

Гаврилюк В. Д., Гороховський К. С., Соболевська Л. Г.

КРОС-ЧЕЙН ІНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ВЕРИФІКОВАНОГО СТИМУЛЮВАННЯ РЕСАЙКЛІНГУ: ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ НА ICP TA SOLANA

У цій статті розглянуто принципи створення вебплатформи для підвищення екологічної свідомості у громадян України. Продемонстровано, як використання блокчейн-технологій надає можливість побудувати надійний додаток, який гарантує коректність даних, пов'язаних з переробленням, і дозволяє розробити прозору систему винагород за допомогою utility-токенів і NFT. У роботі детально розглянуто процес розроблення екологічно корисної ініціативи, враховуючи аргументацію обраних технологічних рішень, аналіз вимог до системи, а також масштабованість і перспективи створеного у результаті вебдодатка в майбутньому.

Ключові слова: екологія, блокчейн, ICP, Internet Identity, Solana, переробка сміття, децентралізація.

Вступ

Сортування і перероблення сміття сьогодні — це не просто тренд, а справжній спосіб зберегти навколишнє середовище і зменшити руйнівний вплив цивілізації на природні екосистеми. Перероблення відіграє вирішальну роль у збереженні природних ресурсів, оскільки зменшує потребу у видобуванні первинної сировини. Крім того, перероблення також сприяє зменшенню обсягів відходів, що потрапляють на сміттєзвалища, і тих, що спалюють.

Проблеми з переробленням вторсировини в нашій державі існують протягом довгого часу і мають серйозний характер. До прикладу, за статистикою видання «USA today», Україна є однією з десяти країн, які виробляють найбільшу кількість сміття на одну особу [13]. Відповідно до даних Міністерства розвитку громад та територій України [1], у 2021 р. було утворено близько 51 млн м³ побутових відходів, з яких 2 % спалили і приблизно 3–4 % відправили на перероблення. Проблема полягає не лише у великій кількості виробленого сміття, а у відсотку його перероблення. Вітчизняна статистика рециклінгу є критично низькою порівняно з країнами ЄС, де в середньому 40 % сміття використовують повторно. Отже, збільшення обсягів переробки в Україні є важливим з огляду євроінтеграції.

Існує декілька основних причин, чому в Україні не є розвинутою культура сортування і рециклінгу. Серед них можна назвати такі [3]:

1. Хоча в Україні на законодавчому рівні передбачено вимоги щодо поводження з побутовими відходами (зокрема, відповідно до Закону України «Про відходи»), на практиці ці норми часто не виконують або не контролюють належним чином. На відміну від більшості європейських країн, де за порушення правил сортування передбачено реальні санкції для громадян, в Україні немає ефективного механізму моніторингу та притягнення до відповідальності. Окрім того, через обмежену кількість пунктів приймання, переробних підприємств і сміттесортувальних станцій, процес перероблення залишається складним і малодоступним для більшості населення.
2. Серед значної частини українців досі немає усталеної практики роздільного збирання сміття. Це пов'язано, зокрема, з браком чіткої системи заохочення: громадяни не мають зрозумілої вигоди від сортування відходів, а наявні механізми стимулювання здебільшого не дають очікуваного результату. У результаті процес сортування сприймається як додатковий клопіт без реального сенсу чи користі.

Запропоноване рішення

Враховуючи попередньо наведені факти, можна стверджувати, що платформа з елементами гейміфікації, яка може мотивувати громадян долучатись до екологічної спільноти, надаючи винаго-

роду за перероблення, є справді актуальною. Як рішення було розроблено вебзастосунок, що надає змогу отримати винагороду у формі токенів, завантаживши фотографію з переробної станції зі сміттям як підтвердження своєї екологічно корисної діяльності. Перевірка валідності даних користувача про рециклінг буде здійснюватися на основі API-інтеграції зі штучним інтелектом. Токени, зі свого боку, є валютою, за яку можна придбати право на знижку у мережі магазинів партнерів, шаблони цих купонів (NFT-токенів) партнер може добровільно розміщати в застосунку. Списання знижки відбувається з використанням згенерованих на основі NFT QR-коду. Стан купону (активний або неактивний) зберігається on-chain, що унеможливорює повторне використання знижки. Елементи гейміфікації у формі щоденних квестів і опитувань допомагають учасникам застосунку більше дізнатись про принципи сортування та отримати додаткові бонуси, що викликає зацікавленість з боку користувачів у регулярному відвідуванні додатку. Створена платформа має назву **Proof of recycling**, або скорочено **PoR** («Доказ передання на перероблення»).

На сьогодні застосунок має дві основні ролі — Recycler і Partner. Recycler — користувач, який надає докази перероблення сміття і отримує за це токени. За токени він може купувати купони на знижку в партнерів. Partner — користувач, який може розміщувати NFT, що дає право на знижку на платформі. Він також може списувати купони, придбані користувачами.

