



А. І. Редько, Я. О. Адаменко

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

РЕКУЛЬТИВАЦІЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ ПІД РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Досліджено потенціал рекультиваци відпрацьованих кар'єрів шляхом розміщення на їхній території сонячних електростанцій (СЕС), що поєднує цілі екологічного відновлення деградованих земель із розвитком відновлюваної енергетики. Як об'єкт аналізу обрано кар'єр у с. Довге Івано-Франківської обл., який демонструє сприятливі топографічні умови для розміщення фотоелектричних установок. Зокрема, природний ухил схилів кар'єру ($\approx 31,6^\circ$) відповідає придатному куту нахилу сонячних панелей для середніх широт України. Виконано геоінформаційне моделювання інсоляційних характеристик, розраховано ефекти затінення та визначено вплив просторової орієнтації модулів на ефективність використання площі. Установлено, що горизонтальна орієнтація модулів дає змогу зменшити міжрядне затінення та підвищити щільність їхнього розміщення на схилах до 64 % порівняно з горизонтальною поверхнею. На підставі замірів рельєфу оцінено можливу кількість рядів панелей, встановлену потужність та прогнозований річний обсяг генерації електроенергії, що може сягати понад 1,4 млн кВт·год/МВт. Особливу увагу приділено інженерно-геотехнічним аспектам безпеки: стійкості укосів, потребі у додаткових заходах під час проєктування таких станцій для протирозійного укріплення та антикорозійного захисту несівних елементів. Розглянуто соціально-економічні переваги таких проєктів для громад: створення робочих місць, залучення інвестицій, покращення екологічного стану, зростання бюджетних надходжень і формування позитивного іміджу регіону. Узагальнено світовий досвід Франції, США та Австралії, який підтверджує ефективність концепції перетворення деградованих земель у енергогенерувальні об'єкти. Наведено рекомендації із масштабування подібних проєктів в Україні та розроблення нормативної бази для стимулювання інвестицій у сфері рекультиваци кар'єрів під СЕС. Отримані результати доводять міждисциплінарний ефект такої рекультиваци та обґрунтовують необхідність державної підтримки подібних ініціатив у контексті переходу до сталого розвитку та енергетичної трансформації.

Ключові слова: енергетична трансформація кар'єрів; альтернативне землекористування; сонячна енергетика; деградовані землі; відновлювані джерела енергії.

Вступ / Introduction

Відпрацьовані кар'єри та інші деградовані землі стають серйозною екологічною проблемою, будучи водночас потенційним ресурсом для сталого розвитку. Такі території часто непридатні для сільськогосподарства чи рекреації без проведення рекультиваци. З іншого боку, сучасний перехід до запровадження відновлюваних джерел енергії потребує значних земельних площ під сонячні та вітрові електростанції. За оцінками експертів, для встановлення 1 МВт потужності сонячної електростанції потрібно в середньому близько одного гектара площі. За умов обмеженості придатних земель, особливо сільськогосподарських, дедалі більшої уваги набуває використання так званих деградованих земель (колішніх звалищ, промислових зон і кар'єрів) під розміщення сонячних фотоелектричних станцій. Такий підхід дає змогу уникнути конкуренції за родючі землі та дає покинутим ділянкам "друге життя" у вигляді об'єктів відновлюваної енергетики.

Політичні та наукові кола багатьох країн, враховуючи й малорозвинені, підтримують цю ідею. Зокрема, у Франції уряд стимулює встановлення сонячних елек-

тростанцій на деградованих територіях, мотивуючи девелоперів (відповідальних за увесь процес реалізації проєкту) через спеціальні тендерні умови та гранти. В Європейському Союзі проведені дослідження підтверджують наявність достатнього обсягу малопродуктивних земель для розміщення відновлювальних джерел енергії без шкоди для продовольчої безпеки. За даними Європейського екологічного бюро, тільки половини з ідентифікованих придатних територій (винятково поза природоохоронними зонами та цінними сільгоспугоддями) достатньо, щоб повністю декарбонізувати (зменшити викиди парникових газів) енергетику ЄС до 2040 р. [6]. Тобто сонячна енергетика може розвиватися на деградованих землях, не конкуруючи з агросектором, і водночас сприяти відновленню цих територій.

Глобальні тенденції переходу до екологічно чистіших джерел енергії та сталих практик задля зменшення впливу антропогенної діяльності на зміну клімату тільки підсилюють актуальність такої синергії. Сонячна енергетика наразі – один з найдинамічніших секторів: у 2023 р. світові потужності сонячних електростанцій сягнули $\sim 1,42$ ТВт, що перевищило потужність гідроенер-

Інформація про авторів:

Редько Андрій Ігорович, аспірант, кафедра екології. Email: redko.geo@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-0221-6908>

Адаменко Ярослав Олегович, д-р техн. наук, професор, кафедра екології. Email: yarad1964@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-5665-7958>

Цитування за ДСТУ: Редько А. І., Адаменко Я. О. Рекультивация відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 4. С. 79–85.

