

УДК 628.33:621.311:504

Andrii Redko, postgraduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0221-6908> **e-mail:** redko.geo@gmail.com

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ECO-ENERGY POTENTIAL OF EXPLODED QUARRIES AND RISKS OF ITS USE

Annotation. Aim of paper to propose a semi-quantitative model for rapidly ranking disturbed industrial lands closed quarries as candidate sites for utility-scale solar plants or renewable «energy parks», explicitly accounting for engineering constraints and environmental-permitting risks. Method the study introduces a pre-feasibility multi-criteria screening framework and an integrated EEP score (0-100) computed from expert-rated components that reflect: solar conditions and terrain shading, geotechnical suitability, grid-connection feasibility, environmental restrictions and permitting effort, and logistics and site-related capital costs. Input evidence is derived from open-access sources and translated into risk-adjusted indicators relevant to eco-engineering decision-making. Findings – the framework was tested on two quarry sites in Ivano-Frankivsk region. The Dubivtsi site achieved $EEP \approx 59$ (moderate attractiveness) while a stricter «stop-factor» formulation yielded $EEP_{geo} \approx 45$, indicating barriers requiring mitigation. The Yamnitsa site demonstrated higher feasibility with $EEP \approx 68$ and $EEP_{geo} \approx 46$, primarily due to improved geotechnical conditions and less risky grid integration. Theoretical novelty – the paper operationalises the notion of «ecoenergy» renewable potential on degraded land by combining resource availability with infrastructure readiness and risk exposure within a single, transparent scoring construct. Practical implications – the approach supports a 1-2 week desktop screening to prioritise sites, pinpoint dominant constraints (typically grid and geotechnics), and justify targeted field investigations and EIA scoping before full feasibility studies. Originality – the proposed EEP scale and the complementary geometric («hard») aggregation enhance repeatability and penalise critical blockers, improving early-stage comparability of quarry sites. Future research should calibrate weights against realised projects, embed hydrological and slope-stability submodels.

Keywords: multi-criteria screening; eco-energy potential of disturbed lands; geotechnical stability; solar generation.

А. Редько

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ЕКОЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ І РИЗИКИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Анотація. Мета дослідження – розробити модель швидкого порівняння техногенно порушених територій (відпрацьованих кар'єрів) за придатністю до розміщення сонячних електростанцій чи енергопарків з урахуванням ключових інженерних та еколого-правових ризиків. Запропонований підхід ґрунтується на багатокритеріальному скринінгу перед техніко-економічним обґрунтуванням з формуванням інтегрального індексу екоенергетичного потенціалу EEP (0-100), який агрегує експертні оцінки п'яти груп чинників:

сонячні умови та затінення, геотехнічна придатність, мережеве приєднання, екологічні обмеження, логістика та капітальні витрати. Вхідні параметри отримувалися з відкритих джерел та інтерпретувалися з позицій інженерно-екологічної безпеки. Результати апробовано на двох кар'єрах Івано-Франківської області: для ділянки поблизу с. Дубівці отримано $EER \approx 59$ (помірна привабливість) і $EER_{geo} \approx 45$ (наявність блокуючих чинників), для кар'єру поблизу с. Ямниця – $EER \approx 68$ і $EER_{geo} \approx 46$, що свідчить про вищий екоенергетичний потенціал кар'єру за рахунок кращої геотехніки та умов приєднання. Наукова новизна дослідження полягає у формалізації поняття екоенергетичний потенціал кар'єру на деградованих землях через інтеграцію ресурсних, інфраструктурних і ризикових компонентів в одному індексі. Практичне значення проведених досліджень – можливість за 1-2 тижні виконати ранжування кар'єрів, визначити проблемні місця та обґрунтувати пріоритетність детальних вишукувань і оцінки впливу на довкілля. Запропонована шкала EER та «жорсткий» геометричний варіант, які підсилюють вплив стоп-факторів і підвищують відтворюваність попереднього відбору майданчиків. Перспективи подальших досліджень – калібрування ваг за статистикою реалізованих проєктів, деталізація геотехнічних і гідрогеологічних підмоделей.

Ключові слова: багатокритеріальний скринінг; екоенергетичний потенціал порушених земель; геотехнічна стійкість; сонячна генерація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.69-81>

Вступ

Енергетика є однією з визначальних галузей економіки будь-якої країни, а стабільне та ефективне енергозабезпечення безпосередньо впливає на економічне зростання та сталий розвиток держави [1].

Зважаючи на тенденції сьогодення, все більша увага приділяється використанню альтернативних видів енергетичних ресурсів [2]. Енергетична диверсифікація дозволить суттєво зменшити енергетичну залежність України, підвищити рівень економічної, національної та екологічної безпеки і, відповідно, сприятиме економічному зростанню [3].

