

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Редько Андрій Ігорович

УДК 622.271:621.311.243:528.9:502.171


ДИСЕРТАЦІЯ
ПРОСТОРОВО-ЕКОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ
ВИКОРИСТАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ ДЛЯ РОЗВИТКУ
СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ (НА ПРИКЛАДІ
ІВАНО - ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

101 - Екологія

10 - Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 А. І. Редько

Науковий керівник **Адаменко Ярослав Олегович**, доктор технічних
наук, професор

Івано-Франківськ - 2026

АНОТАЦІЯ

Редько А. І. «Просторово-екологічне обґрунтування використання відпрацьованих кар'єрів для розвитку сонячної енергетики (на прикладі Івано-Франківської області)».

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 «Екологія» галузі знань 10 «Природничі науки». - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання, що полягає в науковому обґрунтуванні екологічно безпечного використання сонячної енергії у Івано-Франківській області шляхом розроблення та практичної апробації ГІС-орієнтованої методики скринінгу, багатокритеріального оцінювання та інтегрального ранжування відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій. Актуальність теми зумовлена необхідністю одночасного забезпечення розвитку відновлюваної енергетики, зниження конфліктів землекористування, мінімізації екологічних ризиків та пошуку ефективних шляхів повторного функціонального використання техногенно порушених територій. У сучасних умовах розширення сонячної генерації дедалі гостріше постає проблема вибору ділянок, придатних для розміщення СЕС без вилучення високопродуктивних сільськогосподарських земель, без надмірного втручання у природоохоронні території та без формування нових просторових конфліктів із житловою, рекреаційною й інженерною інфраструктурою. У цьому контексті відпрацьовані кар'єри становлять особливий інтерес як уже трансформовані техногенні ландшафти, які за певних умов можуть бути адаптовані до нового функціонального використання й розглядатися не лише як об'єкти рекультивації, а й як потенційні майданчики для розвитку сонячної енергетики.

Метою дисертаційної роботи є розроблення, теоретичне обґрунтування та практична апробація системи оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій із використанням ГІС-інструментів, скринінгу, багатокритеріального аналізу та інтегрального ранжування.

Для досягнення поставленої мети в роботі узагальнено сучасні наукові підходи до просторового планування сонячної енергетики та використання техногенно порушених земель у післявидобувних ландшафтах; проаналізовано переваги й обмеження застосування геоінформаційних систем і багатокритеріального аналізу прийняття рішень у задачах вибору майданчиків під сонячні електростанції; обґрунтовано доцільність розгляду відпрацьованих кар'єрів як альтернативних територій для розвитку сонячної генерації; сформовано систему критеріїв та часткових індексів придатності; розроблено архітектуру інтегральної моделі, побудованої на поєднанні Gate-фільтра та зваженої лінійної комбінації; виконано її практичну апробацію на вибірці кар'єрів Івано-Франківської області; проведено детальний просторовий аналіз пілотних об'єктів засобами ArcGIS; а також сформовано рекомендації щодо просторово-інженерної адаптації кар'єрного рельєфу для розміщення фотоелектричних модулів.

Об'єктом дослідження є процес екологічно безпечного використання сонячної енергії у відпрацьованих кар'єрах.

Методологічну основу дослідження становить поєднання геоінформаційного аналізу та багатокритеріального аналізу прийняття рішень. У роботі застосовано системний і порівняльний аналіз, ГІС-аналіз растрових і векторних даних, некомпенсаційний фільтр критичних обмежень, зважену лінійну комбінацію критеріїв, морфометричний аналіз цифрових моделей рельєфу, моделювання сонячної радіації в середовищі ArcGIS, а також розрахунково-аналітичні та інженерно-геометричні методи. Концептуально методика побудована за принципом двоетапного оцінювання: на першому етапі здійснюється відсікання об'єктів, що не відповідають базовим умовам

просторової допустимості, а на другому - ранжування допустимих альтернатив за системою нормалізованих індексів. Такий підхід дозволяє поєднати жорстку перевірку нормативно й екологічно неприйнятних варіантів із подальшим гнучким зіставленням перспективних кар'єрів за сукупністю параметрів, що мають значення для попереднього вибору майданчиків під сонячні електростанції.

У дисертації розроблено ГІС-орієнтовану модель оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, у якій поєднано некомпенсаційний фільтр критичних обмежень (Gate-фільтр) та інтегральне ранжування на основі зваженої лінійної комбінації (WLC). Структуру моделі сформовано з урахуванням п'яти основних нормалізованих індексів, кожен із яких відображає окремий вимір придатності кар'єру для подальшого енергетичного використання. Індекс сонячного потенціалу характеризує відносний рівень інсоляції та очікувану енергетичну продуктивність. Геотехнічний індекс відображає інженерно-геологічні передумови безпечного та економічно доцільного розміщення конструкцій. Мережевий індекс оцінює доступність приєднання до електричних мереж і наближеність до релевантної енергетичної інфраструктури. Екологічний індекс інтегрує природоохоронні й соціально-екологічні чинники чутливості території. Логістично-інфраструктурний індекс враховує просторові показники транспортної доступності, конфігурації кар'єру та потенційних капітальних витрат початкового етапу освоєння території. Узгодження цих показників в єдиній шкалі забезпечує коректність подальшої агрегації та дозволяє формувати підсумковий інтегральний бал придатності, придатний для зіставлення об'єктів між собою.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, Вперше розроблено та науково обґрунтовано ГІС-орієнтовану модель екологічного багатокритеріального скринінгу та інтегрального оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, яка

базується на поєднанні некомпенсаційного фільтра критичних обмежень (Gate-фільтр) та зваженої лінійної агрегації (WLC) часткових індексів.

Удосконалено систему оцінювання сонячного потенціалу техногенно порушених ландшафтів шляхом впровадження спеціалізованих індексів геотехнічної придатності та мережевої доступності, які інтегруються в єдиний показник ранжування територій для розміщення сонячних електростанцій, що дозволяє враховувати специфіку літологічної будови та існуючої енергетичної інфраструктури кар'єрів.

Дістала подальший розвиток методика GIS-MCDA скринінгу відпрацьованих кар'єрів під СЕС шляхом адаптації блоку соціально-екологічної чутливості до післявидобувних територій, зокрема через включення GBIF-опосередкованого індикатора чутливості фауни як градуйованого складника індексу S_{eco} .

Практичну апробацію методики виконано на вибірці з 11 відпрацьованих кар'єрів Івано-Франківської області. Для цієї вибірки послідовно реалізовано повний цикл оцінювання - від первинного дистанційного скринінгу та перевірки бінарних обмежень до інтегрального ранжування допустимих альтернатив. Установлено, що 9 кар'єрів відповідають базовим просторовим вимогам допустимості, тоді як 2 об'єкти виключаються з подальшого розгляду через наявність критичних обмежень. Отримані результати підтвердили доцільність використання Gate як обов'язкового первинного етапу моделі, оскільки він запобігає включенню неприйнятних територій до подальшого рейтингового аналізу навіть у разі, якщо за окремими критеріями вони виглядали б потенційно привабливими. За результатами інтегрального оцінювання визначено групу найбільш перспективних кар'єрів для подальшого проєктного опрацювання, до якої увійшли Стриганецький, Олешівський, Городенківський, Стрільченський та Дубівецький кар'єри. Встановлено, що підсумкова придатність кар'єру до розміщення СЕС визначається не одним домінантним фактором, а збалансованим поєднанням

сонячного ресурсу, геотехнічних умов, мережевої доступності, рівня екологічної чутливості та логістичних передумов освоєння території.

У межах дослідження виконано детальний просторовий аналіз пілотних кар'єрів із використанням цифрових моделей рельєфу, карт ухилів, експозиції та сонячної радіації. Показано, що просторовий розподіл інсоляції в межах кар'єрних територій істотно залежить від конфігурації бортів, ухилу й орієнтації поверхонь, терасування, мікрорельєфу та локального екранування горизонту. Отримані результати підтвердили, що морфологія кар'єру не є лише обмеженням для розміщення сонячних електростанцій, а може розглядатися як ресурс інженерної оптимізації за умови її цілеспрямованого просторового переосмислення. Доведено, що кероване профілювання рельєфу, терас і похилих поверхонь є дієвим інструментом підвищення придатності відпрацьованих кар'єрів до енергетичного використання. Для пілотних об'єктів обґрунтовано параметри розміщення фотоелектричних модулів, зокрема кут нахилу, азимут орієнтації, міжрядні відстані та щільність компонування, з урахуванням геометрії ділянок, вимог до мінімізації взаємного затінення та необхідності досягнення раціонального співвідношення між максимальною інсоляційною ефективністю і площею, доступною для встановлення модулів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена методика може бути використана як інструмент попереднього скринінгу та ранжування відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, як основа для передпроектного аналізу, а також як допоміжний інструмент для формування рекомендацій щодо рекультивації, ревіталізації та повторного функціонального використання техногенно порушених земель. Її застосування дозволяє скоротити обсяг дорогих детальних вишукувань на початковому етапі, зменшити ризик екологічно необґрунтованого вибору майданчиків, підвищити обґрунтованість інженерних та інвестиційних рішень і сформулювати перелік пріоритетних кар'єрів для подальшої поглибленої оцінки. Одержані результати можуть бути використані органами місцевого

самоврядування, природоохоронними й планувальними структурами, надрокористувачами, проєктними організаціями та інвесторами у сфері відновлюваної енергетики. Запропонований підхід має потенціал масштабування на інші регіони України за умови адаптації ваг критеріїв, уточнення регіональних просторових обмежень і розширення бази кар'єрів.

Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовано на міжнародних і регіональних науково-практичних конференціях. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, у яких відображено теоретичні, методичні та прикладні результати проведеного дослідження.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, відпрацьований кар'єр, рекультивация порушених земель, геоінформаційні системи, декарбонізація, просторове планування, дистанційні методи, сонячна електростанція, екологічна безпека, математичне моделювання, сонячна генерація, геотехнічна придатність, інтегральне ранжування.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Редько А. І. Екологічні обмеження використання сонячної енергії у Карпатському регіоні / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. - 2024. - Вип. 106. - С. 65-71. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.65> (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач обґрунтував основні екологічні обмеження для розміщення сонячних електростанцій (СЕС) у Карпатському регіоні; провів статистичне оброблення даних експериментальної СЕС та розробив регресійні моделі залежності виробітку електроенергії від ключових метеорологічних параметрів; визначив граничні умови ефективного функціонування фотоелектричних панелей для м. Івано-Франківська; Я. О. Адаменко здійснив загальне наукове керівництво дослідженням, долучився до формування методології екологічної оцінки та перевірів коректність отриманих закономірностей.

2. Редько А. І. Рекультивация відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Науковий вісник НЛТУ України*. - 2025. - Т. 35, № 4. - С. 79-85. <https://doi.org/10.36930/40350409> (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач дослідив потенціал рекультивации деградованих земель на прикладі кар'єру в с. Довге; провів топографо-геодезичні вимірювання схилів та здійснив геоінформаційне моделювання інсоляції; встановив, що використання природного ухилу схилів дозволяє підвищити щільність розміщення модулів на 64% порівняно з рівнинною поверхнею; Я. О. Адаменко забезпечив наукове керівництво, брав участь у систематизації світового досвіду рекультивации та надав пропозиції щодо впровадження фінансових стимулів для таких проєктів в Україні.

3. Редько А. І. Сонячні електростанції як інструмент екологічної ревіталізації відпрацьованих кар'єрів / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. - 2025. - № 8. - С. 80-89.

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-011> (Фахове наукове видання України категорії Б). *Здобувач розробив та апробував ГІС-методику оцінювання придатності схилів кар'єрів; побудував цифрову модель рельєфу Стриганецького кар'єру та розрахував інтегральний індекс придатності ділянок; виконав розрахунок потенційної потужності СЕС для обраного об'єкта; Я. О. Адаменко обґрунтував актуальність поєднання рекультивації земель із розвитком відновлюваної енергетики та надав пропозиції щодо інтеграції методики у проекти розробки кар'єрів.*

4. Редько А. І. Екоенергетичний потенціал відпрацьованих кар'єрів і ризику його використання / А. І. Редько // *Екологічна безпека та природокористування*. - 2025. - Вип. 4 (56). - С. 69-81. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.69-81> (Фахове наукове видання України категорії Б). *Здобувач розробив модель багатокритеріального скринінгу техногенно порушених територій; сформував інтегральний індекс екоенергетичного потенціалу (ЕЕР), що враховує умови інсоляції, геотехнічну придатність, мережеве приєднання та екологічні обмеження; провів апробацію моделі на кар'єрах поблизу Дубівців та Ямниці.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Редько А. І. Перспективи використання сонячної енергії / А. І. Редько // *Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування : матеріали I Всеукраїнської (з міжнародною участю) наукової конференції студентів, магістрантів, аспірантів та молодих вчених (Харків, 29 листопада - 1 грудня 2012 р.)*. - Харків : Вид-во ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. - С. 90-91. *Здобувач проаналізував перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні як стратегічного відновлюваного ресурсу; систематизував екологічні та економічні переваги заміщення викопного палива сонячними установками для зменшення забруднення довкілля та зміцнення енергетичної незалежності; виконав кількісну оцінку потенційного виробітку електроенергії для побутових потреб домогосподарств на основі даних про регіональну*

інсоляцію; визначив техніко-експлуатаційні переваги використання автономних геліосистем для енергозабезпечення віддалених об'єктів, зокрема в гірських районах Карпат, Н. О. Зоріна здійснила загальне наукове керівництво підготовкою роботи; надала методичну допомогу у структуруванні основних розділів доповіді; перевірила коректність розрахункових енергетичних параметрів та відповідність сформульованих висновків принципам сталого розвитку.

6. Редько А. Аналіз методів рекультивації відкритих гірських виробок // Вплив виробництва, передачі, розподілу та використання електроенергії на навколишнє середовище [Електронне видання] : збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 24-25 листопада 2022 р.) / за заг. ред. проф. Я. О. Адаменка.- Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022.- укр., англ. та румун. мовами. С. 60-62. *Здобувач провів аналіз екологічних аспектів впровадження СЕС у Карпатах; виконав статистичне оброблення результатів вимірювань експериментальної станції за 2021 рік та побудував регресійні моделі залежності генерації від метеорологічних чинників; Я. О. Адаменко надав методичні рекомендації щодо структури дослідження та брав участь у валідації отриманих статистичних залежностей.*

7. Редько А. І. Впровадження альтернативних джерел енергії для приватних садиб на території Івано-Франківської ТГ / А. І. Редько // *Сталий розвиток - стан та перспективи* : збірник матеріалів IV Міжнародного наукового симпозіуму в рамках Еразмус+ Модуль Жан Моне «Концепція екосистемних послуг: Європейський досвід» («EE4CES») (Львів - Славське, 13-16 лютого 2024 р.). - Київ : Яроченко Я. В., 2024. - С. 139-141. *Здобувач дослідив можливості використання геліоенергетичних систем для приватних садиб Івано-Франківської ТГ; проаналізував сонячний потенціал та обґрунтував доцільність впровадження сонячних колекторів; виконав розрахунок системи для потреб домогосподарства.*

8. Редько А. І. Оцінка придатності відпрацьованих кар'єрів для встановлення сонячних електростанцій на основі геометричного та інсоляційного аналізу / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Молодіжний екогеофорум - 2025 : збірник матеріалів Регіональної конференції (Івано-Франківськ, 19-20 листопада 2025 р.)*. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. - С. 63-64. Здобувач провів оцінювання кар'єру в с. Довге; встановив, що природний кут нахилу схилів ($31,6^\circ$) є оптимальним для монтажу панелей; здійснив інсоляційний аналіз та розрахував прогнозований енерговиріток (1,1 млн кВт·год/рік); Я. О. Адаменко здійснював загальне наукове керівництво та брав участь у валідації результатів геометричного моделювання.

9. Редько А. І. Ревіталізація кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій // *The 6th International scientific and practical conference "International experience in scientific research" (January 23-25, 2026) BoScience Publisher, Chicago, USA. 2026.* - pp. 156-160. Здобувач обґрунтував перспективність поєднання екологічної рекультивациі деградованих земель із розвитком енергетики; підтвердив придатність рельєфу кар'єру в с. Довге без додаткового терасування; виконав розрахунки очікуваної інсоляції на похилих поверхнях; Я. О. Адаменко брав участь у систематизації міжнародного досвіду трансформації копалень та перевіряв висновки щодо відсутності конфліктного землекористування.

10. Редько А. І. Використання відпрацьованих кар'єрів як просторового ресурсу для розміщення сонячних електростанцій (на прикладі долини річки Дністер) / А. І. Редько // *Innovative Research in Science and Economy : Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (Brussels, Belgium, January 28-30, 2026)*. - Brussels, Belgium : International Scientific Unity, 2026. - Pp. 76-79. URL: <https://isu-conference.com/> (Закордонне видання). Здобувач обґрунтував роль деградованих земель як просторового резерву; розробив цифрову модель рельєфу кар'єру та обчислив морфометричні характеристики; провів моделювання сонячної радіації з

урахуванням взаємного затінення схилів та ідентифікував оптимальні майданчики для СЕС.

11. Редько А. І. Екологічні та інженерні аспекти рекультивації кар'єрів під сонячні електростанції / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Innovation and development in world science : Proceedings of V International Scientific and Practical Conference (Zurich, Switzerland, 2-4 March 2026)*. - Zurich, Switzerland : MDPC Publishing, 2026. - Pp. 142-145. URL: <https://sci-conf.com.ua/> (Закордонне видання). *Здобувач довів можливість розв'язання екологічної проблеми рекультивації шляхом створення сонячних ферм; розрахував прогнозовану генерацію на рік для фіксованих панелей на схилах кар'єру; Я. О. Адаменко здійснював наукове керівництво та перевіряв коректність висновків щодо екологічної безпеки об'єкта.*

ABSTRACT

Redko A. I. «Spatial and Environmental Justification for the Use of Post-Mining Quarries for the Development of Solar Energy)A Case Study of Ivano-Frankivsk Region)».

Qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 101 «Ecology», field of knowledge 10 «Natural Sciences». Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2026.

The dissertation addresses an urgent scientific and applied problem: the scientific substantiation of the environmentally safe use of solar energy in Ivano-Frankivsk Region through the development and practical testing of a GIS-oriented methodology for screening, multi-criteria assessment, and integral ranking of post-mining quarries for the placement of solar power plants. The relevance of the topic is determined by the need to simultaneously ensure the development of renewable energy, reduce land-use conflicts, minimise environmental risks, and identify effective ways of reusing technogenically disturbed areas for new functional purposes. Under present conditions, as solar generation expands, the problem of selecting sites suitable for the placement of solar power plants is becoming increasingly important, particularly without the withdrawal of highly productive agricultural land, excessive intervention in protected areas, or the creation of new spatial conflicts with residential, recreational, and engineering infrastructure. In this context, worked-out quarries are of particular interest as already transformed technogenic landscapes which, under certain conditions, may be adapted to new functional uses and considered not only as objects of reclamation but also as potential sites for the development of solar energy.

The aim of the dissertation is to develop, theoretically substantiate, and practically test a system for assessing the suitability of worked-out quarries for the placement of solar power plants using GIS tools, screening, multi-criteria analysis, and integral ranking.

To achieve this aim, the study generalises contemporary scientific approaches to the spatial planning of solar energy and the use of technogenically disturbed land in post-mining landscapes; analyses the advantages and limitations of applying geographic information systems and multi-criteria decision analysis to the selection of sites for solar power plants; substantiates the feasibility of considering worked-out quarries as alternative areas for the development of solar generation; develops a system of criteria and partial suitability indices; proposes the architecture of an integral model based on the combination of a Gate filter and weighted linear combination; carries out its practical testing on a sample of quarries in Ivano-Frankivsk region; performs a detailed spatial analysis of pilot sites using ArcGIS; and formulates recommendations for the spatial and engineering adaptation of quarry relief for the placement of photovoltaic modules.

The object of the study is the process of environmentally safe use of solar energy in worked-out quarries.

The methodological basis of the study is a combination of GIS analysis and multi-criteria decision analysis. The study applies systemic and comparative analysis, GIS analysis of raster and vector data, a non-compensatory filter of critical constraints, weighted linear combination of criteria, morphometric analysis of digital elevation models, solar radiation modelling in the ArcGIS environment, as well as computational-analytical and engineering-geometric methods. Conceptually, the methodology is based on a two-stage assessment principle: at the first stage, objects that do not meet the basic conditions of spatial admissibility are excluded, while at the second stage, admissible alternatives are ranked using a system of normalised indices. This approach makes it possible to combine a strict verification of normatively and environmentally unacceptable alternatives with the subsequent flexible comparison of promising quarries according to a set of parameters relevant to the preliminary selection of sites for solar power plants.

The dissertation develops a GIS-oriented model for assessing the suitability of worked-out quarries for the placement of solar power plants, combining a non-compensatory filter of critical constraints, referred to as the Gate filter, with integral

ranking based on weighted linear combination (WLC). The structure of the model is formed on the basis of five main normalised indices, each of which reflects a separate dimension of quarry suitability for further energy-related use. The solar potential index characterises the relative level of insolation and the expected energy productivity. The geotechnical index reflects the engineering-geological prerequisites for the safe and economically feasible placement of structures. The grid index assesses the accessibility of connection to power networks and proximity to relevant energy infrastructure. The environmental index integrates nature conservation and socio-environmental sensitivity factors of the territory. The logistics and infrastructure index accounts for spatial indicators of transport accessibility, quarry configuration, and potential initial capital costs of site development. Harmonising these indicators within a single scale ensures the correctness of subsequent aggregation and enables the formation of a final integral suitability score suitable for comparing the objects with one another.

The scientific novelty of the obtained results lies in the following. For the first time, a GIS-oriented model of ecological multi-criteria screening and integral assessment of the suitability of worked-out quarries for the placement of solar power plants has been developed and scientifically substantiated. The model is based on the combination of a non-compensatory filter of critical constraints, referred to as the Gate filter, and weighted linear aggregation (WLC) of partial indices.

The system for assessing the solar potential of technogenically disturbed landscapes has been improved by introducing specialised indices of geotechnical suitability and grid accessibility, which are integrated into a single ranking indicator for territories intended for the placement of solar power plants. This makes it possible to account for the specific features of the lithological structure and existing energy infrastructure of quarries.

The GIS-MCDA methodology for screening worked-out quarries for solar power plant placement has been further developed by adapting the socio-environmental sensitivity block to post-mining areas, in particular through the

inclusion of a GBIF-mediated fauna sensitivity indicator as a graded component of the S_{eco} index.

The practical testing of the methodology was carried out on a sample of 11 worked-out quarries in Ivano-Frankivsk Oblast. For this sample, the full assessment cycle was consistently implemented, from initial remote screening and verification of binary constraints to the integral ranking of admissible alternatives. It was established that nine quarries meet the basic spatial admissibility requirements, whereas two objects are excluded from further consideration due to the presence of critical constraints. The results obtained confirmed the feasibility of using Gate as a mandatory initial stage of the model, since it prevents unacceptable areas from being included in subsequent ranking analysis even when they may appear potentially attractive according to individual criteria. Based on the results of the integral assessment, a group of the most promising quarries for further project-level elaboration was identified, including the Stryhanets, Oleshiv, Horodenkivskyi, Strilchenskyi, and Dubivetskyi quarries. It was established that the final suitability of a quarry for the placement of a solar power plant is determined not by one dominant factor, but by a balanced combination of solar resource, geotechnical conditions, grid accessibility, the level of environmental sensitivity, and the logistical prerequisites for site development.

Within the study, a detailed spatial analysis of pilot quarries was carried out using digital elevation models, slope maps, aspect maps, and solar radiation maps. It was shown that the spatial distribution of insolation within quarry areas substantially depends on the configuration of quarry walls, slope gradient and surface orientation, terracing, microrelief, and local horizon obstruction. The obtained results confirmed that quarry morphology is not merely a constraint for the placement of solar power plants, but may be considered a resource for engineering optimisation, provided that it is purposefully reinterpreted in spatial terms. It was demonstrated that controlled profiling of relief, terraces, and inclined surfaces is an effective tool for increasing the suitability of worked-out quarries for energy-related use. For the pilot sites, the parameters for the placement of photovoltaic modules

were substantiated, including tilt angle, orientation azimuth, inter-row spacing, and layout density, taking into account the geometry of the sites, the need to minimise mutual shading, and the requirement to achieve a rational balance between maximum insolation efficiency and the area available for module installation.

The practical significance of the obtained results lies in the fact that the developed methodology can be used as a tool for the preliminary screening and ranking of worked-out quarries for the placement of solar power plants, as a basis for pre-project analysis, and as an auxiliary tool for formulating recommendations on the reclamation, revitalisation, and functional reuse of technogenically disturbed lands. Its application makes it possible to reduce the scope of costly detailed surveys at the initial stage, decrease the risk of environmentally unjustified site selection, improve the substantiation of engineering and investment decisions, and form a list of priority quarries for subsequent in-depth assessment. The obtained results may be used by local self-government bodies, environmental protection and planning authorities, subsoil users, design organisations, and investors in the renewable energy sector. The proposed approach has the potential to be scaled to other regions of Ukraine, provided that the criterion weights are adapted, regional spatial constraints are refined, and the quarry database is expanded.

The main provisions and results of the dissertation have been presented at international and regional scientific and practical conferences. A total of 11 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, reflecting the theoretical, methodological, and applied results of the conducted research.

Keywords: renewable energy sources, post-mining quarry, reclamation of disturbed lands, geographic information systems, decarbonisation, spatial planning, remote sensing methods, solar power plant, environmental safety, mathematical modelling, solar generation, geotechnical suitability, integral ranking.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА АНГЛОМОВНИХ ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП	14
РОЗІДЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ПРОСТОРОВОГО ПЛАНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНИХ ЗЕМЛЯХ: ПРОБЛЕМИ, ПРОГАЛИНИ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ.....	21
1.1 Вступ до проблематики просторового планування відновлюваної енергетики.....	21
1.2 Теоретичні засади просторового енергетичного планування (SEP) та еволюція методів GIS-MCDA	23
1.2.1 Концепція просторового енергетичного планування	23
1.2.2 Інтеграція геоінформаційних систем та багатокритеріального аналізу рішень	25
1.3 Використання деградованих, браунфілд-територій і післявидобувних територій для розміщення сонячних електростанцій.....	31
1.4 Прогалини та обмеження сучасних підходів до оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій	34
1.4.1 Недостатнє врахування геотехнічної придатності у GIS-MCDA моделях	35
1.4.2. Обмежена інтеграція еколого-просторових чинників у спеціалізовані моделі оцінювання кар'єрів.....	37
1.4.3 Спрощене представлення мережевої доступності у GIS-MCDA моделях відбору ділянок під СЕС.....	39
1.4.4 Недостатнє врахування логістичних і CAPEX-проксі чинників у ранньому скринінгу територій.....	41

1.5 Висновки до розділу та обґрунтування потреби у спеціалізованій моделі оцінювання відпрацьованих кар'єрів	43
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДИСТАНЦІЙНОГО ГІС-СКРИНІНГУ ТА ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПРИДАТНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	48
2.1 Розрахункова модель інтегральної оцінки придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення СЕС на основі архітектури Gate + WLC	48
2.2 Методика дистанційного скринінгу: застосування бінарних критеріїв «Так/Ні» для первинного відбору майданчиків	51
2.2.1 Джерела онлайн-спостереження та принцип перехресної перевірки.....	52
2.2.2 Перевірка водних обмежень: уріз води, нормативна ширина прибережної захисної смуги та gate-коефіцієнт	53
2.2.3 Перевірка потрапляння кар'єру в межі природно-заповідного фонду: межі охоронюваної території, факт перетину та gate-коефіцієнт.....	55
2.2.4 Формалізація gate-множника у моделі інтегральної придатності.....	55
2.3 Скринінг сонячного потенціалу кар'єрів за даними Global Solar Atlas (індекс придатності S_{sol}).....	56
2.4 Геотехнічний індекс придатності S_{geo} для скринінгу кар'єрів під СЕС.....	59
2.4.1 Призначення індексу та межі застосування.....	59
2.4.2 Геотехнічна придатність майданчика під СЕС.....	60
2.4.3 Обґрунтування пріоритетності оцінки стану масиву над властивостями монолітної породи.....	60
2.4.4 Фізична інтерпретація та компонентна структура індексу S_{geo}	61
2.4.5 Правило присвоєння за шкалою S_{geo}	62
2.5 Обґрунтування індексу електромережевої доступності S_{grid} : двокомпонентна модель оцінювання (ПС / ЛЕП-35 кВ).....	64
2.5.1 Концептуальна структура індексу та його роль у методиці скринінгу...	64
2.5.2 Обґрунтування системи індикаторів оцінки мережевої інфраструктури	65
2.5.3 Визначення змінних і правило вибору цільової підстанції.....	66
2.5.4 Дискретизація просторових метрик та алгоритм розрахунку індексу....	67

2.5.5 Розрахункова модель індексу S_{grid} та умови відсікання за Gate-критерієм	68
2.5.6 Аналіз чутливості моделі та верифікація вагових коефіцієнтів	70
2.5.7 Обмеження моделі та ризику інтерпретації результатів	72
2.6 Обґрунтування індексу соціально-екологічної чутливості у моделі скринінгу S_{eco}	73
2.6.1 Концептуальні засади та місце індексу в структурі оцінювання	73
2.6.2 Актуальність врахування локального контексту для кар'єрних ландшафтів	74
2.6.3 Структура та операціоналізація часткових індикаторів індексу S_{eco}	75
2.6.3.2 Рекреаційно-культурна чутливість S_{rec}	75
2.6.3.3 Буферна зона ПЗФ.....	76
2.6.3.4. Індустріальний контекст S_{ind}	76
2.6.4. Розрахункова модель та вагові коефіцієнти.....	78
2.6.5 Обмеження моделі та інтерпретація результатів	79
2.7 Логістика та капітальні витрати S_{log} у скринінгу кар'єрів	80
2.7.1 Роль земляних робіт у капітальних витратах фотоелектричних проєктів.	80
2.7.2 Індекс експозиційної придатності кар'єру для розміщення СЕС.....	80
2.7.3 Вихідні геометричні дані.....	82
2.7.4 Класи придатності та коефіцієнт орієнтаційно-експозиційної придатності k_{exp}	83
2.7.5 Розрахунок поправки на витягнутість кар'єру.	83
2.7.6 Обмеження та ризику інтерпретації.....	85
2.7.7 Дорожня доступність до потенційних майданчиків під СЕС.....	85
2.7.8 Розрахунок індексу придатності S_{logi}	87
2.7.9 Формалізація критеріїв оцінювання та забезпечення відтворюваності результатів.....	87
2.8 Висновки до розділу 2	89

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ГІС-СКРИНІНГУ ТА ІНТЕГРАЛЬНЕ РАНЖУВАННЯ КАР'ЄРІВ ПІД РОЗМІЩЕННЯ СЕС.....	93
3.1 Вихідні дані та підготовка розрахункової бази	93
3.1.1 Перелік і коротка характеристика 11 кар'єрів (об'єкти дослідження)....	94
3.1.2 Структура вхідних таблиць/параметрів для індексів і Gate (зведення даних).....	95
3.1.3 Єдині правила одиниць виміру, нормалізації та округлення результатів (для відтворюваності).	98
3.1 Застосування gate-скринінгу (ПЗФ і прибережні захисні смуги) для попереднього відбору кар'єрів під СЕС.....	100
3.2.1 Вхідні дані та правила розрахунку Gate (за Розділом 2)	100
3.2.2 Процедура вимірювання d_{min} у Google Earth та заповнення таблиці	101
3.2.3 Демонстраційний розрахунок на прикладі Стриганецького кар'єру у с. Довге	101
3.2.4 Висновки за результатами gate-скринінгу	106
3.2 Практичний розрахунок індексу сонячного потенціалу S_{sol} для 11 кар'єрів (за даними Global Solar Atlas).....	106
3.3.1 Вихідні дані та нормалізація	107
3.3.2 Демонстраційний розрахунок на прикладі Стриганецького кар'єру	108
3.3.3 Висновки за результатами індексу придатності S_{sol}	112
3.4 Геотехнічна придатність S_{geo} : правило присвоєння та результати для 11 кар'єрів	113
3.4.1 Призначення індексу та межі застосування.....	113
3.4.2 Правило присвоєння S_{geo} за класами.....	114
3.4.3 Висновки за результатами придатності індексу S_{geo}	115
3.5 Мережевий індекс S_{grid} : двокомпонентна модель доступності (ПС / ЛЕП-35 кВ).....	115
3.5.1 Вхідні змінні та дискретизація (шкали PS0-PS5 та L1-L6).....	116
3.5.2 Демонстраційний розрахунок індексу S_{grid} на прикладі Стриганецького кар'єру	116

3.5.3 Висновки за результатами придатності за індексом S_{grid}	121
3.6 Оцінювання екологічної чутливості кар'єрів для розміщення СЕС (індекс S_{eco}).....	122
3.6.1 Призначення та інтерпретація індексу.....	122
3.6.2 Вхідні змінні та просторові операції (буфери/відстані).....	122
3.6.3 Нормалізація в підіндекси (0 / 0,5 / 1) - за формулами (2.9)-(2.16)	123
3.6.4 Агрегація по формулі S_{eco} (2.17) з вагами розрахунку.....	125
3.6.5 Розрахунок вихідних даних для індексу S_{eco} на прикладі Стриганецького кар'єру	125
3.6.6 Демонстраційний розрахунок індексу S_{eco} на прикладі Стриганецького кар'єру	132
3.6.7 Формування таблиці вхідних даних та обчислення S_{eco} для вибірки кар'єрі	134
3.6.8 Висновки за результатами придатності за індексом S_{eco}	137
3.7.1 Розрахунок коефіцієнта експозиційної придатності кар'єрів k_{exp} та k_{exp*}	138
3.7.2 Демонстраційний розрахунок для Стриганецького кар'єру.....	140
3.7.3 Дорожня доступність кар'єрів: розрахунок k_{surf} , k_{dist} і k_{road}	142
3.7.4 Розрахунок індексу придатності S_{log}	144
3.8 Інтегральна оцінка придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення СЕС (Gate + WLC): базовий екологічно-орієнтований сценарій ваг і підсумкове ранжування.....	146
3.8.1 Принцип узгодження шкал.....	146
3.8.2 Базовий сценарій ваг як екологічно-орієнтований підхід.....	147
3.8.3 Приклад розрахунку S_{score} для Стриганецького кар'єру	149
3.8.4 Інтерпретація результатів і значення отриманого ранжування	152
3.9 Підсумковий висновок підрозділу.....	153
РОЗДІЛ 4. ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА СОНЯЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПЛОТНИХ КАР'ЄРІВ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ	156

4.1. Аналіз фактичного (поточного) стану рельєфу та інсоляційного режиму на прикладі Стриганецького кар'єру.....	157
4.2. Моделювання просторових умов та сонячного потенціалу на етап завершення виробітку	160
4.3 Обґрунтування оптимальних просторових параметрів (кута нахилу та азимута) для розміщення фотоелектричних модулів	165
4.3.1 Оптимізація кута нахилу	165
4.3.3 Практичні рекомендації для проектування СЕС у Стриганецькому кар'єрі	169
4.4 Просторовий аналіз та оцінка сонячного потенціалу кар'єру «Водники» для розміщення фотоелектричних модулів	170
4.4.1 Аналіз фактичного (поточного) стану рельєфу та інсоляційного режиму	170
4.4.2 Аналіз проєктного стану (на кінець виробітку) та оптимізація інсоляційного ресурсу.....	172
4.4.3 Висновки щодо кар'єру «Водники»	176
4.5. Просторовий аналіз та оцінка сонячного потенціалу кар'єру Олешів для розміщення фотоелектричних модулів	177
4.5.1. Аналіз фактичного (поточного) стану рельєфу та інсоляційного режиму	178
4.5.2. Аналіз проєктного стану (на кінець виробітку) та ефект «глибокої виїмки»	180
4.6. Верифікація результатів мікромасштабного моделювання з макрорегіональними даними Global Solar Atlas.....	185
4.7 Підсумкові висновки до розділу 4	188
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ З РЕВІТАЛІЗАЦІЇ КАР'ЄРІВ ОБ'ЄКТАМИ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	190
5.1 Інженерно-екологічне обґрунтування ревіталізації Стриганецького кар'єру	190

5.1.1 Пояснення прийнятих відстаней між рядами.....	191
5.1.2 Розрахункове порівняння за схемою апробації: похила тераса проти горизонталі.....	192
5.1.3 Висновок апробації для Стриганецького кар'єру	193
5.2 Інженерне обґрунтування та просторова оптимізація розміщення фотоелектричної станції (на прикладі кар'єру «Водники»)	194
5.2.1 Прогнозування максимального енергетичного виробітку з урахуванням просторових і азимутальних відхилень	199
5.3 Інженерно-екологічне обґрунтування ревіталізації глибокого кар'єру чашоподібної форми (на прикладі кар'єру «Олешів»).....	201
5.4 Висновок до розділу 5.....	204
ВИСНОВКИ.....	206
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	211
ДОДАТКИ	228

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА АНГЛОМОВНИХ ТЕРМІНІВ

використаних у вступі, розділах 1-5 та висновках дисертаційної роботи

До переліку включено скорочення, індекси, символи та англomовні терміни, які неодноразово використовуються в основному тексті дисертації або є методично значущими для викладу моделі ГІС-скринінгу, інтегрального ранжування, просторового аналізу та інженерної апробації. Написання уніфіковано для подальшого включення до окремого структурного елемента дисертації.

1. Українські умовні скорочення

Скорочення	Розшифрування	Пояснення / контекст
ВДЕ	відновлювані джерела енергії	Узагальнена назва для сонячної та інших форм відновлюваної енергетики.
ГІС	геоінформаційні системи	Використовується для позначення просторово-аналітичного інструментарію.
ДЗК	Державний земельний кадастр	Картографічне та довідкове джерело для верифікації меж.
КМУ	Кабінет Міністрів України	Застосовується у посиланнях на нормативні акти.
ЛЕП	лінія електропередачі	У роботі переважно йдеться про ЛЕП 35 кВ.
ОВД	оцінка впливу на довкілля	Використовується в контексті екологічних обмежень і процедур.
ПЗС	прибережна захисна смуга	Критерій gate-обмеження для водних об'єктів.
ПЗФ	природно-заповідний фонд	Критерій gate-обмеження для охоронюваних територій.
ПС	підстанція	У мережевому індексі - підстанція 6-10 кВ.
СЕС	сонячна електростанція	Основний об'єкт просторового планування та ранжування.
ФЕМ	фотоелектричний модуль	Застосовується у просторово-інженерній апробації.
ФЕС	фотоелектрична станція	Використовується як синонімічне позначення СЕС у низці фрагментів.
ЦМР	цифрова модель рельєфу	Відповідає DEM; застосовується при локальному ГІС-аналізі.
ЧКУ	Червона книга України	Джерело для оцінювання чутливості видів у складі Seco.

2. Латинські скорочення, індекси та основні позначення

Позначення	Англійська форма / термін	Українське тлумачення
AHP	Analytic Hierarchy Process	Метод аналізу ієрархій для визначення ваг критеріїв.
ArcGIS	ArcGIS	Програмне середовище для просторового аналізу, моделювання рельєфу та сонячної радіації.
CAPEX	capital expenditures	Капітальні витрати; у роботі використано також проксі-оцінювання.
DEM	Digital Elevation Model	Цифрова модель висот; український відповідник - ЦМР.
DIF	Diffuse Horizontal Irradiation	Дифузна горизонтальна сонячна радіація.
DNI	Direct Normal Irradiation	Пряма нормальна сонячна радіація.
ELE	elevation	Абсолютна висота над рівнем моря.
GBIF	Global Biodiversity Information Facility	Глобальна база спостережень біорізноманіття.
GCR	Ground Cover Ratio	Коефіцієнт покриття території модулями.
GHI	Global Horizontal Irradiation	Глобальна горизонтальна сонячна радіація; базовий показник для SSol.
GHI _{max}	maximum GHI in sample	Максимальне значення GHI у вибірці для нормалізації SSol.
GIS	Geographic Information System	Геоінформаційна система.
GIS-MCDA	GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis	Інтеграція ГІС та багатокритеріального аналізу рішень.
GSA	Global Solar Atlas	Платформа макрорегіональної оцінки сонячного потенціалу.
ID	identifier	Ідентифікатор об'єкта в розрахункових таблицях.
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis	Багатокритеріальний аналіз рішень.
MCDM	Multi-Criteria Decision Making	Прийняття рішень за багатьма критеріями.
OPTA	optimal tilt angle	Оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів.
OSM	OpenStreetMap	Відкрита картографічна база даних.
PV	photovoltaic	Фотоелектричний / фотогальванічний.
PVOUT	photovoltaic power output	Питомий виробіток фотоелектричної системи.
SEP	Spatial Energy Planning	Просторове енергетичне планування.
TEMP	temperature	Середньорічна температура повітря.
WLC	Weighted Linear Combination	Зважена лінійна комбінація критеріїв.

