

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ШАРУ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ У ГІС-КАРТІ ПРОЄКТІВ ЗЕЛеної ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Отримано 21 лип. 2025 р.; рекомендовано до публікації 22 вер. 2025 р.
Доступно онлайн 30 вер. 2025 р.

Кудря С. О.¹, Зур'ян О. В.², Зур'ян О. В.³

Автор для кореспонденції: Бондаренко Дмитро,
e-mail: dima7007bond@gmail.com

¹ член-кор. НАН України, д-р. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² д-р. техн. наук
<http://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

³ д-р. філос. у галузі економіки
<https://orcid.org/0000-0001-8786-807X>

^{1, 2} Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна

³ Український інститут інновацій та економіки природних ресурсів, м. Київ, Україна

У статті розглянуто науково-методичні засади побудови шару інвестиційної привабливості в структурі геоінформаційної карти проєктів зеленої водневої енергетики. Обґрунтовано актуальність створення такого інструменту в контексті повоєнного відновлення, переходу до низьковуглецевої економіки та децентралізації управління в Україні. Проаналізовано світовий досвід просторового планування інвестицій у сфері водневої енергетики з використанням ГІС, включаючи приклади реалізованих міжнародних проєктів. Запропоновано концептуальну модель формування шару привабливості на рівні територіальних громад з урахуванням п'яти груп чинників: природно-ресурсного потенціалу, інфраструктури, соціально-економічного середовища, адміністративно-правових умов та ризиків. Детально описано методику нормалізації індикаторів, застосування вагових коефіцієнтів і обчислення інтегрального індексу привабливості. Показано, як інтеграція такого шару в ГІС дозволяє визначати зони з високим потенціалом для реалізації проєктів, формувати кластери, аргументувати інвестиційні ініціативи та моделювати сценарії розвитку. Особливу увагу приділено важливості деталізації саме по громадах, що забезпечує точність, прозорість та адаптивність аналізу до локальних потреб. Зроблено висновки щодо практичної реалізації концепції на базі відкритих даних та перспектив інтеграції в державні цифрові платформи.

Ключові слова: зелений водень, інвестиційна привабливість, ГІС, карта, територіальні громади, просторове планування, воднева енергетика, відновлювана енергія.

PRINCIPLES OF FORMING AN INVESTMENT ATTRACTIVENESS LAYER IN THE GIS MAP OF GREEN HYDROGEN ENERGY PROJECTS

Received Jul. 21, 2025; accepted Sept. 22, 2025
Available online Sept. 30, 2025

Kudrya S. ¹, Zurian O. ², Zurian O. ³

Author for correspondence: Bondarenko Dmytro,
e-mail: dima7007bond@gmail.com

¹ Corresponding Member of the NAS of Ukraine,
Dr. of Sciences (Tech.)
<https://orcid.org/0000-0002-4798-6853>

² Dr. of Technical Sciences
<http://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

³ PhD in Economics
<https://orcid.org/0000-0001-8786-807X>

^{1, 2} Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Ukrainian Institute of Innovation and Natural Resource Economics, Kyiv, Ukraine

The article presents the scientific and methodological foundations for constructing an investment attractiveness layer within a geographic information system (GIS) map for green hydrogen energy projects. The relevance of such a tool is substantiated in the context of post-war recovery, transition to a low-carbon economy, and decentralization of governance in Ukraine. The study analyzes global experience in spatial planning of hydrogen energy investments using GIS, including examples of implemented international projects. A conceptual model is proposed for forming the investment attractiveness layer at the level of territorial communities, taking into account five groups of factors: renewable energy resource potential, infrastructure, socio-economic conditions,

administrative and legal framework, and risks. The methodology for indicator normalization, application of weighted coefficients, and calculation of the integrated attractiveness index is described in detail. It is shown how the integration of such a layer into a GIS enables the identification of high-potential project areas, the formation of clusters, justification of investment initiatives, and scenario-based development modeling. Special attention is given to the importance of community-level detail, which ensures the accuracy, transparency, and adaptability of the analysis to local needs. The conclusions outline the possibilities for practical implementation of the concept based on open data and the potential for integration into national digital platforms.

Keywords: green hydrogen, investment attractiveness, GIS, map, territorial communities, spatial planning, hydrogen energy, renewable energy.

Використані позначення та скорочення

IRENA – Міжнародне агенство з відновлюваних джерел енергії (англ. International Renewable Energy Agency)

Hydrogen Europe – організація, що представляє європейські компанії, які прагнуть перейти до вуглецево-нейтральної економіки

ГІС – геоінформаційна система

MCDA – багатокритеріальний аналіз (англ. Multi-Criteria Decision Analysis)

АНР – метод налітчної ієрархії

DiXi Map – портал, що містить аналіз основних даних в енергетичному секторі України

ОТГ – об'єднана територіальна громада

Brownfield – (укр. Коричневе поле), термін для позначення територій, які використовувалися для промислової або комерції, але згодом були покинуті або занедбані

Вступ. У сучасних умовах кліматичної трансформації, енергетичної нестабільності та геополітичної вразливості питання пошуку стійких джерел енергії набуває стратегічного значення як для окремих країн, так і для глобальної спільноти. Одним з найперспективніших напрямів є розвиток зеленої водневої енергетики – технологій, що передбачають виробництво водню з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) без викидів вуглецю. У світовій практиці водень розглядається не лише як екологічно чисте паливо майбутнього, а і як інструмент енергетичного зберігання, балансування систем та декарбонізації промисловості.