Citation APA: Redko, A. I., & Adamenko, Ya. O. (2025). Reclamation of exhausted quarries for solar power plant placement. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 79–85. <https://doi.org/10.36930/40350409>

гетики, а приріст за рік (346 ГВт) становив 73 % від усіх нововведених потужностей відновлюваної енергетики [12]. За прогнозами компанії IRENA [4], для досягнення кліматичних цілей до 2030 р. темпи введення відновлювальних джерел енергії мають бути потроєні, тож використання наявних просторів деградованих земель під сонячні електростанції є надзвичайно своєчасним рішенням.

Об'єкт дослідження – рекультивація кар'єрного схилу під розміщення сонячної електростанції.

Предмет дослідження – методи і засоби технічної рекультивації кар'єрного схилу під розміщення сонячної електростанції, що дадуть змогу максимально ефективно використати природний рельєф без значних земельних перетворень.

Мета роботи – обґрунтувати можливість розроблення практичних рекомендацій щодо перетворення відпрацьованого кар'єру на майданчик для встановлення сонячної електростанції, що забезпечить вирішення як екологічних (рекультивація деградованих земель), так і енергетичних завдань (генерування відновлюваної електроенергії).

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати світовий досвід та останні дослідження щодо використання деградованих земель (зокрема кар'єрів, шахт і відвалів) у проєктах відновлюваної енергетики, що дасть змогу виявити перспективні підходи до їх ревіталізації та адаптувати успішні практики до українських реалій;
- дослідити геометричні параметри вибраного кар'єру та визначити допустимі умови розміщення сонячних модулів на його схилі, що дадуть можливість максимально ефективно використати природний рельєф без значних земельних перетворень;
- розробити методику розташування фотоелектричних панелей на крутих укосах без істотної зміни рельєфу з урахуванням вимог щодо уникнення затінення та забезпечення стабільності конструкцій, а також оцінювання потенціалу генерації електроенергії на підставі даних інсоляції та технічних характеристик панелей з метою прогнозування річного виробітку й економічної ефективності проєкту за складних геоморфологічних умов.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У науковій літературі останніх років з'явилися роботи з цієї тематики. Зокрема, у роботі [12] автори 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 чистотенергетичних цілей регіону.

У науковій роботі [11] проведено огляд методів рекультивації відпрацьованих кар'єрів в Англії. Автори розглянули різні технічні способи 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'є-

рів зазвичай обмежується пасовищами, лісами чи рекреаційними зонами з невисокою господарською цінністю.

У роботі [1] 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, потребує спеціальних інженерних рішень для довготермінової стабільності конструкцій. Водночас наведено успішні приклади встановлення СЕС на відвалах у Франції, що підтверджують реалізованість цієї ідеї на практиці.

Перспективним напрямом вважають й використання затоплених кар'єрів: у роботі [16] автори провели огляд застосування плавучих фотоелектричних систем у кар'єрних озерах та хвостосховищах гірничих підприємств. Вони відзначають, що плавучі СЕС дають змогу використовувати незадіяні водні поверхні в регіонах із браком землі, зменшують випаровування води та підвищують ефективність панелей за рахунок охолодження. Проаналізовано реальні кейси впровадження плавучих сонячних панелей на затоплених копальнях, показано, що такі проєкти сприяють вуглецевій нейтральності та енергетичній безпеці гірничих регіонів, хоча потребують подальших досліджень щодо довготермінових екологічних впливів та економічної доцільності.

У роботі [14] автори дослідили потенціал встановлення плавучої СЕС на кар'єрному озері в Республіці Корея. У вступі вони наголошують, що через технічні труднощі (нерівний рельєф, тінь від укосів) відкриті розрізи традиційно вважалися непридатними для розміщення сонячних станцій. Попри це, численні проєкти доводять протилежне: автори наводять приклади вітропарків на рекультивованих шахтах у США та найбільшій в Німеччині сонячній станції (166 МВт) на місці лігнітового кар'єру під Лейпцигом. Їхній власний кейс – плавуча СЕС на озері колишнього вапнякового кар'єру – продемонстрував економічну доцільність: запропонована система могла генерувати ~970 МВт·год/рік із терміном окупності ~12 років, а річне скорочення викидів (~471 т CO₂) вдвічі перевищило б ефект від лісовідновлення на цій ділянці. Це підтвердило, що переорієнтація занедбаних кар'єрів на виробництво енергії може стати ефективним шляхом їхнього відновлення.

В Австралії було здійснено комплексний підхід на базі закритої шахти [7]. Це унікальний проєкт Kidston Clean Energy Hub на місці колишньої золотої копальні Кідстон у штаті Квінсленд. Цей масштабний хаб поєднує відразу кілька відновлюваних технологій: функціональну сонячну електростанцію 50 МВт, гідроаккумулявальну станцію 250 МВт (у процесі будівництва) та заплановану вітрову ферму ~150-270 МВт. Родзинкою проєкту є використання двох відпрацьованих кар'єрів шахти як верхнього та нижнього резервуарів для гідроакмуляції (помпованого гідроаккумулявального циклу) – різниця висот між котлованами ~190 м забезпечує 8 год генерації за стоку води з верхнього в нижній з потужністю 250 МВт. Сонячна станція Kidston Stage 1 (50 МВт) працює з 2017 р., розташована на рекультивова-

ній території хвостосховища шахти. Проект фінансується за підтримки уряду Австралії і демонструє, як колишній гірничий об'єкт може стати поліфункціональним енергетичним центром. Очікують, що після завершення всіх черг Kidston Hub генеруватиме значну частку електроенергії Північного Квінсленду, сприяючи досягненню мети 70 % ВДЕ до 2032 року. Важливо, що цей кейс вказує й на інший аспект: інфраструктурний. Для підключення хабу було прокладено нову ЛЕП 275 кВ завдовжки 186 км, що "розблокувала" віддалений район для розвитку відновлюваної енергетики. Досвід Kidston показує, що великі інвестиції в рекультивацію окуповуються, якщо на місці шахти вдасться створити комплексний енергетичний об'єкт з високою віддачею.

Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить, що за останні роки сформувався підґрунтя для концепції "рекультивації через енергію", проте залишається низка незакритих питань. Попередні дослідження зосереджені переважно на оцінці потенціалу та загальних техніко-економічних показників переобладнання шахт/кар'єрів під СЕС. Натомість практичні аспекти інженерної реалізації таких проєктів (зокрема, оптимізація розміщення панелей без повної трансформації ландшафту, забезпечення стійкості укосів тощо) висвітлено ще недостатньо. Актуальним є також вивчення локальних умов – досі не публікували результатів подібних пілотних досліджень для кар'єрів в Україні. Отже, потрібне проведення цільового дослідження, яке б заповнило ці прогалини – що і стало завданням цієї роботи.

Матеріали та методи дослідження. Для оцінювання придатності відпрацьованого схилу кар'єру до розміщення сонячної електростанції проведено топографо-геодезичні вимірювання із застосуванням GNSS-обладнання, що дало змогу визначити ключові геометричні характеристики схилу (кут нахилу, експозиція, довжина). За допомогою математичного методу виконано аналітичні розрахунки інсоляції та оптимального міжряддя фотоелектричних модулів з урахуванням географічної широти та кута нахилу поверхні. Емпіричним методом здійснено визначення параметрів на підставі фактичних натурних вимірювань. За допомогою теоретичного методу проаналізовано наукові джерела та наявні інженерні підходи до проєктування сонячних електростанцій.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Дослідження ґрунтується на аналізі геометрії схилів частково відпрацьованого кар'єру поблизу с. Довге (Івано-Франківська обл.), з метою перевірки можливості прямого розміщення сонячних панелей без істотних змін у рельєфі. Для цього застосовано методи геоінформаційного аналізу, просторового моделювання та розрахунку енергетичного потенціалу на схилах із різною експозицією й кутом нахилу. Досліджено потенціал запропонованої моделі рекультивації стосовно її практичної реалізації та конкурентоспроможності порівняно з класичними підходами.

Традиційно рекультивація відпрацьованих кар'єрів орієнтувалася на відновлення природних екосистем або створення об'єктів господарського використання (сільськогосподарських угідь, лісових насаджень, водойм). Напрацьовано низку методів технічної рекультивації рельєфу: виположування укосів (формування пологих схи-

лів), зворотна засипка виїмок, терасування уступів зі створенням ґрунтового покриття, геопластичне профілювання шляхом вибухів тощо. Паралельно може застосовуватися біологічна рекультивація – насадження рослинності або, навпаки, спосіб залишити територію для природної сукцесії (самовідновлення) без втручання людини [11]. Комбінація таких підходів дає змогу досягти стабілізації ландшафту, безпечності укосів і поступового відновлення екосистем, проте остаточне використання території зазвичай зводиться до обмеженої господарської цінності (пасовища, ліси) або рекреації.

У дослідженні для моделювання взято конкретний схил кар'єру, геодезичні параметри якого було визначено за допомогою топографічного знімання та паспортизації кар'єру. Зокрема, зафіксовано:

- висота верхньої бровки схилу – 282,23 м над рівнем Балтійського моря;
- висота підшви схилу – 243,49 м;
- перепад висот – 38,74 м;
- горизонтальна протяжність схилу – 62,89 м;
- довжина схилу по поверхні (по нахилу) – 73,22 м.

На підставі цих даних розраховано середній кут нахилу схилу [3]:

$$\alpha = \arctg(\Delta H / L_h) = \arctg(0,616) = 31,6^\circ, \quad (1)$$

де: ΔH – різниця висот, м; L_h – горизонтальна проєкція довжини схилу, м.

Допустимий кут близький до придатного діапазону нахилу сонячних панелей для середніх широт України (30-35°). У літературі зазначають, що для максимальної річної генерації фіксованої СЕС кут установки панелей потрібно обирати наближеним до географічної широти місцевості [5]. Географічна широта с. Довге ($\approx 49^\circ$ N) підтверджує доцільність кута нахилу схилу ~ 30 -35°. Отже, природний ухил кар'єрного укосу практично відповідає придатному нахилу панелей, що є сприятливим фактором для розміщення СЕС. Для підтвердження цього, а також оцінювання сезонних відхилень продуктивності планують додатково побудувати графік залежності генерації від кута нахилу панелей (для різних місяців року) – однак у межах цієї роботи приймаємо кут $31,6^\circ$ як базовий.

