

СОНЯЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОЇ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ

Редько А. І., Адаменко Я. О.

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

e-mail: redko.geo@gmail.com

e-mail: yarad1964@gmail.com

Анотація

У статті запропоновано підхід до оцінювання придатності схилів відпрацьованих вапнякових кар'єрів для розміщення наземних сонячних електростанцій (СЕС) на прикладі Стриганецького кар'єру поблизу с. Довге (Івано – Франківська область, Україна). Актуальність теми зумовлена необхідністю поєднання завдань рекультивативних порушених земель та розвитку відновлюваної енергетики, зокрема використанням техногенно порушених земель для розміщення СЕС, що активно обговорюється у світовій літературі для відкритих гірничих розробок, але практично не реалізовано для умов Українських Карпат [1 – 3]. На основі цифрової моделі рельєфу кар'єру виконано просторовий аналіз розподілу ухилів, експозицій схилів та сумарної річної сонячної радіації. Для оцінювання придатності використано трирівневу систему класифікації за кожним з показників (поза розрахунком, помірно придатні, придатні, найбільш придатні) з подальшим формуванням інтегрального індексу придатності як добутку часткових індексів. До аналізу було залучено лише ті схили з крутістю понад 15°, які орієнтовані в південний сектор (від півдня через південний схід до південного заходу) та характеризуються підвищеними значеннями річної сумарної сонячної радіації.

Додатково застосовано фільтрацію за площею полігонів, що дозволило відсіяти дрібні, технологічно непридатні фрагменти. У результаті виділено «перспективний схил» площею близько 1,7 га, на якому геометричні параметри рельєфу та радіаційні умови є найсприятливішими для розміщення СЕС.

На основі середньорічної величини радіації та прийнятих параметрів фотоелектричних модулів оцінено потенційний річний виробіток електроенергії та можливу встановлену потужність майбутньої станції.

Показано, що запропонована методика може бути інтегрована у завершальні розділи проєктів розробки та рекультивативних кар'єрів як інструмент попереднього планування геометрії уступів та схилів з урахуванням перспектив їх подальшого використання для розміщення СЕС.

Для території Івано – Франківської області це перша спроба комплексного GIS – моделювання придатності схилів відпрацьованого кар'єру з урахуванням інсоляції, ухилу та експозиції, що формує підґрунтя для подальшого поширення підходу на інші гірничі об'єкти регіону.

Ключові слова: відпрацьований кар'єр; рекультивативна; сонячна електростанція; деградовані землі; відновлювані джерела енергії; GIS – моделювання; експозиція схилу; сонячна радіація; інтегральний індекс придатності.

SOLAR POWER PLANTS AS A TOOL FOR THE ECOLOGICAL REVITALIZATION OF ABANDONED QUARRIES

A. I. Redko, Y. O. Adamenko
Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas

Abstract

The article proposes an approach to assessing the suitability of slopes of exhausted limestone quarries for the deployment of ground-mounted solar power plants (SPPs), using the Stryhynets quarry near the village of Dovhe (Ivano-Frankivsk Oblast, Ukraine) as a case study. The relevance of the topic is driven by the need to combine the tasks of reclaiming disturbed lands with the development of renewable energy, in particular the use of technically disturbed lands for SPP siting. This issue is actively discussed in the international literature for open-pit mining sites, but has been virtually unexplored under the conditions of the Ukrainian Carpathians [1–3]. Based on a digital elevation model of the quarry, a spatial analysis of the distribution of slope gradients, slope aspects and annual global solar irradiation was performed. To assess suitability, a three-level classification was applied for each indicator (excluded from consideration, moderately suitable, suitable, highly suitable), followed by the construction of an integral suitability index as the product of the partial indices. The analysis considered only slopes steeper than 15°, oriented towards the southern sector (from south-east through south to south-west) and characterised by increased values of annual global solar irradiation. Additional filtering by polygon area was applied to remove small, technologically unsuitable fragments. As a result, a «prospective slope» with an area of about 1.7 ha was identified, where the geometric parameters of the terrain and the radiation conditions are most favourable for SPP installation. Using the mean annual irradiation and the adopted parameters of photovoltaic modules, the potential annual electricity generation and the possible installed

capacity of a future plant were estimated. It is shown that the proposed methodology can be integrated into the final stages of quarry design and reclamation projects as a tool for pre-planning the geometry of benches and slopes, taking into account their future use for SPP deployment. For the territory of Ivano-Frankivsk Oblast, this represents the first attempt at comprehensive GIS-based modelling of the suitability of exhausted quarry slopes considering insolation, slope and aspect, providing a basis for further application of the approach to other mining sites in the region.