Gate	gate factor / gate filter	Некомпенсаційний множник допустимості (0/1).
S_{core}	integral score	Підсумковий інтегральний бал придатності в шкалі 0-100.
S_{sol}	solar suitability index	Індекс сонячної придатності кар'єру.
S_{geo}	geotechnical suitability index	Індекс геотехнічної придатності.
S_{grid}	grid accessibility index	Мережевий індекс доступності підключення.
S_{eco}	ecological sensitivity index	Соціально-екологічний індекс чутливості.
S_{log} / S_{capex}	logistics / CAPEX proxy index	Індекс логістичної придатності та проксі капітальних витрат.
S_{PS}	substation subindex	Підіндекс близькості / наявності підстанції.
S_{35}	35 kV line subindex	Підіндекс близькості до ЛЕП 35 кВ.
w_{PS}, w_{35}	weights	Ваги компонентів SPS та S35 у складі Sgrid.
k_{water}	water constraint pass coefficient	Коефіцієнт проходження водного gate-обмеження.
k_{pzf}	protected-area pass coefficient	Коефіцієнт проходження обмеження за ПЗФ.
d_{min}	minimum distance	Мінімальна відстань від контуру кар'єру до урізу води.
D_{PS}	distance to substation	Відстань до найближчої підстанції.
D_{35}	distance to 35 kV line	Відстань до найближчої ЛЕП 35 кВ.
k_{exp} / k_{exp*}	exposure coefficient	Коефіцієнт експозиційної придатності; зірочка означає поправку на витягнутість.
k_{road}	road accessibility coefficient	Коефіцієнт дорожньої доступності.
k_{surf}	surface coefficient	Коефіцієнт якості дорожнього покриття.
k_{dist}	distance coefficient	Коефіцієнт віддаленості від асфальтованої дороги.
α	terrace slope angle	Кут ухилу тераси до горизонту.
β	module tilt angle	Кут нахилу модулів до горизонту.
P	pitch	Крок між рядами модулів.
g	clear gap	Чистий проміжок між рядами модулів.
D	horizontal projection	Горизонтальна проєкція довжини ряду / «слід» панелі по землі.
L	row length	Довжина столу (ряду) фотоелектричних модулів.
h_{low} / h_{up}	lower / upper edge height	Висота нижньої та верхньої кромки ряду модулів.

3. Англомовні терміни та словосполучення, використані в тексті

Англомовний термін	Рекомендований український відповідник	Пояснення / примітка
already disturbed lands	вже порушені землі	Вживається для позначення техногенно трансформованих територій як просторового резерву.
Area Solar Radiation	площа / площинне моделювання радіації / площинне сонячної	Назва інструмента ArcGIS для розрахунку інсоляції.
Aspect	експозиція схилу	Назва похідної морфометричної характеристики / інструмента.
brownfield	браунфілд; територія повторного індустріального використання	Використовується для зіставлення з кар'єрними та постмайнінговими територіями.
clear gap	чистий проміжок між рядами	Відстань від верхньої кромки одного ряду до нижньої кромки наступного.
final state	проектний / кінцевий стан	Стан кар'єру на етап завершення виробітку.
fixed-tilt	стаціонарна система з фіксованим кутом нахилу	Тип опорної конструкції без трекінгу.
gate + scoring	відсікання + ранжування	Двоетапна архітектура оцінювання у дисертації.
ground cover ratio	коефіцієнт покриття території	Показник щільності розміщення модулів.
ground investigation	інженерно-геологічні вишукування	Детальний етап після попереднього скринінгу.
greenfield	гринфілд; незабудована / новоосвоювана територія	Використовується для протиставлення постмайнінговим майданчикам.
hard filtering	жорстке відсікання	Некомпенсаційне виключення варіантів.
intact rock	непорушена порода	Термін геомеханіки для матеріалу породи без урахування тріщинуватості масиву.
inter-row spacing	міжрядна відстань	Використовується в інженерній апробації розміщення ФЕМ.
pitch	крок між рядами	Ключовий геометричний параметр схеми компонування ФЕМ.
post-mining	постмайнінговий; післявидобувний	Характеристика кар'єрних та інших порушених виробничих територій.

rock mass	скельний масив	Термін геомеханіки для масиву порід з урахуванням тріщин, зволоження та стану.
screening	скринінг; попередній відбір	Первинний етап оцінювання придатності об'єктів.
site selection	вибір майданчика	Базове поняття літератури з просторового планування СЕС.
slaking	розмокання / дезінтеграція породи при зволоженні-висиханні	Термін, використаний у геотехнічному блоці.
Slope	ухил	Назва похідної морфометричної характеристики / інструмента.
solar site selection	вибір майданчика для СЕС	Спеціалізований різновид задачі просторового планування.
Spatial Energy Planning	просторове енергетичне планування	Концептуальна рамка, у межах якої розглядається розвиток ВДЕ.
utility-scale PV	великомасштабна фотоелектрична станція	Термін для промислових наземних СЕС.
Weighted Overlay	зважене накладання	Поширена GIS-процедура поєднання просторових шарів.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. «Просторово-екологічне обґрунтування використання відпрацьованих кар'єрів для розвитку сонячної енергетики (на прикладі Івано-Франківської області)» зумовлене необхідністю одночасного розв'язання кількох взаємопов'язаних науково-прикладних завдань, що мають особливу актуальність в умовах сучасного енергетичного, екологічного та просторового розвитку України. З одного боку, посилення глобальних і національних процесів декарбонізації, зростання потреби в енергетичній безпеці, що загострилася внаслідок збройної агресії Російської Федерації, зменшенні залежності від викопних енергоресурсів і розвитку відновлюваної енергетики об'єктивно підвищують роль сонячної енергії як одного з найбільш перспективних напрямів трансформації енергетичного сектору. З іншого боку, практичне впровадження об'єктів сонячної енергетики дедалі частіше супроводжується загостренням просторових, екологічних і соціальних суперечностей, пов'язаних із вилученням земель, зміною характеру землекористування, впливом на природні комплекси, ландшафтну структуру території та інші компоненти довкілля.

Особливої складності ця проблема набуває в межах Карпатського регіону, який характеризується високою природною цінністю, складною геоморфологічною будовою, значною часткою лісових і природоохоронних територій, водоохоронною значущістю, чутливістю природних екосистем до техногенного навантаження та просторовою обмеженістю земель, придатних для нового освоєння. За таких умов розміщення сонячних електростанцій не може ґрунтуватися виключно на техніко-економічних міркуваннях або формальному пошуку вільних площ. Воно потребує екологічно виваженого підходу, який забезпечує мінімізацію конфліктів землекористування, врахування природоохоронних та інженерно-геологічних обмежень, а також орієнтацію на пріоритетне використання вже порушених або трансформованих територій.

У цьому контексті особливого значення набувають відпрацьовані кар'єри як специфічний різновид техногенно порушених земель, що можуть розглядатися як потенційний просторовий резерв для розміщення сонячних електростанцій. Використання таких територій дозволяє зменшити навантаження на продуктивні сільськогосподарські угіддя, уникнути прямого залучення природних або малопорушених ландшафтів, а також поєднати розвиток відновлюваної енергетики з ревіталізацією постіндустріальних просторів. Водночас відпрацьовані кар'єри не є типовими ділянками для наземного розміщення СЕС, оскільки характеризуються складною морфологією рельєфу, наявністю уступів і терас, неоднорідністю геотехнічних умов, специфікою інфраструктурної доступності та підвищеною локальною варіабельністю інсоляційних характеристик. Це зумовлює необхідність розроблення спеціалізованого методичного підходу до їх оцінювання, скринінгу та просторового ранжування.

Аналіз наукових джерел засвідчує, що у сучасній літературі досить широко представлені підходи до вибору територій для розміщення сонячних електростанцій на основі геоінформаційних систем і багатокритеріального аналізу. Проте більшість із них орієнтована на стандартні території та не враховує повною мірою особливості техногенно порушених земель, зокрема кар'єрних ландшафтів. Недостатньо розробленими залишаються питання поєднання жорстких екологічних обмежень із системою технічних, геотехнічних, мережевих, логістичних і соціально-просторових критеріїв придатності. Окремою науковою проблемою є відсутність цілісної моделі, яка б дозволяла не лише відсівати екологічно неприйнятні території, а й виконувати інтегральне ранжування кар'єрів як потенційних майданчиків для розміщення сонячних електростанцій з урахуванням їх інженерно-просторової специфіки.

У цьому контексті попередній просторовий скринінг і ранжування потенційних майданчиків є складовою ширшої логіки сталого впровадження відновлюваної енергетики, яка передбачає послідовний перехід від планування

та стратегічного відбору територій до практичної реалізації проєктів [141].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі екології факультету природничих наук Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу у 2022-2026 рр. відповідно до наукової теми «Просторово-екологічне обґрунтування використання відпрацьованих кар'єрів для розвитку сонячної енергетики (на прикладі Івано-Франківської області)».

Мета і завдання дослідження. *Метою* дисертаційної роботи є розроблення, теоретичне обґрунтування та практична апробація системи оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій із використанням ГІС-інструментів, скринінгу, багатокритеріального аналізу та інтегрального ранжування.

Для досягнення поставленої мети у роботі було визначено такі *завдання*:

- проаналізувати сучасний стан наукових досліджень у сфері використання сонячної енергії, просторового планування сонячних електростанцій та ревіталізації техногенно порушених територій;
- виявити екологічні, просторові та інженерні передумови й обмеження використання сонячної енергії у Івано-Франківській області на прикладі відпрацьованих кар'єрів;
- обґрунтувати доцільність використання відпрацьованих кар'єрів як потенційних територій для розміщення сонячних електростанцій;
- розробити структуру ГІС-орієнтованої моделі скринінгу та інтегрального оцінювання придатності кар'єрів на основі поєднання некомпенсаційного фільтра критичних обмежень і багатокритеріальної зваженої оцінки;
- сформулювати систему часткових індексів, що відображають сонячний потенціал, геотехнічну придатність, мережеву доступність, екологічну чутливість та логістично-інфраструктурні умови реалізації проєкту;
- виконати практичну апробацію розробленої методики на вибірці відпрацьованих кар'єрів Івано-Франківської області;

- провести детальний просторовий аналіз пілотних кар'єрів із використанням геоінформаційних інструментів моделювання рельєфу та сонячної радіації;
- обґрунтувати інженерні рішення щодо параметрів можливого розміщення фотоелектричних модулів у межах кар'єрних територій;
- оцінити наукове та практичне значення запропонованого підходу для екологічно безпечного розвитку сонячної енергетики у Івано-Франківській області.

Об'єктом дослідження є процес екологічно безпечного використання сонячної енергії у відпрацьованих кар'єрах.

Предметом дослідження є просторово-аналітичні та інженерні засади ГІС-скринінгу, інтегрального ранжування й просторового обґрунтування придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій.

Методи дослідження: Для досягнення поставленої мети використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів дослідження. Системний і порівняльний аналіз застосовано для узагальнення наукових підходів до використання сонячної енергії, екологічної безпеки, ревіталізації порушених територій та GIS-MCDA-моделювання. Методи геоінформаційного аналізу використано для оброблення просторових даних, формування картографічних шарів, оцінювання територіальних обмежень та аналізу морфологічних особливостей кар'єрів. Методи багатокритеріального аналізу прийняття рішень використано для побудови інтегральної моделі оцінювання придатності кар'єрів. Некомпенсаційний фільтр застосовано для виключення територій, що потрапляють у критичні просторово-екологічні обмеження, а зважену лінійну комбінацію - для інтегрального ранжування допустимих об'єктів. Морфометричні методи аналізу цифрових моделей рельєфу використано для розрахунку параметрів ухилу, експозиції та сонячної радіації в середовищі ArcGIS. Розрахунково-аналітичні та інженерно-геометричні методи застосовано для обґрунтування параметрів розміщення

фотоелектричних модулів на пілотних ділянках. Також використано методи узагальнення, класифікації, нормалізації показників і порівняльного ранжування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в дисертаційній роботі:

- вперше розроблено та науково обґрунтовано GIS-орієнтовану модель екологічного багатокритеріального скринінгу та інтегрального оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, яка базується на поєднанні некомпенсаційного фільтра критичних обмежень (Gate-фільтр) та зваженої лінійної агрегації (WLC) часткових індексів;

- удосконалено систему оцінювання сонячного потенціалу техногенно порушених ландшафтів шляхом впровадження спеціалізованих індексів геотехнічної придатності та мережевої доступності, які інтегруються в єдиний показник ранжування територій для розміщення сонячних електростанцій, що дозволяє враховувати специфіку літологічної будови та існуючої енергетичної інфраструктури кар'єрів;

- Дістала подальший розвиток методика GIS-MCDA для скринінгу відпрацьованих кар'єрів під розміщення СЕС шляхом адаптації блоку еколого-соціальної чутливості до специфіки післявидобувних територій, та включення GBIF-опосередкованого індикатора чутливості фауни до структури індексу S_{eco} . з диференційованою шкалою оцінювання.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена методика може бути використана як інструмент попереднього скринінгу та ранжування відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій у межах Івано-Франківської області та інших територій зі схожими природно-просторовими умовами. Її застосування дозволяє зменшити ризик екологічно необґрунтованого вибору майданчиків, скоротити обсяг детальних передпроектних обстежень на початковому етапі, підвищити обґрунтованість прийняття рішень щодо пріоритетності освоєння конкретних

кар'єрів і забезпечити формалізовану основу для подальшого інженерного опрацювання територій.

Матеріали дисертаційних досліджень впроваджено:

- впровадження у виробничу діяльність ТОВ «ЗПУЄ Україна», де запропоновану методику рекомендовано до використання як комплексний інструмент попереднього скринінгу кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій та формування рекомендацій щодо цільового профілювання уступів, терас і похилих поверхонь під оптимальні параметри встановлення фотоелектричних модулів (Акт впровадження від 25.02.2026 р.);

- впроваджено також в освітній процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при викладанні дисциплін «Оцінка впливів на довкілля» та «Рекультивация порушених земель» (Акт впровадження від 20.02.2026 р.).

Практична цінність роботи полягає також у тому, що запропонований підхід апробовано на реальній вибірці кар'єрів Івано-Франківської області, а результати детального просторового аналізу пілотних об'єктів дозволили перейти від загального скринінгу до формування конкретних інженерно-проектних рішень щодо параметрів розміщення фотоелектричних модулів, профілювання терас і оцінювання потенційного енергетичного ефекту. Одержані результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування, природоохоронними та планувальними структурами, проектними організаціями, надрокористувачами та інвесторами у сфері відновлюваної енергетики.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові положення, методичні розробки, результати аналізу, розрахунки, картографічні матеріали, узагальнення та висновки, що становлять зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать постановка окремих наукових завдань, збір і систематизація вихідних даних, виконання ГІС-аналізу, побудова моделі скринінгу, розрахунок індексів, узагальнення результатів та підготовка текстових і графічних матеріалів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовано на міжнародних і регіональних науково-практичних конференціях, зокрема: Міжнародній науково-практичній конференції «Вплив виробництва, передачі, розподілу та використання електроенергії на навколишнє середовище» (Івано-Франківськ, 2022), Регіональній конференції «Молодіжний екогеофорум - 2025» (Івано-Франківськ, 2025), The 6th International Scientific and Practical Conference “International experience in scientific research” (Chicago, USA, 2026), the 3rd International Scientific and Practical Conference “Innovative Research in Science and Economy” (Brussels, Belgium, 2026), V International Scientific and Practical Conference “Innovation and development in world science” (Zurich, Switzerland, 2026).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, з яких 4 статті у фахових наукових виданнях України та 7 публікацій у матеріалах міжнародних і регіональних науково-практичних конференцій. У фахових публікаціях відображено результати дослідження екологічних обмежень використання сонячної енергії у Івано-Франківській області, можливостей рекультивациі відпрацьованих кар’єрів під розміщення сонячних електростанцій, екологічної ревіталізації кар’єрів засобами сонячної енергетики, а також оцінювання екоенергетичного потенціалу відпрацьованих кар’єрів і ризиків його використання. У матеріалах конференцій висвітлено результати ГІС-аналізу придатності кар’єрів, побудови цифрових моделей рельєфу, просторового моделювання сонячної радіації, оцінювання потенційної потужності сонячних електростанцій та екологічно безпечного використання деградованих територій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел - 146 найменування. Загальний обсяг роботи становить 234 стор., обсяг основного тексту 197 стор., в тому числі 35 рисунків, 20 таблиць (з них 9 - на окремих аркушах), додатки - на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ПРОСТОРОВОГО ПЛАНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНИХ ЗЕМЛЯХ: ПРОБЛЕМИ, ПРОГАЛИНИ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ

1.1 Вступ до проблематики просторового планування відновлюваної енергетики

Глобальний енергетичний перехід і необхідність декарбонізації світової економіки зумовлюють потребу в прискореному розгортанні відновлюваних джерел енергії [86, 91, 92]. У цьому контексті просторове планування енергетичної інфраструктури набуває значення одного з ключових інструментів реалізації кліматичної та енергетичної політики. В Україні стратегічні орієнтири такого переходу закріплено, зокрема, у Національному плані з енергетики та клімату на період до 2030 року, схваленому розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25.06.2024 № 587-р [13].

Подальшу конкретизацію цілей у секторі відновлюваної енергетики визначено Національним планом дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року, затвердженим розпорядженням Кабінету Міністрів України від 13.08.2024 № 761-р. Відповідно до цього документа, індикативна частка енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії у 2030 році має становити 27,1%, а у секторі виробництва електроенергії - 29,4% [12].

Разом із тим розширення наземної сонячної генерації супроводжується посиленням просторових конфліктів землекористування, оскільки великомасштабні фотоелектричні об'єкти можуть змінювати структуру земного покриву, наближатися до природоохоронних територій, впливати на екосистемні послуги та конкурувати із сільськогосподарським використанням земель [124–126]. Великомасштабні фотоелектричні проєкти, особливо за умови їх екстенсивного

розміщення, можуть конкурувати із сільськогосподарським використанням земель, змінювати структуру ландшафтів і створювати нові екологічні компроміси. У сучасній літературі це розглядається як одна з центральних проблем просторового планування сонячної енергетики, оскільки технічно придатна територія не завжди є екологічно, соціально або функціонально доцільною для розміщення СЕС [125, 80].

У зв'язку з цим у наукових дослідженнях дедалі більшу увагу приділяють деградованим, маргінальним, забрудненим і поствидобувним територіям як більш прийнятній альтернативі освоєнню продуктивних сільськогосподарських або природних земель. Такий підхід уможливує поєднання розвитку відновлюваної енергетики з ревіталізацією техногенно трансформованих ландшафтів, повторним використанням вже порушених земель та зменшенням конфлікту між енергетичним переходом і збереженням екосистем [80, 5]. Особливу увагу серед таких територій доцільно приділити відпрацьованим кар'єрам, які, з одного боку, мають потенціал для повторного господарського використання, а з іншого - характеризуються складними інженерно-геологічними, морфометричними, інфраструктурними та еколого-соціальними умовами, що не дає змоги механічно переносити на них типові моделі вибору майданчика, розроблені для ділянок нового освоєння [100, 110].

У європейському науковому дискурсі сценарії досягнення кліматичної нейтральності розглядаються через поєднання енергетичного моделювання, просторових обмежень, технологічної трансформації та поступового заміщення викопних джерел енергії відновлюваними [134].

У зв'язку з цим доцільним є критичний аналіз сучасних GIS-MCDA підходів до просторового відбору майданчиків під сонячні електростанції з позиції їх придатності для техногенно порушених гірничих територій. Для відпрацьованих кар'єрів принципово важливими є не лише сонячний ресурс і загальні просторові обмеження, а й поєднання морфології виробітку, геотехнічної придатності, мережевої доступності, екологічної чутливості та логістичних бар'єрів. Це обумовлює доцільність переходу від універсальних регіональних моделей до

спеціалізованих інструментів ГІС-скринінгу, адаптованих саме до умов поствидобувних ландшафтів [100, 110, 125].

У вітчизняному науковому дискурсі ця проблематика дедалі виразніше пов'язується з категоріями декарбонізації, екологічної безпеки, рекультивації порушених земель і сонячної генерації. Зокрема, у працях В. Петрука та співавторів декарбонізація та екомодернізація економіки розглядаються як ресурсно- та енергоефективний вектор післявоєнного відновлення України, а постмайнінг гірничорудних об'єктів - як напрям екологізації та повторного залучення техногенно трансформованих територій у господарський обіг [114, 115]. Додатково роботи К. Барабан, Л. Архипової, О. Мандрика та співавторів акцентують значення рекультивації, екосистемних послуг і фітомеліоративної ефективності техногенних ландшафтів, що добре узгоджується з логікою ревіталізації відпрацьованих кар'єрів об'єктами відновлюваної енергетики [1, 15]. Для Івано-Франківської області важливим є й локальний контекст сонячної генерації: аналіз впливу метеорологічних умов на ефективність роботи сонячних панелей у регіоні підтверджує доцільність врахування кліматичних параметрів і локальних природних умов у подальшому моделюванні [21].

1.2 Теоретичні засади просторового енергетичного планування (SEP) та еволюція методів GIS-MCDA

1.2.1 Концепція просторового енергетичного планування

У сучасній науковій літературі просторове енергетичне планування (Spatial Energy Planning, SEP) розглядається як міждисциплінарний підхід, що поєднує завдання енергетичної трансформації з інструментами просторового планування територій. На відміну від традиційних моделей енергосистемного аналізу, які зосереджуються переважно на балансі попиту і пропозиції, техніко-економічних параметрах та мережевій оптимізації, SEP виходить із того, що відновлювана енергетика має виражений територіальний вимір, а тому її розвиток неможливо

коректно планувати без урахування просторових, екологічних, соціальних і ландшафтних чинників [113, 121].

Актуальність такого підходу зумовлена тим, що технології ВДЕ, зокрема наземні фотоелектричні системи, потребують значних площ і неминуче взаємодіють з існуючою структурою землекористування. У зв'язку з цим простір перестає бути нейтральною основою для розміщення енергетичної інфраструктури та перетворюється на один із ключових чинників прийняття рішень. Саме тому просторове енергетичне планування орієнтоване не лише на пошук технічно придатних територій, а й на узгодження енергетичних цілей із природоохоронними, соціальними та планувальними обмеженнями конкретного регіону [35, 113].

Концептуально просторове енергетичне планування передбачає інтеграцію просторового аналізу, картографічного моделювання, сценарного підходу та багатокритеріальної оцінки для підтримки рішень на різних ієрархічних рівнях - від локального до національного. Такий підхід дозволяє виявляти потенційні конфлікти землекористування ще на ранніх етапах планування, оцінювати сумісність енергетичних проєктів із просторовою структурою території та формувати обґрунтовані альтернативи розміщення енергетичних об'єктів [113, 121, 129].

Для задач розміщення сонячних електростанцій це означає перехід від спрощеного інженерного підбору ділянок до комплексного територіального аналізу, в якому враховуються не лише ресурс сонячної радіації та близькість до інфраструктури, але й характер рельєфу, тип землекористування, екологічна чутливість, візуально-ландшафтні ефекти, локальна суспільна прийнятність і планувальні режими використання територій [35, 113, 129]. У цьому розумінні просторове енергетичне планування є не окремим методом, а ширшою концептуальною рамкою, в межах якої ГІС, МСДА та інші інструменти використовуються як прикладні засоби обґрунтування просторових рішень [113, 129].

Водночас просторове планування сонячної енергетики має враховувати не лише фізичний ресурс інсоляції, а й реальні закономірності просторового

поширення фотоелектричних проєктів, які залежать від соціально-економічних, інфраструктурних, регіональних і просторово-суміжних чинників [122, 123].

Для тематики цієї дисертації концепція просторового енергетичного планування є принципово важливою, оскільки саме вона дозволяє розглядати відпрацьовані кар'єри не просто як вільні техногенно порушені площі, а як специфічні просторові системи з власною морфологією, інженерно-геологічними обмеженнями, екологічним контекстом та інфраструктурною конфігурацією. Відповідно, їх оцінювання потребує не універсального підходу до розміщення об'єктів відновлюваної енергетики, а спеціалізованої просторово-аналітичної моделі, адаптованої до умов післявидобувних територій [121, 129].

1.2.2 Інтеграція геоінформаційних систем та багатокритеріального аналізу рішень

Одним із найбільш поширених підходів до просторового відбору територій для розміщення об'єктів відновлюваної енергетики є інтеграція геоінформаційних систем (ГІС) із методами багатокритеріального аналізу рішень (MCDA). Така комбінація набула широкого застосування у задачах вибору майданчиків під сонячні електростанції, оскільки дозволяє поєднати картографічне подання різнорідних просторових даних із процедурою формалізованого оцінювання альтернатив за сукупністю технічних, природних, інфраструктурних, екологічних та соціальних критеріїв [37, 124, 135].

Функціональна роль ГІС у цьому поєднанні полягає у збиранні, структуризації, візуалізації та просторовому аналізі вхідних даних. Саме в геоінформаційному середовищі формуються шари критеріїв і обмежень, виконуються операції буферизації, перекласифікації, просторового накладання, аналізу відстаней, морфометричних параметрів рельєфу та інших характеристик, що впливають на придатність території для розміщення СЕС. Водночас MCDA забезпечує логіку інтеграції цих шарів у єдину систему оцінювання, в якій окремі фактори не лише враховуються, а й порівнюються між собою за відносною важливістю [32, 37, 124].

Водночас для сучасних геоінформаційних досліджень дедалі важливішими стають бази даних, дистанційні методи, інформаційні технології та засоби математичного моделювання. У цьому контексті праці Л. Давибіди, В. Триснюка, В. Марущака та співавторів демонструють значення обробки геопросторових даних, візуалізація результатів, використання даних дистанційного зондування Землі, а також залучення платформ на кшталт Google Earth Engine для систематизації екологічної інформації та просторового аналізу [8, 9, 22, 23]. Особливо показовою для тематики сонячної генерації є робота L. Davybidia, I. Wyszalek та A. Plichta, у якій ГІС- і SDSS-інструменти використано для моделювання сонячної радіації, виділення придатних зон і проектування фотоелектричної системи, що підтверджує методичну цінність геоінформаційного підходу для задач просторового вибору майданчиків під СЕС [36].

Сучасні просторові дослідження сонячної енергетики дедалі частіше поєднують геоінформаційні системи, дистанційне зондування та алгоритмічні методи аналізу, зокрема для картографування існуючих фотоелектричних станцій і моделювання чинників вибору їхнього розташування [132, 133].

У більшості досліджень із GIS-MCDA відбору майданчиків під фотоелектричні станції повторюється подібна структура критеріїв. Найчастіше до аналізу включають показники сонячного ресурсу, ухилу поверхні, експозиції, висоти, типу землекористування, відстані до транспортної інфраструктури, електромережі, населених пунктів, водних об'єктів, природоохоронних територій та інших обмежувальних елементів просторової структури [32, 37, 94, 135]. Така повторюваність свідчить про наявність базового методичного ядра GIS-MCDA моделей, однак не означає їх автоматичної придатності для будь-якого типу територій.

З методичного погляду GIS-MCDA підходи привабливі тим, що дають змогу працювати одночасно з кількісними та якісними показниками, поєднувати жорсткі просторові обмеження з системою ранжування та формувати підсумкові карти придатності, зручні для подальшої інтерпретації. Найчастіше для визначення ваг критеріїв використовують метод аналізу ієрархій (АНП), рідше - ANP, TOPSIS,

ELECTRE, PROMETHEE, fuzzy-підходи та їх гібридні комбінації. АНР у поєднанні з ГІС є одним із найуживаніших підходів для задач вибору майданчиків для СЕС завдяки відносній простоті, прозорості й зручності практичного застосування [82, 124, 135].

Таблиця 1. Огляд методів MCDA, що застосовуються у просторовому плануванні ВДЕ (складено автором за [82, 124, 125])

Метод MCDA	Математична основа та філософія	Переваги	Обмеження	Типове застосування у плануванні СЕС
АНР / Fuzzy АНР	Матриці попарних порівнянь, розрахунок власного вектора, оцінка узгодженості (Consistency Ratio). Нечітка логіка додає функції належності.	Прозорість, інтуїтивна зрозумілість для експертів, вбудований контроль логічних протиріч.	Обмеження на кількість критеріїв (феномен когнітивного перевантаження), явище зсуву рангу при додаванні альтернатив.	Визначення ваги критеріїв (напр., кліматичних vs екологічних факторів) перед накладанням у ГІС.
TOPSIS / VIKOR	Розрахунок геометричної відстані до позитивного та негативного ідеальних рішень у багатовимірному просторі.	Висока обчислювальна ефективність, чітке математичне підґрунтя. Схильність до компромісних рішень (VIKOR).	Чутливість до методів нормалізації даних. Припускає повну компенсаційність між критеріями.	Кінцеве ранжування попередньо відібраних дискретних земельних ділянок.
ELECTRE / PROMETHEE	Школа "Outranking" (відношення переваг). Використання порогів згоди та незгоди.	Дозволяє враховувати некомпенсаційність: дуже поганий показник за одним критерієм (напр., екологія) не може бути перекритий іншим (інсоляція).	Висока математична складність, важкість пояснення результатів зацікавленим сторонам.	Сортування територій на класи (придатні/непридатні/резерв) зі строгими лімітами.
WLC (Weighted Linear Combination)	Адитивна агрегація нормованих просторових шарів (растерів) із застосуванням вагових коефіцієнтів.	Пряма інтеграція з інструментами просторового аналізу ГІС (напр., Weighted Overlay в ArcGIS).	Повна компенсаційність. Ризик усереднення результатів, що приховує локальні екологічні чи технічні бар'єри.	Базовий алгоритм агрегації факторів придатності на масштабних територіях (регіон, країна).

Разом із тим аналіз літературних джерел показує, що переважна частина GIS-MCDA моделей орієнтована на регіональний або субрегіональний відбір умовно стандартних наземних ділянок і зазвичай не враховує специфіку складних техногенно трансформованих об'єктів [135]. Для відпрацьованих кар'єрів цього виявляється недостатньо, оскільки тут критичне значення мають не лише загальні критерії інсоляції, характеру землекористування чи наближеності до інфраструктури, а й морфологія виробітку, геотехнічні умови, конфігурація бортів і терас, локальні екологічні обмеження та практична реалізованість підключення і доступу [100, 136]. Отже, GIS-MCDA підхід є необхідною методичною основою для розв'язання поставленої задачі, однак потребує спеціалізованої адаптації до умов післявидобувних територій.

1.2.3 Типові групи критеріїв та обмежень у GIS-MCDA моделях для розміщення сонячних електростанцій

Аналіз сучасних GIS-MCDA досліджень показує, що просторовий відбір ділянок для розміщення сонячних електростанцій зазвичай ґрунтується на поєднанні кількох повторюваних груп критеріїв. Найчастіше до них належать ресурсно-кліматичні, топографічні, інфраструктурні, землекористувальні, екологічні та соціально-просторові фактори. У різних роботах склад окремих показників може змінюватися залежно від масштабу дослідження, регіональних умов і доступності даних, однак загальна логіка побудови моделей залишається подібною: спочатку формують систему жорстких просторових обмежень, після чого придатні території ранжують за сукупністю критеріїв [15, 16, 19, 20].

До першої групи належать ресурсно-кліматичні критерії, які характеризують енергетичний потенціал території. Для сонячної енергетики ключовими показниками зазвичай виступають глобальна горизонтальна іррадіація, тривалість сонячного сьйва, середня температура повітря, інколи також показники хмарності чи сезонної мінливості інсоляції. Саме ці

параметри визначають базову доцільність розміщення СЕС, однак у більшості прикладних GIS-MCDA моделей вони розглядаються не ізольовано, а в поєднанні з іншими просторовими факторами, що обмежують або підсилюють реальну придатність ділянки [32, 137].

Друга велика група охоплює топографічні критерії. Найуживанішими серед них є ухил поверхні, експозиція схилів, абсолютна висота та локальні морфометричні характеристики рельєфу. Їх врахування зумовлене тим, що рельєф безпосередньо впливає як на рівень інсоляції, так і на технічну можливість монтажу фотоелектричних систем, виконання земляних робіт та подальшу експлуатацію об'єкта. У типових регіональних моделях ці показники зазвичай інтерпретуються досить узагальнено, через порогові значення або класи придатності, що є прийнятним для регіонального скринінгу, але може бути недостатнім для територій зі складною морфологією [32, 136].

Третя група включає інфраструктурні критерії, насамперед відстань до автомобільних доріг, підстанцій, ліній електропередачі та інших елементів енергетичної й транспортної мережі. У GIS-MCDA моделях вони зазвичай трактуються як проксі-показники капітальних витрат і практичної реалізованості проєкту: що ближче ділянка розташована до інфраструктури, то нижчими вважаються потенційні витрати на приєднання, під'їзд, будівництво та обслуговування. Саме тому близькість до мережі та доріг майже завжди належить до базового ядра критеріїв у задачах вибору майданчиків для СЕС [32, 94, 137].

Окремий блок утворюють критерії землекористування та просторових обмежень. До нього належать типи земного покриву, категорії земель, віддаленість від населених пунктів, водних об'єктів, лісів, природоохоронних територій, а також інші обмеження, пов'язані з режимом використання земель і вимогами екологічної безпеки. У більшості моделей саме ці фактори формують некомпенсаційний етап відсіву: території, що потрапляють у

заборонені або небажані зони, виключаються з подальшого ранжування ще до етапу зважування критеріїв [26, 94, 137].

Попри методичну усталеність описаних груп критеріїв, для відпрацьованих кар'єрів їх стандартне застосування має обмеження. У типових GIS-MCDA моделях кар'єр або інша порушена ділянка зазвичай інтерпретується як черговий полігон землекористування, тоді як для реальної оцінки її придатності необхідно враховувати складну геометрію виробітку, локальну неоднорідність терас і бортів, геотехнічні умови, специфіку доступу та просторово-екологічний контекст. Отже, традиційна система критеріїв формує методичну основу для скринінгу, але потребує спеціалізованого уточнення при застосуванні до післявидобувних територій [100, 136].

1.3 Використання деградованих, браунфілд-територій і післявидобувних територій для розміщення сонячних електростанцій

У сучасних дослідженнях і прикладних програмах дедалі чіткіше простежується тенденція до розгляду деградованих, маргінальних, забруднених і поствидобувних територій як просторового резерву для розвитку відновлюваної енергетики, зокрема через розміщення сонячних електростанцій на забруднених землях, полігонах, браунфілдах і гірничих майданчиках [134]. Такий підхід формується як відповідь на загострення конфлікту землекористування, що виникає при розміщенні великомасштабних фотоелектричних систем на продуктивних сільськогосподарських, природних або ландшафтно чутливих землях. У цьому контексті повторне використання вже порушених земель розглядається не лише як технічна альтернатива, а й як інструмент поєднання енергетичного переходу з просторовою ревіталізацією порушених територій [25, 80, 110, 128, 136].

Браунфілд-території та післявидобувні території мають низку переваг для розміщення СЕС. По-перше, їх використання зменшує тиск на землі, що мають вищу агровиробничу, природоохоронну або рекреаційну цінність. По-

друге, такі ділянки часто вже мають змінений стан поверхні, порушену структуру ґрунтового покриву або попередню індустриальну функцію, що робить їх більш логічними кандидатами для технічного переосвоєння. По-третє, у частині випадків вони пов'язані з наявною транспортною чи енергетичною інфраструктурою, що потенційно знижує витрати на підготовку майданчика та приєднання до мережі [100, 110, 128].

Одним із підходів до зменшення конкуренції між сонячною енергетикою та сільським господарством є агрофотовольтаїчні системи, що поєднують виробництво електроенергії з рослинництвом. Проте для цієї дисертації основний акцент зроблено не на суміщенні функцій у межах продуктивних угідь, а на використанні вже порушених післявидобувних територій як альтернативного просторового резерву [138, 144].

Значущість післявидобувних територій як об'єкта просторового аналізу підтверджується глобальними дослідженнями гірничого землекористування, які демонструють значні площі земель, трансформованих видобувною діяльністю, а також недостатню документованість екологічних і просторових наслідків для багатьох гірничих районів світу [98, 99].

Особливий інтерес у цьому контексті становлять відпрацьовані кар'єри та інші післявидобувні території. На відміну від узагальненого поняття браунфілд-територій, післявидобувні території мають виразну морфологічну та інженерну специфіку: складний рельєф, борти, уступи, тераси, штучно трансформовані поверхні, локальну неоднорідність умов основи, а також можливі екологічні ризики, пов'язані з попереднім видобуванням. Практична релевантність такого напряму підтверджується світовими прикладами використання фотоелектричних систем у гірничій промисловості, зокрема на діючих і занедбаних гірничих об'єктах [34]. Саме тому їх не можна розглядати лише як "вільні ділянки" для розміщення фотоелектричних систем; вони потребують спеціалізованого просторового та інженерного аналізу [100, 136].

Останні дослідження підтверджують, що потенціал такого переосвоєння є значним не лише на локальному, а й на глобальному рівні. Зокрема, у

дослідженні, опублікованому в Nature Sustainability, показано, що відкриті гірничі виробки можуть розглядатися як масштабний просторовий резерв для розвитку фотоелектричних систем із суттєвим потенціалом генерації електроенергії та одночасним зменшенням конфліктів землекористування. Автори наголошують, що повторне використання відкритих кар'єрів здатне поєднувати декарбонізаційний ефект із завданнями післявидобувної трансформації територій [136]. Подібну логіку підтримують і прикладні оглядові праці, у яких колишні гірничі території розглядаються як перспективний напрям для розміщення фотоелектричних систем, але з акцентом на необхідності врахування геотехнічних умов, типу фундаментів, рельєфних обмежень та експлуатаційних ризиків [100].

Водночас наявність загального потенціалу не означає автоматичної придатності будь-якого кар'єру для розміщення СЕС. Для таких територій критичними залишаються питання стабільності основи, конфігурації уступів і терас, транспортної доступності, можливості приєднання до електромереж, дотримання режимних екологічних обмежень та економічної доцільності адаптації кар'єрного простору до потреб фотоелектричної інфраструктури [100, 136]. Отже, відпрацьовані кар'єри слід розглядати не як безумовно придатні майданчики, а як перспективну, але методично складну категорію територій, для якої потрібні спеціалізовані ГІС-орієнтовані моделі скринінгу й ранжування [100, 136].

Оскільки кар'єри є результатом користування надрами, їх подальше функціональне переосмислення має розглядатися не лише в площині землекористування, а й у контексті правового режиму надр, гірничих відносин, охорони надр і забезпечення екологічної безпеки [3]. У цьому зв'язку розміщення сонячних електростанцій на порушених або післявидобувних територіях доцільно трактувати як один із можливих напрямів повторного функціонального використання земель, що має узгоджуватися з вимогами їх охорони, запобігання подальшій деградації та відновлення екологічних функцій техногенно трансформованих ландшафтів [6].

Для українського наукового поля важливо, що проблематика порушених земель розглядається не лише у площині обмежень, а й у площині перспективних функцій подальшого використання. Зокрема, оцінка перспективних екосистемних послуг планованої рекультивації териконів Львівсько-Волинського вугільного басейну показує, що рекультивація техногенних ландшафтів має розглядатися як багатофункціональний процес, у межах якого поєднуються природоохоронні, соціальні та господарські ефекти [1]. У поєднанні з дослідженнями щодо постмайнінгу та декарбонізації мінерально-сировинних територій це підсилює тезу про те, що використання відпрацьованих кар'єрів під СЕС слід трактувати як форму екологічно орієнтованої трансформації порушених земель, а не лише як технічне розміщення енергетичного об'єкта [19, 118].