Розміщення сонячних електростанцій у відпрацьованих кар'єрах сьогодні вважається одним із найбільш перспективних напрямів повторного використання техногенно порушених територій [4].

У науковій літературі останніх років з'явилися роботи, присвячені цій тематиці. Зокрема, у роботі автора [5] дослідили можливість перетворення покинутих кар'єрів на сонячні ферми у США. Вони проаналізували 18 закинутих гірничих ділянок у штатах Флорида та Пенсильванія і виявили можливість встановлення СЕС, здатних генерувати до ~22% річного попиту електроенергії цілого штату Флорида. Автори застосували ГІС-моделювання з урахуванням критеріїв площі, ухилів, орієнтації, близькості до мереж тощо, і дійшли висновку, що рекультивація кар'єрів під СЕС може істотно сприяти досягненню чистоенергетичних цілей регіону.

У науковій роботі [6] проведено огляд методів рекультивації відпрацьованих кар'єрів в Англії. Автори розглянули різні технічні прийоми відновлення ландшафту (виположування укосів, зворотна засипка виїмок, терасування уступів зі створенням ґрунтового покриву тощо) та біологічні підходи (насадження рослинності або залишення території для природної сукцесії). Зазначено, що традиційна рекультивація забезпечує стабілізацію

схилів і поступове відновлення екосистем, проте остаточне використання рекультивованих кар'єрів зазвичай обмежується пасовищами, лісами чи рекреаційними зонами з невисокою господарською цінністю.

У роботі [7] автор оцінив переваги й обмеження встановлення фотоелектричних станцій на відвалах гірничих підприємств (шахтних териконах) у Європі. Дослідник відзначає, що розміщення сонячних панелей на відпрацьованих породних відвалах є одним з найкращих екологічних та економічних варіантів повторного використання земель, хоча реалізовано ще небагато таких проєктів порівняно з наявним потенціалом. Серед головних технічних чинників названо крутизну схилів відвалів, яка виступає основним обмеженням для монтажу панелей, потребуючи спеціальних інженерних рішень для довготермінової стабільності конструкцій. Водночас наведено успішні приклади встановлення СЕС на відвалах у Франції, що підтверджують реалізованість цієї ідеї на практиці.

У багатьох країнах території відпрацьованих кар'єрів перетворюють на енергопарки [8]. Наприклад, в США великі сонячні парки побудовані в кар'єрах Аризони та Невади, в Польщі на даний час відбувається реконверсія вугільних кар'єрів у регіоні Сілезія. Європейський Союз офіційно рекомендує цей підхід як зелений механізм рекультивації земель, що відповідає Green Deal, ESG-стандартам та Водній рамковій директиві [9].

Тож для України є майбутні перспективи. Особливо перспективні області: Івано-Франківська, Львівська, Дніпропетровська, Київська, Полтавська, де зосереджено найбільше кар'єрів.

Але виникає питання, як порівняти відпрацьовані кар'єри за їх екоенергетичним потенціалом.

Мета наукового дослідження: запропонувати модель оцінки екоенергетичного потенціалу відпрацьованих кар'єрів.

Теоретичні основи дослідження

Окрім переваг розміщення відновлюваних джерел енергії у відпрацьованих кар'єрах (табл. 1), існують суттєві ризики, в тому числі екологічні. Об'єкти «зеленої» енергетики необхідно розглядати в розрізі кількох категорій, таких як: зміна якості атмосферного повітря, вплив на поверхневі та підземні води, вплив на геологію, ґрунти та землекористування, вплив на ландшафти та біорізноманіття; вплив на суспільні та соціально-економічні аспекти, вплив на культурно-туристичну спадщину [10]. Лише зваживши переваги та недоліки таких впливів, чи їх повну відсутність можна визначити найбільш придатну територію для улаштування того чи іншого «зеленого» енергетичного об'єкта [11].

Однак кар'єри мають свої особливі технічні умови, які потребують врахування [12]. Серед головних:

- нестабільність укосів та потреба в постійному геотехнічному контролі;
- можливість підтоплення вимагатиме улаштування дренажних систем;
- зміна мікроклімату в котловинах потребує додаткових досліджень (наприклад, наявні температурні інверсії сприятимуть ефективності роботи сонячних панелей);
- необхідний підбір монтажних систем з урахуванням великих перепадів висот.

Таблиця 1. Переваги розміщення СЕС у відпрацьованих кар'єрах

Напрямок	Переваги
Екологічний	Рекультивация порушених земель без додаткового вилучення с/г угідь або природних територій. Зниження пилового та ерозійного ризику завдяки стабілізації поверхні. Використання деградованих земель як екологічно прийнятна альтернатива.
Інфраструктурний	Великі відкриті площі, мінімальне затінення. Вже наявні під'їзні шляхи та електричні підстанції (які використовувались у видобутку). Можливість розміщення обладнання в кар'єрі нижче рівня рельєфу сприятиме зменшенню вітрових навантажень.
Економічний	Низька вартість землі або відсутність плати за оренду для підприємств. Підвищення інвестиційної привабливості для регіону. Можливість залучення «зеленого» фінансування та грантів ЄС.
Соціальний	Нові робочі місця замість втраченої видобувної діяльності. Зменшення негативного впливу на населення, оскільки кар'єри зазвичай мали більший екологічний вплив ніж ВДЕ.