Інсоляційні умови. За даними Європейської бази PVGIS [11], середньорічна сумарна сонячна радіація на горизонтальну поверхню в Івано-Франківській обл. становить ~ 1200 -1300 кВт·год./м². З урахуванням нахилу 30-32° та південної експозиції схилу, очікують деяке збільшення річної інсоляції на похилу площину (орієнтовно +5-10 %). Отже, потенційна річна генерація електроенергії для фотоелектричних модулів стандартної потужності (1 кВт на 6-8 м² панелей) може перевищувати 1100–1200 кВт·год з кожного встановленого кіловата пікової потужності, що є типовим показником для західних регіонів України.

Методика розрахунку СЕС. На першому етапі визначено, чи потребує вибраний схил додаткового виположування чи терасування для монтажу панелей. Оскільки фактичний нахил ($31,6^\circ$) вже знаходиться в рекомендованому діапазоні, було прийнято рішення зберегти конфігурацію схилу без масштабних змін рельєфу. Проте на етапі технічної рекультивації передбачають здійснити зміцнення та підготовку поверхні: перевірку механічної стійкості породи, укріплення потенційно нестабільних ділянок, облаштування дренажу для запо-

бігання ерозії, а також нарізання локальних терас-"кишеней" чи фундаментних майданчиків під опори панелей. Ці заходи мають забезпечити довготермінову безпечну експлуатацію СЕС: уникнення зсувів або осипів породи, корозії кріплень та підмивання основ.

Наступним кроком проведено розрахунок геометрії розміщення сонячних модулів на схилі та на рівній місцевості (для порівняння ефективності використання площі). Прийнято типову конфігурацію наземної СЕС: стаціонарні кремнієві фотомодулі, встановлені рядами на металевих опорах. Система орієнтована на південь; трекири (системи стеження за сонцем) не застосовуються, що спрощує конструкцію і знижує вартість. Кут нахилу модулів відповідає куту схилу ($\approx 32^\circ$).

Для оцінювання відстаней між рядами використано геометричну модель затінення у період найнижчого сонцестояння. Мінімальний кут підняття сонця опівдні над горизонтом для цієї широти становить $\sim 15^\circ$ [7]. Відповідно, висоту панелі (вертикальний виступ модуля над площиною схилу) розраховано за формулою [3]

$$H = L_p \cdot \sin(\alpha) = 1,0 \cdot \sin(31,6^\circ) = 0,52 \text{ м}, \quad (2)$$

де α – кут нахилу схилу. Для $L_p = 1,0$ м (висота панелі) та $\alpha = 31,6^\circ$ (середній кут нахилу схилу) отримуємо $H \approx 0,52$ м.

Далі, потрібний інтервал між рядами на горизонтальній проекції місцевості визначають за формулою

$$D = H / \tan(\gamma) = 0,52 / 0,268 = 1,94 \text{ м},$$

де γ – кут висоти сонця над горизонтом взимку (15°). Підставивши $H \approx 0,52$ м, отримуємо $D \approx 1,94$. Це мінімальна відстань, щоб передній ряд панелей не затіняв наступний за низького зимового сонця.

Сумарна горизонтальна відстань на рівнині для одного ряду панелей становить $l_p = L \cdot \cos(\alpha) = 1,0 \cdot 0,85 = 0,85$ м. Отже, повна горизонтальна відстань для одного ряду на рівній площині становить $l_p + D = 0,85 + 1,94 = 2,79$ м. Це означає, що на рівному майданчику завдовжки 62,89 м (еквівалент горизонтальної проекції нашого схилу) можна розмістити приблизно $62,89/2,79 = 22$ ряди панелей.

У разі розміщення на похилому схилі панелі розташовуються щільніше, оскільки проекцію кожного ряду накладають на нахил. За нашої горизонтальної орієнтації модулів один ряд по схилу займає ~ 1 м довжини (довжина панелі) плюс резерв під сервісний прохід між рядами (~ 1 м). Отже, на схилі завдовжки 73,22 м вміщується $73,22/2,0 = 36$ рядів панелей.

Цей результат порівнювали з попереднім для рівнини: отримано збільшення кількості рядів приблизно на 64 %. Тобто крутий схил дає змогу компактніше розташувати панелі без затінення, ніж це можливо на пласкій поверхні аналогічної площі.

Результати геометричного моделювання зведено у таблицю та використано для оцінювання встановленої потужності СЕС. Приймаючи, що в кожному ряду панелі монтуються в стик одна за одною на ширину схилу (яка в нашому випадку не обмежує довжину ряду, оскільки кожен ряд може сягати сотень метрів, але тут обмеження є ширина кар'єру в конкретному місці), можемо оцінити кількість панелей: 36 рядів $\times$ (ширина схилу / ширина панелі). Ширина схилу варіюється, але якщо припустити, що на кожен ряд уздовж фронту можна встановити, скажімо, 50 панелей (еквівалент 100 м довжини ряду, залежно від конфігурації кар'єру), то загальна кількість модулів ~ 1800 шт. За потужності од-

ного сучасного модуля $\sim 0,5$ кВт, потенційна встановлена потужність СЕС на схилі може досягати 900 кВт (0,9 МВт). Це груба оцінка, що демонструє порядок величини. Детальніше проєктування має врахувати фактичну доступну площу кожного уступу, розбиття на секції, розміщення прохідних доріжок, але загалом розрахунки підтверджують високий потенціал розміщення СЕС саме на схилі кар'єру.