Для України розвиток водневої енергетики є надзвичайно актуальним у контексті післявоєнної відбудови, зміцнення енергетичної незалежності, а також інтеграції в Європейський зелений курс. Значні ресурси сонячної та вітрової енергії, наявність транзитної інфраструктури та велика кількість потенційно придатних територій створюють передумови для перетворення України на одного з ключових виробників і експортерів зеленого водню у Східній Європі.

Водночас для ефективного планування таких проєктів потрібні просторово-орієнтовані інструменти, що дозволяють урахувати не лише ресурсний потенціал, а й інфраструктурні, соціально-економічні, правові та ризикові чинники. Саме тому геоінформаційні системи (ГІС) виступають критично важливою технологією для просторового аналізу, візуалізації даних та прийняття обґрунтованих управлінських рішень. ГІС дають змогу інтегрувати різноманітні дані, моделювати сценарії розвитку, здійснювати порівняльний аналіз територій та представляти результати у зручному для користувача форматі.

Однак, попри загальну популярність картографічних рішень у сфері ВДЕ, проблемою залишається формування цільового шару інвестиційної привабливості, який би

відображав комплексну багатофакторну оцінку потенціалу громад або регіонів для розміщення водневих проєктів. Здебільшого інвестиційну привабливість трактують вузько – лише через природний ресурс або близькість до мереж. Такий підхід не враховує повноцінну інституційну, соціальну та безпекову складові, що дуже важливо для умов сучасної України.

Питання оцінки інвестиційної привабливості у сфері відновлюваної енергетики активно досліджується в науковій і прикладній літературі, особливо в контексті розвитку зеленої водневої енергетики. Роботи, присвячені загальній стратегії розвитку водню як ключового елементу низьковуглецевої трансформації, представлені міжнародними аналітичними структурами, зокрема IRENA [1] та Hydrogen Europe [2]. Дослідження [3, 4] пропонують підходи до техніко-економічного аналізу потенціалу виробництва водню в окремих країнах з акцентом на ресурси ВДЕ та інфраструктурну готовність. Окрему увагу в літературі приділено застосуванню геоінформаційних систем (ГІС) для оцінки придатності територій до розміщення водневих об'єктів. Такі дослідження поєднують просторову оцінку сонячного, вітрового та біоенергетичного потенціалу з чинниками логістики, соціоекономіки та ризиків [5–9]. У роботах [10, 11] реалізовано підходи до створення карт придатності із застосуванням багатокритеріального аналізу (MCDA), зокрема АНР-методу, для оцінки перспектив зеленого водню в Північній Африці та Алжирі. Українські джерела, серед іншого Атлас ВДЕ [12] та дослідження Інституту відновлюваної енергетики НАН України [13, 14], є важливою базою для просторової адаптації моделі до місцевих умов.

Водночас досі обмежено представлено дослідження, які б пропонували комплексне об'єднання індикаторів інвестиційної привабливості у форматі окремого шару в ГІС, деталізованого на рівні територіальних громад.

Такий підхід стає особливо актуальним для України в умовах післявоєнної відбудови та переходу до низьковуглецевої економіки, що й обґрунтовує необхідність розробки відповідної моделі.

Постановка завдання. Метою цієї статті є розкриття принципів формування шару інвестиційної привабливості у ГІС-карті проєктів зеленої водневої енергетики, з урахуванням особливостей територіальної організації України, міждисциплінарного характеру водневої енергетики та викликів повоєнного відновлення. Автори пропонують концептуальний та методологічний підхід, що передбачає багаторівневу оцінку потенціалу громад на основі інтеграції ресурсних, інфраструктурних, соціально-економічних, правових і ризик-факторів. Такий підхід покликаний не лише підвищити якість просторового аналізу, а й створити ефективний інструмент стратегічного планування для органів влади, територіальних громад та інвесторів, що орієнтуються на реалізацію проєктів у сфері відновлюваної енергетики в Україні.

Виклад основного матеріалу

Теоретичні основи інвестиційної привабливості в енергетичних проєктах

Інвестиційна привабливість – це узагальнена характеристика здатності об'єкта, галузі чи території генерувати стабільний економічний ефект і викликати інтерес у потенційних інвесторів. У науковій літературі її трактують як багатофакторну категорію, що включає поєднання ресурсних, фінансових, інституційних, правових та інфраструктурних параметрів. Для енергетичного сектору, передусім для відновлюваної енергетики, поняття інвестиційної привабливості набуває особливої ваги, оскільки більшість проєктів у цій сфері передбачають тривалий цикл реалізації, високу капіталоємність і значну залежність від зовнішнього середовища.

Традиційно оцінка привабливості енергетичних проєктів здійснюється на основі таких критеріїв, як рівень технічної складності, термін окупності, доступ до ресурсної бази, наявність ринку збуту, рівень державної підтримки та регуляторного ризику. Однак з поширенням децентралізованих та інноваційних моделей енергетики (зокрема ВДЕ) акценти зміщуються в бік просторової привабливості: важливо не лише що будувати, а й де саме – з урахуванням специфіки території, локальної політики, логістики, соціальних умов і потенційних загроз.

В умовах розвитку водневої економіки зростає значення інтегрованої оцінки територій, де інвестиційна привабливість не може розглядатися окремо від таких категорій, як енергетичний потенціал (насамперед ВДЕ), транспортна доступність, придатність інфраструктури, доступ до води, соціальна стабільність, а також довіра до місцевої влади. Для зеленого водню особливо важливою є синергія між різними видами ресурсів та інфраструктурних умов, що формує так звану системну привабливість – здатність території забезпечити не просто генерацію, а повний ланцюг доданої вартості: від виробництва до зберігання, транспортування та експорту.