Методика дослідження

Нами запропонована наступна модель для порівняння кар'єрів за їх екоенергетичним потенціалом. Базові оцінки варіюються у діапазоні від 0 до 100, які дають простий рейтинг: 0 – «нульовий екоенергетичний потенціал», 100 – «максимально можливий екоенергетичний потенціал».

Наприклад, нехай для кар'єру i ми маємо 5 базових нормованих оцінок (кількість оцінок може бути збільшена):

S_i – сонячний потенціал та затінення;

G_i – геотехнічні особливості території (стабільність та придатність до улаштування СЕС);

M_i – віддаленість електромереж та складність приєднання;

E_i – екологічні обмеження та дозволи;

L_i – логістика та проєкт капітальних затрат.

Кожна оцінка виставляється експертним шляхом в діапазоні 0...10.

Тоді модель оцінки екоенергетичного потенціалу матиме вигляд:

$$EEP_i = 100 \times (0,25S_i + 0,20G_i + 0,25M_i + 0,15E_i + 0,15L_i). \quad (1)$$

Таким чином, враховуючи при впровадженні відновлюваних джерел енергії у відпрацьованих кар'єрах всі критерії ризику, можна виокремити його екоенергетичний потенціал, збільшити енергетичну, туристичну, а, як наслідок, і економічну вигоду при мінімальних впливах на рівень екологічної безпеки [13].

Результати дослідження

З метою опробування запропонованої моделі на реальних кар'єрах, візьмемо для порівняння два об'єкти. Для отримання інформації та статистичних характеристик об'єктів використаємо доступні відкриті джерела: Google map, Глобальний сонячний атлас [14].

Перша ділянка розташована в околицях с. Дубівці (Івано-Франківська область) (рис. 1).

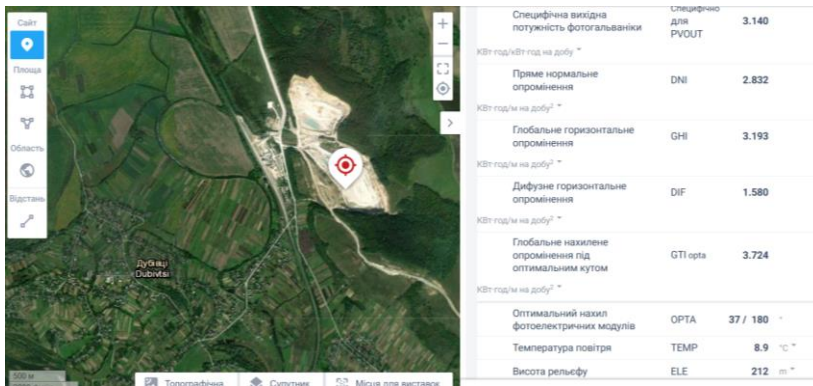


Рис. 1. Супутникове зображення кар'єру поблизу населеного пункту Дубівці Івано-Франківської області, із зазначенням її геолокації для оцінки можливості будівництва сонячної електростанції

Цей кар'єр відкрили ще у 1964 році. Виділена зона характеризується відкритою незабудованою територією. Промислова ділянка знижує ризики затінення та потенційний конфлікт землекористування.

У правій частині рисунка наведені розраховані енергетичні та кліматичні параметри згідно з даними Глобального сонячного атласу [14]. Дана ділянка має наступні характеристики:

1. Специфічна вихідна потужність для потенційної СЕС, яка дорівнює 3,140 кВт×год./кВт на добу визначає середньодобовий потенційний виробіток електроенергії з 1 кВт встановленої потужності.

2. Пряме нормальне опромінення для даної ділянки складає 2,832 кВт×год./м² на добу. Цей показник важливий для систем із сонячними трекерами.

3. Глобальне горизонтальне опромінення складає 3,193 кВт×год./м² на добу. Це загальний рівень сонячної радіації на горизонтальній поверхні.

4. Дифузне горизонтальне опромінення дорівнює 1,580 кВт×год./м² на добу. Це частка розсіяної сонячної енергії, яка також частково вловлюється сонячними панелями.

5. Глобальне нахилене опромінення під оптимальним кутом дорівнює 3,724 кВт×год./м² на добу. Це забезпечує максимальний енергетичний ефект при монтажі модулів під оптимальним кутом.

6. Оптимальний нахил фотоелектричних модулів: 37°.