Таблиця. Результати геометричного моделювання /
Results of geometric modeling

Параметр	Рівна поверхня	Похилий схил
Довжина ділянки	62,89 м	73,22 м
Відстань для одного ряду	2,82 м	2,0 м
Кількість рядів	~ 22	~ 36 (+64 %)
Відстань між рядами	1,94	1,0
Потрібна довжина на один ряд	2,79	2,0
Загальна кількість панелей	1100	1800
Орієнтовна потужність	0,55 МВт	0,9 МВт (+64 %)

Розрахунки показали, що без радикальної зміни рельєфу вибраний кар'єрний схил придатний для встановлення сонячної електростанції. Природний кут укосу ($\sim 32^\circ$) практично придатний для широти об'єкта, що забезпечує максимальне отримання сонячної енергії. Унаслідок моделювання виявлено важливу перевагу: на похилому схилі вдалося розмістити на ~ 64 % більше рядів панелей, ніж це можливо на рівній ділянці аналогічної площі (див. таблицю). Це пояснюють тим, що крутий рельєф дає змогу ущільнити компонування рядів без взаємного затінення. Подібний ефект підвищення щільності розміщення модулів є цінним з погляду використання площі кар'єру. Зазвичай вважалося, що значні ухили є швидше перешкодою для СЕС через небезпеку зсувів та виникнення тіней. Наші результати демонструють протилежне: за умов належного інженерного укріплення круті схили не тільки придатні, а й вигідні для розміщення сонячних панелей, оскільки дають можливість ефективніше використати наявний простір. Отже, показали, що геометрія відпрацьованого кар'єру може виступати не недоліком, а перевагою – кар'єр слугує природним "амфітеатром" для СЕС, екрануванням від зовнішнього оточення. Це важливе практичне доповнення до попередніх досліджень, де переважно пропонували вирівнювати рельєф, розміщувати на затоплених кар'єрах плавучі панелі або встановлювати панелі на гребенях відвалів.

Оцінено очікувану генерацію електроенергії від запропонованої СЕС. З урахуванням інсоляції регіону (≈ 1200 кВт·год/м²·рік) та похилу панелей, прогнозована енерговіддача становить ~ 1100 – 1200 кВт·год на 1 кВт встановленої потужності щороку. Відповідно, станція потужністю $\sim 0,9$ МВт (900 кВт) здатна виробляти до $\sim 1,1$ – $1,2$ млн кВт·год електроенергії на рік. Цього достатньо для забезпечення потреб приблизно 300 середніх домогосподарств. Отримане значення відповідає показникам аналогічних проєктів: [13] сонячна ферма 7 МВт на місці піщаного кар'єру генерує ~ 10 млн кВт·год/рік, тобто $\sim 1,4$ млн кВт·год/МВт, що порівнювано з нашим результатом з поправкою на клімат. Важливо наголосити, що наша пропозиція не тільки продукує значний обсяг "зеленої" енергії, а й вирішує екологічну проблему – рекультивацію деградованої ділянки. З погляду впливу на клімат, проєктна СЕС дасть змогу скоротити викиди парникових газів (за рахунок заміщення виробітку від ископного палива) на сотні тонн CO₂ еквіваленту

щорічно. Для прикладу, результати дослідження [14] показали, що щорічний ефект 5-МВт СЕС на місці закинутого кар'єру еквівалентний подвійному скороченню викидів порівняно з традиційною рекультивацією (залісненням) тієї ж самої території. Це вказує на переваги "енергетичної" рекультивації в контексті боротьби зі зміною клімату.

Природні передумови для СЕС. Проведені розрахунки показали, що один зі схилів кар'єру має кут нахилу $\sim 32^\circ$. Такий нахил дуже близький до придатного для нерухомих панелей на широті $\sim 49^\circ$; за літературними джерелами, нахил у межах (широта $\pm 5^\circ$) забезпечує максимальний річний виробіток електроенергії. Панелі, встановлені паралельно до площини схилу, будуть орієнтовані під кутом $\sim 32^\circ$ до горизонту, що близько до придатних 30° . Розрахункова інсоляція на цій похилій площині становить $\sim 1300\text{--}1400$ кВт·год./м²/рік (трохи більше, ніж на горизонтальній) – цього достатньо, щоб навіть за нерухомого розташування панелей генерувати 1100–1200 кВт·год з кожного кіловата встановленої потужності на рік.

Додатково, запропонована горизонтальна орієнтація модулів дала змогу значно знизити ризик їх взаємного затінення. Наші розрахунки показали, що висота виступу панелі над схилом становить всього $\sim 0,5$ м, тож навіть у найкоротші зимові дні затінення наступного ряду буде мінімальним. Потрібний проміжок між рядами на поверхні схилу – близько 1 м (для проходу персоналу та обслуговування), що цілком достатньо, аби уникнути затінення за висоти сонця 15° над горизонтом. Це підтверджує, що наявний схил можна використати максимально ефективно, розмістивши на ньому близько 36 рядів панелей проти ~ 22 рядів, які стали б уміщуватися на еквівалентній площі, якби вона була рівна. Отже, завдяки рельєфу досягають $\sim 1,6$ -кратне збільшення щільності розміщення сонячних модулів. Це важлива перевага рекультивації кар'єру під СЕС: круті схили фактично перетворюються на природні опори для панелей, даючи змогу економити площу (місце під проєкцією рядів) й уникати ефекту самозатінення.