1.4 Прогалини та обмеження сучасних підходів до оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій

Наявні GIS-MCDA підходи до відбору майданчиків під сонячні електростанції створюють важливу методичну основу для просторового планування, однак переважно орієнтовані на регіональний або субрегіональний скринінг умовно стандартних наземних ділянок. У більшості таких моделей основна увага приділяється поєднанню ресурсно-кліматичних, топографічних, інфраструктурних та екологічних критеріїв у межах узагальнених карт придатності, що є ефективним для регіонального відбору територій, але не завжди достатнім для складних техногенно трансформованих об'єктів [32, 37, 135, 137].

Для відпрацьованих кар'єрів така методична рамка виявляється лише частково придатною. На відміну від типових грінфілд-територій, кар'єри характеризуються складною морфологією виробітку, локально неоднорідними ухилами, наявністю уступів, терас, бортів, зміненими умовами основи, а також

потенційними геотехнічними й експлуатаційними обмеженнями. Унаслідок цього навіть формально придатна за загальними GIS-MCDA критеріями територія може виявитися технічно проблемною або економічно нераціональною для реального розміщення фотоелектричної інфраструктури [100, 136, 137].

Ще одним обмеженням є те, що значна частина наявних моделей розглядає порушені території переважно як один із типів землекористування або як полігони, що підлягають просторовому виключенню чи включенню до аналізу. Такий підхід є прийнятним для огрубленого регіонального картографування, проте він не дозволяє виявити внутрішню неоднорідність кар'єрного простору та не відображає різницю між окремими елементами виробітку з точки зору реальної придатності до розміщення СЕС [32, 110, 135, 136].

У зв'язку з цим подальший аналіз доцільно зосередити на тих групах прогалін, які є принциповими саме для післявидобувних територій. До них належать недостатнє врахування геотехнічної придатності, спрощене представлення мережевої доступності, обмежене включення еколого-просторових чинників у ранжування, а також слабка інтеграція логістичних і CAPEX-проксі параметрів у початковий етап скринінгу [100, 136].

1.4.1 Недостатнє врахування геотехнічної придатності у GIS-MCDA моделях

Однією з найсуттєвіших прогалін сучасних GIS-MCDA підходів до відбору майданчиків під СЕС є обмежене врахування геотехнічної придатності території. У переважній частині робіт рельєфний блок зводиться до параметрів ухилу, експозиції та висоти, тоді як властивості основи, стабільність схилів, характер поверхні, стан порушених масивів і придатність території до розміщення фундаментів залишаються поза межами скринінгової моделі або враховуються лише опосередковано [32, 135, 137].

Для стандартних наземних ділянок таке спрощення часто є методично допустимим, оскільки на ранньому етапі відбору головною метою є швидке відсікання явно непридатних територій. Однак для відпрацьованих кар'єрів цього недостатньо, оскільки тут критичне значення мають локальні геомеханічні та інженерно-геологічні умови: стійкість бортів, характер деформованих поверхонь, наявність насипних або порушених товщ, а також придатність окремих елементів виробітку до монтажу конструкцій фотоелектричних систем [100, 136].

Сучасні дослідження, присвячені розміщенню фотоелектричних систем на колишніх гірничих територіях, прямо вказують, що технічні виклики тут пов'язані не лише з інсоляційними параметрами чи просторовим розташуванням ділянки, а і з вибором фундаментних рішень, несучою здатністю основи, роботою трекерних систем, нерівномірністю поверхні та довгостроковою стабільністю монтажного середовища [100, 136]. Відповідно, звичайне використання показника ухилу як універсального сурогату технічної придатності в умовах кар'єрів є недостатнім і може призводити до завищення фактичної придатності окремих об'єктів [100].

У літературі з геоінформаційного вибору майданчиків для сонячних електростанцій ця проблема проявляється опосередковано: навіть у якісно виконаних моделях складний рельєф зазвичай репрезентується через спрощені класи нахилу, тоді як внутрішня морфологічна структура території не деталізується на рівні, необхідному для аналізу післявидобувних територій [32, 135, 137]. Саме тому для задачі оцінювання відпрацьованих кар'єрів виникає потреба у спеціалізованому геотехнічному індикаторі скринінгового рівня, який не підміняє повноцінне інженерно-геологічне проектування, але дозволяє попередньо диференціювати кар'єри за умовною придатністю до подальшого технічного освоєння під СЕС [100].

Отже, виявлена прогалина полягає не у відсутності топографічного аналізу як такого, а в недостатньому переході від загального рельєфного опису до скринінгової оцінки геотехнічної придатності. Саме ця обставина

обґрунтовує доцільність виокремлення в подальшій методиці окремого індикатора, орієнтованого на специфіку кар'єрного середовища.

Додатковим аргументом на користь такого підходу є результати суміжних українських досліджень, у яких математичне моделювання застосовується для аналізу техногенно зумовлених екологічних процесів у гірничих і нафтогазових системах. Зокрема, у роботі А. Pukish, О. Mandryk, L. Arkhyrova та співавторів побудовано модель поширення забруднення підземних водоносних горизонтів унаслідок видобування корисних копалин, що підтверджує методичну доцільність формалізованих моделей для оцінювання ризиків у техногенно трансформованому середовищі [118]. У цьому сенсі введення окремого індикатора геотехнічної придатності для кар'єрів є логічним продовженням ширшої тенденції до кількісного опису складних процесів у межах екологічної безпеки та аналізу післявидобувних територій.

1.4.2. Обмежена інтеграція еколого-просторових чинників у спеціалізовані моделі оцінювання кар'єрів

Ще однією суттєвою прогалиною сучасних GIS-MCDA підходів до відбору майданчиків під сонячні електростанції є спрощене представлення еколого-просторових чинників. У більшості моделей такі фактори враховуються переважно як система обмежень - через буферні зони від населених пунктів, водних об'єктів, природоохоронних територій, лісів або інших чутливих елементів простору. Такий підхід є методично виправданим на етапі регіонального скринінгу, оскільки дозволяє швидко відсікти явно непридатні території, однак він не завжди забезпечує достатню глибину оцінювання для техногенно трансформованих об'єктів, зокрема відпрацьованих кар'єрів [32, 94, 137].

У типових GIS-MCDA дослідженнях екологічний блок зазвичай поєднує показники природоохоронного режиму, віддаленості від житлової забудови,

водних об'єктів, земель із підвищеною екологічною цінністю та інших територій, де розміщення СЕС є небажаним або обмеженим. Проте в більшості випадків ці параметри функціонують як зовнішні просторові фільтри і значно рідше інтегруються в окремий спеціалізований блок ранжування, який би дозволяв диференціювати рівень екологічної та соціально-просторової чутливості вже серед формально допустимих ділянок [32, 94, 26].

Для відпрацьованих кар'єрів така обмеженість має принципове значення. На відміну від стандартних грінфілд-територій, техногенно порушені гірничі території часто перебувають у складному просторовому контексті: вони можуть бути наближені до фрагментованих природних оселищ, локальних водозбірних елементів, рекультивованих земель, периферій житлової забудови або територій із підвищеною візуально-ландшафтною чутливістю. У таких умовах просте виключення зон за буферним принципом не дозволяє достатньо точно оцінити відмінності між окремими кар'єрами за ступенем екологічної та соціально-просторової конфліктності [35, 137].

Крім того, сучасні оглядові праці щодо використання колишніх гірничих територій для розміщення фотоелектричних систем підкреслюють, що практична реалізація таких проєктів залежить не лише від технічної придатності території, а і від екологічних умов ділянки, характеру попереднього порушення, вимог до рекультивації, режиму землекористування та суспільної прийнятності майбутнього повторного використання [100, 35, 129]. Це означає, що для післявидобувних територій еколого-просторовий компонент має розглядатися не тільки як набір заборон, а як окремий блок критеріїв, здатний впливати на підсумкове ранжування придатних об'єктів.

Отже, виявлена прогалина полягає в тому, що наявні GIS-MCDA моделі переважно обмежуються використанням екологічних і соціально-просторових факторів у ролі фонового обмежувального шару, тоді як для оцінювання відпрацьованих кар'єрів доцільним є їх включення до спеціалізованого інтегрального блоку ранжування. Саме це створює методичну підставу для

подальшого формування окремого еколого-просторового індикатора в структурі моделі оцінювання придатності кар'єрів під розміщення СЕС [35, 129, 137].

Крім просторових обмежень, для українських досліджень характерне посилення уваги до екологічної безпеки та відновлення функцій порушених ландшафтів. Зокрема, аналіз екосистемних послуг планованої рекультивації териконів і дослідження фітомеліоративної ефективності техногенних ландшафтів показують, що оцінювання післявидобувних територій доцільно будувати не тільки на принципі «допустимо/недопустимо», а й на принципі диференційованої екологічної чутливості та потенціалу відновлення [1, 15, 19]. Це прямо кореспондує з потребою виділення в моделі окремого еколого-просторового блоку, здатного враховувати як ризики, так і відновлювальний потенціал порушених земель.

1.4.3 Спрощене представлення мережевої доступності у GIS-MCDA моделях відбору ділянок під СЕС

Однією з важливих складових придатності території для розміщення сонячних електростанцій є мережева доступність, оскільки саме вона значною мірою визначає технічну реалізованість проєкту та потенційний рівень витрат на підключення. У більшості GIS-MCDA моделей цей блок враховується через один або два просторові критерії, найчастіше у вигляді відстані до найближчої лінії електропередачі або підстанції. Огляд сучасної літератури показує, що близькість до ліній електропередачі належить до числа найуживаніших критеріїв вибору майданчиків для СЕС, однак зазвичай використовується у спрощеній формі як загальний інфраструктурний проксі-показник [32, 94, 135].

Такий підхід є методично виправданим для широкомасштабного регіонального скринінгу, коли головною метою є швидке порівняння великої кількості потенційних ділянок за обмеженим набором доступних просторових

даних. Проте для практичного оцінювання відпрацьованих кар'єрів він має очевидні обмеження. Відстань до мережевого об'єкта сама по собі не відображає ні напруговий рівень потенційного приєднання, ні функціональну роль підстанції, ні реальну складність виведення потужності з конкретної ділянки. Унаслідок цього територія, що формально є близькою до лінії електропередачі, може виявитися значно менш придатною для підключення, ніж інша, де мережевий доступ краще узгоджується з технічною конфігурацією об'єкта [32, 94, 135].

У багатьох прикладних GIS-MCDA роботах мережевий критерій розглядається разом із дорожньою доступністю як частина загального інфраструктурного блоку. Така агрегація є зручною для побудови узагальнених карт придатності, однак послаблює аналітичну чутливість моделі саме до електромережових умов. Для задачі оцінювання кар'єрів це є особливо важливим, оскільки економічна і технічна доцільність переосвоєння техногенно порушених гірничих територій значною мірою залежить від можливості реального приєднання до мережі, а не лише від геометричної близькості до окремих інфраструктурних елементів [94, 26, 135].

Додатково проблема посилюється тим, що для колишніх гірничих територій інфраструктурна спадщина може бути суперечливою. З одного боку, частина таких територій історично пов'язана з промисловими мережами, дорогами та енергетичними вузлами, що потенційно підвищує їх інвестиційну привабливість. З іншого боку, наявність інфраструктури попереднього використання не означає її автоматичної придатності для сучасного підключення фотоелектричних систем. Огляд літератури щодо розміщення фотоелектричних систем на колишніх гірничих територіях підкреслює, що поряд із геотехнічними факторами суттєве значення мають саме практичні інженерні обмеження реалізації проекту, зокрема умови доступу та конфігурація інфраструктурного середовища [100].

Отже, виявлена прогалина полягає в тому, що в більшості GIS-MCDA моделей мережеву доступність подано надто узагальнено, переважно через

один просторовий індикатор близькості до мережі. Для оцінювання відпрацьованих кар'єрів доцільним є більш диференційований підхід, у межах якого мережевий блок розглядається як самостійний компонент скринінгової моделі, здатний враховувати відмінності між типами мережевих об'єктів і рівнем потенційної придатності території до приєднання. Саме це обґрунтовує необхідність подальшого виокремлення спеціалізованого індикатора мережевої придатності в структурі моделі оцінювання кар'єрів під розміщення СЕС [32, 100, 135, 136].

1.4.4 Недостатнє врахування логістичних і CAPEX-проксі чинників у ранньому скринінгу територій

Ще однією методичною прогалиною сучасних GIS-MCDA підходів до відбору майданчиків під сонячні електростанції є обмежене врахування логістичних і витратних чинників на ранньому етапі скринінгу. У більшості моделей інфраструктурний блок зводиться до простих показників близькості до доріг і мережевих об'єктів, тоді як потенційні ускладнення доступу, складність будівельної підготовки території, конфігурація майданчика та очікувані додаткові капітальні витрати здебільшого не виділяються в окремий аналітичний компонент [32, 82, 135,]. Найчастіше дорожня доступність використовується як спрощений просторовий індикатор, який лише опосередковано відображає зручність транспортування обладнання, можливість будівельного освоєння та подальшої експлуатації об'єкта.

Для регіонального відбору стандартних наземних ділянок такий підхід є прийнятним, оскільки дозволяє швидко порівнювати велику кількість альтернатив за обмеженим набором доступних просторових даних. Проте для відпрацьованих кар'єрів цього недостатньо, оскільки тут логістична придатність визначається не лише фактом наявності дороги поблизу, а й характером під'їзду, типом покриття, геометрією в'їзду на тераси, складністю внутрішнього переміщення техніки, неоднорідністю поверхні та потребою в

додаткових підготовчих роботах. Через це формально близька до дороги ділянка може мати значно вищу фактичну вартість освоєння, ніж інша, розташована далі, але доступніша з конструктивного погляду. Такі міркування прямо пов'язують інфраструктурну доступність із витратами на будівельні роботи, витратами на облаштування доріг і загальною капіталомісткістю проєкту [100, 128].

Оглядіві праці, присвячені GIS-MCDM підходам у задачах вибору майданчиків для СЕС, підтверджують, що близькість до доріг належить до числа найуживаніших критеріїв, однак зазвичай не деталізується до рівня, який дозволяв би оцінювати логістичні бар'єри саме для складних техногенно трансформованих територій. У багатьох прикладних роботах відстань до дороги інтерпретується як універсальний індикатор придатності, хоча на практиці вона є лише грубим проксі для ширшого комплексу факторів, пов'язаних із доставкою конструкцій, монтажем, обслуговуванням і підготовкою майданчика. Для післявидобувних територій така редукція є особливо проблемною, оскільки реальна вартість адаптації кар'єрного простору до фотоелектричної інфраструктури часто залежить від локальних інженерних обмежень набагато сильніше, ніж від формальної геометричної близькості до зовнішньої дороги [32, 82, 135].

Дослідження, присвячені колишнім гірничим територіям, додатково підкреслюють, що саме нерівний рельєф, нестабільність основи, потреба у спеціальних фундаментних рішеннях і локальні інфраструктурні прогалини часто формують суттєве збільшення витрат порівняно зі звичайними грінфілд-проєктами. Аналітичні огляди вказують, що проєкти на колишніх гірничих територіях можуть потребувати додаткових витрат унаслідок необхідності рекультиваційних заходів, нестабільності ґрунтової основи, нерівного рельєфу та інфраструктурних прогалин, а технічні огляди таких територій наголошують на необхідності врахування обмежень доступу, конструктивних рішень і умов монтажу вже на етапі попередньої оцінки [100, 128, 136].

Отже, виявлена прогалина полягає в тому, що більшість GIS-MCDA моделей враховує інфраструктурну доступність лише у спрощеному вигляді, без виокремлення логістично-витратного компонента, релевантного для складних порушених територій. Для оцінювання відпрацьованих кар'єрів доцільним є включення до скринінгової моделі спеціалізованого логістично-CAPEX проксі-блоку, який не підміняє детальний кошторис або техніко-економічне обґрунтування, але дозволяє вже на ранньому етапі диференціювати кар'єри за умовною складністю доступу, підготовки та потенційної капіталомісткості освоєння під СЕС [32, 82, 100, 128].

Подібна логіка підтримується і суміжними роботами, де інформаційні технології та математичне моделювання використовуються для опису складних технічних систем і просторових процесів. Хоча частина таких досліджень має ширший інженерний або інформаційний профіль, вони демонструють загальну тенденцію до формалізації складних конфігурацій, сценарного аналізу та інтелектуалізації обробки даних, що є методично близьким до побудови логістично-CAPEX проксі-індикаторів у ГІС-скринінгу [8, 22, 24, 118]. Для техногенно порушених територій це означає доцільність переходу від простого вимірювання відстаней до моделювання складності доступу, підготовки майданчика та очікуваних витрат освоєння.

1.5 Висновки до розділу та обґрунтування потреби у спеціалізованій моделі оцінювання відпрацьованих кар'єрів

Проведений аналіз наукової літератури показав, що сучасні підходи до просторового відбору майданчиків під сонячні електростанції сформували достатньо розвинену методичну основу, в якій поєднуються концепція просторового енергетичного планування, інструменти геоінформаційного аналізу та методи багатокритеріального оцінювання рішень [76, 113, 121]. У межах цих підходів напрацьовано широкий спектр критеріїв, що охоплюють сонячний ресурс, рельєф, тип землекористування, транспортну та мережеву

інфраструктуру, а також екологічні та соціально-просторові обмеження [26, 32, 94]. Це підтверджує, що GIS-MCDA моделі є ефективним інструментом первинного скринінгу територій для розвитку фотоелектричної енергетики.

Разом із тим огляд літератури засвідчив, що більшість наявних моделей орієнтована переважно на відбір умовно стандартних наземних ділянок і не повною мірою враховує специфіку відпрацьованих кар'єрів як окремого типу техногенно трансформованих територій [32, 100, 135, 136, 137]. Основне обмеження полягає в тому, що кар'єр у таких підходах найчастіше розглядається як узагальнений полігон порушеної землі, тоді як його реальна придатність до розміщення СЕС визначається значно складнішим поєднанням морфологічних, геотехнічних, інфраструктурних, екологічних і логістичних умов [100, 136].

За результатами критичного аналізу літератури виявлено кілька ключових прогалин, що є принциповими саме для післявидобувних територій. По-перше, у більшості GIS-MCDA моделей недостатньо представлено геотехнічну придатність: рельєфні характеристики зазвичай зводяться до ухилу, експозиції та висоти, тоді як умови основи, стійкість схилів, характер поверхні й загальна технічна освоюваність території не отримують окремої скринінгової інтерпретації [32, 100, 135, 137]. По-друге, еколого-просторові чинники здебільшого використовуються як система зовнішніх обмежень, але рідше інтегруються в окремий блок ранжування, що дозволяв би диференціювати кар'єри за рівнем екологічної та соціально-просторової чутливості [35, 129, 137]. По-третє, мережеву доступність у більшості робіт подано надто узагальнено, переважно через відстань до найближчої лінії електропередачі або підстанції, без достатньої диференціації реальної придатності до підключення [32, 100, 135, 137]. По-четверте, логістичні та CAPEX-проксі чинники на ранньому етапі скринінгу враховуються обмежено, хоча саме для кар'єрів вони можуть суттєво впливати на складність адаптації території до потреб фотоелектричної інфраструктури [32, 94, 100, 135].

Отже, проведений літературний аналіз дозволяє зробити висновок, що наявні GIS-MCDA підходи створюють необхідну теоретико-методичну базу для просторового скринінгу, проте потребують спеціалізованої адаптації для задачі оцінювання відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій. Така адаптація має передбачати поєднання жорсткого просторового відсіву територій із подальшим багатокритеріальним ранжуванням, у межах якого окремо враховуються сонячний потенціал, геотехнічна придатність, мережева доступність, еколого-просторова чутливість та логістично-витратні умови освоєння [32, 82, 100, 120, 128, 135].

Таким чином, проведений літературний аналіз дозволяє зробити висновок, що подальший розвиток моделей оцінювання кар'єрів має відбуватися в напрямі їх спеціалізації та структурного вдосконалення. Для задачі відбору відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій доцільною є модель, яка поєднує ієрархічне розмежування між жорсткими просторовими обмеженнями та багатокритеріальним ранжуванням, а також включає окремі блоки сонячного потенціалу, геотехнічної придатності, мережевої доступності, еколого-просторової чутливості та логістично-витратних проксі.

Окремо слід відзначити, що введення критерію геотехнічної придатності, пов'язаного з літологічною типізацією кар'єрів, є важливим кроком до подолання однієї з головних прогалин сучасних GIS-MCDA підходів для післявидобувних територій. Навіть якщо в межах конкретної вибірки домінує одна літологічна група і це знижує дискримінаційну здатність показника, сама поява такої класифікаційної рамки створює підґрунтя для подальшого масштабування моделі на інші типи кар'єрів, інші породи та інші регіональні умови.

Узагальнюючи українські публікації суміжного профілю, можна констатувати, що вони формують важливе методичне тло для цієї дисертації за такими напрямками: декарбонізація та сонячна генерація [114, 115], використання геоінформаційних систем, баз даних і дистанційних методів [8,

9, 22, 36], математичне моделювання техногенно зумовлених процесів [118], екологічна безпека та рекультивация порушених земель [1, 15, 19]. Це дозволяє розглядати розроблювану у роботі модель не ізольовано, а як продовження ширшого міждисциплінарного напрямку, в якому поєднуються інформаційні технології, ГІС-аналітика, екологічна безпека та просторове обґрунтування рішень для ревіталізації кар'єрних ландшафтів.

Враховуючи проведений аналіз літературних джерел та окреслену проблематику і висновки можна сформулювати мету дисертаційного дослідження та основні завдання.

Метою дисертаційної роботи є розроблення та практична апробація спеціалізованої ГІС-орієнтованої моделі скринінгу й інтегрального ранжування відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, яка поєднує некомпенсаційний просторовий відсів за критичними обмеженнями з подальшим багатокритеріальним оцінюванням сонячного потенціалу, геотехнічної придатності, мережевої доступності, еколого-просторової чутливості та логістично-витратних умов освоєння, а також її перевірка на вибірці кар'єрів Івано-Франківської області й пілотних просторово-інженерних кейсах.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

- проаналізувати сучасні наукові підходи до просторового планування СЕС і виявити методичні обмеження їх застосування до відпрацьованих кар'єрів;
- обґрунтувати структуру спеціалізованої моделі оцінювання кар'єрів на основі архітектури Gate + WLC;
- розробити систему часткових індексів придатності кар'єрів під СЕС;
- розробити критерій геотехнічної придатності кар'єрів з урахуванням літологічної групи як окремого скринінгового параметра;
- сформулювати систему критичних просторово-нормативних обмежень для первинного відсіву непридатних об'єктів;

- виконати нормалізацію часткових індексів і побудувати інтегральний показник для порівняльного ранжування кар'єрів;
- здійснити практичну апробацію методики на вибірці 11 відпрацьованих кар'єрів Івано-Франківської області;
- провести детальний аналіз пілотних кар'єрів у середовищі ArcGIS на основі цифрової моделі рельєфу, ухилів, експозиції схилів і сонячної радіації;
- обґрунтувати інженерні рішення щодо параметрів розміщення фотоелектричних модулів на пілотних об'єктах;
- визначити практичне значення розробленої методики для передпроектного скринінгу територій під СЕС.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДИСТАНЦІЙНОГО ГІС-СКРИНІНГУ ТА ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПРИДАТНОСТІ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

2.1 Розрахункова модель інтегральної оцінки придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення СЕС на основі архітектури Gate + WLC

Для оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів до розміщення сонячних електростанцій у межах дисертаційного дослідження запропоновано інтегральну ГІС-орієнтовану модель багатокритеріального скринінгу та ранжування. Використання багатокритеріального аналізу у сфері енергетичного планування є обґрунтованим через багатовимірність таких рішень, де одночасно враховуються технічні, економічні, екологічні та соціальні критерії, а підсумкова оцінка формується через процедури зважування та агрегації показників [37, 82, 116, 135]. Така постановка є придатною для задач вибору майданчиків під сонячні електростанції, оскільки дозволяє формалізовано поєднати геопросторові, інженерні, інфраструктурні та соціально-екологічні чинники в одному інтегральному показнику пріоритетності.

Запропонована модель виконує дві взаємопов'язані функції: відсіювання неприйнятних територій і порівняльне ранжування допустимих кар'єрів. У термінах GIS-MCDA це відповідає поділу на жорсткі обмеження та фактори придатності, де обмеження реалізуються у формі бінарного фільтра, а фактори придатності агрегуються за принципом зваженої лінійної комбінації [82, 135].

Структурно модель складається з двох послідовних блоків:

- блок Gate, який реалізує некомпенсаційний фільтр допустимості;

- блок WLC-агрегації, який формує інтегральний бал придатності лише для тих об'єктів, що пройшли попереднє відсіювання.

Компонент Gate інтерпретується як правило абсолютного виключення. Якщо кар'єр порушує хоча б одне критичне обмеження, високі значення інших критеріїв не можуть компенсувати цю невідповідність. Такий підхід є методично доцільним для просторового відбору майданчиків під ВДЕ, коли нормативні, режимні або природоохоронні заборони мають характер некомпенсаційних бар'єрів [37, 82]. У межах даного дослідження до таких критичних обмежень віднесено:

- входження кар'єру до меж територій та об'єктів природно-заповідного фонду;
- потрапляння кар'єру в межі прибережних захисних смуг або інших водоохоронних обмежень, що враховуються на етапі скринінгу.

За наявності хоча б одного такого конфлікту значення Gate набуває значення 0, а підсумковий результат автоматично обнуляється. Отже, Gate виконує функцію нормативно-екологічного фільтра первинного відбору.

Після проходження блоку Gate допустимі кар'єри ранжуються за допомогою WLC, тобто зваженої лінійної комбінації нормалізованих часткових індексів. У ГІС-середовищі така логіка відповідає загальним підходам зваженого накладання та зваженого сумування критеріїв, які застосовуються в задачах *suitability modeling* і *site selection* [50, 53, 59, 60]. На відміну від Gate, WLC є компенсаційним механізмом: відносно нижче значення одного часткового критерію може бути частково врівноважене вищими значеннями інших критеріїв. Саме така властивість робить WLC доцільним інструментом для скринінгового ранжування, коли необхідно сформувати впорядкований перелік об'єктів для подальшого поглибленого аналізу [37, 82, 135].

Інтегральна модель включає п'ять часткових індексів придатності, кожен із яких відображає окремий вимір перспективності кар'єру для розміщення СЕС:

- сонячний потенціал S_{sol_i} - відображає очікувану енергетичну продуктивність;
- геотехнічна придатність S_{geo_i} - узагальнює інженерно-геологічні передумови, що впливають на можливість та вартість розміщення конструкцій;
- мережевий індекс S_{grid_i} - відображає доступність приєднання до мережі;
- екологічні чинники S_{eco_i} - інтегрують чутливість і обмеження природоохоронного та соціально-екологічного характеру;
- логістично-підготовчий індекс S_{log_i} - характеризує відносну економічну досяжність через просторові проксі логістики, доступу та потенційних витрат.

Такий набір критеріїв охоплює ключові аспекти попереднього відбору майданчиків під СЕС: ресурсний потенціал, інженерно-геологічну прийнятність, мережеву доступність, екологічні та соціальні обмеження, а також просторові проксі майбутніх витрат на освоєння території. Для поствидобувних територій саме така багатокомпонентна структура оцінювання є обґрунтованою, оскільки відпрацьовані кар'єри не можуть розглядатися як типові грінфілд-території і потребують спеціалізованої моделі просторового скринінгу [25, 100, 128, 136].

Необхідною умовою математично коректного агрегування є приведення всіх часткових індексів до єдиної шкали $[0; 1]$. У такому разі вагові коефіцієнти відображають саме відносну важливість критеріїв, а не відмінності в одиницях виміру. Для запропонованої моделі приймається, що:

- $S_{sol}, S_{geo}, S_{grid}, S_{eco}, S_{log} \in [0; 1]$;
- $Gate \in \{0; 1\}$;
- $w_{sol} + w_{geo} + w_{grid} + w_{eco} + w_{log} = 1$.

Вагові коефіцієнти часткових індексів розподілено таким чином:

- $w_{sol} = 0,20, w_{geo} = 0,15, w_{grid} = 0,25, w_{eco} = 0,30, w_{log} = 0,10$.

За цих умов ранжувальна частина моделі визначається як зважена сума часткових індексів:

$$S_{core\ i} = 100 \cdot Gate_i \cdot (\sum_{j=1}^n w_j \cdot S_{ji}) \quad (2.1)$$

У результаті набуває значення в діапазоні від 0 до 100 балів. Значення 0 означає непридатність кар'єру на етапі скринінгу внаслідок спрацювання некомпенсаційного фільтра Gate. Значення, близькі до 100, відповідають найвищій відносній придатності кар'єру в межах досліджуваної вибірки.

Таким чином, запропонована модель поєднує дві логіки прийняття рішення: нормативно-обмежувальну логіку допустимості та багатокритеріальну логіку порівняльного ранжування. Саме таке поєднання є методично доцільним для оцінювання відпрацьованих кар'єрів, оскільки дозволяє, з одного боку, автоматично виключити завідомо неприйнятні об'єкти, а з іншого - впорядкувати допустимі кар'єри за ступенем їх перспективності для подальшого проектного опрацювання.

2.2 Методика дистанційного скринінгу: застосування бінарних критеріїв «Так/Ні» для первинного відбору майданчиків

Первинне оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів у межах даного дослідження виконувалося як дистанційний ГІС-скринінг на основі відкритих геоінформаційних сервісів, публічних картографічних ресурсів і нормативно-правових обмежень. Метою цього етапу є швидке виявлення жорстких правових та природоохоронних бар'єрів, які роблять розміщення СЕС на конкретній ділянці неприйнятним або практично нереалізовним у межах дозвільних процедур ще до виконання детальних ГІС-розрахунків, інженерно-геологічної перевірки та техніко-економічного аналізу. Саме така логіка відповідає архітектурі «Gate + WLC», де спочатку виконується

некомпенсаційне відсікання, а далі - ранжування допустимих альтернатив за системою часткових індексів [32, 94, 136].

Процедура скринінгу базується на ідентифікації бінарних обмежувальних чинників, для яких фіксується не ступінь впливу, а сам факт наявності або відсутності просторового конфлікту. Для інтеграції цих обмежень у підсумкову формулу придатності використовується інверсія логічних значень, наявність обмеження відповідає коефіцієнту допустимості 0, а відсутність обмеження - коефіцієнту 1.

Така схема реалізує принцип жорсткого відсікання: виявлення хоча б одного критичного обмеження нівелює підсумкову придатність кар'єру незалежно від високих значень інших критеріїв. Відповідно, дистанційний скринінг у даній роботі виконує функцію первинного нормативно-просторового фільтра.

2.2.1 Джерела онлайн-спостереження та принцип перехресної перевірки.

Оцінювання виконувалося за принципом перехресної перевірки просторової інформації з кількох джерел, що дозволяє зменшити ризик помилки, пов'язаної з неповнотою, різною деталізацією та неоднаковою актуальністю окремих картографічних вебресурсів. Такий підхід загалом узгоджується з сучасною ГІС та SDSS-практикою використання відкритих геоданих у прикладних просторових дослідженнях [32, 35, 94, 113, 121, 129, 136].

Для цілей скринінгу використовувалися:

- OpenStreetMap - для первинної ідентифікації гідромережі, дорожньої інфраструктури та локальних об'єктів [111]. OpenStreetMap є відкритим картографічним ресурсом, дані якого поширюються на умовах ODbL і потребують належної атрибуції. Водночас використання OpenStreetMap у скринінговій моделі потребує обережної інтерпретації, оскільки повнота,

актуальність і деталізація цих відкритих даних можуть істотно відрізнятись між територіями та масштабами аналізу [78, 79];

- Google Earth - як візуальна основа для уточнення фактичних контурів порушених земель, урізу води, просторового контексту та виконання первинних лінійних вимірювань [75]. Офіційний ресурс Google Earth прямо позиціонується як інструмент візуалізації глобуса, перегляду супутникових зображень і роботи з просторовими позначками та лініями;

- публічна кадастрова карта України / електронні сервіси Держгеокадастру - для звірки з кадастровими межами та довідковою інформацією щодо земельних ділянок [10]. На офіційному електронному порталі Держгеокадастру прямо вказано, що окремі електронні послуги надаються безпосередньо з Публічної кадастрової карти;

- відкритий картографічний ресурс (атлас) об'єктів природно-заповідного фонду України - як базовий шар для попередньої перевірки потрапляння кар'єру в межі ПЗФ [20]. Сам ресурс позиціонується як атлас об'єктів ПЗФ України, створений для відображення розташування та характеристик територій і об'єктів природно-заповідного фонду.

З огляду на те, що метрична точність, актуальність і рівень деталізації перелічених джерел є неоднаковими, тому результати цього етапу мають попередній скринінговий характер. Вони є придатними для первинного відбору, але не підміняють офіційне встановлення меж, кадастрову перевірку чи проєктне винесення обмежень у природу [10, 20, 75, 111].

2.2.2 Перевірка водних обмежень: уріз води, нормативна ширина прибережної захисної смуги та gate-коефіцієнт

Скринінг водних обмежень виконувався відносно найближчого поверхневого водного об'єкта - річки, струмка, озера, ставка або водосховища. Для кожного кар'єру визначали найближчий водний об'єкт, після чого фіксували мінімальну відстань від контуру кар'єру до урізу води. Далі це

значення порівнювали з нормативною шириною прибережної захисної смуги, встановленою Водним кодексом України [4], а в частині визначення меж водоохоронних зон і режиму ведення господарської діяльності враховували положення постанови Кабінету Міністрів України № 486 [11].

Для кожного кар'єру на етапі онлайн-скринінгу:

1. Визначається найближчий водний об'єкт (річка, струмок, водойма) за відкритими картографічними сервісами.
2. Фіксується мінімальна відстань від контуру кар'єру до урізу води - d_{min} .
3. Приймається нормативна ширина прибережної захисної смуги [34] - $W_{ПЗС}$.
4. Виконується порівняння d_{min} з $W_{ПЗС}$.

Для gate-логіки використовується коефіцієнт прохідності k_{water} водного обмеження $k_{water} \in \{0; 1\}$:

$$k_{water} = \begin{cases} 0, & d_{min} \leq W_{ПЗС} \\ 1, & d_{min} > W_{ПЗС} \end{cases} \quad (2.2)$$

Якщо $d_{min} \leq W_{ПЗС}$, кар'єр вважається таким, що потрапляє в режимне обмеження, отже отримує коефіцієнт відсікання $k_{water} = 0$. В іншому разі - $k_{water} = 1$.

Методично важливо, що в цьому підрозділі фіксується саме ситуація «в межах / поза межами» режимної смуги. Якщо кар'єр не перетинає ПЗС, але розташований поблизу водного об'єкта, цей фактор не повинен дублюватися в блоці жорсткого відсікання; його доцільно враховувати в індексі S_{eco} як градуйований показник екологічної чутливості. Такий поділ між критеріями виключення і критеріями ранжування є методично узгодженим для GIS-MCDA моделей просторового відбору [32, 94, 136].

2.2.3 Перевірка потрапляння кар'єру в межі природно-заповідного фонду: межі охоронюваної території, факт перетину та gate-коефіцієнт

Другий блок первинного скринінгу стосується перевірки потрапляння кар'єру в межі територій та об'єктів природно-заповідного фонду. Для задачі просторового відбору майданчиків під СЕС уникнення територій високої природоохоронної цінності є базовим принципом мінімізації екологічних конфліктів [35, 80, 129].

Для формалізації цього обмеження вводиться коефіцієнт k_{pzf} прохідності ПЗФ-обмеження:

$$k_{pzf} = \begin{cases} 0, & \text{якщо кар'єр у межах ПЗФ} \\ 1, & \text{якщо поза межами ПЗФ} \end{cases}, \quad (2.3)$$

Отже, $k_{pzf} \in \{0; 1\}$. Якщо кар'єр розташований у межах ПЗФ або перетинає його межі, приймається $k_{pzf} = 0$, а об'єкт автоматично виключається з подальшого ранжування. Якщо перетину не виявлено, приймається $k_{pzf} = 1$.

Методично принципово не змішувати критерії «в межах» і «поблизу». Gate-критерій фіксує лише факт входження в межі ПЗФ. Натомість близькість до природоохоронних територій, екотонні ефекти, бар'єрність інфраструктури, фрагментація середовища та інші суміжні ризики мають оцінюватися в S_{eco} , а не дублюватися як повторне відсікання. Такий підхід узгоджується з екологічною логікою просторового планування ВДЕ, де абсолютні обмеження відокремлюються від градуїованих індикаторів чутливості [35, 80, 129].

2.2.4 Формалізація gate-множника у моделі інтегральної придатності

З урахуванням двох бінарних обмежувальних коефіцієнтів загальний Gate-множник визначається як:

$$Gate_i = k_{pzf} \cdot k_{water}, \quad (2.4)$$

де: $Gate_i, k_{pzf}, k_{water} \in \{0; 1\}$.

Підсумковий бал придатності:

$$S_{core\ i} = Gate \cdot S_{core\ i}, \quad (2.5)$$

де $S_{core\ i}$ - підсумковий інтегральний бал придатності кар'єру.

Таким чином, якщо кар'єр перетинає ПЗФ або ПЗС, відповідний коефіцієнт дорівнює 0, отже $S_{core} = 0$ і об'єкт автоматично класифікується як непридатний у межах скринінгу.

2.3 Скринінг сонячного потенціалу кар'єрів за даними Global Solar Atlas (індекс придатності S_{sol})

Для попереднього оцінювання сонячного потенціалу відпрацьованих кар'єрів у межах даного дослідження використано платформу Global Solar Atlas [74]. Використання єдиного стандартизованого джерела даних на етапі скринінгу забезпечує порівнюваність кар'єрів між собою та дозволяє сформувати узгоджену вхідну базу для подальшого багатокритеріального оцінювання. Такий підхід є методично доцільним для GIS-MCDA моделей відбору майданчиків під СЕС, у яких ресурсний блок має бути побудований на однаковій інформаційній основі для всієї вибірки [32, 94, 136].

Платформа Global Solar Atlas надає довгострокові просторові оцінки сонячного ресурсу та пов'язаних показників для фотоелектричних систем, що робить її придатною саме для попереднього скринінгу й первинного зіставлення альтернатив. Водночас її дані слід інтерпретувати як макрорівневу

ресурсну основу, а не як заміну детального локального моделювання інсоляції для конкретного кар'єру.

У подальших дослідженнях така перевірка може бути розширена шляхом зіставлення результатів Global Solar Atlas із іншими міжнародними системами оцінювання сонячного ресурсу та продуктивності фотоелектричних систем, зокрема PVGIS [106, 107].

Для кожного кар'єру було зібрано набір параметрів, які характеризують як сонячний ресурс, так і супровідні фізико-географічні умови:

- PVOUT - питома потенційна генерація фотоелектричної системи (*кіловат-година на кіловат пікової потужності, кВт·год/кВтп*);
- GHI - глобальна горизонтальна сонячна радіація (*кіловат-година на квадратний метр, кВт·год/м²*);
- DNI - пряма нормальна сонячна радіація (*кВт·год/м²*);
- DIF - дифузна горизонтальна сонячна радіація (*кВт·год/м²*);
- OPTA - оптимальний кут нахилу (*градуси, °*);
- TEMP - середня річна температура повітря (*градуси Цельсія, °C*);
- ELE - висота над рівнем моря (*метри, м*).

Зазначені показники є методично значущими, оскільки компоненти сонячної радіації (GHI/DNI/DIF) та геометричні/метеорологічні умови (OPTA, TEMP, ELE) використовуються для узгодженого опису ресурсності території та, у ширших постановках, для пояснення відмінностей очікуваного енергетичного виходу фотоелектричних систем [74].

Оскільки всі кар'єри розташовані в межах однієї області, варіації довгострокових кліматичних показників сонячного ресурсу виявляються відносно невеликими. Тому для регіонально компактної вибірки як базовий індикатор ресурсності свідомо обрано - глобальну горизонтальну сонячну радіацію (GHI), як базовий індикатор ресурсності для ранжування кар'єрів за сонячним потенціалом у межах поточної вибірки .

Водночас інші показники (PVOUT, DNI, DIF, OPTA, TEMP, ELE) не ігноруються: вони зберігаються у вхідній таблиці як інформаційний “паспорт”

кожного кар'єру та як резерв для майбутнього розширення/удосконалення методики (див. нижче).