Keywords: exhausted quarry; land reclamation; solar power plant; degraded land; renewable energy sources; GIS modelling; slope aspect; solar radiation; integral suitability index.

Постановка проблеми

Вичерпання запасів корисних копалин у відкритих розробках супроводжується формуванням значних площ порушених земель, які часто залишаються малоприсадибними для традиційних видів використання. Натомість світова практика демонструє зростаючий інтерес до інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій, у структуру післягірничого використання територій шахт і кар'єрів [1, 2, 8, 12].

Для України, а особливо для гірських та передгірських районів Карпат, це питання є актуальним з двох причин:

- високий потенціал сонячної радіації на південних та південно – західних схилах;
- потреба у ревіталізації відпрацьованих кар'єрів та пошуку економічно доцільних сценаріїв їх рекультивациі.

При цьому більшість існуючих робіт, присвячених розміщенню СЕС, зосереджуються на рівнинних або слабо хвилястих територіях та використовують багатофакторні методи (АНР, TOPSIS, нечіткі MCDM) на рівні регіональних чи національних масштабів [4–7].

Питання детального моделювання інсоляції та геометрії схилів у межах окремого кар'єру, пов'язаного з конкретною геометрією уступів і «проектном виробітки», залишаються недостатньо опрацьованими, особливо в українському контексті.

Таким чином, виникає науково – практична задача: розробити підхід до оцінювання придатності схилів відпрацьованого кар'єру для розміщення СЕС, який би одночасно враховував інсоляційні характеристики, ухил та експозицію, а також міг бути інтегрований у завершальні стадії проектів рекультивації кар'єрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Можливості використання гірничих територій для розміщення сонячних електростанцій активно розглядаються у низці сучасних праць. Зокрема у роботі [1] автори продемонстрували, що глобальні гірничі території мають значний потенціал для встановлення СЕС, здатний робити помітний внесок у декарбонізацію енергетики.

Ряд досліджень у Південній Кореї аналізують фотогальванічний потенціал на територіях рекультивації покинутих шахт, використовуючи карти відновлюваних ресурсів та GIS – аналіз [2, 11, 12].

Показано, що поєднання інформації про глобальну горизонтальну радіацію, характер землекористування та інженерні обмеження дозволяє відбирати ділянки для СЕС у межах десятків та сотень гірничих об'єктів.

На рівні методології вибору майданчиків для СЕС в останні роки домінують підходи на основі багатокритеріального аналізу, що інтегруються з GIS. Автори [4] запропонували АНР – TOPSIS – метод для вибору майданчиків СЕС на відвалах вуглевідходів, поєднуючи технічні, екологічні та соціально – економічні критерії [4].

У статті [5] застосували нечітку MCDM для оцінки придатності територій до розміщення СЕС, інтегруючи радіаційні, орографічні та інфраструктурні показники.

У статті [6] автори використали GIS та нечіткий АНР для вибору майданчиків СЕС у західному Середземномор'ї Туреччини, а у роботі [7] автори проаналізували оптимальне розміщення СЕС за допомогою GIS та багатокритеріального аналізу на прикладі Іспанії. Подібні підходи демонструють ефективність поєднання просторових даних та MCDM, однак переважно зосереджуються на макрорівні (регіони, провінції).

Для детального моделювання сонячної радіації в складному рельєфі ключову роль відіграють моделі на кшталт r_{sun} у GRASS GIS, розробленої авторами [9, 10], а також численні застосування GIS для розрахунку сонячних карт та оцінки потенціалу дахів чи схилів [8].

В українському контексті питання рекультивації кар'єрів під розміщення СЕС нами розглядалося, у роботі [3], де обґрунтовано доцільність використання відпрацьованих кар'єрів для будівництва сонячних електростанцій та наведено узагальнену методику оцінки їхнього потенціалу. Однак вказане дослідження не деталізує GIS – моделювання інсоляції на рівні окремих схилів та не інтегрує його безпосередньо з геометрією кар'єру.

Отже, невирішеною залишається задача розроблення детальної методики для одного конкретного кар'єру, яка б комплексно враховувала:

- ухил та експозицію схилів;
- поле сумарної річної сонячної радіації;
- фільтрацію ділянок за площею;
- можливість інтеграції результатів у проекти рекультивації.

