними рішеннями.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Застосування технології блокчейн у лісгосподарській діяльності досліджено у низці наукових публікацій [1, 17, 23], які пропонують вирішення різного класу проблем, пов'язаних із обліком і транспортуванням деревини.

У дослідженні [1] розглянуто особливості застосування самостійної цифрової ідентичності SSDI (англ. *Self-Sovereign Digital Identity*) та технології блокчейн в управлінні ланцюгами постачання сировини задля підвищення відстежуваності, сталості та відповідності нормативним вимогам. У роботі проаналізовано, як ці технології можуть подолати обмеження традиційних

систем керування об'єктами та покращити прозорість, ефективність й екологічну відповідальність у лісгосподарських заходів. Для дослідження було використано блокчейн-фреймворк, заснований на платформі Ethereum, з акцентом на таких показниках, як пропускна здатність транзакцій та їхня затримка. Проведені експериментальні випробування для оцінювання продуктивності SSDI у лісових ланцюгах постачання показують, що інтеграція SSDI з блокчейном істотно підвищує відстежуваність і сталість в лісових ланцюгах постачання, забезпечуючи високі показники транзакцій та зменшення затримки в часі.

Наукова робота [17] описує впровадження технології блокчейн у лісовому господарстві та ланцюгах постачання деревини, аби, завдяки характеристикам, таким як відстежуваність, децентралізація, верифікованість та незмінність, можна було б подолати інформаційну асиметрію між фізичним рухом деревини та цифровим обміном інформацією. Згідно з ним, у ланцюзі постачання лісопродукції існує певний потенціал для застосування цієї технології. Прозорість, яку забезпечує технологія блокчейн, відкриває можливості для ефективної боротьби з торгівлею незаконно зрубаною деревиною та сприяння сталому лісокористуванню, наприклад через системи її сертифікації. Одним із способів досягнення цього є повна відстежуваність продукції до моменту її заготівлі. Для цього необхідно виконати низку вимог із заміни паперових записів на цифрові. Як було зазначено вище, впровадження технології блокчейн вже відзначалося у кількох проєктах, демонструє приклади застосування, які показують можливість підвищення ефективності процесів у лісовому господарстві, таких як відстеження екологічних проєктів та розроблення довіри у програмах на кшталт REDD+ (англ. *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*). Перераховані у статті приклади дають результати аналізу сфер застосування, які здебільшого базовані на прототипах і наукових дослідженнях.

Унаслідок дослідження [23] розроблено систему управління лісовими ресурсами на підставі технології блокчейн, яка забезпечує моніторинг та планування лісових ресурсів у реальному часі. Систему можна вдосконалити за такими параметрами, як розмір блоку, алгоритми консенсусу, пропускна здатність та інші аспекти, що підвищує її зручність та ефективність використання. Запропонована система забезпечує безпечний обмін даними та відстежуваність власності на лісові ресурси. Завдяки використанню безпілотних літальних апаратів для верифікації на місцях та технології блокчейн підвищується надійність і ефективність управління лісовими ресурсами, а також знижуються витрати. Система пропонує інноваційні рішення у таких аспектах, як достовірність даних, механізми співпраці, інтелектуальне прийняття рішень та сталий розвиток, а також визначає напрями майбутнього її розвитку.

Використання технології блокчейн для спрощення бюрократичних процесів описано у роботі [21], де запропоновано архітектуру обміну даними, яка використовує шифрування даних на підставі атрибутів з багатоврівневним управлінням MA-ABE (англ. *Multi-Authority Attribute-Based Encryption*). Ця модель підтримує проксі-шифрування, відкликання атрибутів та оновлення політик інформаційної безпеки, одночасно надаючи змогу

кожному учаснику автономно керувати своїми ключами, що забезпечує безпеку системи та підвищує довіру серед учасників. Для посилення децентралізації системи в архітектурі передбачено механізм, де кілька установ взаємодіють зі смарт-контрактами та спільно беруть участь у генеруванні публічних параметрів. Інтеграція MA-ABE з багатостороннім рушієм виконання процесів підвищує прозорість обміну інформацією та співпрацю між різними організаціями.

Система, запропонована у дослідженні [16], використовує докази з нульовим розголошенням ZKP (англ. *Zero-Knowledge Proof*) для відстеження деревини, записані у публічному блокчейні. Деревина може перебувати в кількох станах, починаючи від живих дерев до колод, пиломатеріалів та виробів з деревини. Перевагою використання блокчейну для ведення записів є те, що учасники можуть вільно фіксувати інформацію на власний розсуд без будь-яких обмежень. У своєму дослідженні автори застосовують ZKP та NFC-чипи (англ. *Near-Field Communication*) для усунення недоліку, пов'язаного із внесенням недостовірної інформації. Порядковий номер дерева залишається прихованим, а ідентифікатор об'єкта деревини визначається як хеш-значення цього порядкового номера і записується на чип.