7. Середньорічна температура повітря: 8,9°C загалом сприятлива для ефективної роботи сонячних панелей.

8. Висота рельєфу обраної ділянки: 212 м над рівнем моря.

Картографічний матеріал містить топографічні дані з супутникового режиму відображення, що дозволило також оцінити морфологію території, структуру землекористування та відсутність щільної забудови в зоні інтересу [15].

Отримані значення інсоляції свідчать про високий потенціал сонячної генерації у межах досліджуваної ділянки та доцільність її використання для розміщення фотоелектричних модулів. З важливих ризиків, які потрібно врахувати при розрахунку, наявний несприятливий рельєф: кар'єр знаходиться у котловані, тому при розміщенні СЕС потрібно враховувати потенційне затінення від бортів [16]. Для умов Західної України це добрий ресурс.

Підтвердимо оцінку розрахунком моделі.

Сонячний ресурс + затінення:

$$S = 0,88 \times (1 - 0,12) = 0,77. \quad (2)$$

Враховано співвідношення максимального можливого у цьому кар'єрі сонячного ресурсу до максимального можливого серед кар'єрів у регіоні як 0,88. Затінення (борти кар'єру, ранкові/вечірні години) обраховано як 12%.

Геотехнічний ризик:

$$G = 0,6 \times (1 - 0,25) = 0,45. \quad (3)$$

Наявність супутникового знімку дозволила оцінити придатну для улаштування СЕС площу на рівні 60% від загальної площі кар'єру. Геотехнічний ризик (зсуви, осідання) обґрунтовано на рівні $R_{geo} = 0,25$. У цьому відпрацьованому кар'єрі частина терас стабільна, у центральній частині присутні активні укоси.

Мережеве приєднання:

$$M = (1 - 0,3) \cdot e^{-\frac{6}{10}}; \quad (4)$$

$$M = 0,7 \times 0,55 = 0,39. \quad (5)$$

Нами було оцінено мережеве приєднання до загальної електросистеми типово для сільської місцевості. У даному випадку відстань до ПС 35/110 кВ складає близько 6 км. Характерна відстань $d_0 = 10$ км. Наявний мережевий ризик (оскільки невідома пропускна здатність), тому $R_{grid} = 0,3$. Низький коефіцієнт цього показника $M = 0,39$ – це типовий «слабкий пункт» кар'єрів.

Екообмеження:

$$E = 1 - 0,20 = 0,80. \quad (6)$$

Аналіз супутникових знімків дозволив встановити наступне: природно-заповідні території в межах ділянки відсутні, водойми не простежуються, поруч знаходяться сільськогосподарські угіддя [17]. Можна передбачити стандартну процедуру ОВД.

Логістика оцінена як:

$$L = 0,60. \quad (7)$$

Враховано наступні фактори: є під'їзди, проведені значні земляні роботи, висока запиленість території збільшить поточні затрати. Кар'єр потребує дренажу перед встановленням СЕС.

Підсумковий індекс (зважена сума):

$$EEP = 100 \times (0,25 \times 0,77 + 0,2 \times 0,45 + 0,25 \times 0,39 + 0,15 \times 0,80 + 0,15 \times 0,60) = 59. \quad (8)$$

Або більш «жорсткий» варіант (логарифмічний):

$$EEP_{geo} = 10 \times (0,77^{0,25} + 0,45^{0,20} + 0,39^{0,25} + 0,80^{0,15} + 0,60^{0,15}) = 44,7. \quad (9)$$

Інтерпретація результату подана в табл. 2.

Таблиця 2. Інтерпретація результату розрахунку моделі

Значення	Інтерпретація
$EEP \approx 59$	Середній потенціал, можливий проєкт. Кар'єр придатний для СЕС, найкращий сценарій: 10–20 МВт, каскадне розміщення на терасах
$EEP_{geo} \approx 45$	Є блокери, потрібна оптимізація. Електромережа і геотехніка – ключові ризики

Розглянемо другу ділянку. Також кар'єр в безпосередній близькості від міста Івано-Франківська у с. Ямниця (рис. 2).

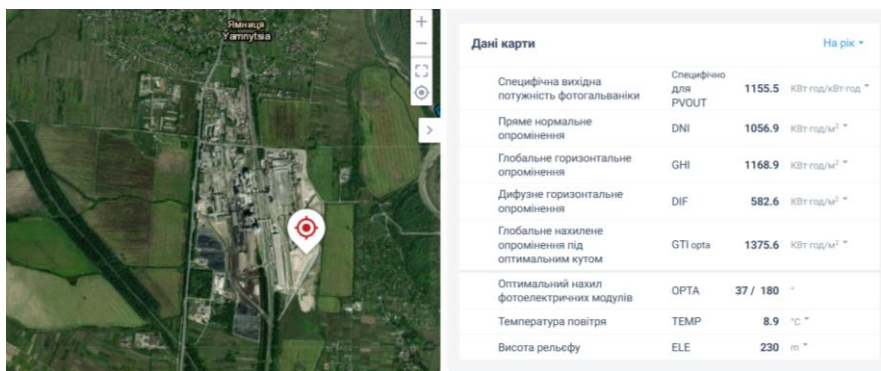


Рис. 2. Супутникове зображення кар'єру поблизу с. Ямниця із зазначенням її геолокації для оцінки можливості будівництва сонячної електростанції