Щоб забезпечити порівнюваність і отримати відносний показник, який можна інтегрувати з іншими критеріями, значення GHI приводилися до індексу сонячного потенціалу S_{sol} у діапазоні 0-1. Принцип нормалізації полягає в тому, що кар'єр із найбільшим значенням GHI_{max} у вибірці приймається за еталон, а решта кар'єрів із значенням GHI_i оцінюються як частка від цього еталона:

$$S_{sol} = \frac{GHI_i}{GHI_{max}}, \quad (2.6)$$

Таким чином, відображає відносну ресурсність кар'єру в межах вибірки, а не абсолютний прогноз генерації конкретної станції.

Для забезпечення порівнянності результатів інтегральної оцінки, фінальний показник придатності трансформується у 100-бальну шкалу шляхом множення на масштабний коефіцієнт 100. Проте на етапі розрахунку часткових критеріїв, зокрема сонячного потенціалу S_{sol} , принципово важливою є їх нормалізація у діапазоні $[0; 1]$. Це є необхідною умовою математичної коректності агрегування різнорідних показників в єдину модель оцінювання.

Наступний етап дослідження присвячено детальній верифікації розрахункових показників сонячного потенціалу. Для цього обрано три пілотні об'єкти, для яких наявні актуальні геодезичні дані. Застосування ГІС-технологій (ArcGIS) дозволить порівняти узагальнені показники ресурсу Global Solar Atlas із локальними моделями інсоляції, що враховують мікрорельєф та затінення бортів кар'єру.

Поточний підхід, заснований на нормалізації GHI до індексу S_{sol_i} є обґрунтованим для однієї області через відносну однорідність сонячного ресурсу. Однак при розширенні задачі на територію країни або кількох країн очікується суттєвіша просторова мінливість кліматичних умов, тому зростає доцільність включення додаткових показників - PVOUT, DNI, DIF, OPTA,

TEMP, ELE - для точнішої диференціації майданчиків і кращої інтерпретації відмінностей сонячного потенціалу [74], [76]. Саме тому вже на етапі скринінгу ці змінні збираються та зберігаються в таблиці як база для майбутнього розширення формули.

2.4 Геотехнічний індекс придатності S_{geo} для скринінгу кар'єрів під СЕС

2.4.1 Призначення індексу та межі застосування

Геотехнічний індекс придатності $S_{geo} \in [0; 1]$ впроваджується у модель скринінгу для ідентифікації територій, придатних до розміщення наземних сонячних електричних станцій (СЕС) за стандартними технологічними схемами, без необхідності застосування спеціальних заходів інженерної підготовки (таких як: глибинне ущільнення або повна заміна ґрунтів, влаштування масивних підпірних стін, систем глибокого дренажу тощо).

Функціональне призначення індексу на цьому етапі полягає не у розрахунку параметрів фундаментів, а у ранжуванні об'єктів та ранжуванні ділянок за рівнем геотехнічної придатності та виявленні об'єктів із підвищеним геотехнічним ризиком. До факторів виключення віднесено: прогнозовані нерівномірні деформації основи, деградацію механічних властивостей порід при циклічному зволоженні-висиханні, наявність карстово-суфозійних явищ, реологічні процеси (повзучість) та загальну нестійкість укосів.

Згідно з принципами геотехнічного проектування (Eurocode 7, EN 1997-1) та рекомендаціями USACE [64, 133], процедура скринінгу передуватиме етапам детальних інженерно-геологічних вишукувань (ground investigation) та верифікації граничних станів за несучою здатністю (ULS) і деформаціями (SLS). Відтак, за відсутності прямої параметризації ґрунтового масиву,

отримані значення S_{geo} мають статус попередньої класифікації придатності території, а не інженерного розрахунку.

2.4.2 Геотехнічна придатність майданчика під СЕС

Аналіз світової практики [100, 136] свідчить, що низьке питома навантаження від конструкцій сонячних електростанцій не нівелює вимог до якості інженерно-геологічних вишукувань. Для кар'єрних ландшафтів ситуація ускладнюється їхньою складною техногенною історією, що призводить до формування специфічних інженерно-геологічних елементів: техногенних насипів, зон розущільнення та ділянок з порушеним гідрогеологічним режимом.

Відтак, для ефективного відбору майданчиків необхідно запровадити інтегральний критерій, який дозволяє "відфільтрувати" території з типовими геотехнічними аномаліями (карст, зсуви, просадні ґрунти) ще до етапу дороговартісних польових досліджень. Такий підхід дозволяє мінімізувати ризики розвитку непрогнозованих деформацій конструкцій в процесі експлуатації.

2.4.3 Обґрунтування пріоритетності оцінки стану масиву над властивостями монолітної породи

У сучасній геомеханіці існує фундаментальне розмежування між міцністю речовини породи (intact rock) та деформаційними характеристиками масиву (rock mass). Навіть високоміцні літологічні різності (граніти, вапняки) в умовах інтенсивної тріщинуватості або вивітрювання можуть демонструвати поведінку, характерну для слабких основ. Це зумовило широке впровадження в інженерну практику емпіричних систем класифікації масивів, таких як RMR (Bieniawski) та Q-system (Barton et al.), що формалізують вплив структурних дефектів, стану поверхонь ослаблення та обводненості [30, 31].

В рамках розробленої методики скринінгу, за відсутності даних польових випробувань на етапі попереднього аналізу, прийнято наступне методологічне припущання:

- Літологічний тип визначає базовий рівень (baseline) фізико-механічних властивостей (потенціал деформацій, водостійкість, розчинність);
- Стан масиву оцінюється через систему індикаторів ризику (наявність карсту, схильність до розмокання/slaking, просадні явища), ідентифікованих за архівними геологічними даними.

Такий підхід відповідає логіці переходу «від індексних показників до розрахункових параметрів»: на етапі скринінгу формується якісна модель поведінки основи, тоді як кількісні характеристики (UCS, модуль деформації), регламентовані стандартами FHWA та ASTM [27, 66, 67], визначаються на стадії робочого проектування.

2.4.4 Фізична інтерпретація та компонентна структура індексу S_{geo}

Індекс S_{geo} синтезує три концептуальні групи геотехнічних параметрів, які визначають придатність основи для влаштування пальових фундаментів СЕС:

1. Несуча здатність та деформаційність (SLS-орієнтація). Базовим критерієм виступає жорсткість та стисливість масиву. Матеріали з високим модулем деформації мінімізують ризики розвитку нерівномірних (диференційних) осідань, що є критичним для збереження геометрії фотоелектричних столів. Ця логіка базується на підходах до проектування основ у скельних та дисперсних ґрунтах, викладених у керівництвах FHWA (GEC-5, GEC-6) [51, 52].
2. Довговічність в умовах циклічних змін вологості (Durability). Окремий блок враховує потенціал деградації слабких порід (аргілітів, алевролітів) під впливом атмосферних чинників.

Циклічне зволоження-висихання призводить до дезінтеграції структури породи (slaking), зниження міцності та втрати стійкості укосів. Для оцінки цього явища в міжнародній практиці застосовується Slake-Durability Test (Franklin & Chandra) та стандарт ASTM D4644 [27, 68].

3. Критичні георизики (High-Penalty Risks). Індекс ідентифікує наявність порід, схильних до карстоутворення та суфозії.

- Евапорити (гіпс, ангідрит): Висока розчинність створює загрозу утворення порожнин і раптових провалів, що є категоричним протипоказанням для будівництва без спеціальних захисних заходів [95].
- Карбонати: Враховано ризики розвитку карсту, особливо при зміні гідрогеологічного режиму внаслідок техногенного втручання [77].
- Просадні ґрунти (леси): Для дисперсних порід враховано ризик колапсу структури при замочуванні, механізм якого детально описано в сучасних дослідженнях механіки ґрунтів [65, 96].

2.4.5 Правило присвоєння за шкалою S_{geo}

У даній роботі запропоновано використати дискретну шкалу класів (таблиця 2.1), яку легко відтворити й масштабувати:

- Клас А (дуже сприятливо): $S_{geo} = 0.90$;
- Клас В (сприятливо): $S_{geo} = 0.75$;
- Клас С (умовно сприятливо): $S_{geo} = 0.55$;
- Клас D (несприятливо): $S_{geo} = 0.30$;
- Клас Е (вкрай несприятливо на етапі скринінгу): $S_{geo} = 0.05$.

На основі аналізу існуючих класифікацій масивів гірських порід (Hoek & Brown, Bieniawski) та специфіки навантажень від фотоелектричних систем, запропоновано власну типізацію літологічних основ, наведену в табл. 2.1. Кожному класу присвоєно емпіричний коефіцієнт S_{geo} , що відображає ймовірність успішного застосування стандартних паливових фундаментів без вартісних заходів інженерної підготовки.

Таблиця 2.1 - Класифікація літологічних типів кар'єрів за геотехнічною придатністю до розміщення наземних СЕС (індекс S_{geo} 0-1) (Розроблено автором на основі [27, 30, 31, 65, 66, 67, 68, 77, 96])

Літолого-генетичний тип порід / ґрунтів	Типові представники (приклади)	Інженерно-геологічна характеристика та фактори ризику (обґрунтування скринінгу)	Клас придатності	Індекс S_{geo}
Скельні магматичні породи (високої міцності)	Граніт, базальт, габро, діорит, сієніт	Характеризуються високою жорсткістю та низькою стисливістю. Деформації мінімальні. Проблеми локалізовані (зони тектонічного дроблення). Оптимальна основа для анкерування паль.	A	0.90
Скельні метаморфічні породи	Кварцит, гнейс, кристалічні сланці	Загалом стабільні масиви. Специфічний ризик - анізотропія властивостей (сланцюватість) та наявність площин ослаблення, проте базово придатні.	A	0.90
Карбонатні породи (масивні, скам'янілі)	Вапняк щільний, доломіт	Висока несуча здатність скелету. Критичний обмежувальний фактор - наявність карстових порожнин та тріщин (прихована небезпека). Вимагає перевірки на карстонебезпечність.	B	0.75
Зцементовані уламкові породи	Пісковик міцний, конгломерат, брекчія	Придатні за умови достатнього ступеня цементації. Ризик пов'язаний з неоднорідністю цементу (карбонатний/глинистий) та вибіркованим вивітрюванням.	B	0.75
Напівскельні та породи середньої міцності	Пористі туфи, туфіти, слабкозцементовані пісковики	Фізико-механічні властивості значно залежать від пористості та водонасичення. Можливі просідання та ерозія. Потребують заходів інженерного захисту.	C	0.55
Слабкі карбонатні породи	Крейда, крейдоподібні мергелі, вапняк-черепашик	Низька міцність на одноосовий стиск, висока чутливість до зміни вологості (зниження міцності у водонасиченому стані). Умовно придатні.	C	0.55
Слабкі глинисті породи (схильні до розмокання)	Аргіліти, алевроліти, сланцеві глини (Shale/Mudstone)	Високий ризик деградації при циклічному зволоженні-висиханні (<i>slaking</i>). Схильність до повзучості та осипання укосів. Низька довговічність (<i>durability</i>).	D	0.30
Карбонатно-глинисті породи	Мергелі, глинисті вапняки	Поєднують ризики карстування та розмокання. Висока ймовірність деформацій без виконання дренажу та конструктивного підсилення.	D	0.30
Дисперсні незв'язні ґрунти	Піски різної крупності, гравій, ПГС	Можуть слугувати надійною основою лише у щільному стані. Без даних про коефіцієнт пористості та рівень ґрунтових	C	0.55

		вод класифікуються як "умовно придатні".		
Просадні та слабкі зв'язні ґрунти	Леси, суглинки лесовидні, торф, мули	Критичний ризик просадних деформацій при замочуванні (леси) або значних довготривалих осідань (торф, м'які глини). Виключення без спеціальних геотехнічних рішень.	Е	0.05
Евапорити (розчинні породи)	Гіпс, ангідрит, кам'яна сіль	Системний ризик утворення провалів та суфозійних воронкок внаслідок розчинення порід. Категоричне виключення на етапі скринінгу (Critical Fatal Flaw).	Е	0.05

2.5 Обґрунтування індексу електромережевої доступності S_{grid} : двокомпонентна модель оцінювання (ПС / ЛЕП-35 кВ)

2.5.1 Концептуальна структура індексу та його роль у методиці скринінгу

Мережевий індекс S_{grid} у структурі скринінгової моделі виконує функцію компаративного індикатора інфраструктурної доступності. Слід підкреслити, що в рамках даного дослідження визначення S_{grid} не підміняє собою процедуру розрахунку плати за приєднання та перевірки технічної можливості видачі потужності. Ці аспекти регламентуються чинним законодавством України, зокрема Кодексом системи передачі та Кодексом систем розподілу (через розрахунок струмів короткого замикання, перевірку стійкості та балансу потужності) [16, 17].

Специфіка об'єкта дослідження - відпрацьованих кар'єрів - полягає в наявності успадкованої інфраструктури промислового електропостачання, зокрема власних підстанцій 6-10 кВ і розподільчих пунктів. Це суттєво знижує бар'єри реалізації проєктів порівняно з грінфілд-територіями, зокрема за рахунок скорочення довжини трас приєднання та зменшення потреби у відведенні земель під опори. Водночас наявність такої інфраструктури не означає автоматичної доступності вільної пропускну здатності мережі.

Методологічно, факт наявності існуючої мережі інтерпретується у моделі як позитивний фактор готовності майданчика. Такий підхід корелює із

загальноприйнятими практиками зонування територій для відновлюваної енергетики, де критичним критерієм відбору є знаходження об'єкта в межах порогових відстаней до точок приєднання (зокрема, до 30 км для мереж 35-110 кВ та до 5 км для мереж 6-10 кВ) [40].

У ширшому контексті енергетичного переходу електричні мережі розглядаються як одна з ключових умов інтеграції відновлюваної генерації, оскільки саме їхня пропускна здатність, технічна готовність і планування розвитку визначають можливість своєчасного приєднання нових об'єктів сонячної енергетики [84, 85].

2.5.2 Обґрунтування системи індикаторів оцінки мережевої інфраструктури

Система критеріїв для розрахунку індексу S_{grid} базується на аналізі двох ключових топологічних елементів електричної мережі, що визначають технічну можливість та вартість приєднання об'єктів ВДЕ:

1. Трансформаторні підстанції (ПС). Розглядаються як пріоритетні вузли комутації, де технічно можливе облаштування точки приєднання (Point of Common Coupling - PCC). Близькість до ПС мінімізує витрати на реконструкцію комірок та прокладання ліній [16, 18].
2. Повітряні лінії електропередачі (ПЛ) напругою 35 кВ. Виступають альтернативним сценарієм приєднання ("врізка в лінію"). Цей клас напруги обрано як оптимальний для СЕС середньої потужності, особливо в умовах обмеженої пропускної здатності локальних мереж 6-10 кВ гірничих підприємств [40].

Така диференціація індикаторів узгоджується з чинною методикою розрахунку плати за нестандартне приєднання, затвердженою НКРЕКП. Відповідно до Кодексу систем розподілу, вартість послуги з приєднання прямо залежить від відстані та замовленої потужності, зокрема в частині ставки плати за лінійну складову приєднання [18]. Це підтверджує коректність

використання геометричної відстані у скринінговій моделі як проксі-індикатора капітальних витрат на мережеву інфраструктуру.

2.5.3 Визначення змінних і правило вибору цільової підстанції

Для кількісної оцінки мережевої доступності введено систему змінних, що характеризують просторове положення кар'єру відносно об'єктів енергетичної інфраструктури:

- D_{PS} - найкоротша відстань від межі гірничого відводу до цільової трансформаторної підстанції (визначеної за алгоритмом пріоритету);
- D_{35} - найкоротша відстань (перпендикуляр) до траси найближчої повітряної лінії електропередачі напругою 35 кВ;
- S_{PS} (0...1) - нормований показник близькості до підстанції (функція приналежності);
- S_{35} (0...1) - нормований показник близькості до ЛЕП-35 кВ;
- S_{grid} (0...1) - інтегральний індекс мережевої доступності.

Правило вибору цільової підстанції (важливо для кар'єрів з внутрішніми об'єктами):

- Якщо в межах кар'єру або безпосередньо на проммайданчику є діюча ПС 6-10 кВ (або вузол трансформації відповідного класу), тоді приймаємо (інфраструктурна наявність).
- Якщо такої ПС немає, тоді визначаємо до найближчої ПС 35 кВ (як реалістичної опції приєднання середньої напруги).

Примітка. Такий підхід забезпечує порівнянність альтернатив на етапі скринінгу. Хоча він не гарантує отримання технічних умов саме в цій точці [16, 17], його застосування дає змогу коректно ранжувати об'єкти за критерієм мінімізації витрат на лінійну складову приєднання.

2.5.4 Дискретизація просторових метрик та алгоритм розрахунку індексу

Для приведення фізичних величин (відстаней у кілометрах) до безрозмірної шкали придатності $[0; 1]$ застосовано метод категоріальної дискретизації. На відміну від неперервних лінійних функцій, ступінчаста (рангова) шкала краще відображає інженерну логіку прийняття рішень, де існують чіткі пороги зміни вартості будівництва (наприклад, перехід від коротких кабельних ліній до необхідності будівництва довгих повітряних трас із землевідведенням).

Граничні значення інтервалів узгоджено з емпіричною практикою зонування територій для ВДЕ, де дистанція 30 км розглядається як гранична межа економічної доцільності приєднання для об'єктів середньої потужності [16, 17]

Оцінку доступності підстанцій S_{PS} розраховуються за шкалою оцінки близькості до центрів живлення (Таблиця 2.2) базується на пріоритеті використання існуючої інфраструктури.

Таблиця 2.2 - Рейтингова шкала оцінки відстані до підстанцій S_{PS}

Ранг	Умова (вхід)	Інтерпретація для скринінгу	
PS0	ПС 6-10 кВ у межах кар'єру -	Ідеальна доступність. Наявність інфраструктури (ПС/ПП) безпосередньо в межах гірничого відводу. Потребує лише реконструкції комірок без будівництва ЛЕП.	1.00
PS1	$0 < D_{PS} \leq 2$ км	Висока доступність. Зона мінімальних лінійних витрат. Можливе прокладання кабельної лінії без складних сервітутів.	0.85
PS2	$2 < D_{PS} \leq 5$ км	Середня доступність. Межа ефективності для "коротких" приєднань. Витрати зростають, але залишаються в межах типового бюджету.	0.70
PS3	$5 < D_{PS} \leq 15$ км	Помірна віддаленість. Необхідність будівництва повітряної лінії. Ймовірні ускладнення з землевідведенням та погодженням траси.	0.45
PS4	$15 < D_{PS} \leq 30$ км	Низька доступність. Висока вартість лінійної складової. Проект доцільний лише за умови високої сонячної генерації.	0.20

PS5	$D_{PS} \leq 30$ км	Критична віддаленість. Знаходиться поза межами економічно обґрунтованого коридору приєднання.	0.05
-----	---------------------	--	------

Оцінка доступності ЛЕП 35 кВ S_{35} оцінюється за шкалою для ліній 35 кВ (Таблиця 2.3) має жорсткіші пороги для ближньої зони, оскільки "врізка" в лінію часто вимагає специфічної конфігурації опор та відводів.

Таблиця 2.3 - Рейтингова шкала оцінки відстані до ЛЕП 35 кВ S_{35}

Ранг	Умова (вхід)	Інтерпретація для скринінгу	
L1	$D_{35} \leq 1$ км	Максимальна доступність. ЛЕП проходить у безпосередній близькості або перетинає ділянку. Висока гнучкість приєднання (врізка).	1.00
L2	$1 < D_{35} \leq 3$ км	Висока доступність. Помірний обсяг будівельно-монтажних робіт.	0.80
L3	$3 < D_{35} \leq 5$ км	Середня доступність. Допустима відстань для стандартних схем приєднання середньої напруги.	0.65
L4	$5 < D_{35} \leq 15$ км	Помірна віддаленість. Зростають ризики узгодження землевідведення під опори на протяжних ділянках.	0.40
L5	$15 < D_{35} \leq 30$ км	Низька доступність. Суттєве зростання інвестиційних ризиків.	0.20
L6	$D_{35} > 30$ км	Критична віддаленість. Низький пріоритет для освоєння.	0.05

Обґрунтування порогів: верхня межа 30 км відповідає практиці критеріїв інфраструктурної готовності (ПС і мережі 35/110 кВ до 30 км) [63; 64].

2.5.5 Розрахункова модель індексу S_{grid} та умови відсікання за Gate-критерієм

Для інтеграції часткових метрик S_{PS} та S_{35} в єдиний показник мережевої доступності застосовано адитивну модель з ваговими коефіцієнтами. Такий підхід дозволяє врахувати нерівнозначність технічних рішень приєднання.

Інтегральний мережевий індекс S_{grid} визначається як зважена сума нормованих показників близькості і розраховується за формулою:

$$S_{grid} = w_{PS} \cdot S_{PS} + w_{35} \cdot S_{35}, \quad (2.7)$$

де:

- S_{PS} , S_{35} - бальні оцінки дистанції до підстанції та ЛЕП-35 кВ відповідно (визначені у табл. 2.2-2.3);
- w_{PS} , w_{35} - вагові коефіцієнти значущості критеріїв, причому $\sum w = 1$.

На етапі скринінгу встановлено наступний розподіл вагових коефіцієнтів:

- $w_{PS} = 0.7$. Висока вага цього компонента зумовлена вузловою роллю підстанції в системі електропостачання. Підстанція є точкою трансформації та комутації, що забезпечує більшу гнучкість у виборі схеми видачі потужності, вищу надійність релейного захисту та ширші можливості диспетчерського керування. Наявність доступної підстанції у багатьох випадках комплексно спрощує вирішення питання приєднання [16-62]*
- $w_{35} = 0.3$. Близькість лінії електропередачі за відсутності вільної комірки на підстанції не гарантує низької вартості приєднання, оскільки приєднання шляхом відгалуження від лінії має технічні обмеження. Тому цей фактор розглядається як додатковий інфраструктурний чинник, що потенційно знижує витрати на лінійну складову приєднання, але має меншу вагу порівняно з доступністю підстанції [17; 18]

Такий розподіл (0.7 / 0.3) відображає інженерну реальність: технічно простіше збудувати нову лінію до існуючої підстанції, ніж будувати нову підстанцію на існуючій лінії.

Для виключення завідомо малопридатних об'єктів у моделі вводиться логічний фільтр низького пріоритету. Якщо виконується умова:

$$(d_{PS} > 30 \text{ км}) \wedge (d_{35} > 30 \text{ км}), \quad (2.8)$$

то кар'єр класифікується як низькопріоритетний за критерієм мережевої доступності.

Це відповідає граничним умовам економічної доцільності будівництва приєднувальної інфраструктури для об'єктів середньої потужності. Подальший розгляд таких майданчиків є виправданим лише за наявності винятково високих значень інших критеріїв, здатних компенсувати підвищені витрати на приєднання, зокрема за дуже високого рівня інсоляції або мінімальних витрат на землекористування [40].

2.5.6 Аналіз чутливості моделі та верифікація вагових коефіцієнтів

Для підтвердження стійкості запропонованої методики оцінювання ($w_{PS}=0.7$; $w_{35}=0.3$) виконано аналіз чутливості інтегрального показника S_{grid} до зміни вагових параметрів. Цей етап є необхідним для перевірки гіпотези про домінуючу роль підстанції порівняно з лінійною інфраструктурою. Така перевірка є важливим елементом багатокритеріального оцінювання, оскільки зміна ваг критеріїв може впливати на підсумкові значення індексів і ранжування альтернатив [123, 139, 140].

Сценарії моделювання дослідження виконано для трьох сценаріїв розподілу ваг, що відображають різні стратегії пріоритезації:

1. Сценарій S0 (Базовий): $w_{PS}=0.7$ / $w_{35}=0.3$. Відображає авторську логіку дослідження (пріоритет вузла приєднання).
2. Сценарій S1 (Збалансований): $w_{PS}=0.6$ / $w_{35}=0.4$. Припущення про зростання ролі ЛЕП при дефіциті потужності на ПС.
3. Сценарій S2 (ПС-домінант): $w_{PS}=0.8$ / $w_{35}=0.2$. Жорстка прив'язка до існуючих вузлів трансформації.

Апробація на модельних об'єктах. Для тестування сценаріїв обрано три типи характерних кар'єрів (Типи А, В, С), що зустрічаються на практиці:

- **Тип А:** ПС 6-10 кВ знаходиться безпосередньо на кар'єрі $S_{PS}=1.00$, але високовольтна ЛЕП-35 кВ віддалена $S_{35}=0.20$.

- **Тип В:** Власна ПС відсутня або зруйнована $S_{PS}=0.20$, проте через ділянку проходить транзитна магістраль $S_{35}=1.00$.
- **Тип С:** Обидва об'єкти знаходяться на помірній відстані $S_{PS}=0.70$; $S_{35}=0.65$.

Результати розрахунку інтегрального індексу S_{grid} для різних сценаріїв наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 - Матриця чутливості індексу S_{grid} до зміни вагових коефіцієнтів

Тип об'єкта / Параметри	Сценарій S0 (Базовий) 0.7/0.3	Сценарій S1 (Баланс) 0.6/0.4	Сценарій S2 (ПС- домінант) 0.8/0.2	Динаміка змін
Тип А (ПС є, ЛЕП немає)	76 балів	68 балів	84 бали	Рейтинг зростає зі збільшенням ваги ПС. Найбільш стабільний лідер.
Тип В (ПС немає, ЛЕП є)	44 бали	52 бали	36 балів	Чуттєво втрачає рейтинг у базовому сценарії, що логічно (врізка в лінію складніша за ПС).
Тип С (Середні умови)	68.5 балів	68 балів	69 балів	Майже нечутливий до зміни ваг

Висновок за результатами моделювання. Аналіз показує, що базовий сценарій (S0) забезпечує адекватну диференціацію: об'єкти з готовою підстанцією (Тип А) отримують суттєву перевагу над об'єктами, що потребують будівництва нової інфраструктури від лінії (Тип В). Різниця у 32 бали (76 проти 44) між Типом А та Типом В у базовому сценарії математично підтверджує економічну тезу про те, що "реконструкція комірки дешевша за будівництво підстанції". Тип С демонструє високу стабільність результату, що свідчить про стійкість моделі до похибок у визначенні ваг для пересічних об'єктів.

2.5.7 Обмеження моделі та ризики інтерпретації результатів

Враховуючи спрощений характер скринінгової оцінки, при інтерпретації індексу S_{grid} необхідно враховувати ряд технічних та регуляторних обмежень:

1. Геометрична відстань не дорівнює пропускній спроможності. Високий бал S_{grid} свідчить лише про фізичну близькість інфраструктури, але не гарантує наявності технічної можливості приєднання. Реальна здатність мережі прийняти додаткову сонячну генерацію залежить від пропускної здатності розподільчої системи, технічного стану обладнання, режимів роботи мережі, потреби в реконструкції та вартості заходів з інтеграції генерації [16, 17, 104, 105, 106, 107, 108].
2. Умовність статусу внутрішніх мереж. Наявність на кар'єрі власної підстанції 6-10 кВ оцінюється позитивно, проте її технічний стан може вимагати повної заміни силового обладнання та пристроїв РЗА. У дисертаційному дослідженні фіксується, що S_{grid} оцінює доступність інфраструктурного коридору, а не кошторис модернізації.
3. Невизначеність процедури землевідведення. Модель припускає лінійну залежність вартості від відстані. На практиці короткий маршрут може бути заблокований через майнові питання (паювання земель, лісовий фонд), що змушує прокладати трасу в обхід, нівелюючи перевагу близькості [17].
4. Часовий фактор. Згідно із загальносвітовими трендами, терміни фізичного приєднання можуть варіюватися незалежно від відстані. Емпіричні дослідження показують зростання адміністративних затримок, які діють як стохастичний фактор, що не описується детермінованою метрикою відстані [122].

Таким чином, індекс S_{grid} слід розглядати як інструмент порівняльного просторового ранжування інвестиційної привабливості, який дозволяє відсіяти завідомо нерентабельні локації, але потребує уточнення на стадії передпроектних вишукувань.

2.6 Обґрунтування індексу соціально-екологічної чутливості у моделі скринінгу S_{eco}

2.6.1 Концептуальні засади та місце індексу в структурі оцінювання

Індекс S_{eco} імплементовано в структуру моделі як скринінговий індикатор для попереднього ранжування відпрацьованих кар'єрів за критеріями соціальної прийнятності та екологічної вразливості території. Функціональне призначення індексу полягає не у заміщенні нормативної процедури оцінки впливу на довкілля (ОВД), а у ранній ідентифікації конфліктних зон та пріоритезації об'єктів для етапу поглибленої верифікації (польових досліджень, СЕО, процедури ОВД [7, 93]. Доцільність такого попереднього екологічного ранжування додатково обґрунтовується тим, що великомасштабні фотоелектричні проекти можуть мати кумулятивні екологічні ефекти, пов'язані зі зміною радіаційного балансу поверхні, мікроклімату, водно-грунтових процесів, рослинності та біорізноманіття [143].

Методологія розрахунку індексу S_{eco} ґрунтується на концепції трирівневої соціальної прийнятності відновлюваної енергетики, у межах якої до ключових локальних бар'єрів належать ландшафтно-візуальний вплив, процедурна справедливість та конфлікти землекористування [38, 142]. У контексті українського законодавства детальне моделювання впливів і розроблення заходів їх пом'якшення належать до сфери процедури оцінки впливу на довкілля [7], тоді як завданням скринінгу є попереднє виявлення територій із підвищеним рівнем соціально-екологічної чутливості та мінімізація інвестиційних ризиків на передпроектній стадії.

Принцип ієрархічної диференціації критеріїв (Gate і Scoring).

Для уникнення колінеарності показників у моделі реалізовано чітке розмежування між жорсткими та м'якими обмеженнями:

- Gate-критерій виключення фіксує прямий просторовий конфлікт, зокрема розташування кар'єру в межах природно-заповідного фонду, що зумовлює непридатність об'єкта для подальшого розгляду[68].
- Індекс S_{eco} як критерій чутливості оцінює розташування об'єкта поблизу охоронюваних територій у межах їх буферного впливу. Така ситуація інтерпретується не як пряма заборона, а як чинник підвищеної екологічної чутливості, що потребує додаткового врахування природоохоронних ризиків і можливих заходів захисту [40].

2.6.2 Актуальність врахування локального контексту для кар'єрних ландшафтів

Наукові дослідження [38, 142] засвідчують, що технічна придатність майданчика сама по собі не гарантує успішної реалізації проекту через ризики локальної суспільної опозиції, зокрема ефекту NIMBY. Водночас використання порушених земель, зокрема браунфілд-територій, створює передумови для зниження екологічних конфліктів, пов'язаних із розміщенням об'єктів відновлюваної енергетики на цінних природних територіях.

Для кар'єрних ландшафтів соціально-екологічний контекст є особливо важливим, оскільки зміна функції території може загострювати конфлікти землекористування, пов'язані з перерозподілом простору, очікуваннями місцевих громад і попередньою історією гірничого освоєння [69, 101].

Індекс S_{eco} дає змогу кількісно відобразити цю перевагу, надаючи вищі оцінки територіям із наявним техногенним навантаженням [25, 100, 128].

2.6.3 Структура та операціоналізація часткових індикаторів індексу S_{eco}

Інтегральний індекс S_{eco} формується на основі агрегації шести нормалізованих підіндексів, де значення 1 відповідає найнижчому рівню чутливості, тобто найвищій придатності території.

2.6.3.1 Соціальна прийнятність: відстань до житлової забудови

Вхідна змінна:

d_{res} - мінімальна відстань (м) від планового контуру СЕС/кар'єру до найближчої житлової забудови.

бґрунтування. Для наземних сонячних електростанцій основними чинниками конфліктності є ландшафтно-візуальний вплив, сприйняття індустріалізації простору та процедурні аспекти прийняття рішень, зокрема ступінь залучення місцевої громади [38, 142]. На етапі скринінгу детальне моделювання видимості та екранувальних ефектів не виконується, натомість використовується спрощена проксі-метрика - відстань. Такий підхід відповідає логіці раннього відбору територій і не підміняє процедуру оцінки впливу на довкілля [7].

Шкала:

$$s_{res} = \begin{cases} 0, & d_{res} < 300 \text{ м (Високий ризик конфлікту)} \\ 0.5, & 300 \text{ м} \leq d_{res} < 500 \text{ м} \\ 1, & d_{res} \geq 500 \text{ м (низький ризик конфлікту)} \end{cases} \quad (2.9)$$

2.6.3.2 Рекреаційно-культурна чутливість s_{rec} . Інтегрує ризики впливу на туристичну привабливість та об'єкти культурної спадщини. Використовує агреговану дистанцію (2.10) до рекреаційних зон d_{rec} та об'єктів охорони культурної спадщини d_{cult} :

$$d_{rec*} = \min (d_{rec}, d_{cult}) \quad (2.10)$$

Примітка. Функція приналежності (базується на буферній логіці Energy Community [40]):

$$s_{rec} = \begin{cases} 0, & d_{rec*} < 700 \\ 0.5, & 700 \leq d_{rec*} < 1400 \\ 1, & d_{rec*} \geq 1400 \end{cases} \quad (2.11)$$

2.6.3.3 Буферна зона ПЗФ. Оцінює ризик опосередкованого негативного впливу на суміжні природоохоронні території, розташовані поза межами дії Gate-критерію, зокрема через екотонний ефект. Закон України «Про природно-заповідний фонд України» передбачає встановлення охоронних зон з метою запобігання негативному впливу господарської діяльності на території та об'єкти природно-заповідного фонду [2]. Водночас конкретні розміри таких зон у загальному випадку не зводяться до єдиного універсального значення, тому поріг 700 м у цьому підрозділі приймається як скринінговий, узгоджений із підходами до картографування чутливості, наведеними у методичних матеріалах Energy Community Secretariat [2, 40], а не як абсолютна законодавчо встановлена норма.

Змінна: d_{pzf} - - відстань до меж об'єктів природно-заповідного фонду.

Функція приналежності:

$$s_{pzf} = \begin{cases} 0, & d_{pzf} < 700 \text{ м} \\ 0.5, & 700 \text{ м} \leq d_{pzf} < 1400 \text{ м}, \\ 1, & d_{pzf} \geq 1400 \text{ м} \end{cases} \quad (2.12)$$

2.6.3.4. Індустріальний контекст s_{ind} . Позитивний індикатор, що відображає ступінь антропогенної трансформації ландшафту. Високий рівень індустріалізації (промзони, відвали) підвищує візуальну сумісність СЕС із оточенням. Змінна: P_{ind} - частка (%) площі індустріальних/порушених земель у буферній зоні $B_{ind} = 500 \text{ м}$. Функція приналежності:

$$s_{ind} = \begin{cases} 0, & p_{ind} < 5\%(\text{низький}) \\ 0.5, & 5\% \leq p_{ind} < 25\%(\text{змішаний}), \\ 1, & p_{ind} \geq 25\%(\text{високий}) \end{cases} \quad (2.13)$$

2.6.3.5 Чутливість фауни. Враховує ризики для тварин на основі даних громадянської науки (GBIF). Для оцінювання чутливості фауни використано дані фауни з GBIF, які акумулюють відкриті відомості про просторово-часові спостереження видів із різних джерел. Такі дані є корисними для попереднього скринінгу, однак потребують коректного цитування, перевірки просторової якості та обережної інтерпретації, оскільки вони не є результатом суцільного польового обстеження досліджуваної території [71–73]. Для нівелювання систематичних зміщень даних застосовано метод відносного перцентильного ранжування. Вхідна змінна: P_{fauna} - перцентиль кількості спостережень N_{fauna} у буфері 2000 м серед вибірки досліджуваних кар'єрів. *Алгоритм:*

1. Підрахунок для кожного об'єкта.
2. Ранжування та розрахунок перцентилля:

$$P_{fauna\ i} = \frac{r_i - 1}{n - 1}, n > 1, \quad (2.14)$$

де $P_{fauna,i}$ - перцентильний ранг кількості спостережень фауни для i -го кар'єру;

r_i - ранг i -го кар'єру у впорядкованій вибірці за кількістю спостережень N_{fauna} ;

n - загальна кількість кар'єрів у вибірці;

3. Функція приналежності:

$$s_{fauna} = \begin{cases} 0, & P_{fauna} \geq 0.75(\text{висока щільність}) \\ 0.5, & 0.25 \leq P_{fauna} < 0.75 \\ 1, & P_{fauna} < 0.25(\text{низька щільність}) \end{cases} \quad (2.15)$$

2.6.3.6 Флористична чутливість: види Червоної книги S_{rb} . Фіксує наявність видів рослин, занесених до Червоної книги України, за даними GBIF.

Вхідна змінна: d_{rb} - відстань до найближчої точки реєстрації охоронюваного виду.

$$s_{rb} = \begin{cases} 0, & d_{rb} < 1000 \\ 0.5, & 1000 \leq d_{rb} < 3000 \\ 1, & d_{rb} \geq 3000 \text{ або відсутність даних} \end{cases} \quad (2.16)$$

2.6.4. Розрахункова модель та вагові коефіцієнти

Інтегральний індекс S_{eco} визначається як зважена лінійна комбінація (WLC) нормалізованих підіндексів:

$$S_{eco} = w_{res}S_{res} + w_{rec}S_{rec} + w_{pzf}S_{pzf} + w_{ind}S_{ind} + w_{fauna}S_{fauna} + w_{rb}S_{rb}, \quad (2.17),$$

де:

$S_{res}, S_{rec}, S_{pzf}, S_{ind}, S_{fauna}, S_{rb} \in [0,1]$ - підіндекси з попередніх підрозділів;

$w_{res}, w_{rec}, w_{pzf}, w_{ind}, w_{fauna}, w_{rb}$ - ваги, $\sum w = 1$.

Тоді:

Запропоновано набір ваг, який віддзеркалює найчастіші джерела конфліктів і регуляторної уваги (житло + ПЗФ/рекреація) та системні екологічні ризики (фауни, червонокнижні рослини), з окремим бонусом за промисловий контекст:

- $w_{res} = 0.25$ (житло)
- $w_{rec} = 0.20$ (рекреація, культурна складова)
- $w_{pzf} = 0.20$ (ПЗФ поблизу)
- $w_{ind} = 0.15$ (індустріальний контекст)
- $w_{fauna} = 0.15$ (фауна)
- $w_{rb} = 0.05$ (червонокнижні рослини)

2.6.5 Обмеження моделі та інтерпретація результатів

При використанні індексу S_{eco} необхідно враховувати ряд методологічних припущень:

1. Індикативний характер. Значення показника S_{eco} використовується для визначення пріоритетності подальшої перевірки, але не може трактуватися як критерій юридичної допустимості діяльності.
2. Окремим обмеженням є використання даних GBIF як джерела для попереднього скринінгу фауни. Такі дані можуть містити просторові й таксономічні зміщення, дублікати, різну точність координат і нерівномірність спостережень, тому результати індексу фауністичної чутливості слід трактувати як індикативний сигнал, а не як повноцінну заміну польового біологічного обстеження [71, 72, 73, 97, 130].
3. Універсальність буферів. Використання фіксованих буферних відстаней 700 м і 1000 м у межах цієї моделі слугує інструментом стандартизації порівняльного аналізу [2, 40], але не замінює визначення охоронних зон для конкретних об'єктів ПЗФ і не враховує видоспецифічні реакції на інфраструктурні об'єкти. Це особливо важливо з огляду на те, що екологічні ефекти великомасштабних об'єктів ВДЕ мають багатовимірний і екосистемно залежний характер, а тому потребують подальшої деталізації на рівні конкретного майданчика [119].

2.7 Логістика та капітальні витрати S_{log} у скринінгу кар'єрів

2.7.1 Роль земляних робіт у капітальних витратах фотоелектричних проєктів.

На етапі попереднього відбору (скринінгу) кар'єрів під наземні фотоелектричні станції доцільно окремо враховувати потребу планування рельєфу та земляних робіт як чинник, що впливає на капітальні витрати і ризики календарного графіка будівництва. У структурі вартості наземних фотоелектричних проєктів промислового масштабу роботи з підготовки майданчика (вирівнювання, формування терас/площадок, внутрішні проїзди, поверхневий водовідвід) належать до «цивільної частини» та інфраструктури ділянки і розглядаються як окрема складова витрат на рівні галузевих еталонів. Зокрема, у звітах Національної лабораторії відновлюваної енергетики США (NREL) у розподілі витрат для наземних систем прямо виділяють статті на кшталт підготовки ділянки та вирівнювання [117, 120].