У дослідженні [10] проаналізовано розроблення у сфері відстеження транспортування деревини. Висновки містять опис перспективи розвитку технологій, які, за умови відповідних стимулів економічного, екологічного, споживчого та законодавчого характеру, можуть привести до широкого впровадження без переривання роботи підприємства. Обґрунтоване рішення полягає в оптичних біометричних системах, які ідентифікують окремі шматки деревини – без додавання чого-небудь – у трьох ключових точках: під час сортування на трельовальній стежці, на лісовій дорозі та на вході на пиломатеріалів. У всіх цих точках дані, що нагромаджуються під час процесу постачання деревини, повинні бути пов'язані з ідентифікатором шматка деревини за допомогою управління даними.

Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій виявив, що більшість проєктів блокчейн-систем управління лісовими ресурсами застосовують статичне подання лісових активів як групових показників насаджень або конкретних ділянок без індивідуального розпізнавання окремих дерев як об'єктів. Вони покладаються на ручне введення таксаційних даних та зберігання біометричних характеристик насаджень у централізованих базах. Концепцію збереження екологічної рівноваги засобами блокчейн-технологій розглянуто у контексті розроблення децентралізованих систем моніторингу та фіксації екосистемних даних. Потенціал використання блокчейн для розроблення достовірних записів про стан природних ресурсів без залучення централізованих органів сертифікації становить фундамент подальших розробок.

У підсумку можна стверджувати, що наявні проєкти використовують невзаємозамінні токени для подання груп насаджень або земельних ділянок без формування індивідуального життєвого циклу кожного дерева із власною функцією зростання, а отже, вказана ніша має потенціал для дослідження.

**Матеріали та методи дослідження.** У дослідженні здійснено аналіз та опрацювання цільової проблеми

зادля розроблення програмного забезпечення, яке володітиме відповідними функціональними властивостями. Матеріальним фундаментом дослідження є формалізовані статистичні набори даних, математичні моделі прогнозування біофізичних параметрів насаджень, алгоритми оцінювання динаміки природи об'єму та структури деревостану, а також методи обчислення таксаційних характеристик, що забезпечують можливість інтеграції предметної області в програмному поданні. Методологічно робота опирається на принципи розроблення смарт-контрактів та комунікацію ізольованих програм із даними реального світу, технології цифрової ідентифікації та управління доступом.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Програмне рішення щодо параметричного моделювання властивостей токенизованих деревних насаджень з використанням технології блокчейн засноване на концепції розроблення невзаємозамінного токена для кожної індивідуальної одиниці насаджень з подальшим динамічним оновленням його параметрів через відповідні методи смарт-контракту довіреними оракулами, зареєстрованими у відповідальному суб'єкті лісового господарства. Тут під оракулами будемо розуміти сторонні сервіси, які надають смарт-контрактам дані із зовнішніх джерел, виступаючи посередниками між блокчейном та реальним світом [14]. Вони необхідні, оскільки смарт-контракти за своєю природою не можуть самостійно отримувати інформацію ззовні мережі.

Формалізовано модель подання дерева як цифрового активу шляхом розроблення структури даних, що містить унікальний ідентифікатор токена, таксономічні характеристики породи дерева, географічні координати місця садіння, часову мітку створення запису та масив біометричних параметрів з можливістю їхнього оновлення. Було обрано модель невзаємозамінного токена, позаяк кожна одиниця лісового активу має свої властивості, а отже, і результати моделювання їхньої цінності будуть різними. Водночас, взаємозамінні токени, як зрозуміло із визначення, наведеному у вступі, містять частку узагальненої цінності.

Однак, невзаємозамінні токени – це унікальні цифрові активи, що представляють право власності на цифрові об'єкти. Кожен невзаємозамінний токен прив'язується до конкретного фізичного саджанця:

$$NFT(t) = \left( \begin{array}{l} Token(t) \wedge \exists id TokenId(t, id) \\ \wedge \exists s Species \\ \wedge \exists ts PlantingDate \\ \wedge \exists lat \exists lon Location(t, lat, lon) \\ \wedge \exists addr Owner(t, addr) \\ \wedge LinkedToTree(t) \\ \\ \wedge \exists o \exists area \left( \begin{array}{l} Oracle(o) \\ \wedge TreeArea(t, area) \\ \wedge AssignedToArea(o, area) \\ \\ \left( \begin{array}{l} BiometricRecord(t, r) \rightarrow \\ ProvidedBy(r, o) \\ \wedge \exists ts_b \wedge \exists d \wedge \exists h \wedge \\ \wedge \forall r \left( \begin{array}{l} RecordTimestamp(r, ts_b) \\ \wedge Diameter(r, d) \\ \wedge Height(r, d) \\ \wedge VitalState(r, v) \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right)$$

де: *id* – унікальний ідентифікатор токена; *s* – таксономічна назва породи дерева; *ts* – час висаджування; *lat*,