У контексті просторового планування інвестиційна привабливість може бути відображена за допомогою картографічних моделей, які об'єднують геопросторові дані, індикатори та вагові коефіцієнти в інтегральний індекс. Такий підхід дозволяє переходити від декларативної оцінки до аналітичної, придатної для порівняння громад, вибору кластерів, обґрунтування державних програм або прийняття управлінських рішень на місцевому рівні.

Отже, теоретичні засади інвестиційної привабливості в енергетиці сьогодні мають міждисциплінарний характер. Вони поєднують економічний аналіз, просторове планування, регіоналістику, енергетичне моделювання та цифрові технології управління даними. Це особливо важливо для країн, що перебувають у фазі енергетичної трансформації та післякризового відновлення, таких як Україна, де правильне розміщення інвестицій може не лише створювати нові виробництва, а й трансформувати цілі території в сучасні низьковуглецеві економіки.

ГІС як інструмент оцінки інвестиційного середовища

Геоінформаційні системи (ГІС) посідають дедалі важливіше місце в процесі просторового планування та прийняття рішень щодо інвестицій у відновлювану енергетику. Як технологічна платформа, ГІС дозволяє інтегрувати, обробляти, аналізувати та візуалізувати великі обсяги геопросторових даних, забезпечуючи цілісне уявлення про інвестиційне середовище на конкретній території. Її застосування особливо ефективне для складних багатофакторних об'єктів, як-от проєкти зеленої водневої енергетики, що потребують оцінки технічних, соціально-економічних, екологічних та правових чинників.

ГІС дає змогу не лише картографувати природні ресурси (сонячна та вітрова активність, біомаса, водні запаси), а й урахувувати просторову доступність інфраструктурних об'єктів (електромережі, дороги, водогони, порти, brownfield-території). Крім цього, у системі можна відобразити соціально-демографічні показники, ризики (військові, кліматичні, техногенні), наявність правових обмежень чи стимулів, а також програм підтримки з боку держави або міжнародних партнерів.

Перевагою ГІС у контексті оцінки інвестиційного середовища є її можливість об'єднувати неоднорідні дані в уніфіковану аналітичну структуру. За допомогою інструментів багатокритеріального просторового аналізу (MCDA), методу аналітичної ієрархії (АНП) та нормалізованих індексів можна створювати інтегральні показники інвестиційної привабливості, які відображаються на карті у вигляді шкали або рейтингу. Це забезпечує об'єктивність, прозорість і відтворюваність оцінки, що важливо для залучення інвесторів та обґрунтування управлінських рішень.

У міжнародній практиці ГІС вже широко застосовується для картування енергетичних ресурсів і планування інвестицій у сфері ВДЕ. Прикладами можуть слугувати ініціативи H₂Atlas Africa, HyPotential, European Hydrogen Backbone, а також національні інструменти, як-от DiXi

Мар або український портал uamar.org.ua, що візуалізують доступні потужності та потенціал територій. Однак більшість таких систем не мають шару, присвяченого саме комплексній інвестиційній привабливості – з урахуванням локального контексту, децентралізації, правових реалій і динамічних загроз.

Таким чином, ГІС є не лише технологічним інструментом візуалізації, а й інтегрованою платформою для стратегічного просторового управління, що здатна поєднати інтереси держави, громади та інвестора в умовах енергетичної трансформації. Розробка ГІС-карт з інтегрованими шарами привабливості дозволяє перейти до проактивного планування і цілеспрямованого інвестування на рівні територіальних громад (ОТГ).

Методологія формування шару інвестиційної привабливості

Формування шару інвестиційної привабливості в геоінформаційній системі (ГІС), орієнтованій на проекти зеленої водневої енергетики, є складним багатокритеріальним процесом, що вимагає інтеграції природно-ресурсних, інфраструктурних, соціально-економічних, адміністративно-правових та ризик-факторів. Такий підхід дозволяє отримати комплексну просторову оцінку потенціалу територій для залучення інвестицій, адаптовану до реалій післявоєнної відбудови України.

Методологічно формування шару ґрунтується на концепції багатокритеріального просторового аналізу (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA), де кожен тематичний індикатор нормалізується в єдиній шкалі (зазвичай від 0 до 1), а потім інтегрується в загальний індекс через систему вагових коефіцієнтів. Для цього можуть бути використані різні методи агрегації, серед яких найпоширенішим є метод зваженого лінійного сумування (WLC).

Загальна формула інтегрального індексу інвестиційної привабливості для кожної територіальної одиниці (громади) має вигляд:

$$I_{H2} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i, \quad (1)$$

де:

I_{H2} – розрахунковий індекс інвестиційної привабливості;

x_i – нормалізоване значення i -го індикатора;

ω_i – ваговий коефіцієнт i -го індикатора (з урахуванням експертного опитування або аналітичної ієрархії);

n_i – загальна кількість індикаторів.

На першому етапі здійснюється **ідентифікація ключових груп індикаторів**, які об'єднують у п'ять основних блоків:

- природно-ресурсний потенціал відновлюваних джерел енергії (сонячна, вітрова, біо-, гідро- та геотермальна енергія);

- наявна інфраструктура (електричні мережі, транспорт, вода, газ, промислові площі);
- соціально-економічні умови (населення, зайнятість, наявність стратегій розвитку);
- адміністративно-правові аспекти (земельні обмеження, підтримка з боку державних програм, статус територій);
- ризики (військові загрози, кліматичні чинники, техногенна деградація).

Кожному з цих блоків присвоюють **вагові коефіцієнти**, які можуть бути визначені на основі експертного опитування (наприклад, метод аналітичної ієрархії, АНР) або політико-економічних пріоритетів. Для підвищення об'єктивності оцінки дані нормалізуються через мінімакс-трансформацію (від мінімального до максимального значення), після чого обчислюють загальний інтегральний бал.