Для кар'єрів цей чинник є більш значущим, ніж для рівнинних територій, оскільки придатні площі часто представлені уступами, бортами, локальними терасами з різною крутизною та експозицією. У таких умовах пряме розміщення фотоелектричних полів без додаткової підготовки може бути обмеженим: для забезпечення прийнятної геометрії монтажних поверхонь (ухил, дренаж, доступ техніки) можуть знадобитися додаткові обсяги виїмки/насипу, перепрофілювання уступів, укріплення і дренажні заходи, що підвищує капітальні витрати та невизначеність строків [100, 117, 120]

2.7.2 Індекс експозиційної придатності кар'єру для розміщення СЕС

Для наземних фотоелектричних систем ключовим чинником є орієнтація робочої поверхні відносно сторін світу (азимут площини модулів) та кут нахилу. Навіть за однакової сонячної радіації в межах регіону відхилення

орієнтації від «південного» напрямку в Північній півкулі знижує річний виробіток, причому відхилення порядку $\pm 60^\circ$ дає вже суттєві втрати (типово близько 10-12% за результатами чутливісних оцінок) [33, 39]. Саме тому в попередньому скринінгу доцільно мати простий індикатор, який відрізняє кар'єри з потенційно значною площею «південних» бортів/уступів від кар'єрів, де домінують «східні/західні» експозиції та потрібне перепланування.

У геоінформаційних підходах експозиція є стандартним параметром поверхні, який визначається як напрямок максимального спадання та задається у градусах $0-360^\circ$ за годинниковою стрілкою від півночі [80, 125]. У нашому індексі експозиція використовується як проксі того, наскільки реалістично отримати значну «південну» площу без масштабних земляних робіт (терасування/перепланування)[33].

Для кар'єрів, що мають витягнуту форму, орієнтація довгої осі задає, які борти домінуватимуть за площею. Це важливо, тому що на бортових і уступних поверхнях напрямок орієнтації відносно півночі часто визначений геометрією (її складно суттєво змінити без перепланування), тоді як на рівних ділянках орієнтацію модулів можна коригувати конструктивними рішеннями.

Застосована так скринінгова інтерпретація:

- якщо кар'єр витягнутий північ-південь (близько $0^\circ/180^\circ$), то довгі борти переважно «дивляться» на схід/захід - частка потенційно «південних» поверхонь серед домінуючих бортів менша, і для формування суттєвої площі з південною експозицією частіше потрібне перепланування;
- якщо кар'єр витягнутий захід-схід (близько $90^\circ/270^\circ$), то домінуючі борти мають нормалі на північ/південь, і одна з великих сторін потенційно забезпечує південну експозицію - це краще з позиції реалістичності отримання «південних» площ без значних земляних робіт.

Зв'язок із енергетичною складовою проявляється через те, що відхилення азимуту від оптимального для Північної півкулі (південний напрямок) веде до помітних втрат річного виробітку; у чисельних

експериментах показано, що зі збільшенням відхилення втрати зростають і можуть досягати порядку десятої частки для великих кутів [33, 39]. Отже, якщо домінуючі борти кар'єру геометрично не формують «південний сектор», то для досягнення прийнятної орієнтації площ під фотоелектричні поля виникає компроміс: або погодитися з енергетичним штрафом, або компенсувати його переплануванням (тобто збільшенням обсягу земляних робіт), що прямо повертає нас до фактора S_{log} .

2.7.3 Вихідні геометричні дані

Для кожного кар'єру за супутниковими знімками та векторним контуром визначаються:

- φ - експозиція кар'єру, градуси, у компасній системі $0^\circ = \text{Пн}$, $90^\circ = \text{Сх}$, $180^\circ = \text{Пд}$, $270^\circ = \text{Зх}$;
- L_{maj} - довжина довгої осі кар'єру, м (за контуром);
- L_{min} - довжина короткої осі кар'єру, м (за контуром);
- e - витягнутість.

Для зрозумілого відображення вводиться відхилення експозиції від півдня:

$$\delta = \min(|\varphi - 180^\circ|, 360^\circ - |\varphi - 180^\circ|), \delta \in [0; 180^\circ], \quad (2.18)$$

Експозиція φ визначаємо за послідовністю:

1. На супутниковому знімку та по векторному контуру кар'єру визначається напрямок довшої сторони кар'єру.
2. Через центр або характерну середину контуру проводиться орієнтирна лінія на південь (меридіональний напрямок).
3. Вимірюється кут між напрямком на південь і визначеним напрямком відкритості кар'єру.
4. Отримане значення безпосередньо записується як φ у шкалі 0-360°.

2.7.4 Класи придатності та коефіцієнт орієнтаційно-експозиційної придатності k_{exp}

Класи задаються через δ (відхилення від півдня), що еквівалентно класам:

- Клас А (оптимальний південний сектор): $\Delta \leq 15^\circ \rightarrow k_{exp} = 1.00$
- Клас В (розширений південний сектор): $15^\circ < \Delta \leq 45^\circ \rightarrow k_{exp} = 0.92$
- Клас С (периферійний південний сектор): $45^\circ < \Delta \leq 60^\circ \rightarrow k_{exp} = 0.86$
- Клас D (значне відхилення): $\Delta > 60^\circ \rightarrow k_{exp} = 0.50$

Мінімальне значення для k_{exp} приймається як 0.50 щоб сильно не занижувати значення по даному параметру для кар'єру, що дає можливість на етапі розроблення проекту на виробіток кар'єру запроєктувати відповідні умови для розміщення СЕС на етапі ревіталізації кар'єру. Також орієнтаційна невідповідність не забороняє розміщення СЕС, але сигналізує про підвищену ймовірність великих земляних робіт/терасування для формування достатньої площі з наближено південною орієнтацією. Отже 0,50 - це штраф за очікувану складність підготовки майданчика, а не повне виключення об'єкта з розгляду, що методично узгоджується зі структурою витрат у проєктах наземних СЕС, де підготовка майданчика і земляні роботи можуть бути суттєвими статтями [28, 117, 120].

2.7.5 Розрахунок поправки на витягнутість кар'єру.

Щоб відобразити, що орієнтація сильніше впливає на кар'єри з виражено витягнутою формою, вводиться показник витягнутості:

$$e = \frac{L_{maj} - L_{min}}{L_{maj} + L_{min}}, e \in [0; 1), \quad (2.19)$$

і коригування:

1. Спочатку обмежуємо кут для стабільної функції (бо після 90° напрям уже “антипівденний” і для скринінгу достатньо вважати його максимально несприятливим):

$$\delta_{90} = \min(\delta, 90^\circ), \quad (2.20)$$

2. Далі застосуємо функцію обмежити:

$$k_{exp}^* = \text{обмежити}(k_{exp} \cdot [1 + \gamma \cdot e \cdot (\cos(\pi\delta_{90}/90^\circ) - 0.5)], 0.50, 1.05), \quad (2.21)$$

де:

- γ - сила впливу форми (для скринінгу застосовуємо значення 0.30).
- Обмежити $(x; a; b)$ - функція “обрізання”:

$$\text{обмежити}(x; a; b) = \min(\max(x, a), b), \quad (2.22)$$

Поправка застосовується:

- Якщо δ малий (експозиція близька до півдня), $\cos(\cdot) \approx 1 \rightarrow$ множник у дужках $> 1 \rightarrow$ можливий невеликий бонус для витягнутих кар’єрів (бо їхня домінуюча орієнтація більш “виражена”).
- якщо δ близький до 90° (схід/захід), $\cos(\cdot) \approx 0 \rightarrow$ множник $< 1 \rightarrow$ додатковий штраф, який зростає з витягнутістю.

Верхня межа 1,05 вводиться як бонус 5% за сприятливу комбінацію витягнутості та орієнтації, але без ризику надати надмірну перевагу на скринінговому рівні, де похибки супутникової інтерпретації й спрощення геометрії залишаються істотними. Межа 1,05 дисциплінує індекс: він залишається проксі підготовчих робіт, а не підміняє детальне енергетичне моделювання чи кошторис.

Короткий приклад розрахунку:

Нехай $\varphi = 201^\circ$. Тоді:

$$\delta = \min(|201 - 180|, 360 - |201 - 180|) = \min(21, 339) = 21^\circ$$

Це Клас В, отже $k_{exp} = 0.92$.

Далі, якщо $e = 0.30$, $\gamma = 0.30$, $\delta_{90} = 21^\circ$, формула дасть k_{exp}^* близьке до k_{exp} , але з невеликою поправкою; і в будь-якому разі результат не вийде нижче 0,50 і не вище 1,05.

2.7.6 Обмеження та ризики інтерпретації

Попри прикладну придатність експозиційного показника для попереднього порівняння кар'єрів, слід наголосити, що запропонований підхід має скринінговий характер і базується на спрощених геометричних припущеннях. Його мета - забезпечити відтворювану та порівнювану оцінку потенційної потреби у переплануванні майданчика під розміщення СЕС на основі орієнтації контуру, а не відтворити реальну просторову структуру уступів, мікрорельєф чи фактичний енергетичний виробіток. Відтак інтерпретація результатів має виконуватися з урахуванням наведених нижче обмежень та джерел невизначеності [33, 39]:

1. описує планову експозицію контуру, а не реальну експозицію укосу - це свідоме спрощення для нерозроблених/частково розроблених кар'єрів.
2. Ручне визначення за супутниковими знімками потребує однакових правил, інакше зростає суб'єктивність.
3. Показник призначений для порівняння між кар'єрами; детальні енергетичні та інженерні висновки мають уточнюватися на наступних етапах (ЦМР, ухили, тераси, затінення, геотехніка).

2.7.7 Дорожня доступність до потенційних майданчиків під СЕС

Дорожній доступ є базовою будівельною умовою: навіть за сприятливих природних характеристик, обмежений під'їзд означає потенційні додаткові витрати на підсилення/ремонт під'їзних шляхів, будівництво тимчасових доріг, обмеження для перевезення важкого обладнання та вищу погодну чутливість

календарного графіка. Практичні посібники для розробників проєктів прямо вказують на потребу оцінювати доступ і, за необхідності, включати роботи з доріг до підготовки майданчика [28, 117].

У геоінформаційних підходах багатокритеріального відбору ділянок інфраструктурні критерії регулярно містять відстань до доріг як наближений показник доступності та супутніх витрат/обмежень [35, 121]. У межах скринінгу доцільно розкласти дорожній чинник на дві компоненти:

1. тип покриття під'їзду: асфальт / щебінь (гравій) / ґрунт / змішаний / невідомо;
2. відстань до асфальтованої дороги як наближений показник транспортної складності: зі зростанням відстані до твердого покриття зростає ймовірність додаткових витрат на утримання проїзду, водовідвід і сезонну прохідність.

Для первинної інвентаризації допустимо використовувати відкриті дані OpenStreetMap (OSM), де дороги описуються класом (ключ *highway*) та, за наявності, типом покриття (ключ *surface*) [78, 111]. Водночас якість і повнота таких даних є неоднорідною в просторі; тому результати за OSM у скринінгу слід трактувати як індикативні й підтверджувати знімками високої роздільності або польовою перевіркою, що узгоджується з оцінками якості добровільно зібраних геоданих [78].

2.7.7.1 Перетворення типу покриття під'їзної дороги у коефіцієнт.

Тип покриття під'їзної дороги переводиться у коефіцієнт $k_{surf} \in (0; 1]$, де менше значення відповідає гіршим логістичним умовам:

$$k_{surf} = \begin{cases} 1.00, & s_{road_type} = \text{асфальт} \\ 0.92, & s_{road_type} = \text{щебінь} \\ 0.86, & s_{road_type} = \text{змішане}, \\ 0.78, & s_{road_type} = \text{ґрунт} \\ 0.85, & s_{road_type} = \text{невідомо} \end{cases} \quad (2.23)$$

2.7.7.2 Коефіцієнт відстані до асфальту

Переводимо відстань до асфальтованої дороги у коефіцієнт $k_{dist} \in (0; 1]$ за пороговими інтервалами:

$$k_{dist} = \begin{cases} 1.00, & d_{asphalt} \leq 0.5 \\ 0.95, & 0.5 < d_{asphalt} \leq 2 \\ 0.88, & 2 < d_{asphalt} \leq 5 \\ 0.78, & 5 < d_{asphalt} \leq 10 \\ 0.65, & d_{asphalt} > 10 \\ 0.80, & d_{asphalt} = \text{невідомо} \end{cases} \quad (2.24)$$

2.7.7.3 Розрахунок за логістичною придатністю

$$k_{road} = \text{обмежити}(k_{surf} \cdot k_{dist}; 0.50; 1.00), \quad (2.25)$$

2.7.8 Розрахунок індексу придатності S_{logi}

$$S_{logi} = \text{обмежити}(k_{exp}^* \cdot k_{road}; 0.40; 1.05), \quad (2.26)$$

- верхня межа 1.05 узгоджена з тим, що лише експозиційний блок може давати дуже обмежений бонус (до +5%);
- $k_{surf} \leq 1$ і $k_{dist} \leq 1$, тому цей блок буде близький до 1.

2.7.9 Формалізація критеріїв оцінювання та забезпечення відтворюваності результатів

Така формалізація є важливою саме для передпроектного етапу, оскільки оцінювання сонячних фотоелектричних проєктів об'єктового масштабу передбачає послідовну перевірку ресурсних, просторових, інфраструктурних і

технічних передумов реалізації, що відповідає практиці підготовки масштабних проєктів сонячної енергетики [103].

Для мінімізації впливу суб'єктивного чинника, зокрема експертного зміщення, та забезпечення високої відтворюваності скринінгу процедуру категоризації в межах індексу S_{log} регламентовано системою формальних правил:

1. Протокол визначення складності планування рельєфу S_{log} .

Класифікація ґрунтується на візуальному аналізі цифрової моделі рельєфу або стереопар знімків із використанням індикатора експозиційної придатності k_{exp} :

- низька складність: у морфології кар'єру переважають горизонтальні ділянки, зокрема днище та широкі берми, або поверхні зі слабким нахилом; інженерна підготовка обмежується плануванням майданчика без значного переміщення ґрунтових мас;
- середня складність: фіксуються локальні перепади висот і нерівності, що потребують вибіркового вирівнювання, формування внутрішніх проїздів та організації поверхневого водовідводу;
- висока складність: домінують круті схили та нерегулярні форми техногенного рельєфу; розміщення фотоелектричних полів потребує масштабного терасування або перепрофілювання бортів;
- формальний маркер: низькі значення коефіцієнта експозиційної придатності $k_{exp} < 0,8$, які свідчать про дефіцит площ південної орієнтації, автоматично підвищують категорію складності до високої, оскільки потребують виконання земляних робіт для коригування азимута поверхні.

2. Протокол оцінки дорожньої доступності для S_{road} . Для верифікації логістичних параметрів використовується поєднання атрибутивних даних OpenStreetMap та матеріалів дистанційного зондування:

- Тип покриття k_{surf} : пріоритетним джерелом є атрибут `surface` у базі даних OSM; у разі відсутності цього атрибута або суперечливості даних виконується візуальна дешифрація ортофотопланів з ідентифікацією асфальтового або бетонного покриття за спектральною яскравістю та чіткістю контурів; якщо однозначна ідентифікація неможлива, застосовується консервативне значення “невідомо”, для якого приймається $k_{surf}=0.85$.
- відстань $d_{asphalt}$: визначається як найкоротша відстань від векторного контуру кар’єру до осьової лінії найближчої дороги з підтвердженим твердим покриттям.

Запровадження цього набору правил забезпечує трасованість рішень: кожне присвоєне значення може бути перевірене та обґрунтоване первинними даними. Такий підхід не підміняє детального кошторисного розрахунку, проте забезпечує узгодженість порівняльного аналізу в межах усієї вибірки [117; 120].

2.8 Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено та науково обґрунтовано методикку дистанційного ГІС-скринінгу й інтегральної оцінки придатності відпрацьованих кар’єрів для розміщення сонячних електростанцій. Побудовано цілісну ГІС-орієнтовану модель багатокритеріального оцінювання, засновану на архітектурі Gate + WLC, яка поєднує некомпенсаційне відсікання об’єктів за критичними просторово-нормативними обмеженнями та подальше компенсаційне ранжування допустимих альтернатив за системою нормалізованих часткових індексів [32, 37, 82, 94, 135, 136].

Обґрунтовано, що для задачі попереднього відбору кар’єрів під СЕС методично доцільним є розмежування двох логік прийняття рішення:

нормативно-обмежувальної, реалізованої через Gate-множник, і порівняльно-оцінювальної, реалізованої через зважену лінійну комбінацію часткових індексів. Такий підхід дозволяє, з одного боку, автоматично виключати завідомо неприйнятні ділянки, що потрапляють у межі природоохоронних або водоохоронних обмежень, а з іншого — виконувати змістовне ранжування кар'єрів, які пройшли первинний фільтр допустимості [37, 82, 135].

У межах розділу сформовано систему часткових індексів, що охоплює ключові виміри придатності кар'єрів до розміщення СЕС: сонячний потенціал S_{sol} , геотехнічну придатність S_{geo} , мережеву доступність S_{grid} , соціально-екологічну чутливість S_{eco} та логістично-підготовчу придатність S_{log} . Для кожного з цих індексів визначено набір вхідних параметрів, правила нормалізації, шкали інтерпретації та спосіб включення до інтегрального показника. Це забезпечує внутрішню узгодженість моделі, її прозорість і можливість відтворення на інших вибірках об'єктів за аналогічної структури вихідних даних.

Розроблено методику дистанційного скринінгу на основі відкритих геоінформаційних ресурсів і принципу перехресної перевірки даних. У межах цієї процедури формалізовано два критичні gate-обмеження: потрапляння кар'єру в межі прибережної захисної смуги та потрапляння кар'єру в межі природно-заповідного фонду. Показано, що саме бінарна логіка «в межах / поза межами» є методично коректною для етапу первинного відсікання, тоді як градуйовані ефекти близькості до чутливих територій мають враховуватися вже в системі часткових індексів, насамперед у складі S_{eco} .

Обґрунтовано доцільність використання платформи Global Solar Atlas як уніфікованого джерела макрорівневих даних для скринінгового оцінювання сонячного потенціалу, а також показано, що для регіонально компактної вибірки кар'єрів базовим індикатором ресурсності доцільно приймати GHI з подальшою нормалізацією у складі індексу S_{sol} . Такий підхід забезпечує порівнюваність альтернатив на етапі первинного оцінювання та не підміняє

подальшого локального інсоляційного моделювання на рівні конкретного об'єкта [32, 74, 94, 136].

У геотехнічному блоці запропоновано дискретну систему оцінювання придатності кар'єрів за літологічними та інженерно-геологічними передумовами, що формалізується через індекс S_{geo} . На відміну від підходів, де геотехнічний чинник враховується лише на пізніх стадіях проектування, у запропонованій методиці його включено вже на етапі попереднього скринінгу. Це підвищує практичну достовірність моделі та зменшує ризик відбору об'єктів, формально привабливих за іншими критеріями, але проблемних з погляду подальшої інженерної реалізації [30, 64 - 68, 77, 133, 136].

Для індексу S_{grid} розроблено двокомпонентну модель мережевої доступності, яка враховує наявність або близькість підстанції та близькість до ЛЕП 35 кВ. Показано, що така структура коректно відображає відносну придатність кар'єрів з точки зору потенційного приєднання до електромереж і забезпечує достатню диференціацію альтернатив на етапі скринінгу. Додатково обґрунтовано сценарний аналіз чутливості індексу до зміни вагових коефіцієнтів, що підвищує методичну стійкість моделі та прозорість її інтерпретації

У структурі індексу S_{eco} систематизовано соціально-екологічні чинники чутливості території, включно з наближеністю до житлової забудови, рекреаційних зон, культурної спадщини, природоохоронних територій, індустріально трансформованих земель, а також показниками біорізноманіття. Обґрунтовано, що на етапі скринінгу ці параметри мають враховуватися не як абсолютні заборони, а як градуйовані показники чутливості, які знижують або підвищують відносну придатність кар'єру залежно від просторового контексту.

У логістично-підготовчому блоці обґрунтовано використання індексу S_{log} як інструмента врахування просторових проксі майбутніх витрат на освоєння території. Показано, що поєднання експозиційної придатності

кар'єрного простору, дорожньої доступності та підготовчих умов дозволяє вже на етапі скринінгу врахувати відносну складність адаптації об'єкта до нового функціонального використання. Це розширює практичну значущість моделі, оскільки наближує її результати до реальної інженерної та інвестиційної логіки прийняття рішень.

Таким чином, у розділі 2 сформовано завершену методичну основу дисертаційного дослідження: визначено структуру інтегральної моделі, обґрунтовано склад часткових індексів, формалізовано gate-обмеження, встановлено єдині правила нормалізації, інтерпретації та агрегування показників. Запропонована методика є відтворюваною, масштабованою та придатною до практичної апробації на вибірці кар'єрів Івано-Франківської області, що створює безпосередню методичну основу для подальших розрахунків і інтегрального ранжування у розділі 3.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ГІС-СКРИНІНГУ ТА ІНТЕГРАЛЬНЕ РАНЖУВАННЯ КАР'ЄРІВ ПІД РОЗМІЩЕННЯ СЕС

3.1 Вихідні дані та підготовка розрахункової бази

Розділ 3 демонструє практичне застосування методики дистанційного ГІС-скринінгу та інтегральної оцінки придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, сформульованої у Розділі 2, до вибірки з 11 об'єктів. Центральним результатом є отримання порівнянних часткових індексів (сонячного, геотехнічного, мережевого, соціально-екологічного та логістично-підготовчого) і підсумкового інтегрального балу, який інтерпретується як скринінгова придатність кар'єру в шкалі 0-100 за умови проходження критичних обмежень (Gate).

Підрозділ 3.1 формує розрахункову базу дослідження:

1. Зводить наявні вхідні дані по 11 кар'єрах у стандартизований «реєстр об'єктів».
2. Описує структуру вхідних таблиць та відповідність між вхідними змінними і вихідними індексами (Gate, S_{sol} , S_{geo} , S_{grid} , S_{eco} , S_{log}).
3. Задає єдині правила одиниць виміру, нормалізації та представлення результатів для забезпечення відтворюваності. У межах логіки «відсікання і ранжування» спочатку застосовується некомпенсаційний Gate-множник G (обмеження “в межах”), після чого для допустимих об'єктів здійснюється агрегація часткових індексів у зведений показник Score.

Вхідні дані у Розділі 3 організовано як «шарувату» систему:

- ідентифікація об'єкта (ID/назва);
- Gate-таблиця (водні обмеження та ПЗФ “в межах”);

- таблиці часткових індексів (сонячний/гео/мережі/екологія/логістика);
- підсумкова зведена таблиця для інтегральної оцінки Score (0-100).

Така структура забезпечує трасованість: кожне кінцеве значення має посилання на конкретні вхідні поля і формулу перетворення/нормалізації, що уможливорює повторення розрахунку за однакових первинних даних.

3.1.1 Перелік і коротка характеристика 11 кар'єрів (об'єкти дослідження)

У межах Івано-Франківської області сформовано вибірку з 11 кар'єрів (табл. 3.1), що використовується для демонстрації практичної реалізації методики дистанційного скринінгу та інтегральної оцінки придатності, поданої у Розділі 2. Об'єкти дослідження розглядаються як майданчики порушених земель, для яких у розрахунковій базі зібрано показники, необхідні для обчислення часткових індексів (сонячного, мережевого, соціально-екологічного, логістично-підготовчого) та застосування обмежувального множника Gate.

Літологічну складову в межах цієї вибірки зафіксовано як вапняк (карбонатні породи), що забезпечує однорідність геотехнічного чинника і підвищує коректність порівняння кар'єрів за іншими компонентами моделі. У термінах Розділу 2 це відповідає присвоєнню єдиного класу придатності «В» та значення $S_{geo} = 0,75$ (у шкалі 0-1) для всіх 11 об'єктів. Така постановка дозволяє трактувати отримане ранжування як результат комбінованого впливу просторових обмежень Gate і варіативності часткових індексів, а не як наслідок різниці літологій. Разом із тим, методика Розділу 2 є масштабованою: при перенесенні на інші регіони або при роботі з кар'єрами інших порід застосовується відповідна дискретна шкала S_{geo} за класами А-Е (див. табл. 2.3.1), без зміни загальної логіки інтегральної моделі.

Таблиця 3.1 - Перелік об'єктів дослідження.

№	Назва кар'єру	Територіальна громада Івано-Франківської обл.	Статус об'єкта (діючий / частково відпрацьований / відпрацьований)	Площа кар'єру, га
1	Стриганецький кар'єр	с. Довге	Частково відпрацьований	15,52
2	Водники	с. Водники	Діючий	3,15
3	Городенківське	Котиківська с.р.	Діючий	5,80
4	Делівське	с. Делева	Діючий	6,41
5	Дубівецький	Дубовецька с.р.	Частково відпрацьований	54,00
6	Межигірсько-Дубовецьке	Межигорецька с.р.	Частково відпрацьований	164,42
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	Ланівська с.р.	Діючий	29,38
8	Москалівське родовище	Стратинська с.р.	Діючий	7,43
9	Олешівське	с. Олешів	Частково відпрацьований	9,90
10	Петрівське	с. Петрів	Діючий	11,51
11	Стрільченське	с. Стрільче	Частково відпрацьований	13,22

3.1.2 Структура вхідних таблиць/параметрів для індексів і Gate (зведення даних)

Розрахункова база реалізована у вигляді набору взаємоузгоджених електронних таблиць Excel, де для кожного кар'єру зберігаються:

1. Первинні вхідні змінні (відстані, бінарні ознаки, частки, кількості).
2. Проміжні нормалізовані підіндекси (0-1) та ранги,
3. Фінальні часткові індекси (0-1).

Логіка побудови таблиць відповідає методиці Розділу 2 і підтримує покрокову перевірку: від «сирих» значень до нормалізованих індикаторів.

Базова ідентифікація (ID, назва кар'єру). Є спільним ключем зведення: у кожній таблиці присутні колонки ідентифікації (ID, назва кар'єру), що дозволяє формувати зведений набір для підсумкового S_{core} .

Gate-таблиця (обмеження від природно заповідного фонду та природної захисної смуги від водойм) містить первинні змінні водного обмеження (мінімальна відстань до урізу води d_{\min} та нормативна ширина прибережної захисної смуги $W_{\text{пзс}}$, сформована на базі W_0 і ознаки відносно ухилу берега), а також бінарні коефіцієнти прохідності k_{water} і k_{pzf} та їх добуток G . Нормативні пороги ширини ПЗС задаються Водним кодексом України, а процедурний аспект встановлення меж водоохоронних зон - постановою КМУ № 486 [4, 11]. Факт входження в межі ПЗФ визначається за відкритими даними кадастру ПЗФ та/або перехресною перевіркою у веб-картографічних джерелах [20], з урахуванням загальної заборони діяльності, що суперечить цільовому призначенню ПЗФ [2]. Вхідні картографічні джерела, які використовуються для дистанційної верифікації контексту й контурів (OSM/Google Earth/ПКК), описані в Розділі 2 як елемент перехресної перевірки [10, 75, 111].

Таблиці часткових індексів, який має власну таблицю з ідентифікаційним блоком і набором вхідних полів, а вихід індексу представлено у шкалі (0-1):

- S_{sol} (сонячний потенціал): формується за даними Global Solar Atlas [74]. Вхідні поля включають набір ресурсних та супровідних параметрів (GHI, DNI, DIF, PVOU, OPTA, TEMP, ELE), але нормалізація для індексу здійснюється за GHI відносно максимуму у вибірці.
- S_{geo} (геотехнічна придатність): задається дискретно за літологічним класом (А-Е) згідно з правилом присвоєння Розділу 2. У таблиці зберігаються літологія, літологічна група, клас та відповідне S_{geo} (0-1) [64, 133].
- S_{grid} (мережевий індекс): реалізовано як двокомпонентну модель ПС/ЛЕП-35 (відстані, ранги, бальні оцінки S_{PS} та S_{35}) з ваговою агрегацією (w_{PS}, w_{35}). У таблиці присутні колонки-плейсхолдери координат, бінарний індикатор наявності ПС 6-10 кВ на території

(1/0), відстані (км) та проміжні ранги. Вихід представлено як S_{grid} у шкалі (0-1) (для базового сценарію ваг).

- S_{eco} (соціально-екологічна чутливість): містить шість груп вхідних параметрів (дистанції до житла, рекреації, культурної спадщини, ПЗФ поблизу, частка індустріальних територій, показники біорізноманіття за GBIF, дистанція до записів видів Червоної книги України) та вихідні підіндекси, вагову суму S_{eco} (0-1).
- S_{log} (логістика та проксі капітальних витрат): у розрахунковій базі представлено таблицею логістично-підготовчої придатності та окремим шаблоном експозиційного компонента. Вхідні поля включають геометрію контуру (L_{maj} , L_{min} , азимут θ), похідні параметри (витягнутість e , кутові відхилення Δ) та дорожні змінні (тип покриття, відстань до асфальту), які перетворюються у коефіцієнти k_{exp*} та k_{road} (через k_{surf} і k_{dist}) і агрегуються у підсумковий логістично-підготовчий індикатор.

Підсумкова зведена таблиця для інтегрального S_{core} в межах Розділу 3 використовується як центральний «інтеграційний» аркуш розрахункової бази: у неї поетапно переносяться результати всіх часткових індексів і множника Gate для кожного з 11 кар'єрів. Таким чином забезпечується єдина структура даних для подальшого обчислення балу придатності кар'єру для розміщення СЕС (0-100) за формулою, наведеною у Розділі 2. Зведена таблиця містить ідентифікатори об'єкта (ID, назва), Gate-множник G , уніфіковані часткові індекси (S_{sol} , S_{geo} , S_{grid} , S_{eco} , S_{log}) і підсумковий показник S_{core} , який використовується для порівняння та ранжування кар'єрів на скринінговому етапі.

На наступних етапах Розділу 3 результати зведеної таблиці застосовуються для відбору трьох репрезентативних кар'єрів, що розглядаються детальніше як демонстраційні приклади. Для цих об'єктів виконується поглиблена просторово-аналітична перевірка з використанням програмного середовища ArcGIS: уточнення морфометричних параметрів

(зокрема експозиції та ухилів), оцінювання просторової мінливості сонячного потенціалу, а також аналіз можливого затінення та інших факторів рельєфної обумовленості, які не деталізуються в базовому дистанційному скринінгу [89, 102].

3.1.3 Єдині правила одиниць виміру, нормалізації та округлення результатів (для відтворюваності).

Єдині правила одиниць виміру. На рівні вхідних даних у розрахунковій базі використовуються такі групи одиниць:

1. Відстані у метрах (м):
 - Gate-блок: W_0 , $W_{пзс}$, d_{min} (водні обмеження). Нормативні значення ширини прибережних захисних смуг задаються Водним кодексом України [4], а порядок встановлення меж водоохоронних зон - постановою КМУ № 486 [11].
 - Екологічний блок: d_{res} , d_{rec} , d_{cult} , d_{pzf} , d_{rb} (соціально-екологічні дистанції).
2. Відстані у кілометрах (км):
 - Мережевий блок: відстані до ПС і ЛЕП-35 кВ (км), що далі переводяться в ранги й безрозмірні оцінки (0-1).
 - Логістичний блок (дорожній чинник): $d_{asphalt}$ (км), яка дискретизується у коефіцієнт k_{dist} .
3. Енергетичні показники (кВт·год/м², кВт·год/кВтп), температура (°C), висота (м), кут (°):
 - Сонячний блок: GHI, DNI, DIF (кВт·год/м²), PVOUT (кВт·год/кВтп), ОРТА (°), TEMP (°C), ELE (м) за Global Solar Atlas.
 - Геометрія контуру: експозиція θ (°), похідні Δ (°), довжини осей (м).
4. Частки та бінарні змінні:
 - Частка індустріальних територій p_{ind} - як частка 0-1.
 - Gate-коефіцієнти та частина індикаторів: 0/1 (наприклад, «ПС 6-10 кВ на території (1/0)», k_{water} , k_{pzf}).

Для агрегування у зваженій сумі всі часткові індекси приведені до узгодженої безрозмірної шкали. У методиці Розділу 2 базовою є шкала $[0;1]$, тоді як 0-100 використовується як представницьке масштабування результатів.

Практично це означає:

- S_{sol} : первинні значення GHI, отримані з Global Solar Atlas, нормалізуються відносно максимуму вибірки ($S_{sol} \in [0;1]$) [74].
- S_{geo} : задається як дискретний коефіцієнт $S_{geo} \in [0;1]$ за класом літологічної придатності.
- S_{grid} : формується через рангові оцінки S_{PS} і S_{35} (0-1), зважується вагами W_{PS} , W_{35} .
- S_{eco} : усі підіндекси S^* визначаються у шкалі 0/0,5/1 або 0-1, після чого інтегруються WLC у $S_{eco} \in [0;1]$.
- S_{log} : експозиційний та дорожній блоки перетворюються у коефіцієнти (0-1) з обмеженням верхньої межі бонусу до 1,05 (скринінгове обмеження), що запобігає непропорційному переважанню логістичного компонента у загальному S_{core} .

Правила обробки відсутніх значень (як реалізовано у таблицях). У розрахунковій базі застосовано «захисні» правила для порожніх полів, щоб уникати некоректних обчислень:

- Gate (водний чинник): якщо найближчий водний об'єкт не ідентифіковано, k_{water} у таблиці встановлюється як 1 (допуск), що відповідає скринінговій логіці «немає зафіксованого конфлікту за наявними даними» та потребує додаткової перевірки на наступних етапах.
- S_{eco} (червонокнижні види): якщо d_{rb} не задано, у шаблоні передбачено значення $S_{rb} = 1$ як технічне значення «немає сигналу в таблиці», але це не інтерпретується як доказ відсутності виду; така інтерпретація узгоджується із загальним обмеженням даних спостережень у підході Розділу 2[130].

- S_{sol} , S_{grid} : формули в шаблонах блокують розрахунок похідних полів при порожніх базових комірках (результат лишається порожнім), що дисциплінує заповнення вхідних даних.

Округлення та подання результатів зводиться до:

- відстані у метрах: округлення до 1 м;
- відстані у кілометрах: округлення до 0,01 км;
- енергетичні показники ($GHI/DNI/DIF$): до 0,1 кВт·год/м²; $PVOUT$: до 0,1 кВт·год/кВтп;
- безрозмірні індекси у шкалі 0-1: до 0,01;
- результати у шкалі 0-100: до 1 бала для підсумкової таблиці ранжування.

3.1 Застосування gate-скринінгу (ПЗФ і прибережні захисні смуги) для попереднього відбору кар'єрів під СЕС

Gate-етап у моделі виконує роль некомпенсаційного фільтра - якщо ідентифіковано критичне обмеження, воно трансформується у коефіцієнт допустимості 0 і нівелює вплив інших позитивних характеристик, а результируючий бал стає рівним нулю

Структура відбору відповідає логіці gate + Scoring - спочатку відсікання неприйнятних за жорсткими просторовими обмеженнями, потім ранжування придатних за багатокритеріальною системою

3.2.1 Вхідні дані та правила розрахунку Gate (за Розділом 2)

4. Для водного обмеження використано мінімальну відстань від контуру кар'єру до урізу води d_{min} , яку визначають за онлайн-спостереженням.
5. Для ПЗФ використано факт просторового перетину контуру кар'єру з межами ПЗФ
6. Формалізація критерію за природно захисною смугою від водоюм (2.2)

$$7. k_{water} = \begin{cases} 0, & d_{min} \leq W_{пзс} \\ 1, & d_{min} > W_{пзс} \end{cases}$$

8. Формалізація критерію за природно захисним фондом (2.3)

$$9. k_{pzf} = \begin{cases} 0, & \text{кар'єр у межах ПЗФ} \\ 1, & \text{кар'єр поза межами ПЗФ} \end{cases}$$

10.- Інтегральний gate-множник (2.4)

$$11. Gate = k_{water} \cdot k_{pzf}$$

12.Інтерпретація - Gate є множитком 0/1 у загальній моделі придатності
- при G=0 результат обнуляється і не може бути “компенсований”
високими значеннями інших індексів

3.2.2 Процедура вимірювання d_{min} у Google Earth та заповнення таблиці

Для кожного кар'єру відкривається контур кар'єру і гідромережа - інструментом вимірювання відстані у Google Earth фіксується найкоротша відстань від межі кар'єру до урізу води - це значення приймається як d_{min} і далі підставляється у правило (2.2) для обчислення k_{water} .

Якщо в межах спостереження не було визначено річки чи водойми - d_{min} не фіксується і не вписується - водні поля залишаються порожніми - k_{water} автоматично приймається як 1 за прийнятим у цьому підрозділі правилом інтерпретації “відсутність ідентифікованої водойми в межах спостереження”

Після отримання k_{water} і k_{pzf} значення Gate обчислюється як $G=k_{water} \cdot k_{pzf}$ і вже тоді заноситься до підсумкової таблиці

3.2.3 Демонстраційний розрахунок на прикладі Стриганецького кар'єру у с. Довге

Стриганецький кар'єр, розташований у с. Довге, за результатами просторової перевірки не перетинає межі територій природно-заповідного фонду, що проілюстровано на рисунку 3.1 - відповідно для нього прийнято $k_{pzf} = 1$.



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- ПЗФ - коричневий;
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.1 - Просторове положення Стриганецького кар'єру (с. Довге) відносно меж об'єкта природно-заповідного фонду «Галицький національний природний парк»

Для оцінювання водного обмеження мінімальну відстань від межі кар'єру до урізу води визначено за допомогою сервісу Google Earth - отримане значення d_{\min} становить - 935 м (рис. 3.2) і перевищує прийнятну ширину прибережної захисної смуги, отже кар'єр задовольняє умову (2.2) і для нього встановлено $k_{\text{water}} = 1$.



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- лінія вимірювання відстані d_{\min} - жовта;
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.2 - Визначення мінімальної відстані d_{\min} від межі Стриганецького кар'єру до урізу води р. Дністер за даними Google Earth. контур кар'єру (червона лінія) - контур відпрацьованої/робочої площі кар'єру (блакитне зафарбування) - лінія вимірювання d_{\min} (жовта лінія) - результат вимірювання $d_{\min} = 935$ м відображено у вікні інструмента «Лінійка» - картографічна основа Google Earth

Приклад розрахунку:

- Стриганецький кар'єр (ID 1)
- Вхід - $W_{\text{пзс}} = 100$ м - $d_{\min} = 935$ м
- Перевірка - $935 > 100$
- Обчислення k_{water} - за (2.2) $k_{\text{water}} = 1$
- Перевірка ПЗФ - перетину з ПЗФ не зафіксовано - $k_{\text{pzf}} = 1$
- Gate - $G = k_{\text{water}} \cdot k_{\text{pzf}} = 1 \cdot 1 = 1$

Для всіх наступних кар'єрів розрахунки виконувалися аналогічно наведеному прикладу для Стриганецького кар'єру - спочатку перевірявся факт перетину меж ПЗФ - далі у Google Earth вимірювалась мінімальна відстань d_{\min} від межі кар'єру до урізу води і порівнювалась із $W_{\text{пзс}}$ - після цього обчислювалися k_{water} , $k_{\text{пзф}}$ та інтегральне значення G - усі підсумкові дані зведено в таблицю 3.2

Якщо в межах спостереження (за Google Earth) не було ідентифіковано водойму поблизу кар'єру - відстань d_{\min} не фіксувалася і в таблицю не вносилося - водні довідкові поля залишалися порожніми - при цьому для цілей gate-скринінгу приймалося $k_{\text{water}} = 1$ як відсутність підтвердженого просторового конфлікту з ПЗС на етапі дистанційного огляду.