Ця прогалина й обумовлює мету даної роботи.

Мета статті та постановка завдання

Мета дослідження – розробити та апробувати GIS – методику оцінювання придатності схилів відпрацьованого вапнякового кар'єру для розміщення наземної сонячної електростанції, з подальшим виділенням перспективного схилу та оцінкою його енергетичного потенціалу.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

Побудувати цифрову модель рельєфу (ЦМР) кар'єру та отримати на її основі карти ухилів, експозицій та сумарної річної сонячної радіації.

Розробити класифікацію ухилів, експозицій і радіації за рівнями придатності до розміщення СЕС.

Сформувати інтегральний індекс придатності шляхом поєднання часткових індексів та побудувати карту інтегральної придатності схилів.

Виконати фільтрацію виділених ділянок за мінімальною площею та визначити перспективний схил для розміщення СЕС.

Оцінити потенційну встановлену потужність та річний виробіток СЕС на виділеному схилі.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є відпрацьований вапняковий кар'єр поблизу с. Довге (Стриганецький кар'єр) в Івано – Франківській області. Кар'єр розташований у передгір'ї Карпат, характеризується складним рельєфом із системою уступів та терас, що формують різноорієнтовані схили.

Для аналізу використано:

- цифрову модель рельєфу кар'єру, побудовану за результатами геодезичного знімання;
- супутникові та картографічні дані про контури кар'єру та прилеглі території;
- кліматичні дані про сонячну радіацію (довгострокові середньорічні значення) для району дослідження.

Побудова цифрової моделі рельєфу та похідних карт

На основі вхідних геодезичних даних створено растрову ЦМР із просторовою роздільною здатністю, узгодженою з розмірами уступів, що дозволяє візуалізувати загальну будову рельєфу кар'єру та прилеглої території і слугує вихідною основою для подальших розрахунків (рис. 1).

У середовищі ArcGIS сформовано такі похідні шари:

Карта ухилів – значення ухилу в градусах для кожного пікселя ЦМР.

Карта експозицій схилів – азимут експозиції (0 – 360°) з відліком від півночі за годинниковою стрілкою.

На (рис. 2) подано просторовий розподіл експозиції схилів у межах Стриганецького кар'єру, отриманий шляхом розрахунку азимутів похилу поверхні за цифровою моделлю рельєфу. Значення експозиції згруповано у класові інтервали (1 – 21°, 22 – 44°, ..., 331 – 360°), які відображено різними кольорами та накладено на тривимірну модель кар'єру. Така візуалізація дозволяє виокремити ділянки південної та наближених до неї орієнтацій, що є ключовими для подальшої

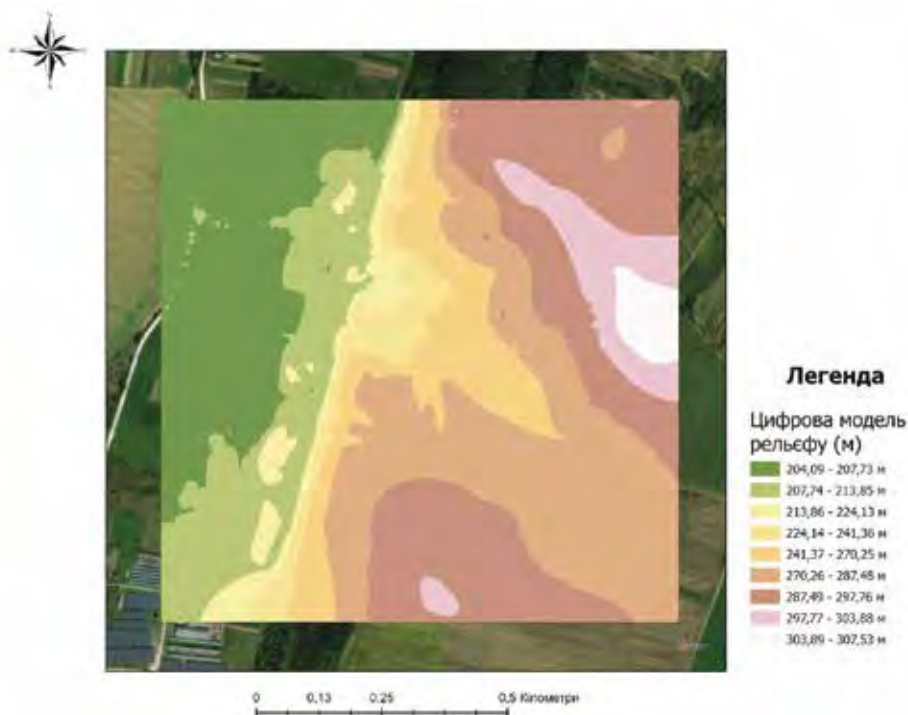


Рисунок 1. Цифрова модель рельєфу Стриганецького кар'єру, побудована за даними топографічного знімання