У правій частині рисунка наведені розраховані енергетичні та кліматичні параметри згідно з даними Глобального сонячного атласу. Дана ділянка має наступні характеристики:

1. Специфічна вихідна потужність для потенційної СЕС, яка дорівнює 1155,5 кВт×год./кВт у рік визначає середньорічний потенційний виробіток електроенергії з 1 кВт встановленої потужності.

2. Пряме нормальне опромінення для даної ділянки складає 1056,9 кВт×год./м². Цей показник важливий для систем із сонячними трекерами.

3. Глобальне горизонтальне опромінення складає 1168,9 кВт×год./м². Це загальний рівень сонячної радіації на горизонтальній поверхні.

4. Диффузне горизонтальне опромінення дорівнює 582,6 кВт×год./м². Це частка розсіяної сонячної енергії, яка також частково вловлюється сонячними панелями.

5. Глобальне нахилене опромінення під оптимальним кутом дорівнює 1375,6 кВт×год./м². Це забезпечує максимальний енергетичний ефект при монтажі модулів під оптимальним кутом.

6. Оптимальний нахил фотоелектричних модулів: 37°/180°.

7. Середньорічна температура повітря: 8.9°C загалом сприятлива для ефективної роботи сонячних панелей.

8. Висота рельєфу обраної ділянки: 230 м над рівнем моря.

Картографічний матеріал містить топографічні дані з супутникового режиму відображення, що дозволило також оцінити морфологію території, структуру землекористування та відсутність щільної забудови в зоні інтересу.

Отримані значення інсоляції свідчать про високий потенціал сонячної генерації у межах досліджуваної ділянки та доцільність її використання для розміщення фотоелектричних модулів.

Підтвердимо оцінку розрахунком моделі.

Сонячний ресурс + затінення:

$$S = 0,8896 \times (1 - 0,10) = 0,8006. \quad (10)$$

Враховано співвідношення максимального можливого у цьому кар'єрі сонячного ресурсу до максимального можливого серед кар'єрів у регіоні як 0,8896. Затінення (борти кар'єру, ранкові/вечірні години) обраховано як 10%, оскільки кар'єр менш глибокий, ніж попередній.

Геотехнічний ризик:

$$G = 0,70 \times (1 - 0,20) = 0,56. \quad (11)$$

Наявність супутникового знімку дозволила оцінити придатну і стабільну для улаштування СЕС площу на рівні 70% від загальної площі кар'єру. Геотехнічний ризик (зсуви, осідання) обґрунтовано на рівні $R_{geo} = 0,2$. У цьому відпрацьованому кар'єрі більша частина терас стабільна.

Мережеве приєднання:

$$M = (1 - 0,25) \times e^{-\frac{3}{10}} = 0,5556. \quad (12)$$

Нами було оцінено мережеве приєднання до загальної електросистеми типово для сільської місцевості. У даному випадку відстань до ПС 35/110 кВ складає близько 3 км. Характерна відстань $d_0 = 10$ км. Найвний мережевий ризик, тому $R_{grid} = 0,25$.

Екообмеження

$$E = 1 - 0,15 = 0,85. \quad (13)$$

Аналіз супутникових знімків дозволив встановити наступне: природно-заповідні території в межах ділянки відсутні, водойми не простежуються, поруч промислова територія та антропогенний вплив, тому тут ризик нижчий, ніж у попередньому варіанті. Можна передбачити стандартну процедуру ОВД.

Логістика оцінена як:

$$L = 0,70. \quad (14)$$

Враховано наступні фактори: є під'їзди, логістична карта є кращою у зв'язку із близькістю до обласного центру, нижча запиленість території, ніж у попередньому випадку.

Підсумковий індекс (зважена сума):

$$EEP = 100 \times (0,25 \times 0,80 + 0,20 \times 0,56 + 0,25 \times 0,55 + 0,15 \times 0,85 + 0,15 \times 0,7) = 68,2. \quad (15)$$

Або більш «жорсткий» варіант (логарифмічний):

$$EEP_{geo} = 10 \times (0,80^{0,25} + 0,56^{0,20} + 0,55^{0,25} + 0,85^{0,15} + 0,70^{0,15}) = 46,22. \quad (16)$$

Цей кар'єр виглядає кращим за попередній (де екоенергетичний потенціал дорівнював 59) через трохи вищу інсоляцію, краще підключення до мереж, кращі умови геотехніки.