Аналіз подібних рішень

Проаналізовані українські аналоги платформи мають серйозні недоліки. До прикладу, мобільний застосунок «Кліматичні краплі» [2] має схожу концепцію: за різноманітні корисні екологічні дії, і рециклінг також, користувач отримує «краплі», якими він може розплатитись у закладах партнерів. Однак, із технічного погляду, додаток має багато недоліків. Наприклад, інформація про зароблені токени зберігалась на пристрої користувача, отже, після зміни смартфона він втрачав свої бали. Більше того, таке рішення дозволило зловживати можливостями додатка отримати «краплі» через технічні неточності в коді платформи. Також нагорода за більшість активностей надавалась вручну модераторами. Це, своєю чергою, призводить до потреби у залученні додаткового людського ресурсу, а також може викликати певну недовіру у користувачів, тому що з таким підходом немає гарантії, що вони отримають обіцяну компенсацію за свої зусилля. Беззаперечно, існують і закордонні аналоги цієї ідеї, як-от іспанський Reciclos [10] або італійський Junker app [8], що пропонують бонуси за перероблення відходів, однак вони не є популярними в Україні, і, на відміну від них, наша платформа забезпечує прозору фіксацію факту перероблення з використанням блокчейну, що унеможливорює шахрайство та дозволяє автоматично нараховувати винагороди у формі токенів.

Використання блокчейн-технологій

Застосування децентралізованого підходу дає можливість позбутись багатьох недоліків конкурентів. PoR написаний на смарт-контрактах — самостійно виконуваних програмах, що зберігаються в блокчейні і виконують транзакції на основі попередньо заданих умов. Відповідно, учасники платформи можуть бути впевнені у гарантованому отриманні бенефітів за свої старання, і для цього не потрібна зовнішня регуляція з боку людини. Окрім того, блокчейн дає змогу побудувати прозору і гнучку систему винагород на основі utility-токенів і NFT, що буде працювати на децентралізованих серверах, це робить її стійкою до відмов і унеможливорює зловживання. Таким чином, партнери, котрі надають можливість отримати знижку в додатку, можуть бути впевнені у достовірності права на бонуси, що є критично важливим у контексті ризику фінансових втрат.

Internet computer protocol

Internet computer protocol (ICP) є ключовою технологією, що лягла в основу проекту. ICP — це інноваційна блокчейн-мережа, розроблена фондом DFINTITY, яка дозволяє повноцінно розробляти і розгортати клієнтську та серверну частини вебзастосунків на децентралізованих серверах. Вона є у мільйони разів потужнішою і здатна замінити хмарні сервіси й традиційні IT-системи [5]. Мета ICP — розширити публічний інтернет, додавши до нього вбудовану функціональність хмарних обчислень. Серед головних переваг ICP, на які ми спирались при виборі технології, можна виділити:

1. Смарт-контракти в блокчейні ICP можуть використовувати сотні гігабайтів пам'яті з використанням stable memory [12] та обчислюватися з повною швидкістю сучасного процесора, що на кілька порядків перевищує можливості смарт-контрактів Ethereum.
2. На відміну від більшості децентралізованих систем, смарт-контракти в ICP можуть самостійно надсилати HTTPS-запити до зовнішніх сервісів, тим самим вирішуючи The oracle problem [9]. Усунення потреби в зовнішніх ораклах надає значну кількість покращень, дозволяючи напряду взаємодіяти з API, базами даних і смарт-контрактами інших блокчейнів.
3. ICP застосовує reverse gas model, що пропонує розробникам попередньо оплачувати комісії за газ, наповнюючи свої смарт-контракти так званими циклами. Це дає змогу користувачам взаємодіяти з додатком без потреби мати токени чи гаманець. Такий підхід спрощує вхід у Web3, забезпечуючи користувацький досвід, подібний до традиційних вебзастосунків.
4. Смарт-контракти, що працюють на ICP, є потужною еволюцією традиційних смарт-контрактів, і їх називають каністрами (рис. 1). Це обчислювальні одиниці, які поєднують у собі як код, так і дані. Каністри можна використовувати для найрізноманітніших цілей — від надання вебсторінок для клієнтського застосунку, написаних на JS-фреймворку, до реалізації повноцінної децентралізованої системи. Каністри можуть бути написані різними мовами, які здатні компілюватись до стандарту WASM; основними є Rust і Motoko.