Особливістю цього підходу є можливість урахування **негативних чинників** через присвоєння окремим індикаторам від'ємних ваг (наприклад, військова загроза, природна катастрофа, зношеність інфраструктури), що дозволяє коректно зменшити індекс при високих ризиках.

Геопросторова реалізація цього шару в ГІС дозволяє представити результати у вигляді інтерактивної карти, де індекс привабливості візуалізується як кольоровий градієнт або рейтинг громад. Така карта може бути використана для порівняння територій, відбору пілотних кластерів, обґрунтування державних програм стимулювання, а також для прийняття стратегічних рішень на місцевому рівні.

Принципи визначення вагових коефіцієнтів для індикаторів відновлюваних джерел енергії

Одним із центральних етапів методології є обґрунтоване призначення вагових коефіцієнтів для індикаторів, що формують підсумковий індекс інвестиційної привабливості. У разі використання зеленого водню особливе значення має блок, що стосується природного потенціалу відновлюваних джерел енергії, адже саме від їх доступності прямо залежить ефективність виробництва водню методом електролізу.

Для визначення ваг між видами ВДЕ (сонячна, вітрова, біомаса, мала гідроенергетика, геотермальна енергія) запропоновано комбінований підхід, що поєднує емпіричну нормалізацію показників у межах кожної громади та експертну оцінку технологічної доцільності використання відповідного ресурсу для H_2 -виробництва.

Ваговий коефіцієнт для кожного з типів ВДЕ визначається за формулою (2):

$$\omega_{VDE}^k = \frac{P_x^k \cdot a^k}{\sum_{k=1}^m P_x^k \cdot a^k}, \quad (2)$$

де:

ω_{VDE}^k – часткова вага k -го типу ВДЕ в громаді (наприклад, сонячної енергії);

P_x^k – значення потенціалу k -го типу ВДЕ (в енергетичних одиницях) у громаді X ;

a^k – коефіцієнт технологічної ефективності або «перспективності» для виробництва водню з цього типу ВДЕ (експертно заданий);

m – кількість типів ВДЕ, що враховуються у розрахунку.

Таким чином, кожна громада отримує унікальну систему ваг для ВДЕ-блоку, залежно від просторової наявності природних ресурсів. Це дозволяє уникнути помилок узагальнення і врахувати як потенціал, так і техніко-економічну доцільність використання кожного виду ресурсу.

Приклад: якщо в громаді високий рівень сонячної радіації, але практично відсутній вітровий потенціал, а також якщо сонячні системи мають вищу ефективність з погляду H_2 -виробництва в цих умовах, коефіцієнт ваги для сонця буде домінуючим. У гірських або річкових громадах вагу може мати мала гідроенергетика, а для регіонів з розвинутим агропромисловим сектором – біоенергетика.

Значення коефіцієнтів a^k можуть встановлюватися на основі середньої питомої вартості виробництва водню з відповідного ресурсу, стабільності та прогнозованості генерації та відповідності інфраструктурним можливостям зберігання й транспортування.

Такий підхід дозволяє не лише враховувати наявність ресурсів, а й орієнтувати розрахунок на реальні перспективи технологічної інтеграції ВДЕ у водневу інфраструктуру. При цьому блок ВДЕ не має фіксованої структури, а адаптується до умов кожної громади, що підвищує точність моделювання та актуальність інвестиційних рішень.

Приклад можливих вхідних даних та результати розрахунку вагових коефіцієнтів для блоку ВДЕ (відновлювані джерела енергії) у територіальній громаді X , з урахуванням її локального потенціалу та технологічної доцільності використання ресурсів для виробництва зеленого водню наведено в табл. 1 і табл. 2.

З прикладу розрахунку можливо зробити висновок, що для цієї території (територіальної громади X) сонячна енергія є ключовим ресурсом для водневої генерації і становить 50,6 % ваги у ВДЕ-блоці, а вітровий ресурс – 32,1 %, що також є вагомим внеском, водночас інші джерела мають локальне значення, але можуть бути залучені в межах кластерного підходу, або гібридних систем.

Ці ваги далі інтегруються в загальний індекс інвестиційної привабливості як складова блоку природного потенціалу, з відповідною вагою цього блоку в загальному розрахунку (наприклад, 30 % загального індексу).

Таблиця 1. Умовні вхідні дані окремої території (територіальної громади X)

Table 1. Conditional input data of a separate territory (territorial community X)

Тип ВДЕ	Потенціал P_i^k (в умовних одиницях)	Технологічна ефективність a^k	$P_i^k \cdot a^k$
Сонячна енергія	0,85	1,0	0,85
Вітрова енергія	0,6	0,9	0,54
Біоенергетичний потенціал	0,30	0,7	0,21
Гідроенергетика (мала)	0,10	0,5	0,05
Геотермальна енергія	0,05	0,6	0,03
Сума	-	-	1,68

Таблиця 2. Результати розрахунку вагових коефіцієнтів

Table 2. Results of calculating weight coefficients

Тип ВДЕ	ω_{VDE}^k (частка у ваговій структурі)
Сонячна енергія	0,506
Вітрова енергія	0,321
Біоенергетичний потенціал	0,125
Гідроенергетика (мала)	0,030
Геотермальна енергія	0,018

Інфраструктурні чинники в оцінці інвестиційної привабливості

Інфраструктурна доступність є одним із ключових чинників, що безпосередньо впливають на інвестиційну привабливість території для реалізації проєктів зеленої водневої енергетики. Ефективне виробництво, зберігання й транспортування зеленого водню потребує не лише природного потенціалу, а й готової або такої, що підлягає мінімальній адаптації, інженерної та логістичної інфраструктури.