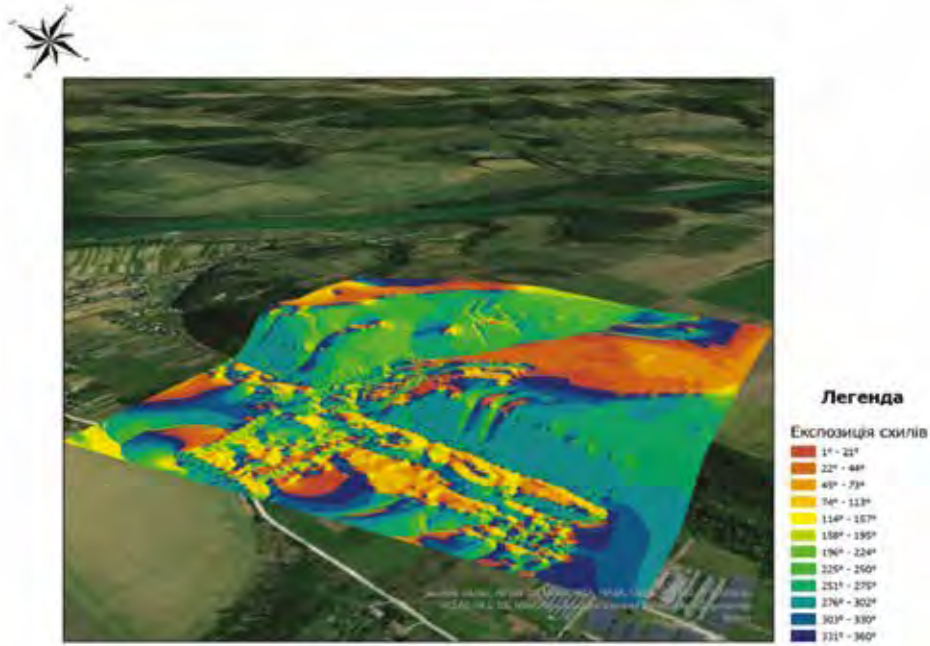


Рисунок 2. Модель експозиції схилів Стриганецького кар'єру

оцінки сонячного потенціалу схилів при розміщенні сонячних електростанцій.

Карта сумарної річної сонячної радіації – інтегральна річна радіація, перерахована до площини, дотичної до поверхні схилу (МВт·год/м²·рік). Для її отримання застосовано методику GIS – моделювання сонячної радіації, аналогічну до реалізованої в g.sun та подібних моделях, які враховують орографію, тіньові ефекти та характеристики атмосфери [8 – 10].

На (рис. 3) представлено просторовий розподіл сумарної річної сонячної радіації в межах Стриганецького кар'єру. Значення радіації варіюють у діапазоні приблизно від 0,18 до 1,17 МВт/м², що відображено градієнтом кольорів від холодних до теплих тонів. Карта враховує геометрію схилів та затінення бортами кар'єру і слугує основою для виділення ділянок із підвищеним сонячним потенціалом для подальшого розміщення сонячних електростанцій.



Рисунок 3. Модель сумарної річної сонячної радіації (МВт/м²) для Стриганецького кар'єру



Рисунок 4. Карта класифікованих ухилів поверхні Стриганецького кар'єру

З метою оцінки придатності схилів до розміщення СЕС кожен з трьох показників – ухил, експозиція та сумарна річна радіація – класифіковано за чотирма рівнями:

- 0 – «поза розрахунком» (непридатні або виключені ділянки);
- 1 – «помірно придатні»;
- 2 – «придатні»;
- 3 – «найбільш придатні».

Нами були обґрунтовано наступні критерії за ухилом – до розрахунку включали лише ділянки з ухилом більше 15°, оскільки площі з меншими ухилами розглядаються як рівнинні та не відповідають фокусу роботи на схилах.