Таблиця 3.2 - Результати gate-скринінгу (ПЗФ/ПЗС) для 11 кар'єрів

ID	Назва кар'єру	Найближча водойма	Тип водойми	Прибережна захисна смуга, водойми	Мінімальна відстань до урізу води	Коефіцієнт по ПЗС	Коефіцієнт по ПЗФ	Коефіцієнт прохідності
				$W_{пзс}, м$	$d_{min}, м$	k_{water}	k_{pzf}	G
1	Стриганецький кар'єр	р. Дністер	річка	100	935	1	1	1
2	Водники	р. Дністер	річка	100	2900	1	1	1
3	Городенківське	-	-	-	-	1	1	1
4	Делівське	р. Дністер	річка	100	850	1	0	0
5	Дубівецький	р. Дністер	річка	100	2950	1	1	1
6	Межигірсько-Дубовецьке	-	-	-	-	1	1	1
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	р. Ворониця	річка	25	35	1	1	1
8	Москалівське родовище	-	-	-	-	1	1	1
9	Олешівське	р. Тлумач	річка	25	375	1	1	1
10	Петрівське	р. Дністер	річка	100	280	1	0	0
11	Стрільченське	р. Лемиць	річка	25	55	1	1	1

3.2.4 Висновки за результатами gate-скринінгу

Застосований gate-скринінг підтвердив придатність більшості об'єктів до подальшого багатокритеріального ранжування - 9 кар'єрів мають $G = 1$, тобто не виявлено просторового конфлікту з ПЗФ і не зафіксовано потрапляння у межі ПЗС за прийнятою процедурою дистанційного огляду

Два кар'єри ідентифіковано як непридатні на етапі відсікання - Делівське та Петрівське мають $k_{pzf} = 0$, а отже $G = 0$ - це означає, що вони не допускаються до подальших розрахунків інтегральної придатності та не можуть бути "компенсовані" високими значеннями інших критеріїв, оскільки правило gate є некомпенсаційним

Для кар'єрів, де в межах спостереження не було ідентифіковано водний об'єкт, водні поля залишені порожніми, а k_{water} прийнято рівним 1 - такий підхід є допустимим у рамках дистанційного скринінгу як попереднього фільтра, однак він фіксує методичне обмеження - за потреби уточнення ці об'єкти доцільно додатково перевіряти за детальнішими шарами гідромережі або польовою верифікацією

Загалом gate-етап сформував остаточну множину кар'єрів, що проходять до наступного кроку методики - розрахунку часткових індексів ранжувального блоку та інтегральної оцінки придатності за наступними індексами.

3.2 Практичний розрахунок індексу сонячного потенціалу S_{sol} для 11 кар'єрів (за даними Global Solar Atlas)

Для кількісної оцінки сонячного потенціалу кар'єрів у межах практичної частини використано показники платформи Global Solar Atlas (World Bank / Solargis), що надає довгострокові просторові оцінки сонячного ресурсу та похідних індикаторів для фотоелектричних систем [12, 124]. Для кожного кар'єру сформовано «паспорт» параметрів:

- Сумарна сонячна радіація на горизонтальну поверхню (GHI), кВт·год/м²
- Пряма нормальна сонячна радіація (DNI), кВт·год/м²
- Дифузна (розсіяна) сонячна радіація на горизонтальну поверхню (DIF), кВт·год/м²
- Питомий виробіток фотоелектричної системи (очікувана генерація на 1 кВт встановленої потужності) (PVOUT), кВт·год/кВтп
- Оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів (ОПТА), °
- Середньорічна температура повітря (TEMP), °С
- Висота над рівнем моря (абсолютна відмітка місцевості) (ELE), м

Для індексу S_{sol} як базовий індикатор застосовано лише GHI [124].

3.3.1 Вихідні дані та нормалізація

Усі 11 кар'єрів розташовані в межах однієї області, тому просторові відмінності кліматичного сонячного ресурсу є відносно невеликими. У таких умовах відносна нормалізація в межах вибірки дає прозорий індикатор порівняння кар'єрів між собою, а не абсолютний прогноз генерації конкретної СЕС [124].

Нормалізація виконується за формулою (2.6) (Розділ 2):

$$S_{sol} = \frac{GHI_i}{GHI_{max}}, \quad (2.6),$$

де $S_{sol} \in [0;1]$.

Для розрахунків використано значення $GHI_{max} = 1202.3$ кВт·год/м², яке відповідає значенню для Городенківського родовища (максимум у вибірці для 11 кар'єрів) (рис. 3.3)

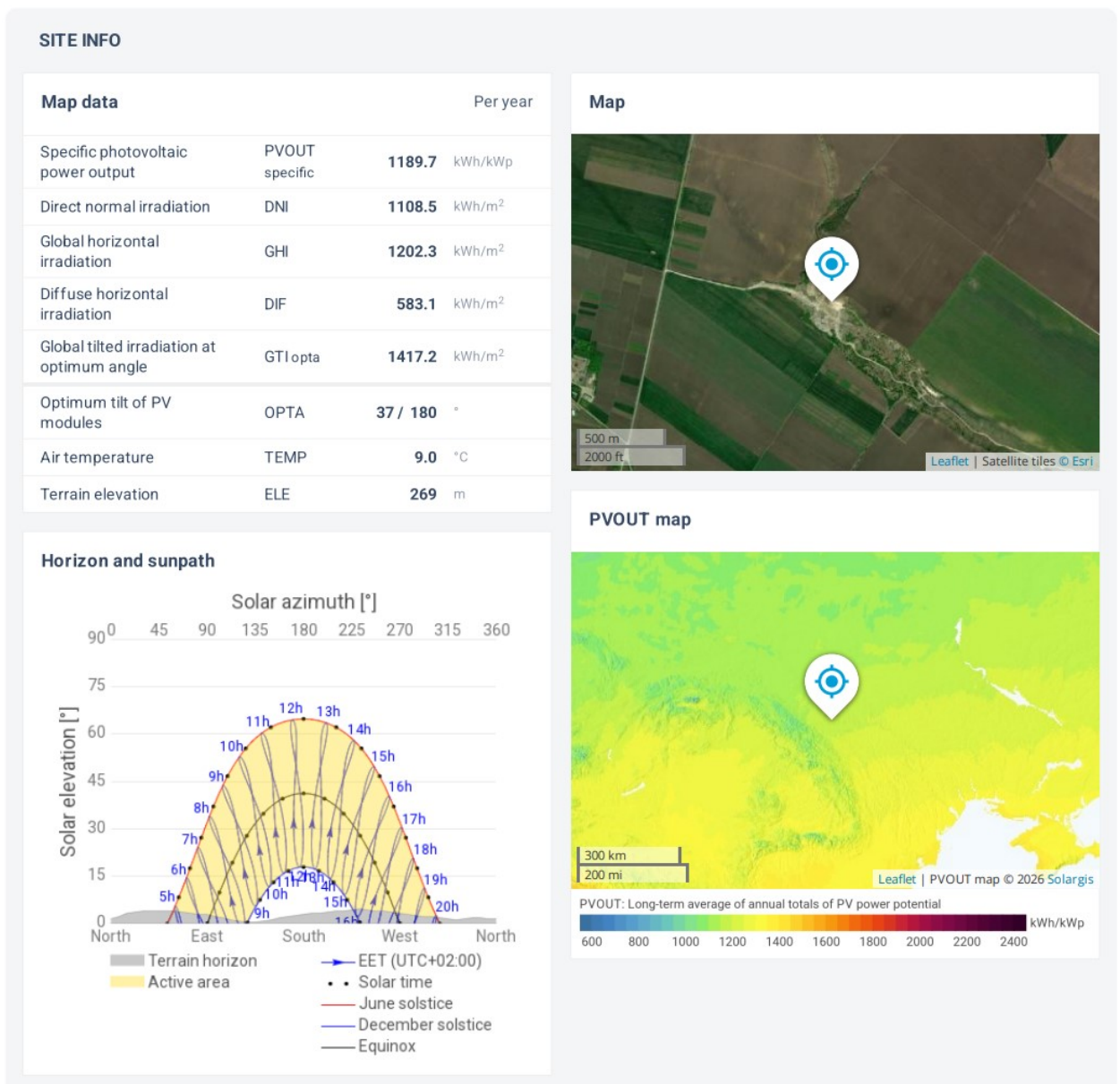


Рисунок 3.3 - Дані з вебплатформи Global Solar Atlas, використані для розрахунку індексу сонячного потенціалу S_{sol} для Городенківського кар'єру.

3.3.2 Демонстраційний розрахунок на прикладі Стриганецького кар'єру

Вихідне значення GHI для цього кар'єру отримано з вебплатформи Global Solar Atlas і наведено на рисунку 3.4, де річна сумарна сонячна радіація на горизонтальну поверхню становить:

$$GHI_i = 1152.5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2,$$

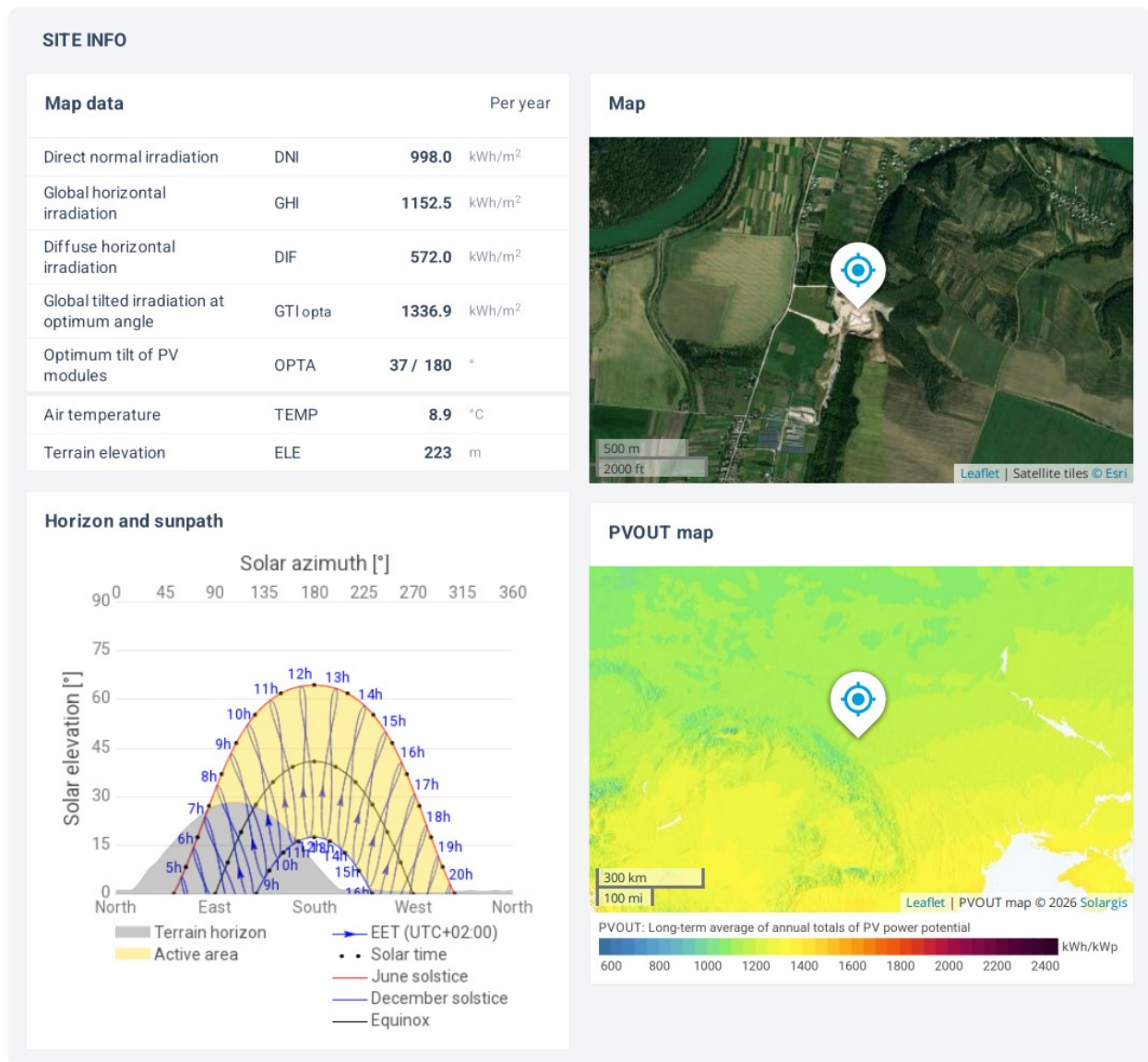


Рисунок 3.4 - Дані з вебплатформи Global Solar Atlas, використані для розрахунку індексу сонячного потенціалу S_{sol} для Стриганецького кар'єру.

Нижче наведено покрокову підстановку у формулу (2.6) для розрахунку індексу придатності за S_{sol} :

$$S_{sol\ 1} = 1152.5 / 1202.3 = 0.96$$

Після підстановки значень у формулу (2.6) для Стриганецького кар'єру отримано $S_{sol\ 1} = 0.96$. Зазначене значення узгоджується з результатами ранжування у зведеній таблиці та відповідає рангу 10 серед 11 досліджуваних

кар'єрів. Усі вихідні показники Global Solar Atlas (GHI, DNI, DIF, PVOUT, ОРТА, TEMP, ELE), а також підсумкові значення S_{sol} для решти кар'єрів вибірки внесено до таблиці 3.3, де виконано їх повний розрахунок та упорядкування за рангом.

Оскільки вибірка сформована в межах однієї області, значення сонячних показників є відносно близькими між собою, тому діапазон S_{sol} у межах цієї підвибірки є стислим; водночас за масштабування методики на територію України просторові відмінності сонячного ресурсу будуть суттєвішими, і значення S_{sol} варіюватимуться ширше, що дозволить більш чітко ідентифікувати кар'єри з вищою перспективністю для розміщення сонячної електростанції.

Таблиця 3.3 - Показники Global Solar Atlas з розрахованим індекс S_{sol} .

ID	Кар'єр	GHI, кВт·год/ м ²	DNI, кВт·год/ м ²	DIF, кВт·год/ м ²	PVOUT, кВт·год/ кВТп	OPTA, °	TEMP, °C	ELE, м	S_{sol} , 0-1	Ранг
1	Стриганецький кар'єр	1152.5	998	572	1144.2	37	8.9	223	0.96	10
2	Водники	1169.3	1056	578.7	1144.0	37	8.8	293	0.97	6
3	Городенківське	1202.3	1108.5	583.1	1189.7	37	9.0	269	1.00	1
4	Делівське	1177.3	1055.7	579.9	1150.6	36	9.0	282	0.98	4
5	Дубівецький	1167.3	1049.1	577.9	1147.9	37	8.9	257	0.97	8
6	Межигірсько-Дубовецьке	1166.4	1048.2	577.5	1144.9	37	8.8	298	0.97	9
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	1170.7	1052.9	579.1	1146.6	37	8.9	247	0.97	5
8	Москалівське родовище	1152.2	1041.4	575.6	1128.9	37	8.4	382	0.96	11
9	Олешівське	1168.4	1045.1	576.9	1154.3	37	8.9	247	0.97	7
10	Петрівське	1187.8	1083.1	582.8	1167.7	37	9.2	298	0.99	3
11	Стрільченське	1202.1	1106.8	583.4	1181.8	37	9.3	225	1.00	2

3.3.3 Висновки за результатами індексу придатності S_{sol}

- У межах вибірки 11 кар'єрів значення сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню (ГНІ) варіюють у відносно вузькому діапазоні 1152.2-1202.3 кВт·год/м², що зумовлює близькі між собою значення індексу сонячного потенціалу S_{sol} (0.96 - 1.00).
- Максимальне значення сонячного потенціалу в межах вибірки зафіксовано для Городенківського кар'єру (ГНІ_{max} = 1202.3 кВт·год/м²; $S_{sol} = 1.00$), що визначає верхню межу нормалізації та забезпечує коректне порівняння інших кар'єрів відносно найкращого варіанта в межах вибірки.
- Друге місце за сонячним потенціалом посідає Стрільченське родовище ($S_{sol} = 1.00$; ранг 2), третє - Петрівське ($S_{sol} = 0.99$; ранг 3), що свідчить про наявність чітко вираженої групи лідерів навіть у межах однієї області.
- Найнижчі значення S_{sol} отримано для Москалівського родовища ($S_{sol} = 0.958$; ранг 11) та Стриганецького кар'єру ($S_{sol} = 0.96$; ранг 10), однак різниця з лідерами є помірною, що підтверджує загальну однорідність сонячного ресурсу в регіоні дослідження.
- Отримані значення S_{sol} відображають відносну ресурсність у межах сформованої вибірки; при застосуванні методики до ширшої території (наприклад, на рівні України) очікується суттєвіше просторове розшарування значень ГНІ, а отже і ширший діапазон S_{sol} , що підвищить дискримінаційну здатність цього показника для відбору найбільш перспективних кар'єрів під СЕС.

3.4 Геотехнічна придатність S_{geo} : правило присвоєння та результати для 11 кар'єрів

3.4.1 Призначення індексу та межі застосування

Геотехнічний індекс придатності $S_{geo} \in [0;1]$ у межах цієї роботи застосовується як скринінговий індикатор геотехнічної прийнятності ділянки в багатокритеріальній моделі відбору кар'єрів для розміщення наземної СЕС, що відображає узагальнену оцінку інженерно-геологічних умов для влаштування типових конструктивних рішень. Важливо підкреслити, що S_{geo} не є інженерним розрахунком фундаментів чи стійкості, а виконує роль попередньої класифікації на етапі дистанційного відбору; детальна верифікація належить до стадій інженерно-геологічних вишукувань і геотехнічного проектування [64, 133].

Оскільки в межах Івано-Франківської області кількість кар'єрів, потенційно придатних для розміщення наземних сонячних електростанцій, є обмеженою, дослідження було цілеспрямовано зосереджено на наявній репрезентативній групі об'єктів регіону та виконано для 11 вапнякових кар'єрів. Такий вибір зумовлений не лише просторовими рамками роботи, а й практичною доцільністю формування єдиного порівнюваного набору ділянок у межах однієї адміністративної області, де природні, інфраструктурні та регуляторні умови є відносно зіставними. Водночас запропонована інтегральна модель оцінювання придатності (із застосуванням gate-множника та подальшим багатокритеріальним ранжуванням у WLC) має універсальний характер і може бути масштабована на інші регіони України. У разі розширення вибірки на кар'єри з іншою домінантною літологією геотехнічний індекс S_{geo} набуватиме більшої диференціувальної здатності, забезпечуючи коректне порівняння ділянок за класами та підвищуючи інформативність ранжування в умовах різномірної геологічної будови.

3.4.2 Правило присвоєння S_{geo} за класами

На підставі зібраних у межах дослідження вихідних відомостей щодо домінантної літології та її віднесення до відповідної літологічної групи, виконано узагальнення результатів і сформовано підсумкову таблицю геотехнічної придатності для відібраних кар'єрів (табл. 3.4). Для кожного об'єкта у таблиці наведено встановлену літологію, присвоєний клас придатності (В) згідно з прийнятим у роботі правилом дискретної класифікації, а також відповідні значення індексу S_{geo} . Отримані значення відображають результати скринінгового етапу оцінювання і використовуються як вхідний геотехнічний компонент у подальшому інтегральному ранжуванні кар'єрів.

Таблиця 3.4 - Геотехнічна придатність S_{geo} за таблицею 2.1

ІД	Назва кар'єру	Домінантна порода (літологія)	Літологічна група (за Табл. 2.1)	Клас придатності	S_{geo} (0-1)
1	Стриганецький кар'єр	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
2	Водники	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
3	Городенківське	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
4	Делівське	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
5	Дубівецький	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
6	Межигірсько-Дубовецьке	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
8	Москалівське родовище	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
9	Олешівське	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
10	Петрівське	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75
11	Стрільченське	Вапняк	Карбонатні породи (масивні)	В	0.75

3.4.3 Висновки за результатами придатності індексу S_{geo} .

- У межах сформованої вибірки 11 кар'єрів домінантною літологією є вапняк, що зумовило віднесення всіх об'єктів до однієї літологічної групи та присвоєння однакового класу геотехнічної придатності за прийнятою дискретною шкалою.
- Відповідно, індекс S_{geo} для всіх розглянутих кар'єрів має однакове значення, а показник у межах цієї вибірки виконує роль фіксації базового рівня геотехнічної прийнятності, а не фактора внутрішньої диференціації.
- Однорідність S_{geo} у вибірці свідчить, що відмінності в інтегральному ранжуванні кар'єрів визначатимуться насамперед іншими індексами моделі, тоді як геотехнічна складова виступає стабільним фоном порівняння.
- Отриманий результат є наслідком просторових рамок дослідження Івано-Франківської області і принципу добору об'єктів, а не свідченням універсальної однаковості геотехнічних умов для кар'єрів інших регіонів або інших порід.
- При масштабуванні методики на інші території України та включенні кар'єрів з різною домінантною літологією, індекс S_{geo} очікувано набуде вищої диференціовальної здатності, оскільки класи формуватимуть ширший спектр значень коефіцієнта.

3.5 Мережевий індекс S_{grid} : двокомпонентна модель доступності (ПС / ЛЕП-35 кВ)

Мережевий індекс S_{grid} використовується в роботі як скринінговий показник інфраструктурної готовності кар'єру до видачі потужності майбутньої СЕС. Він кількісно репрезентує відносну інфраструктурну доступність приєднання майданчика, узагальнюючи два базові типи мережевої близькості:

- доступність вузлового елемента електромережі - підстанції, як потенційної точки приєднання;

- доступність лінійної складової - найближчої лінії електропередачі напругою 35 кВ, що визначає потенційний обсяг лінійної частини приєднання. На цьому рівні оцінювання індекс не замінює процедуру отримання технічних умов і розрахунку плати за приєднання, а застосовується як проксі-метрика для ранжування альтернатив у межах GIS/MCDA-скринінгу [16 - 18].

3.5.1 Вхідні змінні та дискретизація (шкали PS0-PS5 та L1-L6)

Для кожного кар'єру використовуються дві відстані:

- D_{PS} (км) - відстань до *цільової* підстанції:
якщо в межах кар'єру є ПС 6-10 кВ (ознака 1/0), приймаємо $D_{PS} = 0$ за принципом використання браунфілд-території; якщо ПС 6-10 кВ відсутня - D_{PS} дорівнює відстані до найближчої релевантної ПС (у таблиці - «ПС 35 кВ»).
- D_{35} (км) - відстань до найближчої ЛЕП 35 кВ (найкоротша).

Щоб перевести метричні відстані у безрозмірну шкалу придатності $[0; 1]$, застосовано рангову дискретизацію які наведені у таблиці 2.2, 2.3.

3.5.2 Демонстраційний розрахунок індексу S_{grid} на прикладі Стриганецького кар'єру

Для Стриганецького кар'єру мережевий індекс S_{grid} формувався з урахуванням того, що в межах майданчика наявна існуюча та діюча підстанція напругою 10 кВ. За прийнятою в роботі дискретною шкалою (PS0-PS5) така ситуація відноситься до класу PS0, тобто відстань до вузлового елемента електромережі приймається $D_{PS} = 0$, а нормований показник придатності за підстанційною компонентою задається як $S_{PS} = 1.00$. Це відображає найбільш сприятливі вихідні умови для видачі потужності майбутньої СЕС, оскільки

наявність вузла приєднання зменшує потребу у створенні протяжної лінійної частини приєднання та відповідно знижує інфраструктурні витрати і часові ризики реалізації проєкту.

Водночас у межах скринінгу враховано, що фактична можливість приєднання визначається не лише фізичною наявністю ПС, але й доступним резервом пропускної спроможності та технічними обмеженнями мережі. Тому навіть за умови потенційного дефіциту вільної потужності розглядається сценарій модернізації (реконструкції) існуючої підстанції як більш пріоритетний і, як правило, інфраструктурно доцільніший шлях порівняно з будівництвом нової траси приєднання до віддаленого вузла мережі. Щоб зменшити методичний ризик «переоцінки» майданчика лише через наявність ПС 10 кВ, у формулі додатково включено лінійну компоненту - відстань до найближчої лінії електропередачі напругою 35 кВ (D_{35}). Цей параметр інтерпретується як проксі-оцінка потенційного обсягу лінійної частини приєднання у випадку, якщо для видачі потужності СЕС буде необхідним підключення до мережі вищого класу напруги або спорудження (підсилення) відповідної лінії.

Розрахунок виконується за двокомпонентною моделлю. На першому етапі значення D_{35} відносять до одного з дискретних рангів L1-L6 і перетворюють у нормоване значення S_{35} . На другому етапі інтегральний мережевий показник S_{grid} визначають як зважену суму підстанційної та лінійної складових за формулою (2.7) із вагами w_{PS} і w_{35} . За базового сценарію ($w_{PS} = 0,7$; $w_{35} = 0,3$) для Стриганецького кар'єру підсумкове значення S_{grid} відображає поєднання максимально сприятливої вузлової доступності ($S_{PS} = 1,00$) та додаткової переваги, пов'язаної з близькістю до ЛЕП-35 кВ (S_{35} відповідно до встановленого рангу). Додатково перевіряється умова низького пріоритету за формулою (2.8). У цьому випадку вона не спрацьовує, оскільки принаймні один із двох компонентів, а саме в цьому випадку обидва, перебуває в межах 30 км. Це підтверджує відсутність інфраструктурного

бар'єра, пов'язаного з одночасною віддаленістю і від підстанції, і від ЛЕП-35 кВ, на етапі попереднього відбору.

Нижче наведено розрахунок за базовими вагами, та для індексу S_{grid} для Стриганецького кар'єру:

1. ПС-компонента:

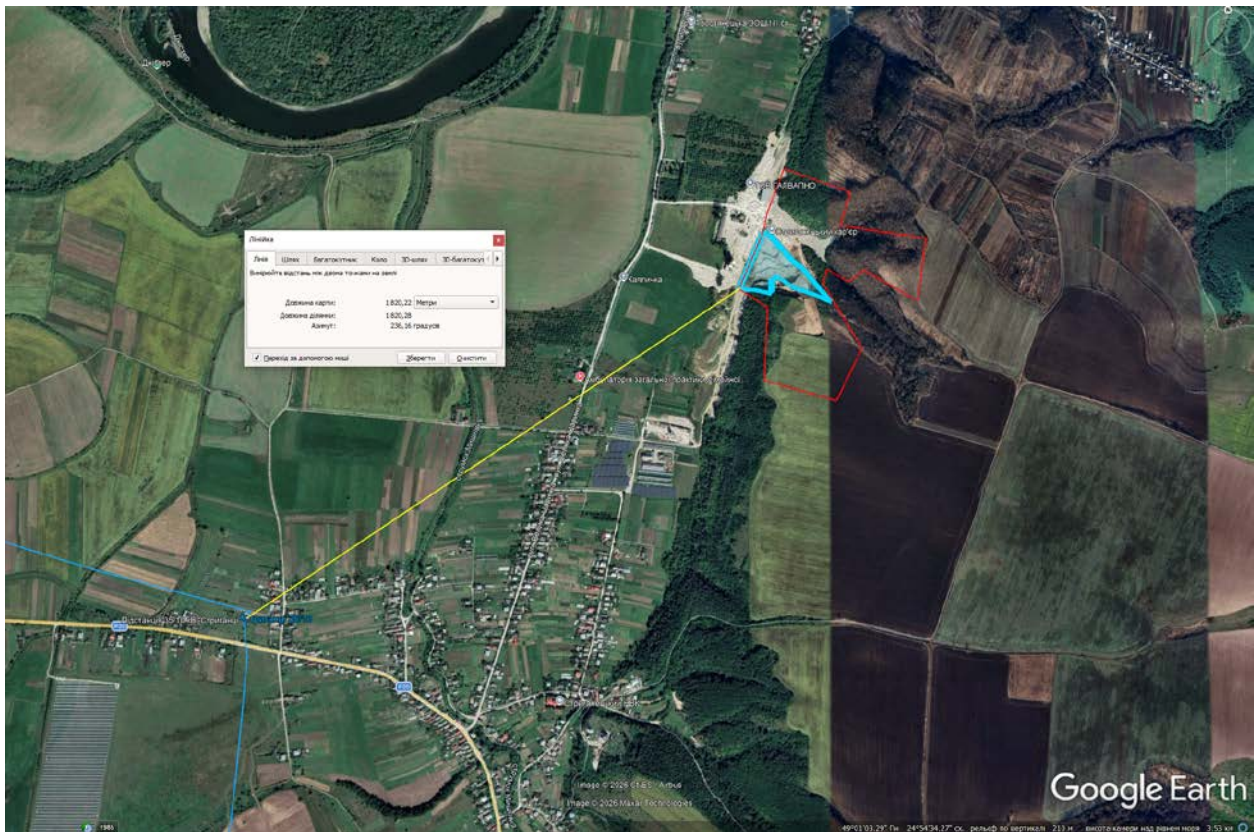
ПС 6-10 кВ у межах кар'єру 1 $\rightarrow D_{PS} = 0 \rightarrow$ ранг PS0 \rightarrow

2. ЛЕП-35 кВ компонента:

Для візуальної верифікації лінійної складової індексу S_{grid} на рисунку 3.4 подано схему для Стриганецького кар'єру з нанесеним контуром кар'єрного поля та найближчою ЛЕП напругою 35 кВ; на схемі показано найкоротшу вимірну відстань D_{35} від межі кар'єру до траси лінії, яка використовувалася для присвоєння рангу L1-L6 і визначення значення S_{35} у розрахунку.

3. Агрегація по формулі (2.7):

Після виконання демонстраційного розрахунку для Стриганецького кар'єру аналогічне оцінювання мережевої доступності було проведено для всіх інших кар'єрів вибірки. Для кожного об'єкта визначали наявність ПС 6-10 кВ у межах майданчика (1/0), вимірювали відстань до найближчої релевантної підстанції D_{PS} та відстань до найближчої ЛЕП 35 кВ D_{35} , а також присвоювали дискретні ранги за шкалами PS0-PS5 і L1-L6 з подальшим перетворенням у нормовані оцінки S_{PS} та S_{35} . Після цього за формулою (2.7) виконували зважену агрегацію з базовими вагами $w_{PS} = 0,7$ та $w_{35} = 0,3$. Усі вхідні параметри та підсумкові значення S_{grid} наведено в таблиці 3.5. За результатами розрахунків у межах вибірки значення S_{grid} варіює в діапазоні 43,5-100 балів, а середнє значення становить 75,3 бала. Водночас умова низького пріоритету за критерієм одночасної віддаленості від підстанції та ЛЕП 35 кВ за формулою (2.8) не спрацювала для жодного кар'єру.



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- лінія вимірювання відстані D_{35} - жовта;
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.5 - Визначення відстані D_{35} до найближчої ЛЕП 35 кВ для Стриганецького кар'єру.

$$D_{35} = 1.82 \text{ км} \rightarrow \text{ранг L2} \rightarrow$$

Таблиця 3.5 - Розрахункова таблиця мережевого індекс S_{grid} для 11 кар'єрів

ID	Кар'єр	ПС на території кар'єру	Відстань до найближчої ПС	Ранг ПС	S_{PS}	Відстань до найближчої ЛЕП 35 кВ	Ранг ЛЕП35	S_{35}	w_{PS}	w_{35}	S_{grid}	Gate ₃₀ , км
		ПС 6-10 кВ (1/0)	D_{PS} , км			D_{35} , км						
1	Стриганецький кар'єр	1	0.00	PS0	1.00	1.82	L2	0.80	0.7	0.3	0.94	0
2	Водники	0	1.50	PS1	0.85	1.00	L1	1.00	0.7	0.3	0.90	0
3	Городенківське	0	6.10	PS3	0.45	1.05	L2	0.80	0.7	0.3	0.56	0
4	Делівське	0	8.20	PS3	0.45	8.00	L4	0.40	0.7	0.3	0.44	0
5	Дубівецький	0	0.32	PS1	0.85	0.32	L1	1.00	0.7	0.3	0.90	0
6	Межигірсько-Дубовецьке	0	1.60	PS1	0.85	0.55	L1	1.00	0.7	0.3	0.90	0
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	0	4.40	PS2	0.70	3.50	L3	0.65	0.7	0.3	0.69	0
8	Москалівське родовище	0	11.60	PS3	0.45	9.60	L4	0.40	0.7	0.3	0.44	0
9	Олешівське	1	0.00	PS0	1.00	0.78	L1	1.00	0.7	0.3	1.00	0
10	Петрівське	0	2.80	PS2	0.70	2.30	L2	0.80	0.7	0.3	0.73	0
11	Стрільченське	1	0.00	PS0	1.00	5.50	L4	0.40	0.7	0.3	0.82	0

3.5.3 Висновки за результатами придатності за індексом S_{grid}

- Найвищі значення S_{grid} сформувалися для кар'єрів, де поєднується наявність ПС 6-10 кВ у межах майданчика (PS0, $S_{PS} = 1.00$) та мала відстань до ЛЕП 35 кВ (ранги L1-L2). Це забезпечує максимальний внесок вузлової компоненти та одночасно знижує ризик потреби у протяжній лінійній частині приєднання.
- Група кар'єрів із S_{grid} близько 89.5-94.0 балів демонструє, що навіть за відсутності ПС у межах кар'єру високий результат можливий за рахунок малої D_{PS} (PS1) у поєднанні з близькою ЛЕП-35 кВ (L1-L2), тобто за сприятливої конфігурації в локальному оточенні.
- Значення середнього рівня (приблизно 68.5-73.0 балів) відповідають ситуаціям, коли одна з компонент зберігає прийнятний рівень (наприклад, PS2 або L2-L3), але інша вже не є оптимальною; у таких випадках очікувані інфраструктурні витрати/складність приєднання є помірними й можуть компенсуватися перевагами за іншими індексами MCDA.
- Найнижчі значення (43.5-55.5 балів) характерні для об'єктів із більшими D_{PS} та/або D_{35} (PS3 та L4), що інтерпретується як потенційно підвищені витрати на лінійну частину приєднання або більша залежність від мережних обмежень і необхідності інженерного підсилення.
- Для всієї вибірки $Gate_{30км} = 0$, тобто жоден кар'єр не потрапив у сценарій «подвійної віддаленості» понад 30 км одночасно від підстанції та ЛЕП-35; це означає, що відсіювання за цим низькопріоритетним критерієм у межах досліджуваної області не відбувається, а ключову роль відіграє саме градація близькості, відображена через S_{grid} .

3.6 Оцінювання екологічної чутливості кар'єрів для розміщення СЕС (індекс S_{eco})

3.6.1 Призначення та інтерпретація індексу

Соціально-екологічний індекс $S_{eco} \in [0; 1]$ використано як скринінговий індикатор чутливості та потенційної конфліктності майданчика в соціальному й природоохоронному контекстах. Значення 1 відповідає нижчій чутливості та, відповідно, вищій придатності, тоді як значення 0 відображає вищу чутливість і нижчу придатність. Індекс призначено для пріоритезації додаткових перевірок, зокрема польових обстежень, уточнення обмежень і консультацій із громадою, а не для встановлення юридичної допустимості діяльності. Юридична допустимість у моделі забезпечується окремим Gate-блоком, який виконує функцію відсікання. Методологічно такий підхід узгоджується з сучасними підходами до оцінювання локальної соціальної прийнятності, зокрема NIMBY-ефекту, у реалізації проєктів відновлюваної енергетики, а також із потребою раннього виявлення потенційних екологічних конфліктів [7, 142].

3.6.2 Вхідні змінні та просторові операції (буфери/відстані)

Розрахунок відстаней до житлової забудови, рекреаційних територій, об'єктів природно-заповідного фонду, водних об'єктів та елементів інфраструктури виконується як типова задача аналізу просторової близькості у середовищі геоінформаційних систем. Для таких операцій методично доцільним є використання інструментів визначення найближчих об'єктів, формування таблиць мінімальних відстаней і побудови буферних зон, які дають змогу обчислювати найкоротші відстані між просторовими об'єктами та створювати зони заданої ширини [41, 44, 45, 47, 48, 52].

Для кожного кар'єру (полігон гірничого відводу чи контуром порушених земель) використовуються змінні таблиці S_{eco} :

- d_{res} (м) - мінімальна відстань до житлової забудови (проксі соціальної конфліктності).
- d_{rec} (м) - мінімальна відстань до рекреаційних територій; d_{cult} (м) - мінімальна відстань до об'єктів культурної спадщини/пам'яток природи.
- d_{rec}^* - агрегована «найближча чутливість» рекреація/культура:

$$d_{rec^*} = \min (d_{rec}, d_{cult}) \quad (2.10)$$

- d_{pzf} (м) - мінімальна відстань до меж ПЗФ (поза межами, тобто не Gate).
- p_{ind} (частка 0-1) - частка індустріальних/порушених земель у буфері (проксі «індустріального контексту»).
- N_{fauna} - кількість записів fauna (GBIF) у буфері навколо кар'єру.
- d_{rb} (м) - мінімальна відстань до найближчої реєстрації виду Червоної книги України (за даними GBIF/похідного шару).
- Буфери/шари для ГІС-побудови:
 - Буфер 1 км навколо контуру кар'єру - для розрахунку p_{ind} (площа індустріальних, порушених класів).
 - Буфер 2 км - для підрахунку N_{fauna} (GBIF Fauna).
 - Окремі операції «мінімальна відстань» (Near/Generate Near Table) до шарів: житлова забудова, рекреація, культурна спадщина/пам'ятки природи, ПЗФ, точки ЧКУ.

3.6.3 Нормалізація в підіндекси (0 / 0,5 / 1) - за формулами (2.9)-(2.16)

Усі підіндекси мають шкалу: 1 = найменша чутливість, 0 = найбільша чутливість.

1. Житло s_{res} за d_{res} (2.9):

- $d_{res} < 300 - 0$

- $300 \leq d_{res} < 500 - 0,5$

- $d_{res} \geq 500 - 1$

2. Рекреація/культура: спершу (2.10) $d_{rec}^* = \min(d_{rec}, d_{cult})$, далі

(2.11) s_{rec} :

- $d_{rec}^* < 700 - 0$

- $700 \leq d_{rec}^* < 1400 - 0,5$

- $d_{rec}^* \geq 1400 - 1$

3. ПЗФ поблизу s_{pzf} за d_{pzf} (2.12):

- $d_{pzf} < 700 - 0$

- $700 \leq d_{pzf} < 1400 - 0,5$

- $d_{pzf} \geq 1400 - 1$

4. Індустріальний контекст s_{ind} за p_{ind} (2.13):

- $p_{ind} < 0,05$ (менше 5%) - 0

- $0,05 \leq p_{ind} < 0,25 - 0,5$

- $p_{ind} \geq 0,25 - 1$

5. Тварини (GBIF fauna): перцентиль (2.14)

$$P_{fauna\ i} = \frac{r_i - 1}{n - 1},$$

де r_i - ранг N_{fauna} у вибірці з $n = 11$ (ранжування за зростанням, з усередненням при однакових значеннях). Далі (2.15) s_{fauna} :

- $P_{fauna} \geq 0,75 - 0$

- $0,25 \leq P_{fauna} < 0,75 - 0,5$

- $P_{fauna} < 0,25 - 1$

6. Червонокнижні види (ЧКУ) s_{rb} за d_{rb} (2.16):

- $d_{rb} < 1000 - 0$

- $1000 \leq d_{rb} < 3000 - 0,5$

- $d_{rb} \geq 3000$ або даних немає - 1

3.6.4 Агрегація по формулі S_{eco} (2.17) з вагами розрахунку

Інтегральний індекс визначено як зважену лінійну комбінацію (WLC):

$$S_{eco} = w_{res}S_{res} + w_{rec}S_{rec} + w_{pzf}S_{pzf} + w_{ind}S_{ind} + w_{fauna}S_{fauna} + w_{rb}S_{rb},$$

де сума ваг дорівнює 1.

Використані ваги:

- $w_{res} = 0,25$;
- $w_{rec} = 0,20$;
- $w_{pzf} = 0,20$;
- $w_{ind} = 0,15$;
- $w_{aves} = 0,15$;
- $w_{rb} = 0,05$.

3.6.5 Розрахунок вихідних даних для індексу S_{eco} на прикладі Стриганецького кар'єру

Перед виконанням розрахунку соціально-екологічного індексу S_{eco} для Стриганецького кар'єру вихідні просторові показники (мінімальні відстані та підрахунки в буферах) отримано з тематичних картосхем, підготовлених у ГІС. На цих картосхемах показано: контур кар'єру, буфери аналізу, об'єкти чутливості (житлова забудова, рекреація/культурні об'єкти, ПЗФ), а також точки біорізноманіття (GBIF Fauna і записи Червоної книги України), з яких безпосередньо зчитуються або обчислюються значення d_{res} , d_{rec} , d_{cult} , d_{pzf} , p_{ind} , N_{fauna} та d_{rb} для підстановки у формули (2.9)-(2.17).

Значення d_{res} розраховане через Google Earth і зображено на рисунку 3.5 ($d_{res} = 360$ м).