У межах методології просторового аналізу інфраструктурний блок включає кілька основних індикаторів, які формують відповідні шари в ГІС-карті. Насамперед враховується наявність електромереж середньої та високої напруги, які забезпечують можливість підключення електролізерів до джерел генерації з ВДЕ або до енергосистеми для режиму споживання енергії. Просторовий аналіз охоплює не лише наявність ліній, але й відстань від потенційної локації до точки підключення, що безпосередньо впливає на вартість реалізації проєкту.

Іншим важливим чинником є транспортна доступність, зокрема наявність і якість автомобільних доріг, залізничних колій, а також близькість до портів і логістичних хабів. Це визначає зручність доставки компонентів обладнання, вивезення продукції (в тому числі водню в рідкому або газоподібному стані) та впливає на потенційну можливість інтеграції території до міжнародних або регіональних водневих коридорів.

Оцінюється також наявність інженерної інфраструктури, включно з водогонами, газопроводами, каналізацією, а також можливість приєднання до централізованих систем охолодження або теплопостачання – в разі використання надлишкової теплоти або комбінованих схем енергопостачання.

Окрему увагу приділяють просторовій ідентифікації промислових майданчиків, особливо територій на кшталт раніше індустриально освоєних ділянок, які можуть бути переорієнтовані під потреби водневої енергетики. Такі ділянки зазвичай мають мінімальні адміністративні бар'єри для перепрофілювання, підведені мережі та вигідне розташування, що значно знижує вхідний бар'єр для інвестора.

Інфраструктурні індикатори в моделі мають високий ваговий коефіцієнт у структурі індексу інвестиційної привабливості, оскільки вони визначають реальні можливості реалізації проекту в стислі терміни з контрольованими витратами. У моделі вони можуть бути представлені як бінарні (наявність / відсутність), відстаневі (у кілометрах) або у вигляді індексу доступності, розрахованого на основі декількох чинників.

Таким чином, інфраструктурний компонент ГІС-карти дозволяє об'єктивно оцінити технічну придатність території до водневої трансформації та врахувати не лише потенціал, але й готовність до впровадження інвестицій на практиці.

Значення інфраструктурних індикаторів мають бути нормовані (уніфіковані, нормалізовані) для того, щоб їх

можна було інтегрувати в єдиний підсумковий інфраструктурний індекс. Це є ключовою вимогою для багатокритеріальної оцінки, особливо в межах ГІС-моделей, де кожен блок (ресурси, інфраструктура, соціальні чинники тощо) має бути представлений єдиним числовим значенням для подальшої інтеграції в загальний індекс інвестиційної привабливості.

На практиці це визначається за рахунок нормалізації усіх індикаторів до єдиної шкали, зазвичай від 0 до 1, через методи мінмакс-нормалізації (для відстаней: ближче = краще), логічної шкали (для бінарних – 1 = є, 0 = немає) та експертного шкалування (для індикаторів типу «низька / середня / висока доступність»).

Зважене агрегування нормалізованих значень визначається за формулою (3):

$$I_{инфр} = \sum_{n=1}^n \omega_i \cdot X_i, \quad (3)$$

де:

$I_{инфр}$ – розрахунковий індекс інвестиційної привабливості;

X_i – нормалізоване значення i-го індикатора;

ω_i – ваговий коефіцієнт i-го індикатора (з урахуванням експертного опитування або аналітичної ієрархії);

n_i – загальна кількість індикаторів

Як наслідок, кожна громада отримає узагальнене значення інфраструктурної привабливості, наприклад:

0,82 – дуже високий рівень готовності інфраструктури,

0,41 – низький рівень доступності.

Важливо враховувати, що всі індикатори мають бути однозначно і послідовно нормалізовані, також неуніфіковані значення (наприклад, «відстань у кілометрах») не можна безпосередньо використовувати в інтегральному індексі без трансформації, крім того для порівняльності між громадами або регіонами слід застосовувати однакові шкали (табл. 3).

Таблиця 3. Індикатори інфраструктурного шару інтерактивної карти для оцінки інвестиційної привабливості

Table 3. Indicators of the infrastructure layer of the interactive map for assessing investment attractiveness

№	Індикатор	Позначення	Тип	Метод нормалізації	Пояснення
1	Відстань до ЛЕП	X_1	Відстаневий / Бінарний	$1 - (x / x_{\max})$	Чим ближче громада до лінії, тим краще
2	Наявність ПС	X_2	Відстаневий	1 або 0	1 – наявна підстанція, 0 – відсутня
3	Доступ до газопроводу	X_3	Відстаневий / Бінарний	$1 - (x / x_{\max})$ або 1/0	Оцінюється як наявність або відстань до точки підключення
4	Доступ до водопровідної мережі	X_4	Відстаневий / Бінарний	$1 - (x / x_{\max})$	Важливо для електролізу
5	Відстань до автошляхів	X_5	Відстаневий	$1 - (x / x_{\max})$	Оцінюється доступність транспортування
6	Наявність залізничного сполучення	X_6	Бінарний	1 або 0	Оцінюється як наявність вузла на території

№	Індикатор	Позначення	Тип	Метод нормалізації	Пояснення
7	Близькість до порту / логістичного хабу	x_7	Відстаневий	$1 - (x / x_{\max})$	Оцінюється логістична перевага
8	Наявність brownfield-зон	x_8	Кількісний	$x / x_{\max}$	Чим більше майданчиків, тим вище потенціал
9	Резерв потужності для приєднання	x_9	Бінарний	1 або 0	Оцінюється технічна можливість підключення до мережі