*lon* – географічні координати WGS84; *addr* – адреса власника токена; *ts* – час біометричного вимірювання; *d* – діаметр стовбура; *h* – висота дерева; *v* – стан життєздатності; *LinkedToTree(t)* гарантує відповідність токена реальному саджанцю; *Oracle(o)* – оракул, відповідальний на зону, на якій розміщене дерево; *TreeArea(t, area)* – територія; *AssignedToArea(o, area)* – відповідність оракула та території; *BiometricRecord(t, r)* – інформація про об'єкт; *ProvidedBy(r, o)* – посилання на оракула; *RecordTimestamp(r, ts<sub>b</sub>)* – час створення запису; *Diameter(r, d)* – діаметр у цифровому записі; *Height(r, h)* – висота у цифровому записі; *VitalState(r, h)* – стан у цифровому записі.

Загальну хронологію оброблення даних подано на блок-схемі (рис. 1). Механізм створення нового токена активується через виклик функції смарт-контракту, що приймає параметри породи дерева, координат висаджування та ідентифікатора.

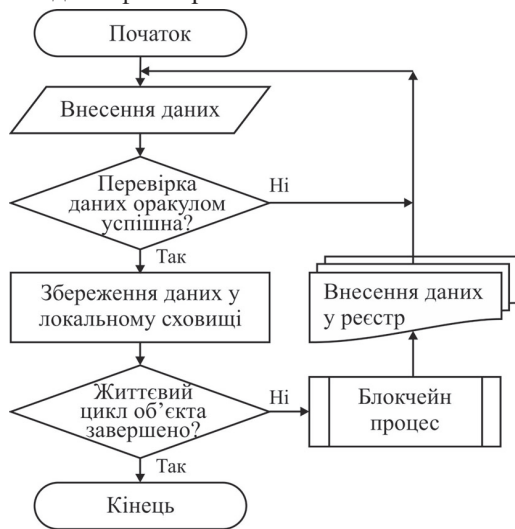


Рис. 1. Логічна архітектура взаємодії компонентів системи / Logical architecture of interaction of system components

Структура невзаємозамінного токена реалізована як розширення базового стандарту ERC-721 [3] шляхом додавання спеціальних полів для зберігання біологічних параметрів дерева. Базові поля токена містять породу дерев, дату висаджування у форматі часової мітки Unix, географічні координати у системі WGS84 та адресу власника у блокчейн-мережі.

Функція генерує унікальний числовий ідентифікатор токена через комбінацію часової мітки створення транзакції, адреси створювача та псевдовипадкового числа, отриманого з хешу-блоку. Після генерування ідентифікатора смарт-контракт створює запис у розподіленому реєстрі з початковими параметрами та встановлює адресу – як власника токена, що ініціювала транзакцію створення.

Математична функція для обчислення об'єму деревини базується на адаптації формули Чапмена-Річардса [11], призначеної для визначення запасу деревини з використанням параметрів віку насадження, діаметра стовбура та специфічних для конкретного виду коефіцієнтів росту. Функція обчислення об'єму деревини реалізована як метод смарт-контракту, що набуває ідентифікатор токена та поточну часову мітку для визначення віку дерева через різницю з датою садіння. Програма отримує з розподіленого реєстру актуальні значення діаметра стовбура, висоти дерева та специфічні коефі-

цієнти росту для обраної таксономічної одиниці. Коефіцієнти росту зберігаються у смарт-контракті як незмінювані пари назв порід та числових параметрів формули обчислення.

Обчислення об'єму деревини здійснюють за такою формулою [5]:

$$V = a \cdot (1 - \text{Exp}(-b \cdot t))^c \cdot D^d \cdot H^e,$$

де: *t* – вік дерева, роки; *D* – діаметр стовбура, см, *H* – висота дерева, м; *a*, *b*, *c*, *d*, *e* – коефіцієнти, які враховують породу дерева.

Видоспецифічні коефіцієнти формули визначаються попередньо для цільових порід дерев [13]. Ця інформація зберігається як незмінна структура даних. Оновлення інших біометричних параметрів токена відбувається автоматично, отримуючи дані з оракулів зареєстрованих лісових господарств. За згаданими вище коефіцієнтами [11] функція зростання для *Quercus robur* (дуб звичайний) матиме такий вигляд (рис. 2). Класи визначають домінуючу висоту у певному віці, якої може досягнути дерево за типових для цільового регіону умов.