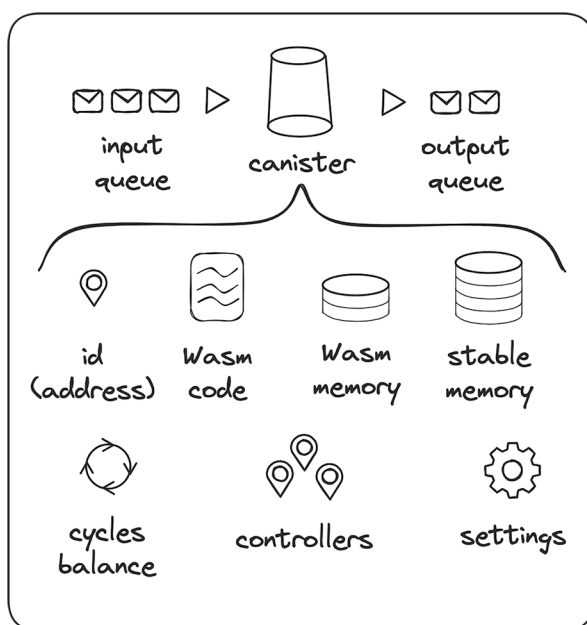


Рис. 1. Основні компоненти смарт-контракту («каністри») в ICP

5. Internet computer protocol має вбудовану систему автентифікації — Internet Identity, що керує сесіями на основі криптографії. Коли користувач підключається до децентралізованого застосунку, створюється нова пара відкритого та закритого ключів для сесії, яку Internet Identity засвідчує за допомогою поєднання WebAuthn [6] і порогового підпису (threshold signing).
6. Використовуючи інструмент збірки dfx, процес розгортання каністр у локальному середовищі є простим, що дозволяє розробникам швидко демонструвати результати їхньої роботи. Водночас, перехід між локальною мережею і mainnet потребує виконання лише декількох термінальних команд і поповнення каністр циклами, що дає змогу легко переконфігурувати проєкт для промислового використання.

Solana

Зі свого боку, Solana — це більш класична блокчейн-платформа, створена організацією Solana labs у 2017 р. Вона не надає можливості розробляти повноцінні вебзастосунки з клієнтською частиною, проте пропонує модель побудови швидких децентралізованих додатків на базі смарт-контрактів і DAO.

Алгоритм консенсусу Proof of History [4] є ядром блокчейну Solana. Цей механізм відіграє центральну роль у забезпеченні високої пропускної здатності блокчейну ефективним способом. Solana теоретично може здійснювати оброблення 65 тисяч паралельних операцій.

Написані на ній програми доцільно використати у розробленій на ICP платформі, продемонструвавши можливість інтернет-комп'ютера робити інтеграції з іншими децентралізованими системами. Крім того, інтеграція Solana в проєкт уможливує порівняння блокчейнів із різними моделями газу, адже в ньому користувач самостійно платить за комісію для здійснення транзакцій.

Загальна архітектура

Вебзастосунок використовує класичний варіант клієнт-серверної взаємодії, маючи окремий SPA-застосунок, що працює в браузері, а також розділені сервіси для серверної та блокчейн логіки. Основу платформи було написано на ICP та розгорнуто в каністрах (рис. 2).

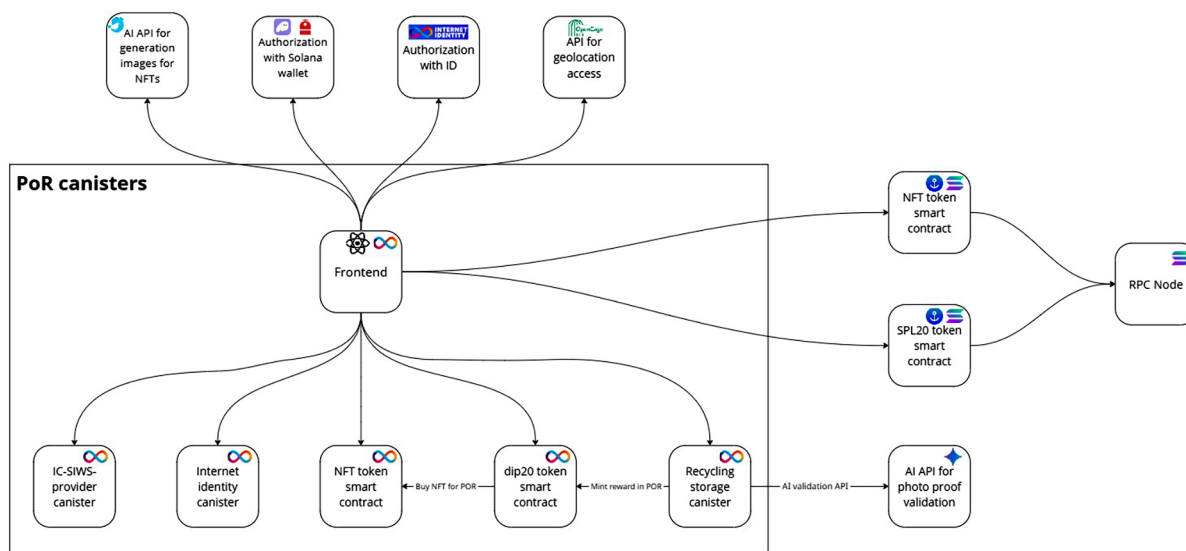


Рис 2. Загальна архітектура застосунку

Клієнтська частина, написана на React.js, також розміщена в мережі інтернет-комп'ютера, хоча сьогодні більшість децентралізованих застосунків, побудованих на інших блокчейнах, покладаються на централізованих хмарних провайдерів (наприклад, AWS, GCP) для хостингу фронтенду, що створює єдину точку відмови і порушує саму концепцію децентралізованої і незалежної платформи. Написані смарт-контракти на інтернет-комп'ютері, окрім логіки розподілення tokenів, додатково дають змогу створювати повноцінні бекенди зі сховищем даних, використовуючи Stable memory.