Технічні аспекти та ризики. Незважаючи на зазначені сприятливі фактори, реалізація проєкту СЕС у кар'єрі потребує ретельного врахування інженерних викликів. По-перше, стабільність укосів: навіть за відсутності значного додаткового навантаження, треба гарантувати, що встановлення конструкцій не спровокує осипів чи зсувів. Тому перед монтажем необхідно провести дослідження міцності ґрунтів і порід на схилі; за потреби – здійснити анкерне кріплення нестійких блоків, укріпити схил сітками або підпірними стінками у проблемних зонах. По-друге, захист від ерозії: до моменту покриття території інженерними спорудами і рослинністю оголені ділянки схилу доцільно укріпити (георешітками, гідропосівом трав для озеленення між панелями тощо), щоб зливові потоки не розмивали ґрунт. По-третє, потрібно передбачити зручність доступу для монтажу й обслуговування: у проєкті мають бути заплановані під'їзні шляхи до підніжжя схилу, технологічні проходи між секціями панелей (ті самі однометрові інтервали можуть слугувати стежками). Це трохи зменшить щільність установки, але є критично важливим для безпеки персоналу та підтримання СЕС у належному стані. Нарешті, корозійна стійкість та кріплення: оскільки середовище кар'єру може мати підвищену

запиленість та вологість (наявність тимчасових водойм, стік води по укосах), варто застосувати антикорозійні матеріали для опор і кріплень панелей; бажано мінімізувати земляні роботи, аби не порушити стійкість уступів.

До потенційних ризиків також належать обмеження біорізноманіття, а саме – кар'єри інколи стають прихистком для рідкісних видів флори і фауни, що колонізують екстремальні умови. Встановлення ж СЕС може відчутно вплинути на ці осередки дикої природи. Втім, у випадку техногенного ландшафту вапнякового кар'єру с. Довге наразі не сформовано унікальних біоценозів – схили здебільшого оголені або покриті рудеральною рослинністю. Навпаки, їх рекультивація з елементами озеленення (посів трав, висаджування дерев уздовж гребенів для додаткового затінення) потенційно підвищить біорізноманіття. Отже, екологічні ризики стають мінімальними, за умов дотримання природоохоронних вимог (наприклад, забезпечення можливості міграції дрібних тварин між панелями, уникнення суцільного бетонування поверхні тощо).

Очікувані вигоди від реалізації проєкту рекультивації кар'єру під СЕС є такими:

1. *Енергетична вигода:* встановлена потужність близько 0,9–1 МВт здатна генерувати до 1,1–1,2 млн кВт·год електроенергії на рік, що еквівалентно споживанню ~ 300 домогосподарств. Це сприятиме підвищенню частки відновлюваної енергії в регіоні та зменшенню викидів парникових газів.

2. *Економічна вигода:* земля кар'єру, що раніше не приносила доходу (після завершення видобутку), починає генерувати економічну цінність. Місцева громада або власник землі отримуватимуть орендну плату чи частку прибутку від СЕС. Окрім цього, будівництво та обслуговування станції створить тимчасові і постійні робочі місця (інженери, електрики, охорона тощо). Як показав приклад подібного проєкту в США, переобладнання покинутого кар'єру під сонячну ферму може стимулювати локальну економіку: на об'єкті 7 МВт у штаті Мен 35 % робіт виконали місцеві підрядники, створено 20–25 постійних робочих місць з обслуговування, а громада отримала доступ до дешевшої електроенергії [13].

3. *Екологічна вигода:* окрім виробництва чистої енергії та скорочення викидів CO₂, рекультивація кар'єру міститиме елементи відновлення ландшафту (виположення гострих кутів, засівання трав для запобігання пилу), що поліпшить стан довкілля. Зникне небезпека обвалів і незахищених пустот – територія стане безпечною. Формування навколо СЕС зелених зон (буферних насаджень) додатково позитивно вплине на локальний мікроклімат і біоценози.

4. *Соціальна вигода:* проєкт демонструє приклад "win-win" стратегії – громада отримує користь від колишнього промислового об'єкта у вигляді нових робочих місць, сплати податків, іміджу "зеленої" зони; інвестор отримує відносно дешеvu землю під СЕС; держава – прогрес у досягненні енергетичних та екологічних цілей. Населенню легше сприйняти СЕС у старому кар'єрі, а ніж, наприклад, на місці вирубаного лісу чи на родючих сільськогосподарських полях.

Обговорення результатів дослідження. У роботі [10], на прикладі кар'єру в Індонезії, показано, що панелі, встановлені на дні відкритого кар'єру, генерують де-що більшу потужність та мають вищий (приблизно на 2,3 %) ККД порівняно з ідентичними панелями на при-

леглій рівнинній місцевості. Автори пояснюють це тим, що рельєф кар'єру сприяє кращому опроміненню й охолодженню панелей. Отже, розміщення СЕС безпосередньо на місці відпрацьованих кар'єрів є ефективним рішенням, що дає змогу отримувати додатковий енергетичний вихід без залучення нових земель.