Для ділянок з більшими ухилами встановлено такі класи (приклад, який може уточнюватися в подальших роботах) (рис. 4):

- $0 \leq 15^\circ$ (поза розрахунком);



Рисунок 5. Карта придатності схилів Стриганецького кар'єру за експозицією

- 15° – 25° (помірно придатні);
- 25° – 35° (придатні);
- 35° – 45° (найбільш придатні з точки зору використання рельєфу для щільного розміщення рядів панелей, за умови забезпечення стійкості та безпеки).

За експозицією схили були поділено на такі групи (кут – азимут експозиції) (рис. 5):

- 0 – поза розрахунком: 0 – 120° та 240 – 360° (переважно північні, північний схід і північний захід);
- 1 – помірно придатні: 120 – 150° та 210 – 240°;
- 2 – придатні: 150 – 165° та 195 – 210°;
- 3 – найбільш придатні: 165 – 195° (максимально наближені до південної орієнтації).

Таким чином, у розрахунок включаються схили з орієнтацією від південного сходу до південного заходу, що відповідає рекомендаціям щодо орієнтації панелей у Північній півкулі [5 - 7].

Сумарну річну радіацію на схилі (МВт·год/м²·рік) також було класифіковано на 4 класи за квантилями або фіксованими порогоми (конкретні порогові значення визначено за статистикою для кар'єру):

- 0 – поза розрахунком: ≤1000;
- 1 – помірно придатні: 1000 – 1100;

- 2 – придатні: 1100 – 1200;
- 3 – найбільш придатні: >1200.

Для комплексної оцінки придатності кожного пікселя використано інтегральний індекс придатності I_{INT} , що обчислюється як добуток трьох часткових індексів:

$$I_{int} = I_S \cdot I_E \cdot I_R, \quad (1)$$

де:

I_S – індекс ухилу (0, 1, 2, 3); I_E – індекс експозиції (0, 1, 2, 3); I_R – індекс річної радіації (0, 1, 2, 3).

Інтерпретація результатів обчислення за формулою (1):

- якщо $I_{INT} = 0$, ділянка виключається з подальшого розгляду;

- чим більше значення I_{INT} , тим вищою є комплексна придатність для розміщення СЕС.

На основі цієї формули побудовано карту інтегрального індексу придатності (рис. 6).

Відбір ділянок та виділення перспективного схилу проводили за:

1. Фільтрація за площею – оскільки практичне розміщення СЕС потребує певної мінімальної площі для формування рядів панелей, полігони з високими значеннями I_{INT} було додатково відфільтровано за критерієм площі. З карти інтегрального індексу придатності виділено полігони з:
 - значенням $I_{INT} > 0$;



Рисунок 6. Карта інтегрального індексу придатності схилів Стриганецького кар'єру для розміщення сонячної електростанції



Рисунок 7. Виділена ділянка з максимальною інтегральною придатністю для розміщення СЕС у Стриганецькому кар'єрі

– площею не менше встановленого порогу (у роботі використано поріг, що дозволяє уникнути фрагментів, менших за кілька сотих гектара).

Це дало змогу відсіяти дрібні ділянки придатності, які, з інженерної точки зору, економічно недоцільно освоювати під окремі масиви панелей.

2. Характеристика виділеного схилу - у результаті аналізу в межах Стриганецького кар'єру виділено перспективний схил площею близько 1,7 га (рис. 7), який:

– розташований на південному або близькому до півдня схилі;

– має ухили, що забезпечують вигідне розташування панелей щодо Сонця та можливість оптимізувати відстань між рядами;

– характеризується підвищеними значеннями сумарної річної радіації порівняно із середніми по кар'єру;

– утворює відносно цілісну ділянку без суттєвого «розбиття» уступами на дрібні фрагменти.

Цей схил розглядається як еталонна ділянка для оцінки енергетичного потенціалу та приклад того, як геометрія кар'єру може бути використана для формування майданчика під СЕС.

3. Оцінка енергетичного потенціалу річного виробітку електроенергії здійснюється на основі:

1. Середньорічної сумарної сонячної радіації на площину схилу $G_{р\text{іч}}$ (кВт·год/м²·рік), отриманої з карти радіації.

2. ККД фотоелектричної системи (модулі + інвертори + кабельні втрати), який для сучасних СЕС зазвичай приймається в 0,6 для перерахунку від енергії сонячної радіації до електричної енергії на виході станції [5, 7].