* $x_{\max}$ – максимальне значення цього показника серед усіх громад
 x – поточне значення індикатора в громаді

Усі показники нормалізуються перед обчисленням загального інфраструктурного індексу та об'єднуються за формулою з ваговими коефіцієнтами для кожного з x_i

$(x / x_{\max})$ – це візуальне зображення методу нормалізації показника, який використовується для того, щоб перевести різні за масштабом і одиницями індикатори до єдиної шкали – зазвичай від 0 до 1. Така нормалізація дозволяє їх згодом додавати з вагами в одному

розрахунку (наприклад, для створення інфраструктурного індексу).

$$x_{\text{norm}} = \frac{x}{x_{\max}} \quad (4)$$

У табл. 4 наведемо отримані результати розрахунку інтегрального індексу інфраструктури на прикладі віртуальної територіальної громади X. А також визначені ваги для кожного індикатора (табл. 5).

Таблиця 4. Чисельні результати прикладу розрахунку нормованого показника індикатора для умовної територіальної громади X

Table 4. Numerical results of an example of calculating the normalized indicator for a conditional territorial community X

Індикатор	Значення x_i	Тип	Нормалізація	x_{norm}
Відстань до ЛЕП	12 км	Відстаневий	1–12/30	0,60
Наявність ПС (є)	1	Бінарний	-	1
Газопровід (є, близько)	1	Бінарний	-	1
Вода (є)	1	Бінарний	-	1
Відстань до автошляху	5 км	Відстаневий	1–5/15	0,67
Залізниця (є)	1	Бінарний	-	1
Порт на відстані 80 км	80 км	Відстаневий	1–80/200	0,6
Brownfield-зони: 2 шт. (макс 5 по країні)	2	Кількісний	2/5	0,4
Резерв потужності (немає)	0	Бінарний	-	0,00

Відповідно до формули (3) $I_{\text{інтегр}} = 0.09+0.10+0.10+0.10+0.067+0.10+0.06+0.06+0.00 = 0.687$

Інтерпретація отриманих даних свідчить про те, що інфраструктурна привабливість цієї громади становить 0.687 (або 68,7 %) – вище середнього, але є слабке місце – відсутній резерв потужності, що знижує загальну оцінку.

Крім природного ресурсу та інфраструктурної забезпеченості, важливе значення у визначенні інвестиційної привабливості мають соціально-економічні, правові й ризикові чинники, які відображають реальну життєздатність та стійкість території до довгострокових проєктів, як-от зелена воднева енергетика.

Соціально-економічні умови відіграють роль у визначенні потенціалу локальної робочої сили, сприйняття інновацій, рівня ділової активності та наявності внутрішнього запиту на розвиток. Основними індикаторами

цього блоку є щільність та динаміка населення, рівень зайнятості, структура економіки громади, освітній потенціал, наявність закладів професійної підготовки та, що не менш важливо, наявність або відсутність стратегій місцевого розвитку, які передбачають підтримку ВДЕ, індустриальні парки або інвестиційні пріоритети. Високий соціально-економічний індекс створює передумови для залучення інвестора, знижує ризики реалізації проєкту та посилює потенціал синергії з локальними ініціативами.

Адміністративно-правові аспекти охоплюють набір індикаторів, які визначають формальну можливість реалізації проєкту на вибраній території. Зокрема, це правовий статус земель (наявність / відсутність обмежень на промислове або інфраструктурне використання), узгодженість з генеральним планом громади, участь території в державних, регіональних або міжнародних

програмах підтримки ВДЕ чи водневої економіки, готовність до державно-приватного партнерства. Також важливо враховувати юридичну спроможність органів місцевого самоврядування, відкритість до інвестицій, прозорість процедур і тривалість адміністративних циклів. Високі показники в цьому блоці означають зменшення бар'єрів і часу для реалізації проєкту, що суттєво підвищує індекс привабливості.

Таблиця 5. Ваги (умовні) для кожного індикатора

Table 5. Weights (conditional) for each indicator

Індикатор	Позначення ω_i	ω_i
ЛЕП	12 км	0,15
Підстанція	1	0,10
Газопровід	1	0,10
Вода	1	0,10
Автошлях	5 км	0,10
Залізниця	1	0,10
Порт / хаб	80 км	0,10
Brownfield-зона	2	0,15
Резерв потужності	0	0,10
Разом		1,0

Ризики – це група негативних чинників, що знижують інвестиційний інтерес, незалежно від природного чи інфраструктурного потенціалу. До них належать передусім безпекові загрози, які набули особливої ваги в умовах повномасштабної війни в Україні: наявність бойових дій, наближеність до лінії фронту, тимчасова окупація, імовірність мінування. Важливими є також екологічні та кліматичні ризики – загроза підтоплення, посухи, ерозія, які можуть впливати на інфраструктуру проєкту або логістику. До техногенних ризиків відносять інфраструктурний знос, аварійність, загрозу промислових забруднень. На відміну від інших блоків, значення цих індикаторів можуть мати негативну вагу, тобто зменшувати загальний індекс привабливості навіть за умови високих значень в інших категоріях.

Прикладна реалізація: як індекс виглядає на карті

Після розрахунку інтегрального індексу інвестиційної привабливості для кожної територіальної громади отримані значення інтегруються в геоінформаційну систему (ГІС) у вигляді цифрового шару, який набуває візуалізації на інтерактивній карті. Це дає змогу не лише порівняти території за рівнем інвестиційної готовності, а й швидко ідентифікувати зони з найвищим потенціалом для розвитку проєктів зеленої водневої енергетики.