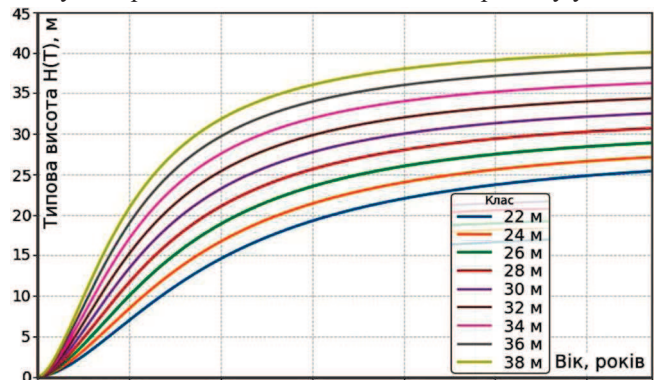


Рис. 2. Графік функції Чапмена-Річардса для дуба звичайного / Chapman-Richards function chart for common oak

Окрім цього, базову модель економічного оцінювання токенів [18] було розширено шляхом введення адаптивних коефіцієнтів вартості, які залежать від екологічного стану територій, створюючи геоетномічний механізм для заохочення відновлення лісового покриву в регіонах з його дефіцитом. Коефіцієнт екологічної цінності ділянок *K* обчислюють як функцію повноти лісової рослинності на територіальній одиниці навколо місця розташування насадження.

Алгоритм визначення екологічного коефіцієнта реалізовано через інтеграцію смарт-контракту з географічними даними про розподіл лісового покриву. Географічні координати дерева, збережені у структурі токена, використовують для визначення регіональної приналежності насадження шляхом обчислення відстані до центрів територіальних одиниць з відомими показниками лісового покриву. Коефіцієнт екологічної цінності обернено пропорційний до густоти лісового покриву у регіоні та пропонується обчислювати за формулою [13]:

$$K = 1 + \frac{F_{\max} - F_r}{2F_{\max}} + T,$$

де: *F<sub>r</sub>* – частка лісистості регіону, %; *F<sub>max</sub>* – максимальна частка повноти лісу; *T* – відносний таксаційний коефіцієнт у регіоні.

Територіальний розподіл екологічних коефіцієнтів формує диференціацію вартості токенів залежно від місця розташування насадження. Для регіонів з лісис-

тістю понад 40 % встановлено базовий коефіцієнт на рівні 1.0, що не змінює економічну оцінку токена. Для регіонів з лісистістю у діапазоні 20-40 %% коефіцієнт зростає пропорційно до 1,25. Для регіонів з лісистістю менше 20 % коефіцієнт досягає максимального значення 1,5, що збільшує вартість токена на 50 % порівняно з базовою оцінкою. Додаткові параметри розрахунку передбачається вводити згідно із затвердженими таксаційними таблицями.

Як було згадано вище, усереднене значення цінності ділянки може містити значні допуски, що можна вирішити внаслідок використання пропонованого підходу зі застосуванням такої функції:

$$Val = \sum_{i=1}^N V_i \cdot k_{S_i} \cdot f(p_i),$$

де:  $N$  – кількість об'єктів;  $V_i$  – об'єм сировини для  $i$ -го об'єкта;  $S_i$  – порода дерева для  $i$ -го об'єкта;  $k_{S_i}$  – таксаційний коефіцієнт породи дерева для  $i$ -го об'єкта;  $p_i$  – координати  $i$ -го об'єкта;  $f(\bullet)$  – функція доступності за вказаними координатами.

Механізм контролю за нелегальним вирубуванням лісу базується на автоматичній зміні статусу невзаємозамінного токена у разі виявлення несанкціонованої зміни стану запису без відповідної транзакції у розподіленому реєстрі. Алгоритм виявлення порушень може мати варіації залежно від обраної моделі сканування території. Результати сканування передаються до програмного інтерфейсу системи, що виконує порівняння отриманих даних з очікуваним станом радіочастотних міток згідно з інформацією у розподіленому реєстрі.

Легальна процедура вирубування дерева реалізована через механізм санкціонованої зміни статусу токена авторизованими операторами лісового господарства. Оператор ініціює транзакцію вирубування через виклик спеціалізованого методу смарт-контракту, що приймає ідентифікатор токена, дозвілну документацію у формі цифрового підпису уповноваженого органу та плану дату виконання рубки. Після успішної перевірки дозвільної документації статус токена змінюють на "санкціоновано до рубки" з фіксацією реквізитів дозвільного документа та часової позначки транзакції у розподіленому реєстрі.

Фіксацію факту вирубування здійснюють через створення оракулом відповідної транзакції безпосередньо після виконання рубки для підтвердження видалення дерева з місця розташування. Інтерфейс програмного забезпечення створює фінальну транзакцію для зміни статусу токена на "зрізано" шляхом введення ідентифікації оператора, який виконав зрізання, позначки часу завершення операції та додаткових метаданих щодо обсягу зібраної деревини. Токен зберігається як незмінна історія життєвого циклу дерева у розподіленому реєстрі, що може використовуватися для відстеження походження зібраної деревини в ланцюгах постачання лісо-продукції.

Процедура отримання відповідної сировини відбувається шляхом взаємодії власника токена з лісогосподарським підприємством для організації фізичної заготовки деревини на місці розташування насадження. Суб'єкт лісового господарства підтверджує право власника на вилучення дерева через зчитування ідентифікатора позначки дерева, запит відповідного токена з розподіленого реєстру та перевірку статусу токена на предмет наявності активного резервування.