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- лінія вимірювання відстані d_{res} - жовта;
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.6 - Вимірювання відстані для показника d_{res} для Стриганецького кар'єру.

Для показника рекреаційної чутливості у межах даної роботи як найближчу рекреаційно привабливу територію було прийнято русло річки Дністер, оскільки ця ділянка формує виражений рекреаційний та водно-екологічний контекст території. Додатково врахування Дністра є обґрунтованим з огляду на його гідроекологічну значущість, антропогенне навантаження, ризики підтоплень і проблематику забруднення басейну, що розглядаються у спеціалізованих дослідженнях водно-екологічної безпеки регіону [14]. Відповідно відстань до рекреації (d_{rec}) трактовано як мінімальну відстань від контуру кар'єру до берегової лінії р. Дністер та визначено за результатами ГІС-вимірювання, поданими на рисунку 3.6 ($d_{res} = 960$ м).

Для показника рекреаційної чутливості у межах даної роботи як найближчу рекреаційно привабливу територію було прийнято русло річки Дністер, оскільки ця ділянка виступає туристичним маршрутом і формує виражений рекреаційний потенціал території; відповідно відстань до рекреації ($d_{гес}$) трактовано як мінімальну відстань від контуру кар'єру до берегової лінії р. Дністер та визначено за результатами ГІС-вимірювання, поданими на рисунку 3.6. ($d_{гес} = 960$ м)



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- лінія вимірювання відстані $d_{гес}$ - жовта;
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.7 - Вимірювання відстані для показника $d_{гес}$ для Стриганецького кар'єру.

Для показника віддаленості від природно-заповідного фонду (d_{pzf}) у межах даної роботи було визначено мінімальну просторову відстань від контуру Стриганецького кар'єру до найближчої межі об'єкта ПЗФ. Вимірювання d_{pzf} виконано засобами ГІС (операція визначення найкоротшої

відстані/NeareSt diStance) та візуально зафіксовано на картосхемі з підписом мінімальної відстані, наведеній на рисунку 3.7.



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- лінія вимірювання відстані d_{pzf} - жовта;
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.8 - Визначення мінімальної відстані від Стриганецького кар'єру до найближчої межі об'єкта природно-заповідного фонду (d_{pzf})

Для розрахунку показника індустріальності r_{ind} у межах даної роботи було оцінено «індустріальний контекст» території навколо Стриганецького кар'єру в межах буферної зони радіусом 500 м від контуру кар'єру. У межах цього буфера виконано просторове накладання з тематичним шаром землекористування/покриву та виокремлено ділянки, що відповідають індустріальним або техногенно порушеним класам (виробничі майданчики, складські/технічні території, техногенні поверхні тощо). Частку r_{ind} визначено як відношення сумарної площі цих індустріальних/порушених ділянок до

загальної площі буферної зони, після чого отримане значення використано для присвоєння підіндексу S_{ind} за формулою (2.13). Просторову схему буфера 500 м та виділених індустриальних площ наведено на рисунку 3.7. ($p_{ind} = 7\%$)



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- Буферна зона 500 м - синя;
- Полігони які відносяться до індустриального контексту - жовта
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.9 - Карта-схема розрахунку показника p_{ind} : буфер 500 м і площі індустриальних (техногенно порушених) класів землекористування

Для оцінювання орнітологічної складової соціально-екологічної чутливості у межах індексу S_{eco} використано відкриті дані про реєстрації фауни (клас Fauna) з бази GBIF за останні 10 років. Як вхідний показник прийнято N_{fauna} - кількість точок-реєстрацій Fauna, що потрапляють у буферну зону радіусом 2 км навколо контуру Стриганецького кар'єру. Просторову постановку задачі (контур кар'єру, межі буфера 2 км та розміщення точок

Fauna) наведено на рисунку 3.8, за яким виконується підрахунок N_{fauna} для подальшої нормалізації.

Оскільки абсолютні значення N_{fauna} залежать не лише від реальної присутності видів, а й від інтенсивності спостережень і просторової нерівномірності даних, у роботі застосовано відносну нормалізацію, що частково нівелює відомі зміщення даних про біорізноманіття, сформованих лише на основі фіксацій присутності видів [130]. Значення N_{fauna} для всіх 11 кар'єрів ранжуються у вибірці, після чого обчислюється перцентиль P_{fauna} за формулою (2.14) і присвоюється підіндекс S_{fauna} за правилом (2.15). Отриманий S_{fauna} інтерпретується як скринінговий індикатор пріоритетності додаткових перевірок (зокрема сезонних обстежень), а не як остаточний висновок щодо допустимості реалізації проєкту. Для Стриганецького кар'єру $N_{fauna} = 2$.



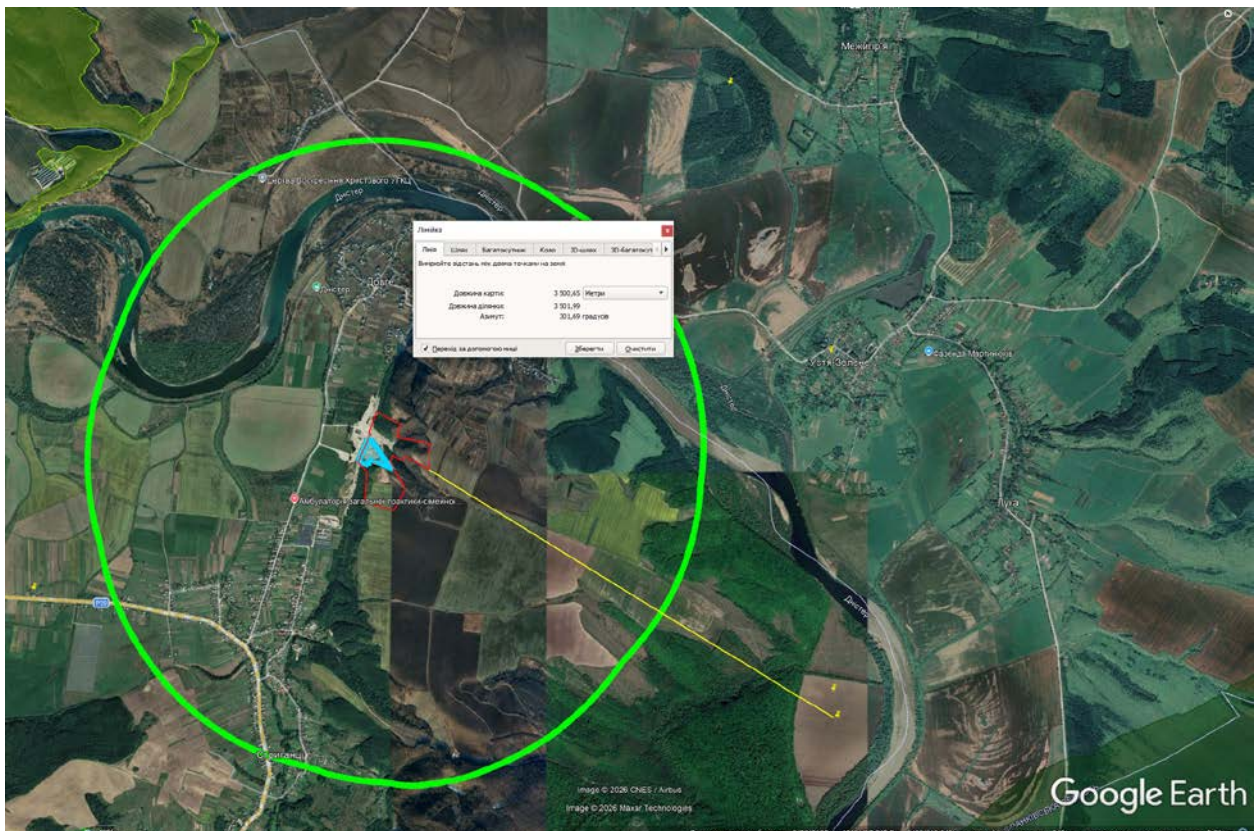
Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- Буферна зона 2000 м - зелена;
- Полігони які відносяться до індустріального контексту - жовта
- Зафіксовані записи із GBIF - жовті маркери

- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.10 - Розрахунок показника N_{fauna} для Стриганецького кар'єру в межах буферної зони.

Для оцінювання потенційної чутливості території до наявності рідкісних і охоронюваних видів у складі соціально-екологічного індексу S_{eco} використано просторовий показник віддаленості до найближчої реєстрації видів, занесених до Червоної книги України (далі - ЧКУ), з відкритих біорізноманітних даних (точкові знахідки, спостереження). У межах методики показник d_{rb} визначається як мінімальна відстань від контуру Стриганецького кар'єру до найближчої точки реєстрації червонокнижного виду (у даному підрозділі - червонокнижних рослин), після чого нормалізується у підіндекс S_{rb} за порогами (2.16). Просторове розміщення реєстрацій ЧКУ відносно кар'єру та графічне відображення найкоротшої відстані d_{rb} наведено на рисунку 3.9, який використовується як візуальна верифікація вихідного значення перед підстановкою у розрахунок і становить $d_{\text{rb}} = 3500$ м.



Умовні позначення:

- Контур кар'єру червоний;
- Буферна зона 2000 м - зелена;
- Відстань до найближчої реєстрації червоно книжних рослин - жовта
- межі із ДЗК - блакитна.

Рисунок 3.11 - Визначення мінімальної відстані d_{fb} від Стриганецького кар'єру до найближчої реєстрації червонокнижних рослин (ЧКУ)

3.6.6 Демонстраційний розрахунок індексу S_{eco} на прикладі Стриганецького кар'єру

1. Агрегована відстань до рекреації/культури (2.10):

Оскільки d_{cult} для цього кар'єру відсутня у вхідній таблиці, у розрахунку використовується наявна відстань до рекреації:

$$d_{rec*} = \min(d_{rec}, d_{cult}) = \min(960; \text{немає даних}) = 960 \text{ м}$$

2. Розрахунок перцентиль P_{fauna} для фауни за даними із GBIF (2.14)

У вибірці $n = 11$ кар'єрів значення N_{fauna} ранжуються за зростанням. Для Стриганецького кар'єру $N_{fauna} = 2$. У загальному ряді значень вибірки $N_{fauna} = 2$ трапляється тричі, тому використано усереднений ранг цієї групи:

- впорядкований ряд N_{fauna} : 0; 1; 1; 2; 2; 2; 3; 6; 7; 9; 13
- значення 2 займає позиції 4-6, отже усереднений ранг $r = (4 + 6) / 2 = 5$
- $P_{fauna} = (r - 1) / (n - 1) = (5 - 1) / (11 - 1) = 4 / 10 = 0,40$

3. Присвоєння підіндексів 0 / 0,5 / 1

3.1 S_{res} за d_{res} формула (2.9):

- $d_{res} = 360$ м належить інтервалу 300-500 м;
- $S_{res} = 0,5$.

3.2 S_{rec} за d_{rec*} формула (2.11):

- $d_{rec*} = 960$ м належить інтервалу 700-1400 м;
- $S_{rec} = 0,5$.

3.3 S_{pzf} за d_{pzf} формула (2.12):

- $d_{pzf} = 2750$ м ≥ 1400 м;

$$- S_{pzf} = 1.$$

3.4 S_{ind} за p_{ind} формула (2.13):

$$- p_{ind} = 0,07 \geq 0,5 ;$$

$$- S_{ind} = 0,5.$$

3.5 S_{fauna} за P_{fauna} формула(2.15):

$$- P_{fauna} = 0,40 \text{ належить інтервалу } 0,25-0,75;$$

$$- S_{fauna} = 0,5.$$

3.6 S_{rb} за d_{rb} формула (2.16):

$$- d_{rb} = 3500 \text{ м} \geq 3000 \text{ м};$$

$$- S_{rb} = 1.$$

4. Агрегація S_{eco} по формулі (2.17) з використанням ваг:

$$\begin{aligned} S_{eco} &= 0,25 \cdot S_{res} + 0,20 \cdot S_{rec} + 0,20 \cdot S_{pzf} + 0,15 \cdot S_{ind} + 0,15 \\ &\quad \cdot S_{fauna} + 0,05 \cdot S_{rb} = \\ &= 0,25 \cdot 0,50,2 + 0 \cdot 0,5 + 0,20 \cdot 1 + 0,15 \cdot 0 + 0,15 \cdot 0,5 \\ &\quad + 0,05 \cdot 1 = 0,125 + 0,10 + 0,20 + 0 + +0,075 + 0,05 = \\ &= 0,55 \end{aligned}$$

6. Коротка інтерпретація результату для Стриганецького кар'єру

Отримане значення $S_{eco} = 0,55$ (55 балів) відображає середній рівень соціально-екологічної чутливості в межах застосованої трирівневої нормалізації. Найбільший позитивний внесок у результат забезпечує достатня віддаленість від ПЗФ ($S_{pzf} = 1$) та значна відстань до найближчої реєстрації ЧКУ ($S_{rb} = 1$), тоді як зниження індексу зумовлене помірною близькістю до житла та рекреації ($S_{res} = 0,5$; $S_{rec} = 0,5$) і середнім перцентилем концентрації записів Fauna за GBIF у межах вибірки ($S_{fauna} = 0,5$). Важливо, що S_{eco} використовується як індикатор пріоритетності подальших перевірок і уточнень, тоді як юридичні обмеження відсікаються окремим Gate-блоком.

3.6.7 Формування таблиці вхідних даних та обчислення S_{eco} для вибірки кар'єрі

Після виконання розрахунку для Стриганецького кар'єру аналогічну послідовність дій застосовано для решти об'єктів вибірки: для кожного кар'єру

Всі первинні вхідні параметри наведено у таблиці 3.5, отримані за допомогою засобів ГІС-аналізу та підрахунків (мінімальні відстані до житлової забудови, рекреаційних/культурних об'єктів і ПЗФ, частку індустріальних/порушених земель у буфері 0,5 км, кількість реєстрацій Fauna за GBIF у 2-км буфері, а також відстань до найближчої реєстрації видів Червоної книги України), включно з допоміжним показником $d_{rec} = \min(d_{rec}; d_{cult})$.

У таблиці 3.6 подано результати подальшої обробки цих даних: розрахунок перцентиля P_{fauna} у межах вибірки, присвоєння підіндексів S_{res} , S_{rec} , S_{pzf} , S_{ind} , S_{fauna} , S_{rb} за пороговими правилами (2.9)-(2.16) та підсумкову агрегацію у інтегральний показник S_{eco} за формулою (2.17) з переведенням результату до шкали [0;1], розрахунки наведені у таблиці 3.7. Це забезпечує уніфіковане порівняння об'єктів за рівнем соціально-екологічної чутливості та дає змогу включити S_{eco} до загальної процедури інтегрального оцінювання придатності кар'єрів.

Таблиця 3.6 - Соціально-екологічний індекс S_{eco} для 11 кар'єрів: вхідні показники, підіндекси та інтегральне значення

№	Назва кар'єру	Відстань до житла, м d_{reS}	Відстань до рекреації, м d_{rec}	Відстань до об'єктів культури, м d_{cult}	Мінімальна рекреація/ культура, м d_{rec*}	Відстань до меж ПЗФ, м d_{pzf}	Частка індустр., порушених (0-1) p_{ind}	GBIF Фауна у буфері, к-сть N_{fauna}	Відстань до ресстрації ЧКУ, м d_{rb}
1	Стриганецький кар'єр	360	960	-	960	2750	0.07	2	3500
2	Водники	630	200	114	114	0	0.01	13	850
3	Городенківське	1400	6700	-	6700	3850	0	9	2730
4	Делівське	225	1480	-	1480	0	0.01	2	1600
5	Дубівецький	500	0	400	0	0	0.06	6	1450
6	Межигірсько-Дубовецьке	650	0	200	0	0	0	7	1480
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	520	100	2700	100	0	0.03	2	1650
8	Москалівське родовище	850	300	-	300	3340	0	1	2400
9	Олешівське	445	1600	4500	1600	10	0.04	1	1650
10	Петрівське	2000	620	-	620	10	0	0	930
11	Стрільченське	162	4100	-	4100	1260	0.055	3	440

Таблиця 3.7 - Результати нормалізації, підіндекси та інтегральний показник S_{eco}

№	Назва кар'єру	Перцентиль у вибірці (0-1) P_{fauna}	Підіндекс житла S_{reS}	Підіндекс рекреації/культури S_{rec}	Підіндекс ПЗФ S_{pzf}	Підіндекс індустріальності S_{ind}	Підіндекс Fauna (GBIF) S_{fauna}	Підіндекс ЧКУ S_{rb}	Інтегральний індекс (0-1) S_{eco}
1	Стриганецький кар'єр	0.40	0.5	0.5	1	0.5	0.5	1	0.63
2	Водники	1.00	1	0	0	0	0	0	0.25
3	Городенківське	0.90	1	1	1	0	0	1	0.70
4	Делівське	0.40	0	1	0	0	0.5	0.5	0.30
5	Дубівецький	0.70	1	0	0	0.5	0.5	0	0.40
6	Межигірсько-Дубовецьке	0.80	1	0	0	0	0	0	0.25
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	0.40	1	0	0	0	0.5	0.5	0.35
8	Москалівське родовище	0.15	1	0	1	0	1	0.5	0.63
9	Олешівське	0.15	0.5	1	0	0	1	0.5	0.50
10	Петрівське	0	1	0	0	0	1	0	0.40
11	Стрільченське	0.60	0	1	1	0	0.5	0	0.48

3.6.8 Висновки за результатами придатності за індексом S_{eco} .

Науковий аналіз результатів за отриманими значеннями S_{eco}

- Загальна варіативність показника в межах вибірки є помірною: S_{eco} змінюється від 0,25 до 0,68 (тобто 25-68 бала), середнє значення становить близько 0,42 (42 бала), медіана - 0,38 (38 бала). Це означає, що для більшості кар'єрів соціально-екологічний контекст є “середньої” чутливості за прийнятою трирівневою нормалізацією, а крайні значення формуються поодинокими сильними чинниками (дуже мала відстань до ПЗФ/ЧКУ або, навпаки, велика віддаленість за ключовими критеріями).
- Лідери за S_{eco} (найменша очікувана чутливість у скринінговій постановці) формують “верхню групу”: Городенківське (0,68) і Москалівське (0,63). Їхній результат обумовлений комбінацією високих підіндексів за критеріями віддаленості до житла та/або ПЗФ і прийнятним рівнем “червонокнижного” компонента (S_{rb} не нижче 0,5), а також сприятливою позицією за відносною нормалізацією Fauna (для Москалівського - $S_{fauna} = 1$).
- Середньо-високі значення демонструють Стриганецький (0,55) та Олешівський (0,50): у першому випадку індекс підтримується великою відстанню до ПЗФ та відсутністю близьких ЧКУ-реєстрацій ($S_{pzf} = 1$; $S_{rb} = 1$), але стримується помірною близькістю до житла та рекреації ($S_{res} = 0,5$; $S_{rec} = 0,5$) і середнім перцентилем Fauna ($S_{fauna} = 0,5$); у другому - позитив формує низький перцентиль Fauna ($S_{fauna} = 1$) і прийнятний d_{rb} ($S_{rb} = 0,5$), тоді як ключовий негатив задає дуже мала відстань до ПЗФ ($S_{pzf} = 0$).
- Найнижчі значення (підвищена скринінгова чутливість) зафіксовано для Водники (0,25), Межигірсько-Дубовецького (0,275) та Делівського (0,30). Для цих об'єктів домінує сукупність “негативних” ознак у нормалізованій шкалі - поєднання малої відстані до ПЗФ і/або рекреаційних територій та/або близьких ЧКУ-реєстрацій, а для Водників

додатково фіксується найвищий перцентиль Fauna у вибірці ($S_{fauna} = 0$), що разом призводить до мінімального підсумкового балу.

- Важливий методичний результат таблиці: підіндекс індустріальності S_{ind} у наданих даних не диференціює об'єкти (p_{ind} нижче 10% у вибірці), тому реальне ранжування визначається п'ятьма компонентами - S_{res} , S_{rec} , S_{pzf} , S_{fauna} і S_{rb} . Це корисний висновок для інтерпретації: за поточних вхідних даних “індустріальний контекст” не є фактором, що пояснює різницю між кар'єрами, тоді як найбільший вплив мають близькість/віддаленість до ПЗФ, рекреаційних об'єктів і наявність близьких ЧКУ-реєстрацій.

Отримані значення S_{eco} формують робочу шкалу пріоритезації подальших перевірок: кар'єри з нижчими значеннями (орієнтовно 0,25-0,35) потребують першочергового уточнення просторових обмежень і польової верифікації (насамперед щодо ПЗФ/ЧКУ та рекреаційної компоненти), тоді як об'єкти з вищими значеннями (понад 0,55-0,60) у скринінговому сенсі мають відносно менш конфліктний соціально-екологічний контекст; при цьому S_{eco} слугує індикатором пріоритетності перевірок і не замінює Gate-відсікання та подальші регуляторні процедури оцінювання впливів.

3.7.1 Розрахунок коефіцієнта експозиційної придатності кар'єрів

k_{exp} та k_{exp}^*

Вхідні геометричні параметри та змінні

Для кожного кар'єру розраховуємо:

- L_{maj} , м - довжина довгої осі контуру кар'єру;
- L_{min} , м - довжина короткої осі;
- θ , ° - азимут довгої осі ($0^\circ = Пн$);
- δ , ° - приведенне відхилення (у Вашому Excel-шаблоні воно збережене у колонці θ');
- e - витягнутість;

- k_{exp} - базова експозиційна придатність за класом δ ;
- множник форми;
- k_{exp}^* - скоригована експозиційна придатність з обмеженням діапазону.

Відхилення δ класифікується на чотири класи придатності (A-D) з присвоєнням коефіцієнту k_{exp} :

- A: $\delta \leq 15^\circ \Rightarrow k_{exp} = 1.00$
- B: $15^\circ < \delta \leq 45^\circ \Rightarrow k_{exp} = 0.92$
- C: $45^\circ < \delta \leq 60^\circ \Rightarrow k_{exp} = 0.86$
- D: $\delta > 60^\circ \Rightarrow k_{exp} = 0.50$

Наступним кроком застосовуємо поправку на витягнутість (форма кар'єру), визначається за формулою (2.19):

$$e = \frac{L_{maj} - L_{min}}{L_{maj} + L_{min}}$$

Далі застосовується множник форми (2.21) при $\gamma = 0.30$:

$$m_{form} = 1 + \gamma \cdot e \cdot (\cos(\pi \cdot \delta_{90}/90^\circ) - 0.5),$$

де $\delta_{90} = \min(\delta, 90^\circ)$ (2.20).

Проміжний добуток:

$$k_{prom} = k_{exp} \cdot m_{form}.$$

Фінальний скоригований коефіцієнт із застосуванням обмеження по заданих межах (2.21-2.22):

$$k_{exp}^* = \text{clip}(k_{prom}, 0.50, 1.05).$$

3.7.2 Демонстраційний розрахунок для Стриганецького кар'єру

Нижче наведено покроковий розрахунок із використанням ГІС спостережень для Стриганецького кар'єру.

1. Вхідні дані:

$$L_{maj} = 639\text{м};$$

$$L_{min} = 255\text{м};$$

$$\theta = 275^\circ;$$

$$\delta = 95^\circ.$$

2. Клас: $\delta = 95^\circ = D$, тому $k_{exp} = 0.50$.

3. Витягнутість:

$$e = \frac{639 - 255}{639 + 255} = \frac{384}{894} = 0.430.$$

4. $\delta_{90} = \min(95, 90) = 90^\circ$. Множник форми:

$$m_{form} = 0.809.$$

5. Добуток і обмеження:

$$k_{prom} = 0.50 \cdot 0.809 = 0.404.$$

Оскільки $0.404 < 0.50$, застосовується нижня межа:

$$k_{exp}^* = 0.50.$$

Далі, на основі виконаних геометричних замірів контуру кожного кар'єру (довга та коротка осі L_{maj} , L_{min} , орієнтація довгої осі θ і приведенне відхилення δ), було здійснено послідовний розрахунок експозиційної придатності: спочатку визначали клас відхилення та базове значення k_{exp} , далі обчислювали витягнутість e і поправочний множник форми, після чого отримували скоригований коефіцієнт k_{exp}^* з обмеженням діапазону значень. За аналогічним принципом, як показано на демонстраційному прикладі Стриганецького кар'єру, розрахунки виконано для всіх 11 кар'єрів вибірки; підсумкові вхідні параметри та результати k_{exp}^* зведені у таблицю 3.7.

Таблиця 3.8 - Експозиційна придатність для 11 кар'єрів

№	Назва кар'єру	L_{maj} , м	L_{min} , м	θ , °	δ , ° (приведене відхилення)	e	Клас	k_{exp}	m_{form}	k_{exp}^*
1	Стриганецький кар'єр	639	255	275	95	0.43	D	0.50	0.81	0.50
2	Водники	918	325	217	37	0.48	B	0.92	0.97	0.89
3	Городенківське	363	217	221	41	0.25	B	0.92	0.97	0.90
4	Делівське	381	168	127	37	0.39	B	0.92	0.97	0.90
5	Дубівецький	1250	444	249	69	0.48	D	0.50	0.82	0.50
6	Межигірсько-Дубовецьке	2022	744	215	35	0.46	B	0.92	0.99	0.90
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	605	491	180	0	0.10	A	1.00	1.02	1.02
8	Москалівське родовище	411	241	206	26	0.260	B	0.92	1.01	0.93
9	Олешівське	934	105	229	49	0.80	C	0.86	0.85	0.73
10	Петрівське	394	336	148	58	0.08	C	0.86	0.98	0.84
11	Стрільченське	613	243	296	116	0.43	D	0.50	0.86	0.50

3.7.3 Дорожня доступність кар'єрів: розрахунок k_{surf} , k_{dist} і k_{road}

Дорожня доступність у скринінгу використовується як проксі логістичних бар'єрів (підвезення конструкцій, бетону/щебеню, важкої техніки; сезонна прохідність; потенційні витрати на підсилення, ремонт під'їздів). У межах методики Розд. 2 цей блок подано трьома послідовними коефіцієнтами: k_{surf} (якість покриття), k_{dist} (віддаленість від твердого покриття) та інтегральний k_{road} , який надалі входить до логістично-підготовчої складової придатності кар'єру і розраховується за послідовністю:

1. Для кожного кар'єру визначено:

- Покриття - тип покриття під'їзної дороги (за атрибутами OSM *surface*; за потреби - візуальна верифікація по знімках) [59, 112];
- $d_{asphalt}$ - найкоротша відстань від контуру кар'єру до найближчої дороги з підтвердженим твердим покриттям, км (у цій таблиці - км).

Формули перетворення у коефіцієнти

2. Коефіцієнт покриття k_{surf} за типом (2.23):

асфальт - 1.00; щебінь - 0.92; змішане - 0.86; ґрунт - 0.78; невідомо - 0.85.

3. Коефіцієнт відстані до асфальту k_{dist} за $d_{asphalt}$ (2.24):

$d \leq 0.5 \rightarrow 1.00$; $0.5 < d \leq 2 \rightarrow 0.95$; $2 < d \leq 5 \rightarrow 0.88$; $5 < d \leq 10 \rightarrow 0.78$; $d > 10 \rightarrow 0.65$; невідомо $\rightarrow 0.80$.

4. Інтегральний коефіцієнт дорожньої доступності (2.25):

$$k_{road} = \text{clip}(k_{surf} \cdot k_{dist}; 0.50; 1.00),$$

де clip- обмеження значення в межах [0.50; 1.00].

Демонстраційний розрахунок коефіцієнту k_{road} для Стриганецького кар'єру.

1. Вхідні дані:

- покриття = щебінь,
- $d_{asphalt} = 0.35$ км.

2. Присвоєння: $k_{surf} = 0.92$; $d \leq 0.5 \Rightarrow k_{dist} = 1.00$.

3. Розрахунок: $k_{road} = \text{clip}(0.92 \cdot 1.00) = 0.92$ (обрізання не змінює)

За аналогічним підходом були виконані заміри та розрахунки на основі ГІС-спостережень (картографічного аналізу) для решти кар'єрів вибірки; узагальнені результати наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.9 - Дорожня доступність за індексами (k_{surf} , k_{dist} , k_{road}) для 11 кар'єрів

№	Назва кар'єру	Тип покриття	d_{asphalt} , км	k_{surf}	k_{dist}	k_{road}
1	Стриганецький кар'єр	щебінь	0.35	0.92	1.00	0.92
2	Водники	щебінь	1.40	0.92	0.95	0.87
3	Городенківське	змішане	0.79	0.86	0.95	0.82
4	Делівське	щебінь	0.35	0.92	1.00	0.92
5	Дубівецький	асфальт	0	1.00	1.00	1.00
6	Межигірсько-Дубовецьке	щебінь	0.40	0.92	1.00	0.92
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	щебінь	5.00	0.92	0.88	0.81
8	Москалівське родовище	щебінь	1.60	0.92	0.95	0.87
9	Олешівське	щебінь	0.72	0.92	0.95	0.87
10	Петрівське	щебінь	1.35	0.92	0.95	0.87
11	Стрільченське	асфальт	0.03	1.00	1.00	1.00

3.7.4 Розрахунок індексу придатності S_{log}

У межах скринінгу логістично-підготовчу придатність кар'єру доцільно описувати простим проксі-індексом, який відображає два практичні джерела потенційних додаткових витрат і ризиків календарного графіка будівництва СЕС:

1. потребу в переплануванні/земляних роботах через несприятливу експозицію домінуючих поверхонь кар'єру (коефіцієнт k_{exp}^*);
2. складність під'їзду важкої техніки та логістики поставок через якість/тип під'їзної дороги та віддаленість від асфальтованого покриття (коефіцієнт k_{road}).

Таке трактування узгоджується з тим, що підготовка ділянки, вирівнювання та внутрішня інфраструктура є помітними складовими у вартості наземних СЕС, а дорожній доступ є базовою умовою будівництва й експлуатації [124, 135]. Для оцінки доріг на етапі дистанційного скринінгу використано відкриті дані OSM та візуальну перевірку за супутниковими знімками; при цьому атрибути OSM щодо класу дороги та типу покриття трактуються як індикативні [76, 80, 110].

Індекс визначається як добуток двох коефіцієнтів із обмеженням у фіксованих межах:

$$S_{log,i} = \text{clip}(k_{exp,i}^* \cdot k_{road,i}; 0.40; 1.05), \quad (2.26)$$

де $\text{clip}(x; a; b)$ - функція обмеження: якщо $x < a$, то результат = a ; якщо $x > b$, то результат = b ; інакше результат = x . Межі 0.40-1.05 застосовано, щоб не перетворювати проксі-показник у «фатальне» обмеження та не давати надмірних бонусів на скринінговому рівні.

Демонстраційний розрахунок для 3 кар'єрів

Нижче наведено покроковий розрахунок за формулою (2.26) для Стриганецького кар'єру.

- $k_{exp}^* = 0,500$
- $k_{road} = 0,800$
- Добуток: $0,500 \cdot 0,800 = 0,40$
- Обрізання (0.40-1.05): $S_{log} = 0,40$ (межі не спрацьовують)

Далі аналогічний розрахунок за тим самим алгоритмом було виконано для всіх інших кар'єрів вибірки. Для кожного об'єкта зберігалася однакова послідовність обчислень. Результати наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.10 - Розрахунок за індексом придатності S_{log} для 11 кар'єрів

ID	Кар'єр				
1	Стриганецький кар'єр	0,50	0,92	0,46	0,46
2	Водники	0,89	0,87	0,77	0,77
3	Городенківське	0,90	0,82	0,74	0,74
4	Делівське	0,90	0,92	0,83	0,83
5	Дубівецький	0,50	1,00	0,50	0,50
6	Межигірсько-Дубовецьке	0,90	0,92	0,83	0,83
7	Межигірсько-Маринопільське родовище	1,02	0,81	0,83	0,83
8	Москалівське родовище	0,93	0,87	0,81	0,81
9	Олешівське	0,73	0,87	0,64	0,64
10	Петрівське	0,84	0,87	0,73	0,73
11	Стрільченське	0,50	1,00	0,50	0,50

3.8 Інтегральна оцінка придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення СЕС (Gate + WLC): базовий екологічно-орієнтований сценарій ваг і підсумкове ранжування

У цьому підрозділі подано фінальне узагальнення результатів розрахунків часткових індексів придатності у вигляді інтегрального показника S_{core} (0-100) для 11 відпрацьованих кар'єрів, відібраних у межах Івано-Франківської області. Розрахунок виконано у двоступеневій логіці, обґрунтованій у Розділі 2:

- етап 1 - Gate-скринінг (некомпенсаційний блок): перевірка критичних просторово-нормативних обмежень із застосуванням Gate-множника (0 або 1), який обнуляє кінцевий бал для об'єктів, що не відповідають базовим умовам допустимості;
- етап 2 - WLC-агрегація (компенсаційний блок): ранжування об'єктів, що пройшли Gate ($Gate = 1$), за зваженою лінійною комбінацією нормованих часткових індексів S_j у шкалі [0;1].

Інтегральний показник визначається як:

$$S_{core\ i} = 100 \cdot Gate_i \cdot (\sum_{j=1}^n w_j \cdot S_{j\ i}) \quad (2.1)$$

3.8.1 Принцип узгодження шкал

Перед інтеграцією всі часткові індекси приведені до єдиної шкали [0;1]. Це є необхідною умовою коректності WLC-процедури, оскільки лише за цієї умови вагові коефіцієнти w_j мають однозначну інтерпретацію як відносні внески критеріїв у підсумковий бал. У підсумкових розрахунках використовуються нормовані значення S_{sol} , S_{eco} , S_{geo} , S_{grid} , S_{log} у шкалі [0;1], [37, 82, 135].

3.8.2 Базовий сценарій ваг як екологічно-орієнтований підхід

Як базовий сценарій для фінального ранжування прийнято екологічно-орієнтований розподіл ваг, у якому найбільша вага надана екологічному критерію [136, 142]. Такий вибір відповідає прикладній меті роботи: оцінювати можливості ревіталізації відпрацьованих кар'єрів під СЕС за логікою мінімізації екологічних ризиків і конфліктів землекористування, а також забезпечення реалістичної інженерної здійсненності підключення до електромереж.

У межах даної роботи для інтегральної оцінки прийнято наступний ваговий розподіл ($\Sigma w = 1.00$):

- $w_{eco} = 0.30$ (екологічні обмеження)
- $w_{grid} = 0.25$ (підключення до ЛЕП / ПС, мережевий компонент)
- $w_{sol} = 0.20$ (сонячний потенціал)
- $w_{geo} = 0.15$ (геотехнічна придатність / порода)
- $w_{log} = 0.10$ (логістика та CAPEX-проксі)

Обґрунтування ієрархії критеріїв у базовому сценарії:

- екологічні обмеження (0.30) прийнято як найвищий пріоритет, оскільки саме цей блок визначає ризик неприйнятності проєкту з точки зору охорони довкілля та потенційних конфліктів із природоохоронними режимами. У межах концепції ревіталізації кар'єрів під СЕС екологічна прийнятність є ключовою умовою не лише для формального погодження, а й для довгострокової стійкості реалізації;
- мережевий компонент (0.25) поставлено на друге місце як один із найбільш затратних і потенційно лімітуючих чинників. Віддаленість і доступність приєднання можуть суттєво підвищувати витрати та складність реалізації, а в окремих випадках фактично унеможливити підключення СЕС до електричної мережі без диспропорційного зростання інфраструктурних робіт. Додатково підкреслено екологічну складову мережевих рішень: будівництво нових опор, просік або

- під'їздів для монтажу може супроводжуватися вирубкою деревної рослинності, порушенням ґрунтового покриву та фрагментацією біотопів. Тому мережевий критерій у цій роботі розглядається не лише як техніко-економічний, але й як опосередкований екологічний ризик;
- сонячний потенціал (0.20) визначено як третій за важливістю критерій, оскільки об'єкти дослідження локалізовані в межах однієї області, і значення сонячних показників у вибірці є близькими одне до одного. Сонячний ресурс залишається принципово важливим для продуктивності СЕС, однак у межах регіонально компактної вибірки він менш дискримінуючий для ранжування, ніж екологічні та мережеві чинники;
 - геотехнічна придатність (0.15) розташована на четвертому місці: вона істотно впливає на проектування, планувальні рішення, стабільність бортів/уступів і складність підготовки майданчиків. У межах даної роботи сформовано та застосовано таблицю експертної придатності гірських порід для розміщення СЕС (див. табл. 2.1), у якій літологічний тип породи зіставлено з відповідним коефіцієнтом геотехнічної придатності для проектування та підготовки майданчиків. Зазначена таблиця забезпечує формалізоване перетворення геологічної (літологічної) інформації на числове значення індексу забезпечуючи відтворюваність і порівнюваність оцінок між об'єктами, а також створюючи механізм коригування цього компонента при масштабуванні методики на інші родовища та відмінні геологічні умови (зокрема, для порід із іншими інженерно-геологічними властивостями). Таким чином, геотехнічний критерій зберігає методичну значущість у моделі, однак у прийнятому ваговому розподілі його внесок є помірним порівняно з екологічним та мережевим блоками.
 - логістика та САРЕХ-проксі (0.10) має найменший ваговий коефіцієнт. Це обґрунтовано двома факторами:

- по-перше, для всіх кар'єрів вибірки наявні під'їзні дороги, тобто випадки повної відсутності транспортної доступності не фіксуються.;
- по-друге, на етапі дистанційного скринінгу немає повної визначеності щодо фінальної морфології кар'єру після завершення виробітку. Щоб уникнути штучного заниження або завищення підсумкового балу через невизначеність майбутнього стану кар'єрного рельєфу, логістично-CAPEX компонент зафіксовано на рівні 0.10 як стабілізуючу, але не домінуючу складову інтегральної оцінки.

Оскільки підсумкове ранжування залежить від прийнятого розподілу ваг, екологічно-орієнтований сценарій доцільно розглядати не як єдино можливий, а як базовий варіант, стійкість якого має перевірятися шляхом сценарного аналізу та зміни вагових коефіцієнтів [123, 139, 140].

3.8.3 Приклад розрахунку S_{score} для Стриганецького кар'єру

Вхідні дані:

- $Gate_1 = 1$
- $S_{sol, 1} = 0.959$
- $S_{eco, 1} = 0.625$
- $S_{geo, 1} = 0.750$
- $S_{grid, 1} = 0.940$
- $S_{log, 1} = 0.400$

Розрахунок:

$$S_{score,1} = 100 \cdot 1 \cdot (0.20 \cdot 0.959 + 0.30 \cdot 0.625 + 0.15 \cdot 0.750 + 0.25 \cdot 0.940 + 0.10 \cdot 0.400) = 100 \cdot (0.192 + 0.188 + 0.113 + 0.235 + 0.040) = 100 \cdot 0.767 = 77$$

За аналогічним алгоритмом, продемонстрованим на прикладі Стриганецького кар'єру, виконано розрахунок інтегрального показника для всіх кар'єрів вибірки; відповідні вхідні значення часткових індексів, Gate-множника та результати ранжування наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.11 Підсумкова таблиця S_{score} та ранжування (11 кар'єрів)

Ранг	ID	Кар'єр	Gate	S_{sol}	S_{eco}	S_{geo}	S_{grid}	S_{log}	S_{score}
1	1	Стриганецький кар'єр	1	0.96	0.63	0.75	0.94	0.46	77
2	9	Олешівське	1	0.97	0.50	0.75	1.00	0.64	76
3	3	Городенківське	1	1.00	0.70	0.75	0.56	0.74	72
4	11	Стрільченське	1	1.00	0.48	0.75	0.82	0.50	71
5	5	Дубівецький	1	0.97	0.40	0.75	0.90	0.50	70
6	6	Межигірсько-Дубовецьке	1	0.97	0.25	0.75	0.90	0.83	68
7	2	Водники	1	0.97	0.25	0.75	0.90	0.77	67
8	8	Москалівське родовище	1	0.96	0.63	0.75	0.44	0.81	67
9	7	Межигірсько-Маринопільське родовище	1	0.97	0.35	0.75	0.69	0.83	66
-	4	Делівське	0	0.98	0.30	0.75	0.44	0	0
-	10	Петрівське	0	0.99	0.40	0.75	0.73	0	0

3.8.4 Інтерпретація результатів і значення отриманого ранжування

Отримане ранжування має прикладний характер і може бути використане для формування пріоритетів подальшого проектного опрацювання майданчиків. За підсумковими розрахунками (табл. 3.8) лідируючу групу формують кар'єри з найвищими значеннями інтегрального бала S_{core} , тоді як об'єкти, що не пройшли Gate-умову, вилучаються з ранжування незалежно від величин часткових індексів. Результати демонструють таке:

- Стриганецький кар'єр займає 1 місце з $S_{core} = 77$, що зумовлено поєднанням високого мережевого показника $S_{grid} = 0.940$ (за ваги 0.25) та достатньо високого екологічного індексу $S_{eco} = 0.625$ (за ваги 0.30), при загалом сприятливому балансі решти складових.
- Олешівське займає 2 місце з $Score = 76$. Його позиція визначається максимально сприятливим мережевим компонентом $S_{grid} = 1.000$ та підсиленням інтегрального бала через логістично-експозиційну складову $S_{log} = 0.554$ за фіксованої ваги 0.10.
- Городенківське посідає 3 місце з $S_{core} = 72$. Високий екологічний індекс $S_{eco} = 0.700$ у поєднанні з максимальним $S_{sol} = 1.000$ компенсує порівняно нижчий мережевий показник $S_{grid} = 0.555$, що у підсумку забезпечує стабільно високий інтегральний результат.
- Стрільченське та Дубівецький займають відповідно 4 і 5 місця з близькими значеннями $Score = 71$ та 70 . Обидва об'єкти характеризуються високими значеннями сонячного потенціалу та мережевого компонента, а розбіжності інтегрального бала у базовому сценарії формуються насамперед різницею екологічної складової та логістично-експозиційного компонента.
- Кар'єри Межигірсько-Дубовецьке, Водники та Москалівське родовище формують групу середньої придатності ($S_{core} = 68; 67; 67$ відповідно), де

ранжування визначається, головним чином, поєднанням низьких/середніх значень S_{eco} із відмінностями у S_{log} та S_{grid} .