3. Площа перспективного схилу $F \approx 1690,2 \text{ м}^2$.

У загальному вигляді річний виробіток електроенергії на схилі можна подати як:

$$E_{р\text{іч}} = G_{р\text{іч}} \cdot F \cdot \eta_{\text{системи}} \quad (2)$$

де:

$E_{р\text{іч}}$ – річний виробіток електроенергії, кВт·год/рік; $G_{р\text{іч}}$ – сумарна річна сонячна радіація на площину схилу, кВт·год/м²·рік; F – площа перспективного схилу, м²; $\eta_{\text{системи}}$ – загальний коефіцієнт корисної дії фотоелектричної системи (0,60).

$$E_{р\text{іч}} = \frac{(1086,73 \cdot 1690,2 \cdot 0,6)}{1000} = 1102,07 \text{ МВт год.}$$

Конкретні числові розрахунки для перспективного схилу виконуються на основі отриманих у проекті значень $G_{річ}$ та прийнятих технічних параметрів СЕС. Вони демонструють, що навіть у межах одного кар'єру можливо сформувавши ділянку, де річний виробіток на 1 кВт встановленої потужності є конкурентоспроможним порівняно з традиційними рівнинними майданчиками, а використання уже порушених земель зменшує конфлікти щодо землекористування.

Обговорення результатів

Отримані результати узгоджуються з висновками міжнародних досліджень щодо потенціалу відпрацьованих гірничих територій для розміщення СЕС [1–2, 11, 12]. Однак запропонований підхід має низку особливостей та переваг:

1. Фокус на схилах кар'єру, а не на плоских майданчиках. Більшість робіт, що стосуються шахт і відвалів, аналізують відносно пологі поверхні (відвали, тераси, рекультивовані майданчики). У даній роботі акцент зроблено саме на схилах, що вимагає більш тонкого урахування ухилів та експозицій.

2. Комплексний інтегральний індекс. На відміну від підходів, де ухил, експозиція та радіація враховуються окремо у багатокритеріальній схемі з вагами [4–7], використання інтегрального індексу у вигляді добутку трьох часткових індексів дозволяє автоматично відфільтровувати ділянки, де хоча б один критерій є неприйнятним (наприклад, тіньові північні схили). Це робить методику простою в реалізації та прозорою з точки зору інтерпретації.

3. Масштаб кар'єру і зв'язок із «проектом виробітки». Методика орієнтована на рівень одного кар'єру, що дозволяє безпосередньо пов'язувати результати з геометрією уступів та схилів. У перспективі це дає змогу враховувати вимоги до «енергетично придатної» форми кар'єру вже на стадії проектування розробки родовища.

4. Рекультиваційний аспект. Розміщення СЕС на відпрацьованих схилах може розглядатися як один зі сценаріїв техніко – екологічної рекультивациі, який поєднує:

- стабілізацію схилів;
- мінімізацію пиловиділення та ерозійних процесів;

– створення довгострокового економічного використання території.

5. Регіональна новизна. Для Івано – Франківської області та загалом для України запропонований GIS – підхід до моделювання придатності схилів відпрацьованого кар'єру з урахуванням інсоляції, ухилу та експозиції є, за результатами аналізу літератури, першим реалізованим прикладом на рівні конкретного об'єкта [1, 2, 3].

Серед обмежень методики слід відзначити:

- залежність точності результатів від якості ЦМР та параметрів моделі сонячної радіації;
- не враховані в даній роботі геотехнічні та гідрогеологічні фактори стійкості схилів;
- необхідність інтеграції економічних та мережевих критеріїв (близькість до ліній електропередач, вартість підключення) для повноцінної оцінки інвестиційної привабливості майданчика.

Висновки

1. Розроблено та апробовано GIS – методику оцінювання придатності схилів відпрацьованого вапнякового кар'єру у с. Довге для розміщення наземної сонячної електростанції, яка комплексно враховує ухил, експозицію та сумарну річну сонячну радіацію.

2. На основі класифікації кожного з трьох параметрів за чотирма рівнями (поза розрахунком, помірно придатні, придатні, найбільш придатні) та формування інтегрального індексу придатності у вигляді добутку часткових індексів побудовано карту інтегральної придатності схилів кар'єру.

3. Додаткова фільтрація за площею полігонів дозволила відсіяти дрібні ділянки та виділити перспективну ділянку площею близько 1,7 га, який має найсприятливіше поєднання ухилу, експозиції та інсоляції для розміщення СЕС.