Після підтвердження прав власності оператор може виконати збирання деревини та створити фінальну транзакцію, яка завершує викуп, викликавши відповідний метод смарт-контракту та додавши метадані про обсяг зібраної деревини та дату операції. Документування подій у розподіленому реєстрі можливо застосувати для автоматизованого підтвердження походження деревини у ланцюгах постачання лісової продукції через використання невзаємозамінних токенів як цифрових сертифікатів легальності заготовки (рис. 3).



Рис. 3. Ланцюг постачання лісової продукції / Forest products supply chain

Кожна одиниця заготовленої деревини прив'язується до відповідного токена шляхом запису його ідентифікатора відповідно до супровідної документації, за якими є можливою верифікація повної історії дерева, опрацьовуючи відповідні дані з розподіленого реєстру. Відкритість даних у блокчейні надає змогу незалежній перевірці походження деревини будь-яким учасником ланцюга постачання або безпосереднім споживачем лісової продукції, використовуючи вебінтерфейс системи, яка робитиме запити до блокчейн-вузлів. Об'єднання засобів токенизації активів з наявними інформаційними системами обліку лісових ресурсів дасть змогу узгоджувати формати даних задля сумісності з державними реєстрами лісових ресурсів та системами документообігу лісогосподарських підприємств.

Розроблене програмне забезпечення було розгорнуто на базі тестової мережі Polygon Mumbai. Задля валідації прогнозованої функціональної переваги, на підставі нормального розподілу, згенеровано тестовий набір даних та виконано моделювання ділянок (рис. 4). Для порівняння результатів обрано метод пробних ділянок [11].

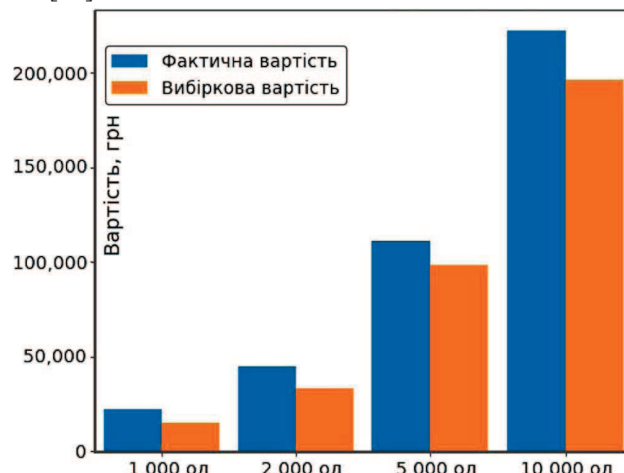


Рис. 4. Порівняння результатів оцінювання вартості розробленим програмним забезпеченням та методом пробних ділянок / Comparison of cost estimation results using the developed software and the trial plot method

Отримані результати свідчать про систематичну помилку при використанні усереднених значень, яка зростає зі збільшенням площі лісової ділянки та неоднорідністю насаджень.

**Обговорення результатів дослідження.** У роботі [6] проаналізовано результати дослідження щодо застосування блокчейн у лісовому секторі. Проведений систематичний аналіз виявив переваги, можливості та виклики програм на підставі блокчейн у лісовому секторі. Результати вказують на великий потенціал блокчейну у сталому лісовому господарстві, зменшенні незаконного вирубування, збереженні біорізноманіття та в багатьох інших аспектах лісового господарства. Водночас, зазначено, що ця технологія все ще є недосконалою та складною і потребує зусиль для впровадження.

Дослідження [20] описує розроблення системи відстежування міжнародних перевезень деревини, що передбачає контекст застосування, основних учасників, систему відстеження та операційну модель. Виявлено, що консорціумна блокчейн-мережа, сформована підприємствами лісової галузі, урядовими органами та сторонніми агентствами з перевірки, є ефективним способом проведення міжнародних перевезень деревини. Зазначені учасники формують консорціум і через єдиний консенсус та технічний контроль створюють екосистему із взаємною довірою та контролем ризиків. Упродовж процесу торгівлі деревиною власники лісів, пилопрами, експортери, імпортери та переробні підприємства послідовно вводять дані, необхідні для транзакцій та простежуваності. Лісові органи, митні та інші регулятивні органи обох країн – імпортери та експортери – стежать за перебігом торгівлі деревиною та посилюють контроль за незаконними перевезеннями. Сторонні агентства з перевірки переглядають і верифікують дані, надані лісовими підприємствами.