Отже, оцінку екоенергетичного потенціалу відпрацьованих кар'єрів під сонячні електростанції чи енергопарки зручно робити як багатокритеріальний скринінг перед техніко-економічним обґрунтуванням проєкту.

Такий скринінг може бути досить швидким із використанням запропонованої моделі (1-2 тижні на 1 об'єкт). Оцінювання ризиків для їх застосування у моделі діючого та перспективно рекультивованого кар'єру варто виконувати у кілька етапів:

1. Ідентифікація природних і техногенних небезпек за матеріалами геологічних, гідрогеологічних та гірничотехнічних досліджень, супутникових знімків і топографічних карт.

2. Виділення чутливих рецепторів довкілля (населення навколишніх сіл, ґрунтово-берегові комплекси, поверхневі та підземні води, транспортна інфраструктура, біота).

3. Напівкількісна оцінка ризиків за матрицею «ймовірність – масштаб наслідків» (5-10-бальна шкала), з ранжуванням ризиків на неприйнятні, керовані та прийнятні.

4. Формування карти ризиків кар'єру з урахуванням зон впливу пилу, шуму, можливих зсувів, затоплення тощо.

Ризики розглянемо детально на прикладі другого кар'єру в с. Ямниця.

Геологічні та гідрогеомеханічні. Кар'єр розташований у долинно-рівнинному ландшафті з наявністю алювіальних та делювіальних відкладів, поблизу долини річки Бистриця. Основні небезпеки: нестійкість бортів кар'єру, зсуви та обвали. Порушення природної рівноваги схилів, наявність тектонічної тріщинуватості, сезонне перезволоження та сейсмічність регіону (Карпатський пояс, інтенсивність до 7 балів за MSK-64) підвищують імовірність локальних обвалів порід. Ризик зростає при подальшому заглибленні кар'єру. Це загрожує техніці, персоналу й інфраструктурі. Спостерігається деформація прилеглих територій. Гірничі роботи створюють поля розвантаження, що можуть викликати осідання або мікрозсуви на межі кар'єру та сільськогосподарських угідь, залізничної гілки і проммайданчика заводу. За матричним підходом ці ризики відносяться до категорії високих для періоду активної експлуатації й потребують постійного геодезичного та геотехнічного моніторингу (контроль деформацій, інклінометрія, сейсмомоніторинг).

Гідрогеологічні та водно-екологічні ризики для використання екоенергетичного потенціалу кар'єру. Порушення поверхневого стоку та підтоплення. Відвали та внутрішні дороги змінюють схему дренажування, що може спричинити локальне підтоплення прилеглих орних земель і прискорення ерозії ярів.

Забруднення підземних і поверхневих вод. Потенційні шляхи – інфільтрація через відвали пилоподібної фракції цементної сировини, витіки паливно-мастильних матеріалів, шламів, стічних вод з проммайданчика. За умов гідравлічного зв'язку з річковою долиною існує ризик перенесення забруднювачів у напрямку питних децентралізованих водозаборів населених пунктів нижче за течією.

Ці ризики оцінюються як середні-високі; для їхнього зниження необхідні протифільтраційні екрани в зонах зберігання паливно-мастильних матеріалів, локальні очисні споруди дощового стоку, контроль хімічного складу ґрунтових і поверхневих вод.

Атмосферне повітря, шум та здоров'я населення. Населений пункт Ямниця та приміські території Івано-Франківська знаходяться в зоні впливу пилогазових викидів пилу цементної сировини та викидів спеціалізованої техніки. Дроблення, навантаження/розвантаження й транспортні операції формують високі концентрації завислих частинок PM10-PM2,5. При несприятливих метеоумовах (штиль, інверсія) ймовірно перенесення пилу на житлову забудову, що підвищує ризики респіраторних захворювань, хронічних бронхітів, алергій. Пил забруднюватиме сонячні панелі, що потребуватиме додаткових капіталовкладень для їх очищення з метою підтримки роботи встановленої потужності.

Шум і вібрації. Вибухові роботи, робота екскаваторів, дробарок і залізничних составів створюють акустичне навантаження, яке потенційно може перевищувати нормативні значення в санітарно-захисній зоні. За оцінкою за шкалою «ймовірність-наслідки» ці ризики для населення середні, але при порушенні санітарних розривів можуть ставати високими. Потрібні пилогазоочисні системи, укриття конвеєрів, зрошення технологічних доріг, шумозахисні екрани та регулярний медико-санітарний моніторинг.

Ландшафтно-екологічні та соціальні ризики. Потенційний ризик втрати ґрунтового покриву та біорізноманіття. Зняття родючого шару та формування кар'єру призводять до деградації ґрунтів і фрагментації екосистем, скорочення площ природних та агроландшафтів. Зміна візуального ландшафту. Кар'єр і відвали формують різкий техногенний контраст у структурі ландшафту, що знижує рекреаційну привабливість території й може викликати соціальну напругу.