У звіті [15] автори наголошують, що розміщення ВДЕ на деградованих землях є "стратегією взаємовигоди", яка одночасно сприяє декарбонізації та розвитку територій. У документі надано економічні обґрунтування переваг використання колишніх шахт і кар'єрів під СЕС, включно зі створенням робочих місць і зменшенням конкуренції за придатні землі. У нашому дослідженні аналогічні ефекти обґрунтовано через локальний приклад, що підкріплює тезу про універсальність цієї моделі.

У роботі [17] зазначено, що потенціал використання кар'єрів під сонячні ферми є величезним: такі об'єкти можуть стати вирішенням конфлікту землекористування та одночасно забезпечити значний приріст енергії для енергетичної системи. Це узгоджується із глобальними трендами трансформації пустих гірничих ландшафтів у джерела чистої енергії.

У роботі [8] актуальним є порівняльний аналіз різних стратегій адаптації пост-видобувних територій для генерації енергії – сонячне генерування серед пріоритетних сценаріїв через технічні та економічні переваги. Це підсилює нашу мету: показати, що навіть круті схили кар'єру можуть стати ефективною основою для потужних СЕС без масштабних змін рельєфу.

У роботі [9] досліджено потенціал гірничих територій для генерації сонячної електроенергії у глобальному масштабі. Автори показали, що загальний річний потенціал виробництва електроенергії на площах колишніх шахт і кар'єрів сягає ~5,8 млн ГВт·год, що в декілька разів перевищує поточне виробництво СЕС у світі. Основним висновком дослідження стало підтвердження доцільності переосмислення використання деградованих ландшафтів не тільки як об'єктів рекультивації, а як повноцінної інфраструктурної бази для енергетичного переходу. При цьому, автори окремо акцентували на технічних викликах, зокрема складному рельєфі, ризиках зсувів, нестабільних укосах і необхідності інженерних рішень. Це підтверджує результати нашого моделювання, де було враховано аналогічні фактори за розміщення фотоелектричних модулів на схилах функціонального кар'єру без масштабного втручання у рельєф.

Отже, обговорення отриманих результатів у контексті літературних даних підтверджує доцільність і новизну проведеного дослідження. Попри наявність поодиноких робіт, що розглядають використання пост-техногенних ландшафтів для генерації сонячної енергії, жодне з відомих досліджень не поєднувало саме ті підходи, які реалізовано у цій роботі. Зокрема, у проаналізованих джерелах не описано детального проектування стаціонарної СЕС на крутих укосах кар'єру з горизонтальною орієнтацією модулів – рішення, яке дало змогу істотно підвищити щільність та ефективність розміщення панелей. Отримані результати є оригінальними і заповнюють цю науково-практичну нішу, підтверджуючи, що рекультивація відпрацьованих кар'єрів під СЕС здатна забезпечити подвійний ефект для енергетики та довкілля, недосяжний традиційними методами.

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

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено методiku обґрунтування можливості рекультивації відпрацьованого кар'єру шляхом розміщення в його межах сонячної електростанції без особливі змін рельєфу, яка, на відміну від наявних методик, базується на використанні природної геометрії схилів як ефективної площини для встановлення фотоелектричних модулів, що дає змогу досягти приблизно 1,6-кратного підвищення щільності розміщення фотоелектричних панелей, збільшити потенціал річного виробітку електроенергії та ефективно використовувати деградовані землі без необхідності істотного інженерного втручання.

Практична значущість результатів дослідження – результати дослідження можна використати для проектування та техніко-економічного обґрунтування розміщення сонячних електростанцій на схилах відпрацьованих кар'єрів, оскільки запропонований підхід дає змогу визначати придатні геометричні параметри укосів для встановлення фотоелектричних модулів без значних змін у рельєфі, що забезпечує зменшення обсягів земляних робіт і дає змогу ефективно залучати деградовані земельні ділянки до відновлюваного енергетичного використання.

Висновки / Conclusions

Обґрунтовано можливість розроблення практичних рекомендацій із перетворення відпрацьованого кар'єру на майданчик для встановлення сонячної електростанції, що забезпечило вирішення екологічних (рекультивація деградованих земель) та енергетичних завдань (генерування відновлюваної електроенергії). За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Встановлено, що відпрацьовані кар'єри можуть виступати перспективними майданчиками для розміщення сонячних електростанцій, що дає змогу поєднати вирішення екологічної проблеми рекультивації деградованих земель із розвитком відновлюваної енергетики; підтверджено природну придатність рельєфу кар'єру с. Довге до розміщення СЕС без терасування, завдяки відповідному куту нахилу схилів і відсутності конфлікту землекористування.
2. Проаналізовано геометричні параметри схилів, які демонструють можливість підвищення щільності розміщення модулів до 64 % порівняно з горизонтальною поверхнею, що відкриває перспективи ефективного залучення "пасивних" земель до енергетичного балансу країни без вилучення сільськогосподарських угідь.
3. Геометрично схили кар'єрів можуть забезпечити більшу щільність розміщення сонячних модулів порівняно з рівнинними ділянками. У розглянутому випадку на похилому укосі вдалося розмістити приблизно на 64 % більше рядів панелей, ніж на еквівалентній площі горизонтальної поверхні. Це підвищує ефективність використання землі та потенційну встановлену потужність СЕС без розширення займаної території. Для України, де питання відведення нових земель під СЕС стоїть гостро, такий підхід відкриває можливості залучити до енергетичного балансу "пасивні" землі, уникнувши вилучення сільгоспугідь.
4. Запропоновано інженерні рішення для безпечної експлуатації СЕС у кар'єрах: укріплення укосів, дренажні й протиерозійні заходи, використання антикорозійних кріплень і забезпечення доступу до модулів для обслуговування, що є критично важливим для надійності системи впродовж її життєвого циклу.