Кожна громада на карті позначається кольором або градієнтною шкалою, що відповідає її зваженому індексу інвестиційної привабливості. Наприклад, громади з високим індексом (0,75–1,00) можуть бути позначені

відтінками зеленого кольору, середні значення (0,40–0,75) – жовтими, а низькі (менше 0,40) – червоними або сірими. Така система дозволяє швидко зорієнтуватися в просторовій структурі привабливості по всій території країни.

Крім того, за допомогою інтерактивних функцій (tooltip, pop-up, клік по громаді) користувач може отримати детальний профіль кожної територіальної одиниці: значення кожного індикатора, вагові коефіцієнти, коротке пояснення чинників, які вплинули на загальну оцінку, а також доступ до супровідної документації (наприклад, стратегій розвитку або проєктів локальних ВДЕ). Це дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення на основі відкритих даних.

Карта також може бути адаптована для фільтрації за окремими категоріями індикаторів: інфраструктура, ресурсний потенціал, ризики, соціально-економічні умови, що забезпечує аналітичну гнучкість. Для прикладного використання – як з боку інвесторів, так і місцевих адміністрацій – реалізується можливість експорту даних (CSV, Excel) та моделювання сценаріїв (наприклад, додавання нової ЛЕП або покращення логістичного доступу).

Важливо, що така карта – це не просто візуальне відображення числових оцінок. Вона перетворюється на інструмент стратегічного управління територіями, дозволяючи:

- визначати території з «найшвидшим запуском» проєктів;
- формувати кластери розвитку зеленої енергетики;
- аргументувати залучення державного чи міжнародного фінансування;
- прогнозувати динаміку змін при зміні окремих чинників.

Таким чином, візуалізація індексу інвестиційної привабливості у форматі ГІС-карти забезпечує поєднання аналітики, просторової логіки та управлінської зручності, відкриваючи нові можливості для планування у сфері водневої енергетики в Україні.

Інтеграція індексу інвестиційної привабливості до ГІС-платформи створює нові можливості для прикладного управління розвитком територій, які виходять за межі суто візуалізації даних. Одним із основних сценаріїв використання такого шару є виявлення територій з найвищою готовністю до реалізації проєктів у стислі терміни. Ідеться про громади, які вже мають доступ до електромереж, водних ресурсів, транспортної інфраструктури, а також відповідну нормативну базу та локальні стратегії розвитку. Подібні території можна вважати зонами «швидкого старту», що особливо цінно для ініціації пілотних водневих проєктів або залучення приватного капіталу в межах перехідного періоду післявоєнного відновлення.

Крім індивідуального аналізу, карта дозволяє формувати просторові енергетичні кластери – об'єднання суміжних громад із взаємодоповнюючим потенціалом у сфері ВДЕ

та інфраструктури. Такий підхід відкриває шлях до синергії на рівні логістики, спільного використання мереж, оптимізації розміщення водневих установок та індустріальних парків. Замість точкових проєктів громади можуть ініціювати мережеві ініціативи, що підвищують масштабність й економічну доцільність зелених проєктів.

Важливою функцією карти є її застосування для обґрунтування інвестиційних ініціатив перед донорами та державою. Візуально представлений індекс дозволяє громадам подаватися до національних або європейських програм підтримки з об'єктивною аргументацією, базованою на даних. Наприклад, якщо громада демонструє високі значення в усіх ключових показниках, але має слабкий інфраструктурний компонент, це може стати підставою для державного або грантового співфінансування саме цього напрямку.

Крім того, ГІС-карта дозволяє моделювати сценарії змін, коли користувач (наприклад, орган місцевого самоврядування) може змінити значення одного або кількох індикаторів і миттєво побачити, як це вплине на загальний індекс привабливості. Така функціональність важлива як для стратегічного планування, так і для обґрунтування локальних інвестиційних рішень, розробки програм соціально-економічного розвитку або залучення приватних партнерів.

У підсумку, індекс інвестиційної привабливості, реалізований у вигляді інтерактивного шару в ГІС-карті, набуває ролі універсального інструменту просторового управління. Він поєднує аналітичну точність, просторову логіку і доступність для прийняття рішень як на рівні громади, так і в межах державної політики стимулювання енергетичної трансформації.

Висновок

Запропоноване бачення, методика та зібраний у статті матеріал створюють цілісну основу для побудови ефективного шару інвестиційної привабливості в ГІС-карті проєктів зеленої водневої енергетики. Такий підхід забезпечує аналітичну точність, просторову деталізацію і практичну застосовність для прийняття управлінських та інвестиційних рішень.

Формування індексу привабливості потребує поетапного нормалізованого врахування природно-ресурсного, інфраструктурного, соціально-економічного, правового та ризикового контексту громади, що дозволяє створити об'єктивну систему порівняння територій у межах національного просторового планування.

Деталізація оцінки на рівні територіальних громад, а не регіонів чи областей, є ключовим принципом сучасного просторового управління, оскільки вона враховує локальні ініціативи, ресурсну гнучкість та децентралізований характер прийняття рішень в Україні.

Практичне застосування карти інвестиційної привабливості у форматі інтерактивного ГІС-шару відкриває нові можливості для швидкої ідентифікації пілотних локацій,

обґрунтування залучення ресурсів, сценарного моделювання та планування регіональних водневих кластерів.

Мають перспективу подальші дослідження, спрямовані на адаптацію вагових коефіцієнтів до різних типів територій, автоматизацію оновлення просторових індикаторів, залучення експертної оцінки та розробку прототипів цифрових карт на базі державних геопорталів, що забезпечить практичну реалізацію запропонованого концепту.