Каністри в ICP

Для застосунку було розроблено три основні каністри (і використано дві готові). Каністра **storage** (рис. 3) відповідає за збереження інформації користувача про рециклінг, а також робить запити до інших контрактів і до Gemini API для валідації фотографії переробки. Смарт-контракт **dip20** імплементує стандарт взаємозамінних tokenів для ICP, що застосовуються у платформі у вигляді POR-tokenів, які є внутрішньою валютою додатку. Каністра **nft** реалізує типовий смарт-контракт для логіки невзаємозамінних tokenів, що використовуються як доказ користувача на право знижки у партнера. Для розроблення додатка на ICP ми використали мову програмування Rust разом із Rust Canister Development Kit (CDK). Для імплементції постійного сховища даних у каністрах ми застосовуємо Rust-крейт **ic-stable-structures**, що робить можливим використання звичайних структур даних, однак при цьому загальний ліміт стабільної пам'яті в одній каністрі може досягати 500 гігабайтів.

Як уже зазначено раніше, одним із найбільших плюсів інтернет-комп'ютера є його здатність робити HTTPS-виклики поза власною мережею, не використовуючи оракли. Ми використовуємо цю функцію, щоб делегувати перевірку фотодоказу користувача, коли він надає інформацію про переробку; як наслідок, якщо користувач надав будь-яке невідповідне зображення, то він не зможе отримати винагороду.

```

use ic_cdk::api::call::call;
use lazy_static::lazy_static;
use candid::Principal;

type PrincipalId = String;

#[derive(CandidType, Deserialize, Clone)]
4 implementations
struct RecycleData {
    image: Vec,
    comment: String,
    location: String,
    principal_id: PrincipalId,
    created_at: u128,
}

#[update]
async fn store_data(image: Vec, comment: String, location: String, created_at: u128) -> Result<String, String> {
    if !validate_image_with_gemini(image.clone(), &location, &comment).await? {
        return Err("AI rejected the image as invalid.".to_string());
    }
    let principal_id: String = caller().to_string();
    let recycle_data = RecycleData { image, comment, location, principal_id: principal_id.clone(), created_at };

    let mut storage: MutexGuard<'_, HashMap<String, _>> = STORAGE.lock().unwrap();
    let user_records: &mut Vec<RecycleData> = storage.entry(principal_id.clone()).or_insert(vec![]);
    user_records.push(recycle_data);
    reward_user(caller()).await;
    Ok(principal_id)
}

```

Рис. 3. Використання IC CDK і функція зберігання даних про переробку

У своїй роботі ми застосовуємо вбудовану систему автентифікації Internet Identity, адже ми хочемо надати доступ до смарт-контрактів лише авторизованим користувачам. Для інтеграції з Internet Identity потрібно розгорнути в проєкті pre-built каністру, додати деякі конфігурації і, до того ж, встановити на JS-клієнті бібліотеку `@dfinity/auth-client`.

Інтеграція Solana в застосунок

Доповненням до основної частини платформи є написання Solana-програм та їх інтеграція в застосунок. Для написання смарт-контрактів на Solana було обрано фреймворк Anchor на мові Rust. Anchor — це провідна платформа для розроблення програм на Solana. З використанням цього фреймворку вдалось написати функціональність винагород, аналогічну до тієї, що спроектована в ICP каністрах `dip20` і `nft`. Таким чином, якщо при вході на платформу обрати спосіб авторизації з криптогаманцем (Phantom, Backpack чи іншим), то клієнтська частина вебзастосунку буде звертатись до Solana-програми, і, як наслідок, нагорода буде нараховуватись на баланс обраного криптогаманця.

Для того щоб взаємодіяти з каністрами, користувач повинен бути авторизованим і мати прив'язану до його сесії Internet Identity. Однак якщо користувач буде авторизовуватись через криптогаманець Solana, то він не зможе автоматично викликати методи ICP смарт-контрактів, для цього потрібен мапінг публічної адреси гаманця до новоствореної Internet Identity. Саме тому в проєкті використано в застосунку рішення від `ic-siws` [7] — це проєкт, який забезпечує автентифікацію на основі гаманця Solana для застосунків на ICP (Internet Computer). Застосування цієї бібліотеки гарантує, що вхід через Solana-гаманець завжди використовує той самий Principal (ідентифікатор ICP), незалежно від клієнта або пристрою, створюючи однозначну відповідність між Solana-адресами і Principal-ідентифікатором.

Клієнтська частина

Для створення користувацького інтерфейсу обрано популярний фреймворк ReactJS. Щоби полегшити написання стилів для компонентів, було обрано бібліотеку TailwindCSS. Цей CSS-фреймворк дотримується принципу mobile-first системи брейкпоінтів. Використовуючи цей принцип, вдалось створити адаптивний вебінтерфейс, що враховує особливості розмірів різних типів пристроїв.

Важливим також є механізм поєднання фронтенд-каністри з іншими. Це можливо за допомогою спеціальних Candid-інтерфейсів. Candid — це мова опису інтерфейсів (interface description language), призначена для визначення публічного контракту сервісу. Згенерувати їх для каністри можна за допомогою інструменту збірки `dfx`.