Транспортні ризики. Зростання інтенсивності вантажопотоків у період будівництва (кар'єр – завод – залізнична станція) збільшує ризик дорожньо-транспортних пригод, шумового навантаження та руйнування місцевих доріг.

Ці ризики кваліфікуються як середні, але вони мають кумулятивний характер і проявляються в середньо- та довгостроковій перспективі.

Специфічні ризики при розміщенні сонячних електростанцій у відпрацьованому кар'єрі. З огляду на перспективу трансформації кар'єру в майданчик для фотоелектричних станцій, необхідно врахувати додаткові аспекти. По-перше, геотехнічна стійкість основи для опор СЕС. Нерівномірне ущільнення відвалів, наявність тріщин і зсувонебезпечних ділянок може спричинити деформацію конструкцій. Потрібні інженерно-геологічні вишукування, моделювання напружено-деформованого стану й вибір оптимальної схеми фундаментів (палеві, анкерні).

Затоплення та підтоплення панелей. При можливому формуванні кар'єрного озера необхідно гарантувати запас по відмітках та дренаж, щоб уникнути корозії й коротких замикань.

Пилова ерозія та корозійний знос модулів. Висока пилова навантаженість з боку цементного виробництва може прискорювати деградацію поверхні модулів і знижувати їхню ефективність, тому потрібні системи періодичного миття, застосування антипилових покриттів.

Електробезпека й блискавкозахист у глибокій чаші кар'єру. Необхідні розрахунки систем заземлення, оцінка ризику короточасних затоплень під час злив, системи відведення поверхневого стоку.

При грамотній інженерній підготовці майданчика більшість цих ризиків відноситься до категорії керованих, а сам кар'єр потенційно є придатним для розміщення СЕС як форма техногенної рекультивації.

Глобальне горизонтальне опромінення довгострокове, річне, середнє значення добових і річних показників для території України не є ризиком. Глобальний сонячний атлас [15] дозволяє оцінити довгострокову енергетичну доступність сонячного ресурсу в будь-якому місці, тобто теоретичний потенціал. Цей потенціал ілюструється фізичною змінною глобального горизонтального опромінення, яке є сумою прямого та дифузного опромінення, отриманих горизонтальною поверхнею. Воно вимірюється в кіловат-годинах на квадратний метр ($\text{кВт} \times \text{год} / \text{м}^2$). Ця величина дозволяє порівнювати природні умови для впровадження будь-якої фотоелектричної технології без врахування конкретного технічного проєкту та режиму роботи. Однак на певному місці глобальне горизонтальне опромінення модулюється місцевою температурою повітря, вітром та снігом, забрудненням атмосфери, пилом та деякими іншими факторами.

Наріжним каменем дослідження є оцінка практичного потенціалу фотоелектричної електроенергії, тобто потужності, досягнутої за допомогою типової конфігурації системи сонячних електричних електростанцій, з урахуванням теоретичного потенціалу, температури повітря, що впливає на продуктивність системи, конфігурації системи, затінення та забруднення, а також топографічних і земельних обмежень [18]. Кар'єри часто «програють» не сонцем, а мережею та геотехнікою – тому ці блоки варто зважувати найсильніше.

Висновки

Розміщення сонячних електростанцій у відпрацьованих кар'єрах – це інноваційний, економічно вигідний та екологічно безпечний напрям розвитку енергетичної інфраструктури, який одночасно вирішує проблему рекультивації земель.

Для України такий підхід є високоперспективним і повністю відповідає цілям енергетичної незалежності, декарбонізації та відновлення деградованих територій.

Науковим результатом дослідження є запропонована напівкількісна модель швидкого скринінгу екоенергетичного потенціалу відпрацьованих кар'єрів, що агрегує п'ять груп чинників: сонячний ресурс і затінення, геотехнічну придатність, мережеве приєднання, екологічні обмеження та логістику із капітальними затратами.

Проведена апробація моделі на двох кар'єрах Івано-Франківщини показала практичність підходу: для кар'єру поблизу Дубівців отримано середній потенціал за сумарним індексом ($EEP \approx 59$) при наявності «блокерів» у жорсткішій оцінці ($EEP_{geo} \approx 45$), тоді як майданчик біля Ямниці демонструє вищу привабливість ($EEP \approx 68$; $EEP_{geo} \approx 46$) завдяки кращим умовам геотехніки та приєднання до мережі.