Робота [4] описує дослідження, яке впроваджує технологію блокчейн для електронного відстеження деревини від стоячого дерева до безпосереднього споживача. Система інтегрує інформацію, пов'язану з якістю продукту, з даними, що стосується відстеження (фізичні та цифрові документи) у межах інформаційної системи, транзакції якої можна захистити від змін за допомогою блокчейн. Він виступає децентралізованим та розподіленим реєстром, який зберігає записи цифрових транзакцій так, щоб вони були доступними та видимими для кількох учасників мережі, одночасно забезпечуючи їхню безпеку без необхідності централізованого сертифікаційного органу. Архітектура заснована на RFID (англ. *Radio Frequency Identification*) сенсорах та технологіях з відкритим кодом. Весь ланцюг постачання деревини було змодельовано від живих дерев до остаточного продукту, проходячи процеси вирубування та оброблення. Було використано IoT (англ. *Internet of Things*) пристрої та теги, а також розроблено спеціальний застосунок для лісових операцій, який дає змогу збирати та зберігати в базі даних інформацію (наприклад, вид деревини, дата, місце, дендрометричні та комерційні характеристики).

У роботах [14, 15] наведено трансформаційний підхід до відстеження та ідентифікації деревини тика на підставі блокчейну. Автори стверджують, що технологія блокчейн стала надзвичайно популярною завдяки своїм відмінним властивостям незмінності та відстежу-

ваності, які дають змогу подолати різноманітні проблеми. Щоб позбутися незаконного вирубування деревини тикового дерева та досягти відстежуваних, прозорих та надійних даних про тик, які переміщуються через ланцюг поставок, науковці подали децентралізований додаток (DApp) на підставі блокчейну Ethereum, який реалізує систему відстеження для ідентифікації тика. Згідно з результатами проведеного експерименту, їхній DApp досягає гарного компромісу між вартістю транзакцій системи в 116 тис. одиниць транзакційної вартості (2,53 дол. США) для зберігання даних у блокчейні Ethereum та забезпеченням високого рівня безпеки, прозорості, конфіденційності, стійкості та надійності. Вони помітили, що запропонована система на підставі блокчейну може зменшити незаконне вирубування лісу, використання паперової документації та час, необхідний для перевірки документації в системах контролю ланцюга поставок, порівняно із традиційним процесом, що використовується в ланцюжку поставок.

У роботі [2] наведено смарт-контракти на базі блокчейну для безпечного та прозорого відстеження деревини, покращення прозорості та довіри споживачів у лісовій промисловості. Автори зосереджуються на таких проблемах, як незаконне вирубування деревини та непрозорості ланцюга поставок, пропонуючи фреймворк на підставі блокчейну для управління ключовими процесами: реєстрація лісозаготівель, оцінка та сертифікація якості, передача права власності та перевірка споживачів. Дослідження демонструє, як смарт-контракти можуть автоматизувати та захистити ці операції, забезпечуючи цілісність даних та оптимізуючи взаємодію в ланцюгу поставок. Для оцінювання продуктивності системи було використано симульоване середовище блокчейну. Результати симуляції показали, що середня пропускна здатність транзакцій досягла 320 транзакцій за секунду, тоді як споживання енергії на транзакцію зменшилося від 400 до 200 Дж зі збільшенням їхнього обсягу. Плата за транзакцію лінійно зростала зі складністю контракту, що вказує на важливість операційної оптимізації для ефективності та економічної ефективності. Новизна дослідження полягає в його цілісній інтеграції блокчейну та смарт-контрактів у робочі процеси ланцюга поставок деревини. Воно наголошує не тільки на технічній реалізації, але й на масштабованості, енергоефективності та необхідності систем, що підлягають аудиту та зберігають конфіденційність. Розроблена модель пропонує практичну інформацію для покращення законності, сталості та підзвітності у світовій торгівлі деревиною.

У роботі [12] наведено результати аналізу особливостей відстеження деревини, визначення ефективних методів боротьби з незаконним вирубуванням деревини в Африці. Автори вважають, що ефективна боротьба з незаконним вирубуванням лісів є вкрай важливою, особливо в африканському контексті, який є найбільш вразливим до вирубування лісів регіоном і має менше сертифікованих лісів і систем відстеження. Відстеження деревини містить відстеження та моніторинг видів від лісу до їх безпосереднього використання, спрямоване на підтримку лісозаготівель з низьким впливом на навколишнє середовище та захист лісового біорізноманіття. Відстеження деревини може бути сплановано навмисно, починаючи з дерева в лісі, або до, або під час

заготівлі (перспективний метод); або його можна використовувати для перевірки чи визначення географічного походження деревини, що перебуває на ринку (ретроспективний метод). На підставі бібліографічного пошуку в Scopus було зібрано наявну літературу з відстеження деревини в усьому світі, щоб визначити ті, що впроваджуються в Африці, та ті, що можуть сприяти ефективній боротьбі з незаконним вирубуванням лісів на континенті. Найбільш використовуваними методами відстеження в усьому світі з корисними результатами є анатомічні характеристики деревини, методи ДНК, лісове законодавство та сертифікація, марковані поверхні дерев'яних дощок, QR-коди, RFID, NIRS, блокчейн та співвідношення стабільних ізотопів.