Інтеграції із зовнішніми сервісами

Для автоматизації деяких процесів на платформі були налаштовані інтеграції з API сторонніх сервісів на клієнтській і серверній частинах.

Для процесу валідації зображення на основі використовується API моделі Gemini 2.0 Flash. Gemini — це сімейство мультимодальних великих мовних моделей (LLMs), розроблених компанією Google DeepMind.

Для автоматизації процесу визначення геолокації було використано сервіс OpenCagedata, що надає способи геокодування (перетворення координат у адреси або назви місць) по всьому світу на основі відкритих даних через REST API.

Ще одним сервісом, який було впроваджено у застосунку, є DeepAI — сервіс, що надає REST API для роботи з Text-to-image моделлю для створення зображення на основі наданого промпт-запиту.

Для того щоб зберігати метадані і зображення NFT у децентралізованому сховищі і мати доступ до них за URL-адресою, було обрано сервіс Pinata, який допомагає керувати файлами в IPFS (децентралізована система зберігання файлів). IPFS є корисним для Web3-платформ, бо дозволяє зберігати NFT-метадані та зображення без ризику втрати через централізований сервер.

Розгортання

Для того щоб зібрати програму, потрібно створити файл dfx.json. Файл dfx.json використовується для налаштування параметрів проєкту, зокрема дозволяє вказати перелік каністр у застосунку, їхні назви, типи та вихідні файли, параметри збірки за замовчуванням і багато інших опцій. Можна порівняти файл dfx.json із файлами docker-compose, що так само декларативно визначають список сервісів системи.

Відповідно, для деплою каністр потрібно скористатись командою dfx deploy. Якщо розміщення відбувається в mainnet, то розробник попередньо має поповнити баланс каністри «циклами». Цикли (cycles) — це одиниця обчислювального ресурсу. Вони виконують роль «палива» для каністр, подібно до того, як газ використовується в Solana. Лише за один долар можна придбати близько одного трильйона циклів (1,000,000,000,000 циклів). Такої кількості вистачить, щоби зберігати 1 гігабайт даних у каністрі протягом року, при цьому виконуючи мільйони викликів у межах платформи [11]. Після розгортання застосунку в mainnet, він стає публічно доступним і отримує доменну адресу, що сформована на основі ідентифікатору каністри. Для прикладу, представлена в статті платформа після деплою отримала адресу <https://2dwgp-naaaa-aaaan-qzynq-cai.icp0.io>.

Принципи роботи платформи

Початково користувач має авторизуватись, для цього він має обрати один із двох можливих методів: напряму через Internet Identity або використовуючи Solana-гаманець. Обираючи Solana wallet,

Рис 4. Форма для перероблення сміття

користувач отримуватиме NFT-знижку на обраний Solana-акаунт. При авторизації через Internet Identity відбувається редірект на нову сторінку, цей механізм подібний до OAuth2 авторизації з провайдерами Google, Facebook та іншими. На цій сторінці потрібно обрати або створити новий principal ID. Далі користувач, що здає сміття на перероблення, має надати фотодоказ із локацією і описом своєї екологічно корисної активності (рис. 4). Після перевірки зображення користувач одразу отримує 1000 POR-токенів.

Зі свого боку, користувач-партнер може створити шаблон NFT-знижки, вказавши назву, опис, фото (яке він може згенерувати також за допомогою штучного інтелекту), категорію і зберегти результати. Для нових купонів ціна визначається автоматично і становить 2500 POR.

Коли користувач набирає принаймні 2500 токенів, у нього з'явиться опція придбати знижку в магазині бонусів. Якщо він не має приєднаного Solana-гаманця, то NFT буде відображатись на сторінці NFT-колекції, інакше NFT можна буде побачити і на криптогаманці. На прикладі здійснюється купування купону для знижки на масаж (рис. 5).