5. Рекомендовано застосування фінансових і нормативних стимулів з боку держави для підтримки проєктів СЕС на деградованих землях – включно зі спрощеним наданням земель, податковими пільгами та надбавками до "зеленого" тарифу, що може компенсувати початкові витрати та зробити такі проєкти привабливими для інвесторів.
6. Змодельовано, що на прикладі кар'єру в с. Довге можливо встановити СЕС потужністю до 1 МВт з річною генерацією понад 1,1 млн кВт·год, що підтверджує технічну здійсненність концепції, а її успішна реалізація може стати прикладом для масштабування на інші регіони України.
7. Показано, що проєкт має міждисциплінарний ефект: зменшення викидів CO₂, відновлення порушених ландшафтів, підвищення безпеки територій та соціально-економічні вигоди у вигляді створення робочих місць і підвищення інвестиційної привабливості регіонів.
8. Окреслено, що подальші дослідження можуть бути зосереджені на адаптації інженерних рішень до різних типів кар'єрів, створенні типових проєктів СЕС на схилах, а також проведенні оцінки повної економічної ефективності таких об'єктів з урахуванням усього життєвого циклу – від рекультивациі до демонтажу.

References

1. 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>
2. Al Heib, M., & Cherkaoui, A. (2021). Assessment of the Advantages and Limitations of Installing PV Systems on Abandoned Dumps. *Materials Proceedings*, 5(1), article ID 68. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005068>
3. 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), 7, article ID 6077. <https://doi.org/10.3390/su14106077>
4. Balkan Green Energy News. (2024, March 28). *IRENA: Global solar power capacity surpasses hydropower in 2023*. Retrieved August 12, 2025. URL: <https://balkangreenenergynews.com/irena-global-solar-power-capacity-surpasses-hydropower-in-2023/>
5. 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>
6. European Environmental Bureau. (2024, July 24). *Ample land for sustainable renewables expansion in Europe, new study reveals*. URL: <https://eeb.org/ample-land-for-sustainable-renewables-expansion-in-europe-new-study-reveals/>
7. Genex Power. *Kidston Clean Energy Hub – Project Overview*. Project Factsheet, April 2025. URL: <https://genexpower.com.au/wp-content/uploads/2025/04/Kidston-Clean-Energy-Hub-Factsheet-April-2025-V3-1.pdf>
8. 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>
9. 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>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. Nautilus Solar Energy, LLC. (2023, June 29). Nautilus Solar Energy® opens community solar farm built on former sand quarry. Retrieved August 12, 2025. URL: <https://nautilus-solar.com/news/nautilus-solar-energy-opens-community-solar-farm-built-on-former-sand-quarry>
14. 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>
15. The Nature Conservancy. (2024, April 15). *Mining the Sun: Transforming mine lands and brownfields into clean energy hubs* [PDF report]. Retrieved August 12, 2025. URL: https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/Mining_the_Sun_Report.pdf
16. 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>
17. 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>

A. I. Redko, Ya. O. Adamenko

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

RECLAMATION OF EXHAUSTED QUARRIES FOR SOLAR POWER PLANT PLACEMENT

This study investigates the feasibility of reclaiming exhausted quarry areas to install solar power plants, offering an innovative approach to ecological restoration and renewable energy development. The analysis focused on a limestone quarry near the village of Dovhe in Ivano-Frankivsk Region in Ukraine. Topographic and geodetic surveys were used to determine the geometric characteristics of the quarry slopes, such as their angles, lengths and orientations. Solar radiation potential was assessed using the PVGIS database and geometric modelling was employed to optimise the placement and arrangement of photovoltaic modules. The study found that the natural slope angle of the quarry of around 31.8°, oriented towards the southwest, closely matches the optimal tilt angle for fixed photovoltaic panels in mid-latitude regions. This enhances the annual energy yield. Consequently, adopting a horizontal orientation for the solar panels significantly reduces mutual shading between rows and increases panel density on slopes by around 64 %, compared to flat terrain arrangements. Moreover, technical considerations include the need for slope stabilisation, erosion control and corrosion protection measures to ensure long-term operational safety. The study also characterised the socio-economic benefits, including job creation, increased local revenue, and an improved regional ecological and social image. Furthermore, international experience from similar projects in France, the USA and Australia was summarised, confirming the viability and success of quarry reclamation projects incorporating solar installations. These findings suggest that scaling up such projects across Ukraine could contribute significantly to sustainable land management, the expansion of renewable energy, and regional economic growth. Further research into developing regulatory frameworks and financial incentives to facilitate investment in renewable-energy-based reclamation initiatives is therefore recommended.

Keywords: energy transformation of quarries; alternative land use; solar energy; degraded land; renewable energy sources.