Використання екоенергетичного потенціалу потребує поетапного управління ризиками: від ідентифікації природних і техногенних небезпек та виділення чутливих рецепторів довкілля – до напівкількісного ранжування ризиків і формування карти зон впливу (пил, шум, зсуви, підтоплення). За умови належних інженерних вишукувань і моніторингу більшість ризиків є керованими, а запропонована модель дозволяє швидко порівнювати кар'єри та обґрунтовувати вибір об'єкта ще до техніко-економічного обґрунтування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. European Environmental Bureau. (2024, July 24). *Ample land for sustainable renewables expansion in Europe, new study reveals*. <https://eeb.org/ample-land-for-sustainable-renewables-expansion-in-europe-new-study-reveals/>
2. Mariotti, E., & Engström, J. (2025). Transforming abandoned mines into solar farms: A pathway to renewable energy development and sustainable land use. *Environmental Research: Energy*, 2(1), article ID 015013. <https://doi.org/10.1088/2753-3751/adb6a3>
3. Al Heib, M., & Cherkaoui, A. (2021). Assessment of the Advantages and Limitations of Installing PV Systems on Abandoned Dumps. *Materials Proceedings*, 5(1), 68. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005068>
4. Al Heib, M. (2022). Assessment of advantages and limitations of installing PV on abandoned dumps. *Górnictwo Odkrywkowe*, 63(4), 4–9. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.8051>
5. Valikandi, E. M., & Choi, Y. (2025). Utilization of floating photovoltaic systems in mine pit lakes and tailings ponds. *Cleaner Engineering and Technology*, 27, article ID 101005. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101005>
6. Song, J., & Choi, Y. (2016). Analysis of the potential for use of floating photovoltaic systems on mine pit lakes: Case study at the Ssangyong open-pit limestone mine in Korea. *Energies*, 9(2), 102–105. <https://doi.org/10.3390/en9020102>
7. Genex Power. *Kidston Clean Energy Hub – Project Overview*. Project Factsheet, April 2025. https://genexpower.com.au/wp-content/uploads/2025/04/Kidston-Clean-Energy-Hub-Factsheet-April_2025-V3-1.pdf
8. Legwaila, I. A., Lange, E., Cripps, J. (2015). Quarry reclamation in England: A review of techniques. *Journal of the American Society of Mining and Reclamation*, 4(2), 55–79. <https://doi.org/10.21000/JASMR15020055>
9. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
10. Nautilus Solar Energy, LLC. (2023, June 29). Nautilus Solar Energy® opens community solar farm built on former sand quarry. Retrieved August 12, 2025, from <https://nautilussolar.com/news/nautilus-solar-energy-opens-community-solar-farm-built-on-former-sand-quarry>
11. Junaedi, K., Dewi, T., & Yusi, M. S. (2021). The Potential Overview of PV System Installation at the Quarry Open Pit Mine PT. Bukit Asam, Tbk Tanjung Enim. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, 6(1), 41–50. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v6i1.1148>
12. Balkan Green Energy News. (2024, March 28). *IRENA: Global solar power capacity surpasses hydropower in 2023*. Retrieved August 12, 2025, from <https://balkangreenenergynews.com/irena-global-solar-power-capacity-surpasses-hydropower-in-2023/>
13. The Nature Conservancy. (2024, April 15). *Mining the Sun: Transforming mine lands and brownfields into clean energy hubs* [PDF report]. Retrieved August 12, 2025, from https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/Mining_the_Sun_Report.pdf
14. The Global Solar Atlas (2025). Global Solar Atlas. Energydata.info. URL: <https://globalsolaratlas.info/en>

15. Wang, K., Zhou, J., Yang, R., et al. (2025). Deploying photovoltaic systems in global open-pit mines for a clean energy transition. *Nature Sustainability*, <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01594-w>
16. Giri, S., Holt, O. S., Tully, G., Miller, A., Yellishetty, M., Whittle, D., & Bach, P. M. (2025). Assessing repurposing options for abandoned mines and quarries in Victoria, Australia using spatial MCDA. *Resources, Conservation and Recycling*, 205, article ID 108254. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108254>
17. He, T., Chen, Y., Zhao, Y., Li, F., Xu, N., & Ren, H. (2025). Harnessing the solar photovoltaic potential in global mining areas: Energy locations for the future. *The Innovation*, 6(10), article ID 100987. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100987>
18. Al-Quraan, A., Al-Mahmodi, M., Alzaareer, K., El-Bayeh, C., & Eicker, U. (2022). Minimizing the utilized area of PV systems by generating the optimal inter-row spacing factor. *Sustainability*, 14(10), 6077. <https://doi.org/10.3390/su14106077>

Стаття надійшла до редакції 13.08.2025 і прийнята до друку після рецензування 28.10.2025

The article was received 13.08.2025 and was accepted after revision 28.10.2025

Редько Андрій Ігорович

аспірант, кафедра екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Адреса робоча: 76019, м. Івано-Франківськ; вул. Карпатська, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0221-6908> **e-mail:** redko.geo@gmail.com