4. Проведені розрахунки показують, що на виділеному схилі можливо розмістити СЕС зі значним річним виробітком електроенергії та питомими показниками, співставними з показниками наземних станцій на рівнинних територіях, при цьому використовуючи вже порушені гірничими роботами землі.

5. Запропонована методика може бути інтегрована у завершальні розділи проектів розробки та рекультивациі відпрацьованих кар'єрів як інструмент формування «енергетично придатної» гео-

метрії схилів. Це дозволяє ще на етапі планування гірничих робіт враховувати майбутнє використання території під СЕС.

6. Для території Івано – Франківської області та, ширше, Українських Карпат дана робота є першим прикладом комплексного GIS – моделювання придатності схилів відпрацьованого кар’єру з урахуванням інсоляції, ухилу та експозиції, що відкриває можливості для поширення підходу на інші кар’єри регіону.

Перспективи подальших досліджень пов’язані з:

– розширенням методики на групу кар’єрів області з метою формування карти потенційних майданчиків СЕС;

– інтеграцією геотехнічних, гідрогеологічних та економічних критеріїв у єдину систему багатокритеріального аналізу;

– детальним порівнянням різних варіантів геометрії кар’єру на стадії проектування з погляду їхньої подальшої придатності для розміщення СЕС;

– аналізом впливу різних сценаріїв зміни клімату на довгостроковий сонячний ресурс у регіоні.

Список використаної літератури

1. He, T., Chen, Y., Zhao, Y., Li, F., Xu, N., Ren, H. Harnessing the solar photovoltaic potential in global mining areas: Energy locations for the future. *Innovation*, 2025, 6(10), 100987. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100987>.
2. Choi, Y., Song, J. Assessment of Photovoltaic Potentials at Abandoned Mine Reclamation Sites in Korea Using Renewable Energy Resource Maps. *New & Renewable Energy*, 2016, 12(49 – 2), 44 – 52.
3. Редько, А.І., Адаменко, Я.О. Рекультивация відпрацьованих кар’єрів під розміщення сонячних електростанцій. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2025, 35(4), 79–88. (англ. назва: *Reclamation of exhausted quarries for solar power plant placement*). DOI: <https://doi.org/10.36930/40350409>.
4. Shi, F., Li, X., Li, M., Bai, B. Site selection strategy for photovoltaic power plants construction on gangue hills: An integrated method based on GIS and AHP – TOPSIS. *Energy Strategy Reviews*, 2025, 59, 101722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101722>.
5. Almasad, A., Pavlak, G., Alquthami, T., Kumara, S. Site suitability analysis for implementing solar PV power plants using GIS and fuzzy MCDM based approach. *Solar Energy*, 2023, 249, 642 – 650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.046>.
6. Yilmaz, İ., Koçer, A., Aksoy, E. Site selection for solar power plants using GIS and fuzzy analytic hierarchy process: Case study of the western Mediterranean region of Turkiye. *Renewable Energy*, 2024, 237, 121799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121799>.
7. de Luis – Ruiz, J.M., Salas – Menocal, B.R., Pereda – García, R., et al. Optimal Location of Solar Photovoltaic Plants Using Geographic Information Systems and Multi – Criteria Analysis. *Sustainability*, 2024, 16(7), 2895. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072895>.
8. Choi, Y. GIS – based solar radiation mapping, site evaluation, and potential estimation of rooftop solar photovoltaic systems: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104, 165 – 177 DOI: <https://doi.org/10.3390/app9091960>.
9. Hofierka, J., Šúri, M. The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications. In: *Proceedings of the Open Source GIS – GRASS Users Conference*, Trento, Italy, 11 – 13 September 2002.
10. Hofierka, J., Huld, T., Cebecauer, T., Šúri, M. Open source solar radiation tools for environmental and renewable energy applications. *EU JRC Conference Proceedings*, 2008. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC43644>
11. Song, J., Choi, Y., Yoon, S. – H. Analysis of photovoltaic potential at abandoned mine promotion districts in Korea. *Geosystem Engineering*, 2015, 18(3), 168 – 172. DOI: <https://doi.org/10.1080/12269328.2015.1023469>.
12. Li, X., Gu, Q., Wang, Q., et al. Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges. *Energy Strategy Reviews*, 2024, 52, 101597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101597>.