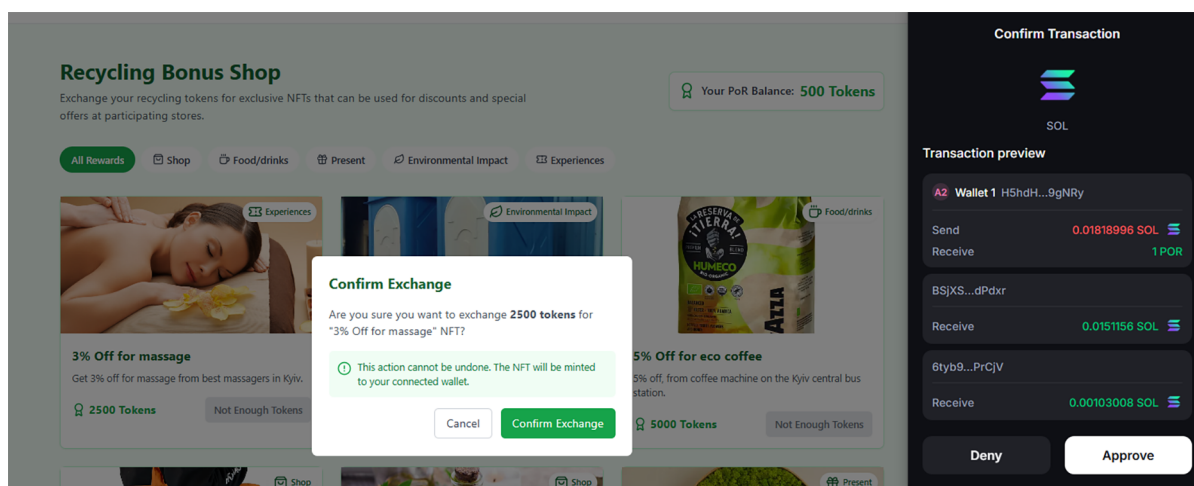


Рис 5. Покупка знижки за POR-токени з Solana wallet

Учасник платформи, що купує знижку з Solana-гаманцем, має сплатити комісію за проведення транзакції, однак за аналогічну дію, що здійснюється на ICP, оплата за транзакцію не береться. Це можливо через reverse gas model.

Щоб користувач мав змогу скористатися своєю знижкою, він має перейти на сторінку з власною NFT-колекцією і показати QR-код партнеру, який створив шаблон цього купона. Лише він здатний списати знижку. Для синхронного оновлення змін було використано технологію WebSocket. QR-код генерується за допомогою бібліотеки react-qr-code (рис. 6).

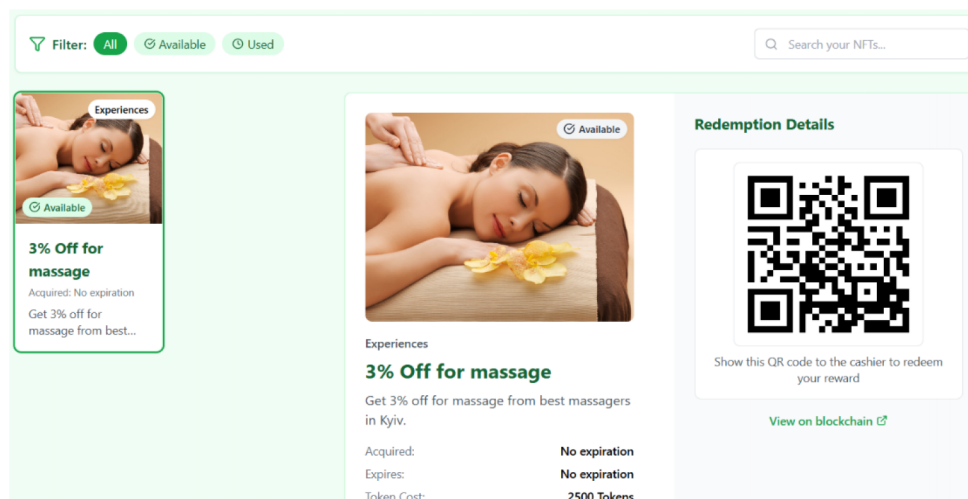


Рис 6. NFT-колекція знижок перед списанням

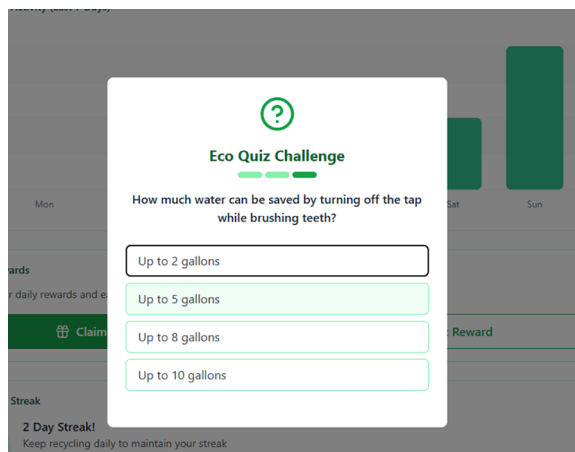


Рис 7. Проходження щоденного опитування

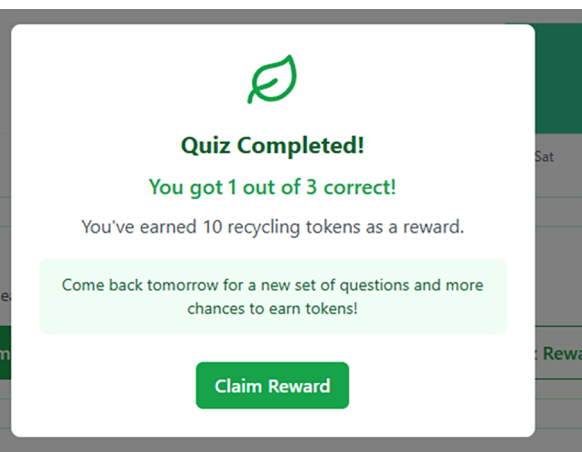


Рис 8. Результат опитування

Крім того, існує можливість заробляти POR-токени за певну активність на платформі. Валюту можна отримати за щоденне відвідування застосунку, а також за невелике опитування, що складається з трьох екологічних питань (рис. 7). Чим більше правильних відповідей буде набрано, тим більше токенів учасник може отримати (рис. 8). До того ж, розроблено функціональність рейтингу спільноти, що може бути додатковим способом заохочення учасників вкладати більше зусиль у перероблення за рахунок фактора змагальності.