Запропонований у поточному дослідженні підхід має низку переваг відносно описаних рішень. Він забезпечує функціональну актуалізацію даних, збережених у розподіленому реєстрі. Тобто оцінювальна цінність лісової ділянки може бути обчислена без усереднення, тобто шляхом нехтування дійсними даними на користь статистичних, для спрощення процесу, а використання таксаційних параметрів – також враховує вартість вироблення сировини для регіону, який пов'язаний із координатами кожного дерева.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – отримала подальший розвиток методика токенизації активів лісового фонду, яка, на відміну від наявних, враховує такі ключові процеси, як реєстрацію лісозаготівель, передачу права власності та перевірку споживачів, що дає змогу динамічно оновлювати вартість лісового активу на підставі природних властивостей об'єктів та таксаційних даних.

*Практична значущість результатів дослідження* – запропоновану методику токенизації активів лісового фонду можна використати для впровадження у системах децентралізованих фінансів як засобу підрахунку актуальної цінності визначених лісових активів.

## Висновки / Conclusions

Здійснено параметричне моделювання властивостей токенизованих деревних насаджень з використанням технології блокчейн, результати якого дали можливість їх застосувати для актуалізації інформації про ціннісні властивості природних ресурсів. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Унаслідок аналізу наявних підходів до впровадження програм у мережі блокчейн для обліку лісових активів було визначено ключові властивості сучасних рішень. Це дало змогу виокремити закономірності використання технології блокчейн у сфері природних ресурсів та сформулювати обґрунтований перелік функціональних вимог до цільового програмного засобу. Зокрема, встановлено, що використання динамічної токенизації забезпечує можливість відстеження індивідуального життєвого циклу деревини та кореляцію її вартості з природними процесами, що формує принципово іншу модель цінності порівняно з традиційними крипто-активами.
2. Розроблена архітектура програмного забезпечення продемонструвала концептуальну можливість параметричного моделювання фізичних властивостей лісових ак-

тивів і підтримки інкрементального оновлення їхньої вартості. Такий підхід забезпечує передбачувану динаміку зміни цінності активів, підвищує достовірність оцінювання та створює передумови для формування нового сегмента фінансових інструментів на базі децентралізованих програмних систем.

3. Створений прототип програмного засобу та результати його тестування підтвердили практичну придатність розроблених механізмів і дали змогу оцінити їх переваги порівняно з наявними рішеннями. Нефункціональні характеристики системи, обґрунтовані теоретично через властивості технології розподілених реєстрів. Отримані результати засвідчили можливість подальшого розширення функціоналу та адаптації системи під потреби лісового господарства, включно з інтеграцією в уніфіковані дані екосистеми.

## References

1. Damaševičius, R., & Maskeliūnas, R. (2025). An analytical approach to blockchain-driven identity management in sustainable forest supply chains. *Supply Chain Analytics*, 12, article ID 100161. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100161>
2. Damaševičius, R., & Maskeliūnas, R. (2025, November). Blockchain-enabled smart contracts for secure and transparent timber traceability. *Journal of Industrial Information Integration*, 48, article ID 100934. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100934>
3. ERC-721. (2025). erc721.org. URL: <https://erc721.org>
4. Figorilli, S., Antonucci, F., Costa, C., Pallottino, F., Raso, L., Castiglione, M., Pinci, E., Del Vecchio, D., Colle, G., Proto, A. R., Sperandio, G., & Menesatti, P. (2018). A blockchain implementation prototype for the electronic open-source traceability of wood along the whole supply chain. *Sensors*, 18(9), article ID 3133. <https://doi.org/10.3390/s18093133>
5. Gove, J. H., Lynch, T. B., & Ducey, M. J. (2019). The Chapman – Richards distribution and its relationship to the generalized beta. *Forest Ecosystems*, 6(27). <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0184-0>
6. He, Z., & Tumer, P. (2022). Blockchain applications in forestry: A systematic literature review. *Applied Sciences*, 12(8), article ID 3723. <https://doi.org/10.3390/app12083723>
7. Hrytsiuk, Y. I. (2022). Features of giving preference to the characteristics of the software product quality model. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(3), 79-102. <https://doi.org/10.36930/40320313>
8. Hrytsiuk, Y. I., & Dyak, T. P. (2021). The use of internet technologies in educational process in higher education institutions. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(1), 137-146. <https://doi.org/10.36930/40310123>
9. Hrytsiuk, Y. I., & Mukha, T. O. (2020). Methods of determination of quality of software. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(1), 158–167. <https://doi.org/10.36930/40300127>
10. Kaulen, A., Stopfer, L., Lippert, K., & Purfürst, T. (2023). Systematics of forestry technology for tracing the timber supply chain. *Forests*, 14(9), article ID 1718. <https://doi.org/10.3390/fl4091718>
11. Kazimirović, M., Stajić, B., Petrović, N., Ljubičić, J., Košanin, O., Hanewinkel, M., Krumm, F., & Šperlich, D. (2024). Dynamic height growth models for highly productive pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands: Explicit mapping of site index classification in Serbia. *Annals of Forest Science*, 81(1), 1–17. <https://doi.org/10.1186/S13595-024-01231-0>
12. Murielle Féty Tonouéwa, J. F., & Honoré Biaou, S. S., et al. (2024, December). Timber traceability, determining effective methods to combat illegal logging in Africa: A review. *Trees, Forests and People*, vol. 18, article ID 100709. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100709>
13. Protazio, J. M. B., Souza, M. A., Hernández-Díaz, J. C., Escobar-Flores, J. G., López-Sánchez, C. A., Carrillo-Parra, A., & Wehenkel, C. (2022). A dynamical model based on the Chapman – Richards growth equation for fitting growth curves for four pine species in Northern Mexico. *Forests*, 13(11), article ID 1866. <https://doi.org/10.3390/fl13111866>