ПОСИЛАННЯ

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi: IRENA, 2019. 54 с. – Режим доступу: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
2. Hydrogen Europe. HyPotential Hydrogen Infrastructure Map. Електрон. дані. – Режим доступу: <https://www.h2inframap.eu/> (дата звернення: 10.06.2025).
3. Velasquez-Jaramillo M., García J. G., Vasco-Echeverri O. Techno economic model to analyze the prospects of hydrogen production in Colombia. *International Journal of Thermofluids*. 2024. Vol. 22. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.ijtf.2024.100597>
4. Cote E., Salm S. The policy design of hydrogen strategies: International comparison and implications for the energy transition. *Energy Policy*. 2022. Vol. 163. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112821>
5. Pinto M. C., Gaeta M., Arco E. et al. Mapping the suitability of North Africa for green hydrogen production: an application of a multi-criteria spatial decision support system combining GIS and AHP for Tunisia. *Energy, Sustainability and Society*. 2025. Vol. 15. № 20. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00512-4>
6. Nasser M., Hassan H. Feasibility analysis and Atlas for green hydrogen project in MENA region: Production, cost, and environmental maps. *Solar Energy*. 2024. Vol. 268. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112326>
7. Timmeberg S., Kaltschmitt M. Hydrogen from renewables: supply from North Africa to Central EU as blend in existing pipelines. Potentials and costs. *Applied Energy*. 2025. Vol. 237. P. 795–809. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.030>
8. Zurian O. V., Levchenko O. I., Pidtilok O. M. To the issue of accounting for uncertainty and risk in the geological-economic analysis and cost assessment of deposits. *Mineral Resources of Ukraine*. 2015. Vol. 1, 38–47. <https://mru-journal.com.ua/index.php/mru/article/view/86>

9. Zurian O., Tolkunov A., Omelchenko T. Risk considerations in the study of investment attractiveness of geothermal energy objects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2025. Vol. 2(109). 97–103. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.13>
10. Touili S., Alami M. A., Azouzoute A. et al. A technical and economical assessment of hydrogen production potential from solar energy in Morocco. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. P. 22777–22796. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.136>
11. Gouareh A., Settou N., Khalfi A. GIS-based analysis of hydrogen production from geothermal electricity using CO₂ as working fluid in Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. P. 15244–15253. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.105>
12. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за ред. С. О. Кудрі. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с. – Режим доступу: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas_2024_publication.pdf
13. Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. А. Електролітичне виробництво водню для вітро-водневих станцій. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3(74). С. 92–100. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).92-100](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).92-100)
14. Мхітарян Н. М., Кудря, С. О., Зур'ян О. В. Концепція створення інтерактивної карти інвестиційної привабливості зеленого водню в Україні. *Відновлювана енергетика*. 2025. № 2(81). С. 151–161. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).151-161](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).151-161)
5. Pinto, M. C., Gaeta, M., Arco, E., Boccardo, P., & Cognati, S. P. (2025). Mapping the suitability of North Africa for green hydrogen production: An application of a multi-criteria spatial decision support system combining GIS and AHP for Tunisia. *Energy, Sustainability and Society*, 15(20). <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00512-4>
6. Nasser, M., & Hassan, H. (2024). Feasibility analysis and atlas for green hydrogen project in MENA region: Production, cost, and environmental maps. *Solar Energy*, 268, 112326. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112326>
7. Timmeberg, S., & Kaltschmitt, M. (2025). Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central EU as blend in existing pipelines. Potentials and costs. *Applied Energy*, 237, 795–809. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.030>
8. Zurian O. V., Levchenko O. I., Pidtilok O. M. (2015). To the issue of accounting for uncertainty and risk in the geological-economic analysis and cost assessment of deposits. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 38–47. <https://mru-journal.com.ua/index.php/mru/article/view/86>
9. Zurian O., Tolkunov A., Omelchenko T. (2025). Risk considerations in the study of investment attractiveness of geothermal energy objects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(109), 97–103. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.13>
10. Touili, S., Alami, M. A., Azouzoute, A., El Hassouani, Y., & Amrani, A. (2018). A technical and economical assessment of hydrogen production potential from solar energy in Morocco. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 22777–22796. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.136>
11. Gouareh, A., Settou, N., & Khalfi, A. (2015). GIS-based analysis of hydrogen production from geothermal electricity using CO₂ as working fluid in Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 15244–15253. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.105>
12. Kudria, S. O. (Ed.). (2024). Atlas of the energy potential of renewable energy sources in Ukraine. Kyiv: Institute for Renewable Energy of the NAS of Ukraine. Retrieved from https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas_2024_publication.pdf
13. Kudria, S. O., Yatsenko, L. V., Shynkarenko, L. Ya., & Tkachenko, M. A. (2023). Electrolytic hydrogen production for wind-hydrogen stations. *Vidnovlyuvana Energetyka (Renewable Energy)*, 3(74), 92–100. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).92-100](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).92-100)
14. Mkhitarayan, N., Kudrya, S., Zurian, O. (2025). Concept for developing an interactive map of green hydrogen investment attractiveness in Ukraine. *Vidnovlyuvana Energetika*, 2(81), 151–161. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).151-161](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).151-161)

REFERENCES

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi: IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
2. Hydrogen Europe. (2025). HyPotential Hydrogen Infrastructure Map. Retrieved June 10, 2025, from <https://www.h2inframap.eu/>
3. Velasquez-Jaramillo, M., García, J. G., & Vasco-Echeverri, O. (2024). Techno-economic model to analyze the prospects of hydrogen production in Colombia. *International Journal of Thermofluids*, 22, 100597. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100597>
4. Cote, E., & Salm, S. (2022). The policy design of hydrogen strategies: International comparison and implications for the energy transition. *Energy Policy*, 163, 112821. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112821>