Висновок

У процесі роботи над проектом вдалось дослідити серйозність і масштаби екологічних проблем в Україні. Крім того, визначено головні переваги ICP для побудови децентралізованих застосунків, а також проаналізовано відмінності між блокчейнами з різними моделями газу. Було проведено детальний аналіз і надано аргументацію використання Web3-архітектури у проекті.

Як результат, було реалізовано гнучку платформу для мотивації користувачів переробляти відходи. Вебдодаток має адаптивний інтерфейс, розгорнутий і повноцінно працює у блокчейні-мережі ICP. Також удалось додати кросчейнову функціональність, побудувавши Solana-програми на Anchor і впровадивши їх у платформу. Було додано декілька способів авторизації, залежності від вибору та потреб користувача. Логіка отримання винагород написана і працює на обох блокчейнах. Разом з тим, розроблені інтеграції з API зовнішніх сервісів, що значно автоматизують деякі процеси під час роботи в додатку. Елементи гейміфікації надають змогу зацікавити користувача у щоденному відвідуванні платформи, а також допомагають дізнатись більше про проблематику перероблення, що існує в нашій державі.

Ідея застосунку вже отримала ствердні відгуки від експертів. Проекту Proof of Recycling удалось перемогти в хакатоні Let's try ICP і посісти друге місце на Mohyla startup accelerator. Це означає, що платформа має високий потенціал завдяки своїй важливій соціальній місії і інноваційному поєднанню децентралізованих технологій.

Список літератури

1. Проект національного плану управління відходами України до 2033 року. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України — офіційний сайт [Електронний ресурс]. — 2021. — Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/12/proyeckt-Natsionalnyj-plan-upravlinnya-vidhodamy-23.11-002.docx> (дата звернення: 25.06.2025).
2. Сімончук О. Як мобільний додаток «Кліматичні краплі» вчить дітей ековідповідальності [Електронний ресурс] / О. Сімончук // Освіторія Медіа. — 2019. — Режим доступу: <https://osvitoria.media/experience/yak-mobilnyj-dodatok-klimatychni-krapli-vchyt-ditej-ekovidpovidalnosti> (дата звернення: 25.06.2025).
3. Скільки українців готові сортувати сміття. Active Group — Маркетингові та соціологічні дослідження [Електронний ресурс]. — 2021. — Режим доступу: <https://activegroup.com.ua/2021/11/15/skilki-ukraynciv-gotovi-sortuvati-smittya> (дата звернення: 25.06.2025).
4. Albus J. Solana deep dive: Unpacking proof-of-history [Electronic resource] / J. Albus // Blockworks. — Mode of access: <https://blockworks.co/news/solana-proof-of-history> (date of access: 25.06.2025).
5. Blockchain and Applications, 4th International Congress (Modelling of the Internet Computer Protocol Architecture: The Next Generation Blockchain; pp. 3–12) [Electronic resource] / ed. by J. Prieto et al. — Cham : Springer International Publishing, 2023. — Mode of access: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21229-1> (date of access: 25.06.2025).

6. Guide to Web Authentication. WebAuth docs [Electronic resource]. — Mode of access: <https://webauthn.guide/#about-webauthn> (date of access: 25.06.2025).
7. Kristofer L. SIWS, Sign in with Solana for ICP, the Internet Computer. Build cross chain Solana apps on ICP [Electronic resource] / L. Kristofer. — GitHub. — Mode of access: <https://github.com/kristoferlund/ic-siws> (date of access: 25.06.2025).
8. Recycling is easy in Italy, just a blip away with Junker. La differenziata in un blip [Electronic resource]. — Mode of access: <https://junker.app/recycling-is-easy-in-italy-just-a-blip-away-with-junker> (date of access: 25.06.2025).
9. Stable memory | Internet Computer. Internet Computer docs [Electronic resource]. — Mode of access: <https://internetcomputer.org/docs/motoko/main/stable-memory/stablememory> (date of access: 25.06.2025).
10. The app that rewards you for recycling — Reciclos [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.reciclos.com/en> (date of access: 25.06.2025).
11. The concept behind canister smart contracts. DFINITY Foundation. Terminology [Electronic resource]. — 2025. — Mode of access: <https://support.dfinity.org/hc/en-us/articles/360057605571-What-are-canister-smart-contracts> (date of access: 25.06.2025).
12. The oracle problem in smart contracts: data privacy, security, and solutions. MediaLaws [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.medialaws.eu/rivista/the-oracle-problem-in-smart-contracts-data-privacy-security-and-solutions> (date of access: 25.06.2025).
13. Waste recycling market size, share, growth & trend by 2032. Allied Market Research. (2024) [Electronic resource]. — 2024. — Mode of access: <https://www.alliedmarketresearch.com/waste-recycling-market-A144607> (date of access: 25.06.2025).