14. Sheng, S. W., & Wicha, S. (2021). The Proposed of a Smart Traceability System for Teak Supply Chain Based on Blockchain Technology. 2021 *Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunication Engineering*, Cha-am, Thailand, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1109/ECTIDAMTNCOS51128.2021.9425780>
15. Sheng, S. W., & Wicha, S. (2024, March). Blockchain-Based Traceability for Teak Identity: A Transformational Approach. *Journal of Mobile Multimedia*, 20(2), 267–306. <https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.2022>
16. Shibano, K., Nakajima, T., & Mogi, G. (2022). Wood traceability system using blockchain and zero-knowledge proof. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.11136>
17. Stopfer, L., Kaulen, A., & Purfürst, T. (2024). Potential of blockchain technology in wood supply chains. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216, article ID 108496. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108496>
18. Swinkels, L. (2024). Trading carbon credit tokens on the blockchain. *International Review of Economics & Finance*, 91, 720–733. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2024.01.012>
19. Torskyi, O. I., & Hrytsiuk, Y. I. (2025). Application of machine learning to enhance the efficiency of automated software testing. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 142–149. <https://doi.org/10.36930/40350416>
20. Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2022). The theoretical framework and application of cross-border timber traceability based on blockchain technology. *American Journal of Environmental and Resource Economics*, 7(3), 89–95. <https://doi.org/10.11648/j.ajere.20220703.12>
21. Xiao, S., Tian, Y., & Dang, Z. (2025). Blockchain-based framework for secure sharing of cross-border trade data. *Computers, Materials & Continua*, 83, 2351–2373. <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.062324>
22. Yousaf, I., Assaf, A., & Demir, E. (2024). Relationship between real estate tokens and other asset classes: Evidence from quantile connectedness approach. *Research in International Business and Finance*, 69, article ID 102238. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102238>
23. Zhang, L., Qu, H., Liu, K., & Wang, Y. (2023). Forest resource management system based on blockchain. *CERNE*, 29. <https://doi.org/10.1590/01047760202329013259>

**I. Yu. Tsybaliuk<sup>1</sup>, Yu. I. Hrytsiuk<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> National Forestry University of Ukraine, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup> Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## PARAMETRIC MODELLING OF THE PROPERTIES OF TOKENISED WOODLAND PLANTATIONS

The problem of digital accounting of forest resources by tokenising the assets of individual tree stands using distributed ledger technologies and decentralised financial instruments is analysed. The research is based on the principles of software architecture design using well-known methods of formulating functional requirements, applying structural patterns, and organising the interaction of software modules. The method of representing a tree as a non-interchangeable token with subsequent incremental updating of its biometric properties and economic value, the actions of which are performed by smart contracts, has been formalised. A method for combining physical identification of tree trunks with logging of their life cycle has been substantiated, which makes it possible to build a digital model of a natural object. An algorithm has been developed for generating an ecosystem model at the blockchain network level as a set of parameters of individual plantings and taxonomic characteristics of tree species without the use of external centralised data storage systems. It has been established that the mechanism of automatic recalculation of the value of a non-fungible token, through correlation with real natural processes, expands the capabilities of tokenised assets with a deterministic trajectory of their value growth. The concept of tree plantation valuation has been expanded by introducing adaptive coefficients of their value, depending on taxation parameters and the natural zone of the region, which allows integration into decentralised trading platforms to obtain additional opportunities. The possibility of transforming a digital asset, equivalent to a change in the status of raw materials, by tracking formal stages in a decentralised network has been investigated. The results of the study form the methodological basis for expanding the possibilities of actualising the value of digitised assets and offer additions to digital certification standards. The created prototype of the software tool and the results of its testing confirmed the practical applicability of the developed mechanisms and made it possible to evaluate their advantages compared to existing solutions. The non-functional characteristics of the system are theoretically justified by the properties of distributed registry technology. The results obtained confirmed the possibility of further expansion of the functionality and adaptation of the system to the needs of forestry, including integration into a unified ecosystem.

**Keywords:** timber blockchain traceability; timber tokenization; blockchain applications forestry; dynamic assets; forest resource management; blockchain applications.