References

- Albus, J. (2025). Solana deep dive: Unpacking proof-of-history. *Blockworks*. <https://blockworks.co/news/solana-proof-of-history>.
- Blockchain and Applications, 4th International Congress (Modelling of the Internet Computer Protocol Architecture: The Next Generation Blockchain; pp. 3–12). (2023) / ed. by J. Prieto et al. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21229-1>.
- Guide to Web Authentication. *WebAuth docs*. <https://webauthn.guide/#about-webauthn>.
- Kristofer, L. SIWS, Sign in with Solana for ICP, the Internet Computer. Build cross chain Solana apps on ICP. *GitHub*. <https://github.com/kristoferlund/ic-siws>.
- Proyekt natsionalnoho planu upravlinnya vidkhodamy Ukrayiny do 2033 roku. Ministerstvo zakhystu dovyillya ta pryrodnykh resursiv Ukrayiny — ofitsiynyy sayt. (2021). <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/12/proyekt-Natsionalnyj-plan-upravlinnya-vidhodamy-23.11-002.docx> [in Ukrainian].
- Recycling is easy in Italy, just a blip away with Junker. *La differenziata in un blip*. <https://junker.app/recycling-is-easy-in-italy-just-a-blip-away-with-junker>.
- Simonchuk, O. (2019) Yak mobilnyy dodatok “Klimatychni krapli” vchyt ditey ekovidpovidalnosti. “Osvitoriya” *Media*. <https://osvitoria.media/experience/yak-mobilnyj-dodatok-klimatychni-krapli-vchyt-ditej-ekovidpovidalnosti> [in Ukrainian].
- Skilky ukrayintsiv hotovi sortuvaty smittyu. Active Group — Marketynhovi ta sotsiolohichni doslidzhennya. (2021). <https://activegroup.com.ua/2021/11/15/skilki-ukraynciv-gotovi-sortuvati-smittyu> [in Ukrainian].
- Stable memory | Internet Computer. *Internet Computer docs*. <https://internetcomputer.org/docs/motoko/main/stable-memory/stablememory>.
- The app that rewards you for recycling — Reciclos. *Reciclos*. <https://www.reciclos.com/en>.
- The concept behind canister smart contracts. *DFINITY Foundation. Terminology*. (2025). <https://support.dfinity.org/hc/en-us/articles/360057605571-What-are-canister-smart-contracts>.
- The oracle problem in smart contracts: data privacy, security, and solutions. *MediaLaws*. <https://www.medialaws.eu/rivista/the-oracle-problem-in-smart-contracts-data-privacy-security-and-solutions>.
- Waste recycling market size, share, growth & trend by 2032. *Allied Market Research*. (2024). <https://www.alliedmarketresearch.com/waste-recycling-market-A144607>.

V. Havryliuk, K. Gorokhovskiy, L. Sobolevska

CROSS-CHAIN INFRASTRUCTURE FOR VERIFIED RECYCLING INCENTIVIZATION: IMPLEMENTATION EXPERIENCE ON ICP AND SOLANA

This article explores the principles of developing a web platform aimed at increasing environmental awareness among Ukrainian citizens through digital rewards for recycling waste. The continuous increase in polluted areas across Ukraine has led to a range of ecological issues. In this context, the creation of a digital tool that draws public attention to the problem of waste management and motivates responsible environmental behaviour is both relevant and necessary.

The use of blockchain technologies provides the opportunity to build a reliable application that ensures the integrity of data related to waste recycling. It also enables the creation of a transparent reward system based on utility tokens and NFTs. The integration of two blockchain ecosystems — Internet Computer Protocol (ICP) and Solana — demonstrates the strengths of both technologies in terms of decentralisation, user accessibility, and scalability.

The ICP blockchain offers a unique environment for hosting complete web applications on decentralised nodes without relying on traditional centralised servers. Through its innovative reverse gas model, end users are not required to hold tokens to interact with the platform, as the computational costs are covered

by the developer or organisation behind the application. This allows for a seamless and user-friendly experience, particularly for non-technical participants in the recycling initiative.

Meanwhile, Solana adds flexibility for the development of smart contracts and fast transaction processing. By combining these two technologies, the article provides a comparative overview of different blockchain architectures and gas models, contributing to a deeper understanding of their practical implications.

Additionally, the article presents a brief explanation of the integration between the ICP and Solana blockchains, including token-based interactions, NFT issuance, and synchronisation of environmental data. The development process is supported by deployment tools such as DFX (for ICP canister management) and the Anchor framework for Solana, ensuring an efficient and structured development workflow.

Overall, the work highlights the reasoning behind the selected technological stack, outlines the key requirements for the platform, and explores its potential for future growth and scalability. The project exemplifies how modern decentralised technologies can be harnessed to promote sustainable development and environmental responsibility in Ukrainian society.

Keywords: ecology, blockchain, ICP, Internet Identity, Solana, waste recycling, decentralisation.

Матеріал надійшов 01.07.2025



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)