- Межигірсько-Маринопільське родовище має найнижчий інтегральний бал серед об'єктів, що пройшли Gate (Score = 66), що відповідає його профілю часткових індексів у базовому ваговому розподілі.
- Делівське та Петрівське вилучені на етапі Gate (Gate = 0), тому їх підсумкові значення Score дорівнюють 0. Це підтверджує методичну коректність некомпенсаційного блоку: навіть порівняно високі значення окремих часткових індексів не можуть компенсувати невиконання критичних умов допустимості.

Таким чином, підрозділ 3.8 завершує логічний ланцюг Розділу 3: від формування бази часткових індексів до інтегрального числового результату, який забезпечує порівнюваність об'єктів, дозволяє сформуванню пріоритетності майданчиків та створює прозоре підґрунтя для переходу від дистанційного скринінгу до інженерно-проектної деталізації.

3.9 Підсумковий висновок підрозділу

У підрозділі 3.8 завершено інтегральну оцінку придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій у шкалі 0-100 на основі двоступеневої моделі Gate \rightarrow WLC. Gate реалізує некомпенсаційне відсікання об'єктів за критичними просторово-нормативними обмеженнями, тоді як зважена лінійна комбінація нормованих індексів формує порівняльне ранжування допустимих альтернатив. У межах прийнятого вагового розподілу екологічний критерій має найбільшу вагу, а мережевий критерій визначено другим за значущістю як капіталомісткий і потенційно лімітуючий чинник реалізації приєднання СЕС. Додатково враховано, що мережеві рішення можуть супроводжуватися екологічними наслідками під час будівництва та експлуатаційного забезпечення (зокрема, при прокладанні нових ділянок ЛЕП, облаштуванні технологічних під'їздів та

формуванні просік), що підсилює доцільність їх включення до екологічно орієнтованої логіки оцінювання.

Сонячний потенціал у межах вибірки Івано-Франківської області розглядається як важливий, але менш дискримінуючий критерій, оскільки його значення в межах регіонально компактної території є відносно близькими. Геотехнічна придатність врахована як чинник, що визначає проектувальні рішення, однак у роботі запропоновано таблицю придатності порід під розміщення СЕС (розд. 2), яка забезпечує уніфіковане зіставлення літології з числовим значенням S_{geo} і створює основу для коректного масштабування методики на інші геологічні умови. Логістично-CAPEX компонент зафіксовано на рівні 0.10 як мінімально достатній внесок, що дозволяє врахувати транспортно-підготовчу придатність без штучного заниження або завищення балів у ситуації, коли кінцева морфологія кар'єрів після завершення виробітку може суттєво відрізнятись від поточного стану.

Оновлений фінальний перерахунок за всіма кар'єрами засвідчив, що перерозрахунок логістично-експозиційної складової та узгодження Gate-умов можуть змінювати місця окремих об'єктів у ранжуванні, що підкреслює важливість роботи з актуалізованими даними та відтворюваними формулами. При цьому сама структура моделі залишається методично стабільною: Gate гарантує коректне відсікання неприйнятних майданчиків, а WLC забезпечує прозору порівняльну інтеграцію придатних альтернатив.

Важливою перевагою запропонованого підходу є його масштабованість і можливість розвитку. У разі доповнення екологічного блоку новими чинниками або при розширенні просторового охоплення до кількох областей чи національного рівня доцільним є перегляд вагових коефіцієнтів відповідно до нової структури варіацій сонячного ресурсу, мережевої інфраструктури, екологічної чутливості та транспортної доступності. Це дозволяє адаптувати модель до різних територіальних і даних-орієнтованих сценаріїв без втрати відтворюваності та логіки інтегральної оцінки.

Практичне значення отриманого результату полягає у формуванні прозорого підґрунтя для переходу від дистанційного скринінгу до інженерно-проектної деталізації. На основі інтегрального ранжування та накопиченої доказової бази у Розділі 4 робота переходить до поглибленого опрацювання можливостей розміщення СЕС у трьох пріоритетних кар'єрах: Стриганецькому, Олешівському та Водники. Для цих об'єктів у межах дослідження зібрано вихідні матеріали, опрацьовано паспорти виробітку та проекти завершального стану, а також виконано топографо-геодезичні заміри актуального стану. Поєднання актуальної геометрії кар'єрного простору з проектною конфігурацією кінцевого стану створює основу для детальних розрахунків сонячного потенціалу, експозиції, ухилів і затінення у програмному середовищі Arcgis та для виділення ділянок, придатних до розміщення фотоелектричних модулів з урахуванням проектних обмежень і необхідних підготовчих робіт.

У підсумку, Розділ 3 забезпечив ключовий науково-прикладний результат: сформовано інтегральну, масштабовану і методично відтворювану систему відбору та ранжування відпрацьованих кар'єрів під СЕС, що поєднує екологічну прийнятність, технічну здійсненність і інфраструктурну реалістичність. Отримані результати створюють обґрунтовану основу для прийняття рішень щодо ревіталізації порушених територій та розвитку відновлюваної енергетики, що відповідає цілям сталого розвитку Івано-Франківської області через залучення деградованих земель у продуктивне низьковуглецеве використання та зменшення тиску на природні, сільськогосподарські й урбанізовані ландшафти.

РОЗДІЛ 4

ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА СОНЯЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПІЛОТНИХ КАР'ЄРІВ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

У контексті екологічно орієнтованої ревіталізації порушених гірничими роботами земель принципово важливим етапом дослідження є детальне просторове оцінювання локального сонячного потенціалу та морфометричних передумов розміщення фотоелектричних модулів у межах конкретних кар'єрних територій. Для поглибленого просторового аналізу обрано Стриганецький, Олешівський і Водниківський кар'єри з огляду на наявність актуальних геодезичних даних, репрезентативність різних морфотипів виробітку та придатність цих об'єктів для демонстрації відмінних сценаріїв просторової адаптації. У цьому розділі здійснено ГІС-аналіз трьох пілотних об'єктів з метою виявлення найбільш придатних ділянок для розміщення сонячних електростанцій і обґрунтування просторово-інженерних параметрів їх можливого освоєння. Дослідження ґрунтується на порівняльному аналізі морфометричних та інсоляційних характеристик кар'єрних територій у двох станах - фактичному, що відображає реальну геометрію виробітку на момент проведення дослідження, та проектному, який відповідає передбачуваній конфігурації рельєфу на етапі завершення виробітку. Такий підхід забезпечує перехід від загального дистанційного ГІС-скринінгу та інтегрального ранжування, виконаних у попередніх розділах, до локального просторового аналізу цифрових моделей рельєфу, ухилів, експозиції, інсоляції та ефектів затінення, виконаних в середовищі ArcGIS Pro [42, 43, 46, 49, 51, 55, 57, 58, 61], що є необхідною передумовою для формування обґрунтованих висновків щодо придатності післявидобувних територій до розміщення фотоелектричних систем.

4.1. Аналіз фактичного (поточного) стану рельєфу та інсоляційного режиму на прикладі Стриганецького кар'єру

У межах даного дослідження вихідною передумовою для детального просторового аналізу Стриганецького кар'єру стало формування надійної планово-висотної основи, здатної відобразити реальний морфологічний стан об'єкта на момент спостережень. Для цього було використано дані топографо-геодезичного знімання території, що забезпечило отримання актуальної геометрії рельєфу та відображення характерних елементів кар'єрної ніші. На відміну від природних схилів, антропогенно трансформований кар'єрний рельєф є різко членованим, характеризується локальними уступами, терасами, бортами та зонами перелому поверхні.

Такі елементи формують складну просторову структуру, яка безпосередньо впливає на інсоляційний режим через взаємне затінення та зміну орієнтації поверхонь. Використання актуальних просторових даних є критичним для коректного опису локальної диференціації сонячного ресурсу, особливо при переході від макрорегіонального рівня оцінювання до масштабу мікропланування розміщення фотоелектричних модулів (ФЕМ) у межах конкретного контуру виробітку.

На основі матеріалів знімання побудовано цифрову модель рельєфу фактичного стану [57], яка репрезентує просторову конфігурацію поверхні. Змістовно така модель виконує роль базового геометричного каркаса, до якого прив'язуються похідні морфометричні характеристики (ухил та експозиція) і подальші результати інсоляційного моделювання. Ключовим підходом є те, що сонячний потенціал оцінюється не як усереднене значення, а як просторово диференційований ресурс.

Рисунок 4.1 відображає цифрову модель рельєфу фактичного стану у висотних відмітках із нанесеним контуром об'єкта. Діапазон висот становить 204,25-307,51 м. Просторово на карті проявляється виразний градієнт, що формує перехід від нижчих до вищих відміток. Контур кар'єру накладається

на зону з підвищеною мозаїчністю класів висоти: спостерігаються локальні пониження, смуги переходів та різкі межі. Така конфігурація свідчить про поєднання відносно плоских елементів (майданчики днища) зі схилувими зонами (борти, уступи). Априорі формуються ділянки з різним ступенем відкритості до сонячного випромінювання.



Рисунок 4.1 - Цифрова модель рельєфу фактичного стану
Стриганецького кар'єру

На основі цих геометричних умов було здійснено моделювання сумарної річної (глобальної) сонячної радіації за 2025 рік (Рис. 4.2). Карта відображає просторовий розподіл інсоляції у кВт·год/м² та класифікована за 5 інтервалами (від 183,53 до 1 166,81 кВт·год/м²). Цей показник є визначальним фізичним чинником, що зумовлює теоретичні обсяги генерації СЕС.

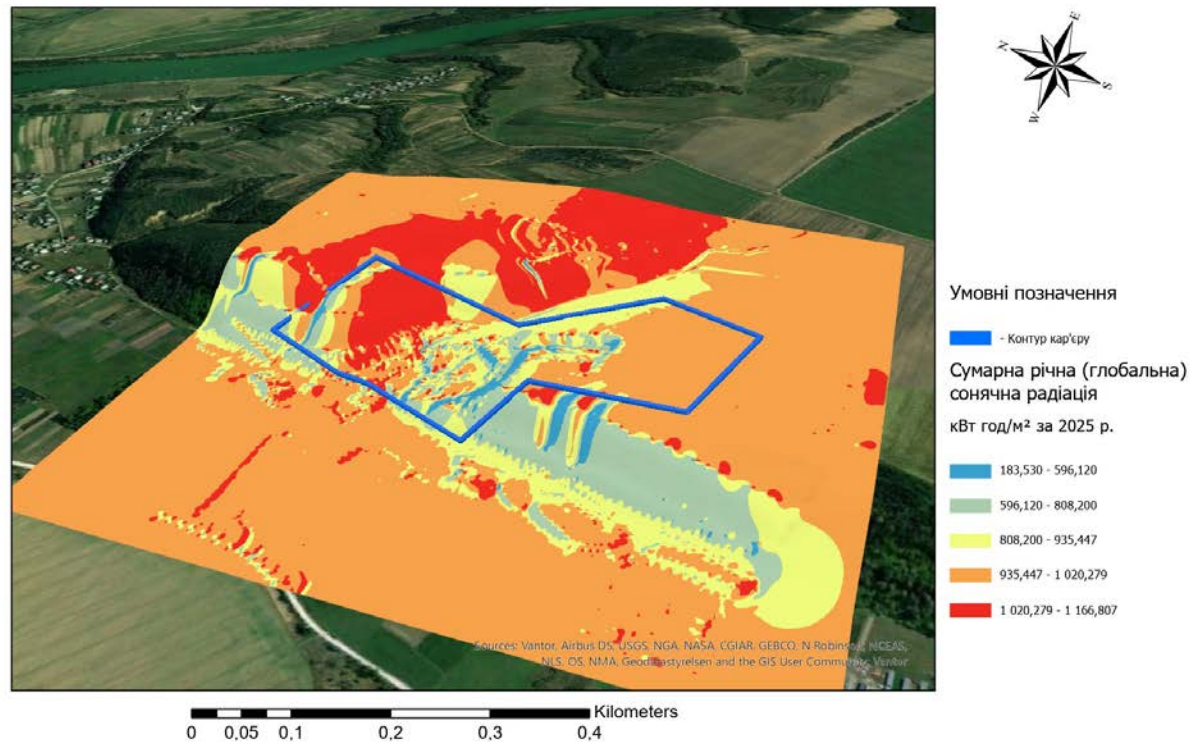


Рисунок 4.2 - Цифрова модель сумарної річної (глобальної) сонячної радіації Стриганецького кар'єру

Просторові закономірності вказують на контрастну структуру:

1. На прилеглих відкритих територіях поза кар'єром домінують високі класи радіації (935,45-1 020,28 кВт·год/м²), що відображає фоновий ресурс рівнинної поверхні.
2. У межах кар'єру розподіл стає мозаїчним: фіксуються витягнуті «шлейфи» та смуги нижчих класів (аж до 183,53-596,12 кВт·год/м²), які повторюють структурні лінії рельєфу.

Фактор затінення проявляється цілісними морфологічними поясами. Для практичного планування це означає, що придатні площі у поточному стані розділені смугами зниженого ресурсу, що суттєво ускладнює формування великих однорідних сонячних полів.

4.2. Моделювання просторових умов та сонячного потенціалу на етап завершення виробітку

Перехід до аналізу проєктного стану є методологічно необхідним, оскільки саме кінцева форма виробітку визначатиме умови подальшого використання майданчика для цілей екологічної ревіталізації. Проєктний сценарій базується на паспорті виробітку, що фіксує планову геометрію завершення гірничих робіт.

На Рисунку 4.3 подано цифрову модель рельєфу на кінець виробітку. На відміну від поточного стану, внутрішня конфігурація поверхонь є значно структурованішою: візуалізуються регулярні переходи між класами висот. Така впорядкованість зменшує випадкову фрагментацію інсоляційних зон і полегшує виділення суцільних майданчиків під СЕС.

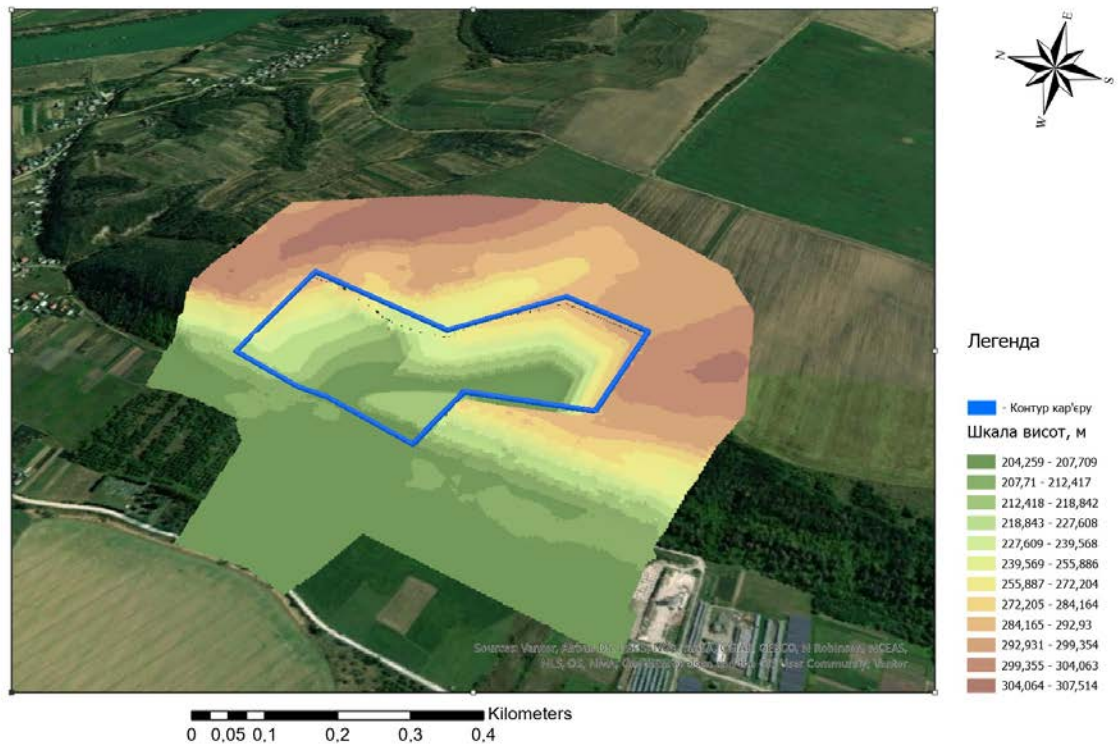


Рисунок 4.3 - Цифрова модель рельєфу проектного вигляду Стриганецького кар'єру на кінець виробітку

Аналіз проектного рельєфу деталізовано за картою ухилів (Рис. 4.4). Карту ухилів побудовано засобами Spatial Analyst в ArcGIS Pro [57]. Ухил визначає технологічну придатність поверхні для монтажу. Просторова структура демонструє чітке розділення: широкі світлі зони (пологі поверхні та тераси, $\leq 11,3^\circ$) формують «несучу площу», тоді як вузькі темні смуги (борти та уступи, $\geq 45^\circ$) є зонами інженерних обмежень. Найбільш перспективною виглядає зона на північному борті кар'єру, яка поєднує пологі ухили з південною експозицією.

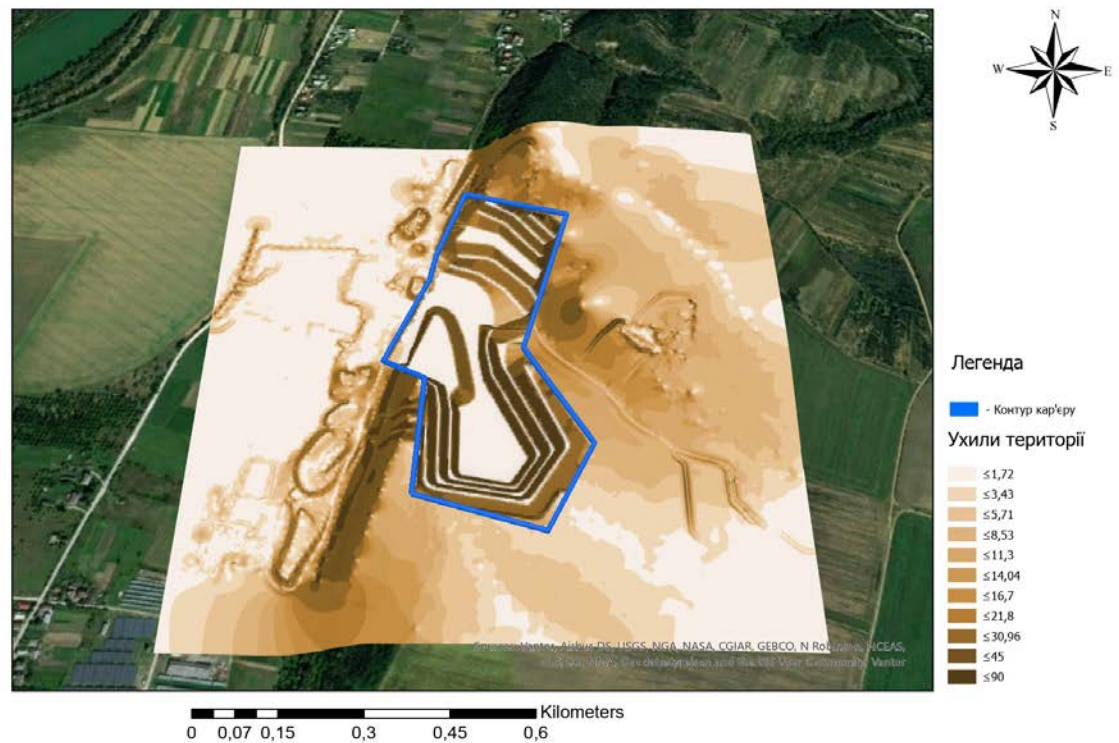


Рисунок 4.4 - Цифрова модель ухилів Стриганецького кар'єру

Цифрова модель експозиції схилів (Рис. 4.5) підтверджує наявність значної частки «рівнинних» ділянок, які найменш чутливі до кутових втрат інсоляції. Експозиції схилів сформовано в ArcGIS Pro [43]. Схиліві елементи закономірно повторюють структуру кар'єру. Пріоритетними для розміщення СЕС є ділянки, де сприятлива орієнтація (південний схід, південь, південний захід) збігається з помірними ухилами та відсутністю екранування від бортів.

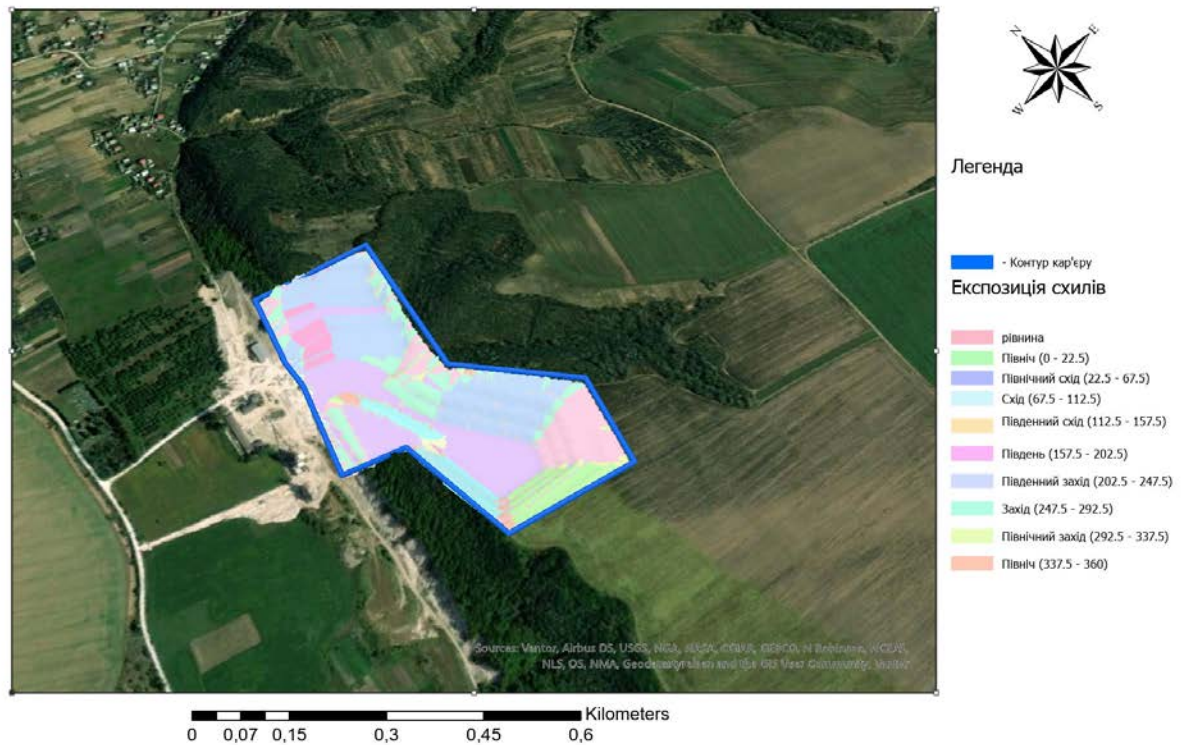


Рисунок 4.5 - Цифрова модель схилів Стриганецького кар'єру

Інтегральним результатом виступає карта глобальної сонячної радіації для проектного стану (Рис. 4.6). На ній виражені геометрично впорядковані смуги інсоляції: відкриті тераси відповідають найвищим класам (858,88-162,88 кВт·год/м²), а міжступні переходи утворюють локальні зони зниженого ресурсу.

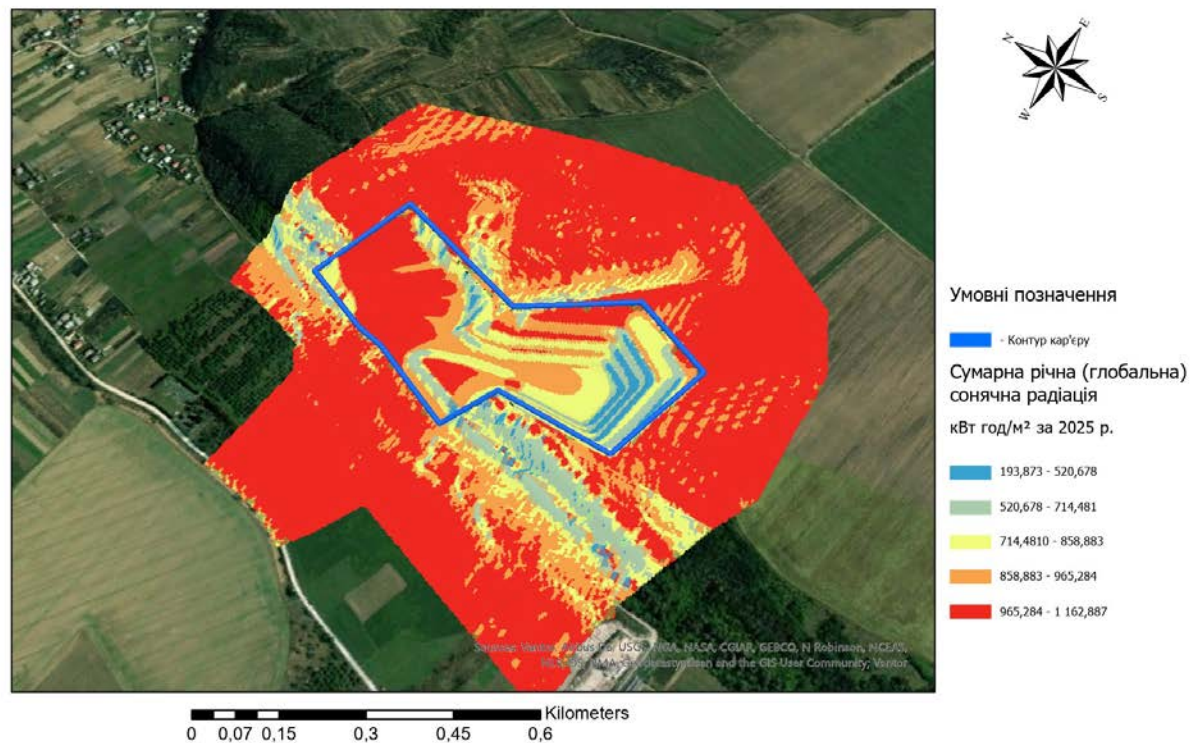


Рисунок 4.6 - Цифрова модель глобальної сонячної радіації
Стриганецького кар'єру, за 2025 р.

Для кількісного підтвердження цих просторових закономірностей було проаналізовано гістограму розподілу площ за класами радіації (Рис. 4.7). Гістограма наочно демонструє виражену асиметрію розподілу в бік найвищих значень інсоляції. Основний масив пікселів (площі) концентрується в червоній та помаранчевій зонах (понад 795 тис. кВт·год/м² у загальному обсязі). Це є математичним підтвердженням того, що після завершення профілювання переважна більшість площі кар'єру не просто потрапляє у зону високої радіації, а утворює суцільне енергетичне «ядро». Відсоток площ із критично низькою інсоляцією (синій та зелений класи) є статистично незначним і відповідає виключно технологічним зонам перепадів висот.

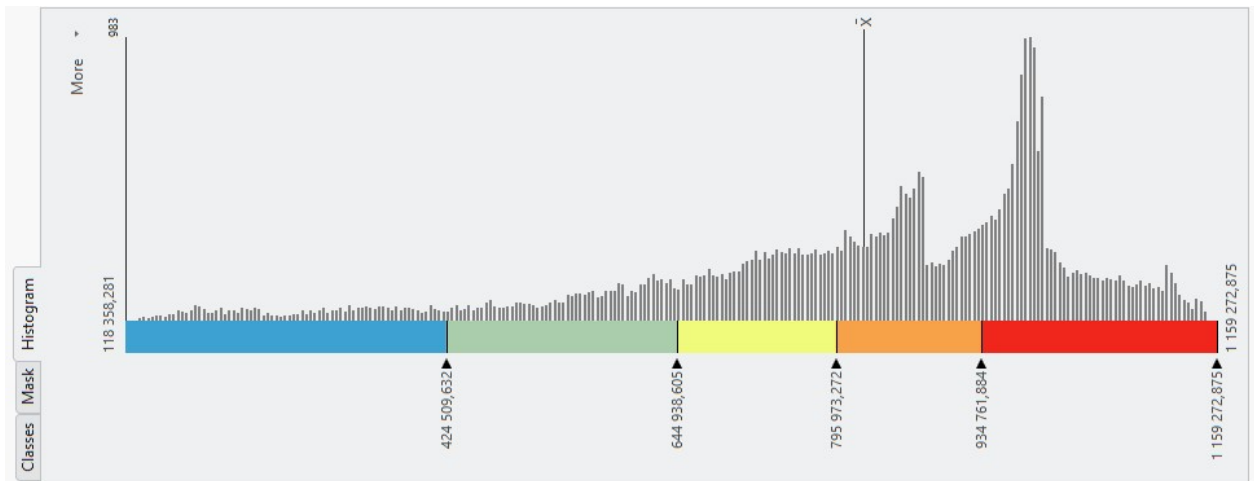


Рисунок 4.7 - Гістограма розподілу площ за класами радіації

4.3 Обґрунтування оптимальних просторових параметрів (кута нахилу та азимута) для розміщення фотоелектричних модулів

Визначення просторово-придатних зон (проаналізованих у підрозділах 4.1-4.2) є необхідною, але не достатньою умовою для максимізації енергетичного виходу фотоелектричної станції. Наступним етапом просторового аналізу є визначення оптимальних параметрів просторової орієнтації самих фотоелектричних модулів (ФЕМ) - кута їх нахилу до горизонтальної поверхні та азимутального напрямку. У складному рельєфі рекультивованого кар'єру ці параметри відіграють критичну роль, оскільки природний ухил терас може як сприяти, так і перешкоджати досягненню оптимальної орієнтації, вимагаючи специфічних інженерних рішень при проєктуванні опорних металоконструкцій.

4.3.1 Оптимізація кута нахилу

Для оцінки впливу кута нахилу ФЕМ на сумарну річну інсоляцію було проведено імітаційне моделювання в середовищі ArcGIS Pro [33, 39, 42, 51] в діапазоні від 20° до 45° за умов фіксованого південного азимута (180°). Результати розрахунків зведено до Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Залежність сумарної річної інсоляції від кута нахилу ФЕМ

Кут, °	Інсоляція, kWh/м ² ·рік	Втрата від тах (33°), Wh/м ² ·рік	Втрата, %	Ранг	Клас
20	1 119,902	28 831,18	2,5098	17	С (помірно придатні)
25	1 137,773	10 960,02	0,9541	15	С (помірно придатні)
27	1 142,586	6 147,03	0,5351	13	С (помірно придатні)
28	1 144,471	4 262,26	0,3710	10	С (помірно придатні)
29	1 146,021	2 712,56	0,2361	8	В (придатні)
30	1 147,223	1 510,00	0,1314	6	В (придатні)
31	1 148,076	656,90	0,0572	4	В (придатні)
32	1 148,580	153,52	0,0134	2	А (найбільш придатні)
33	1 148,733	0,00	0,0000	1	А (найбільш придатні)
34	1 148,537	196,31	0,0171	3	А (найбільш придатні)
35	1 147,991	742,42	0,0646	5	В (придатні)
36	1 147,095	1 638,21	0,1426	7	В (придатні)
37	1 145,850	2 883,42	0,2510	9	С (помірно придатні)
38	1 144,388	4 345,38	0,3783	11	С (помірно придатні)
39	1 142,591	6 141,67	0,5346	12	С (помірно придатні)
40	1 140,537	8 195,83	0,7135	14	С (помірно придатні)
45	1 125,392	23 340,80	2,0319	16	С (помірно придатні)

Аналізуючи таблицю 4.1 значення демонструють нелінійну залежність ефективності збору сонячної радіації від кута нахилу панелей. Абсолютний максимум генерації (1 148,73 кВт·год/м²·рік) досягається при куті 33°. Цей показник є репрезентативним для географічної широти досліджуваного регіону та балансує траєкторію сонця між літнім та зимовим сонцестояннями.

- Оптимальний (А) діапазон 32-34° характеризується мінімальним відхиленням від розрахункового максимуму, тому в межах виконаного моделювання його доцільно вважати локально оптимальним для досліджуваного об'єкта.
- Прийнятний (В) діапазон (29°-31° та 35°-36°): Відносні втрати не перевищують 0,24%.
- Недоцільний (С) діапазон (<29° та >36°): Втрати починають експоненційно зростати, досягаючи понад 2% при відхиленнях до 20° або 45°.

4.3.2 Оптимізація азимутальної орієнтації

У реальних умовах кар'єру ідеальне орієнтування конструкцій строго на південь (180°) не завжди технологічно можливе через форму міжступних майданчиків та трасування під'їзних шляхів [33, 39]. Тому було оцінено енергетичні втрати при відхиленні азимута (ΔAz) відносно ідеального південного напрямку (Табл. 4.2).

Таблиця 4.2 - Оцінка інсоляційних втрат залежно від азимутальної орієнтації ФЕМ (за оптимального кута нахилу 33°)

Азимут, °	$\Delta Az = Az - 180 ,$ °	Категорія (за ΔAz)	Інсоляція, kWh/m ² ·рік	Δ до 180°, Wh/m ²	Δ до 180°, %	Ранг
120	60	С (помірно придатні)	970,262	-178 471,05	- 15,5363	12
135	45	С (помірно придатні)	1 038,932	-109 800,97	-9,5584	10
150	30	С (помірно придатні)	1 008,055	-140 678,25	- 12,2464	11
160	20	В (придатні)	1 120,840	-27 893,26	-2,4282	7
165	15	А (найбільш придатні)	1 131,194	-17 539,50	-1,5269	6

170	10	А (найбільш придатні)	1 139,168	-9 565,59	-0,8327	4
180	0	А (найбільш придатні)	1 148,733	0,00	0,0000	1
190	10	А (найбільш придатні)	1 148,195	- 538,15	-0,0468	2
195	15	А (найбільш придатні)	1 144,070	-4 662,99	-0,4059	3
200	20	В (придатні)	1 137,505	-11 227,73	-0,9774	5
210	30	В (придатні)	1 117,220	-31 513,50	-2,7433	8
225	45	С (помірно придатні)	1 070,516	-78 217,17	-6,8090	9
240	60	С (помірно придатні)	1 008,055	-140 678,25	- 12,2464	11

Моделювання показало цікаву закономірність: вплив відхилення азимута має виражену асиметрію відносно південної осі. Відхилення на захід (наприклад, азимут 195° , $\Delta Az=15^\circ$) спричиняє значно менші втрати (лише -0,4%), порівняно з аналогічним відхиленням на схід (азимут 165° , втрати складають -1,53%). Це пояснюється тим, що у другій половині дня (західна експозиція) температурний режим модулів і прозорість атмосфери в даному макрорегіоні забезпечують дещо інакший режим фотоелектричної генерації. Однак це спостереження слід трактувати як результат конкретного сценарію моделювання, а не як універсальну закономірність для регіону.

Згідно з Таблицею 4.2, всі азимутальні напрямки згруповано у три категорії:

- Категорія А (найбільш придатні): Азимут 165° - 195° . Втрати інсоляції не перевищують критичного порогу у 1,5%.

- Категорія В (придатні): Відхилення до 30° від півдня (азимути 150° - 160° та 200° - 210°). Втрати варіюють від 1% до 12,2%. Розміщення можливе, але потребує економічного обґрунтування.
- Категорія С (помірно придатні): Відхилення понад 30° (азимути 120° - 135° , 225° - 240°), що призводять до значного недовиробітку енергії (від 6,8% до 15,5%).

4.3.3 Практичні рекомендації для проєктування СЕС у Стриганецькому кар'єрі

Інтегруючи отримані результати з просторовими моделями (розглянутими у п. 4.2), для подальшого інженерного етапу ревіталізації кар'єру необхідно впровадити наступні просторово-технологічні обмеження:

Проєктування опорних конструкцій: При монтажі статичних опорних металоконструкцій на рівнинних ділянках та пологих терасах кар'єру, їх геометрія має безальтернативно забезпечувати кут нахилу модулів у межах 32° - 34° . Якщо природний ухил тераси становить, наприклад, 5° на північ, опорна конструкція повинна компенсувати цей градієнт, забезпечуючи підсумковий нахил панелі у 33° відносно абсолютного горизонту.

Адаптація до геометрії бортів (компроміс "Азимут/Втрати"): Проєктування довгих «столів» ФЕМ (рядів) вздовж викривлених бортів кар'єру не обов'язково вимагає жорсткого дотримання азимута строго 180° . Допускається плавне повторення геометрії кар'єру (зادля максимального використання площі терас), якщо азимут ряду залишається в межах 165° - 195° (Категорія А). Енергетичні втрати в такому випадку становитимуть менше 1,5%, що легко компенсується щільністю забудови.

Зонування складних ділянок: Ділянки кар'єру, чия морфологія змушує орієнтувати ФЕМ в азимутах Категорії С (наприклад, круті східні або західні вигини уступів з азимутами 120° чи 240°), слід вилучати з плану забудови високопродуктивними модулями. На цих ділянках доцільніше розміщувати

інфраструктурні об'єкти (інверторні станції, трансформатори, під'їзні шляхи) або використовувати їх для фітомеліорації.

Врахування західної асиметрії: При проектуванні полів складної форми, перевагу в розміщенні слід віддавати південно-західним секторам (азимуту 180° - 200°), оскільки енергетичні втрати при відхиленні на захід є статистично меншими порівняно зі східними відхиленнями.

Таким чином, науково обґрунтовані значення (нахил 32 - 34° , азимут 165 - 195°) слугуватимуть базовими вхідними параметрами для подальшої алгоритмічної генерації 3D-моделі розміщення сонячної електростанції в межах рекультивованого Стриганецького кар'єру.

4.4 Просторовий аналіз та оцінка сонячного потенціалу кар'єру «Водники» для розміщення фотоелектричних модулів

Для комплексної оцінки потенціалу ревіталізації порушених земель регіону, поряд із попередніми об'єктами, було проведено просторове моделювання інсоляційного режиму кар'єру «Водники». Цей об'єкт характеризується специфічним морфологічним розташуванням на схилі, що формує особливі виклики та можливості для проектування сонячних електростанцій. Аналіз виконано на основі порівняння фактичного та проєктного станів рельєфу.

4.4.1 Аналіз фактичного (поточного) стану рельєфу та інсоляційного режиму

Базовим етапом дослідження кар'єру «Водники» стала оцінка його поточної просторової конфігурації. Для цього було сформовано цифрову модель рельєфу фактичного стану (Рис. 4.8).

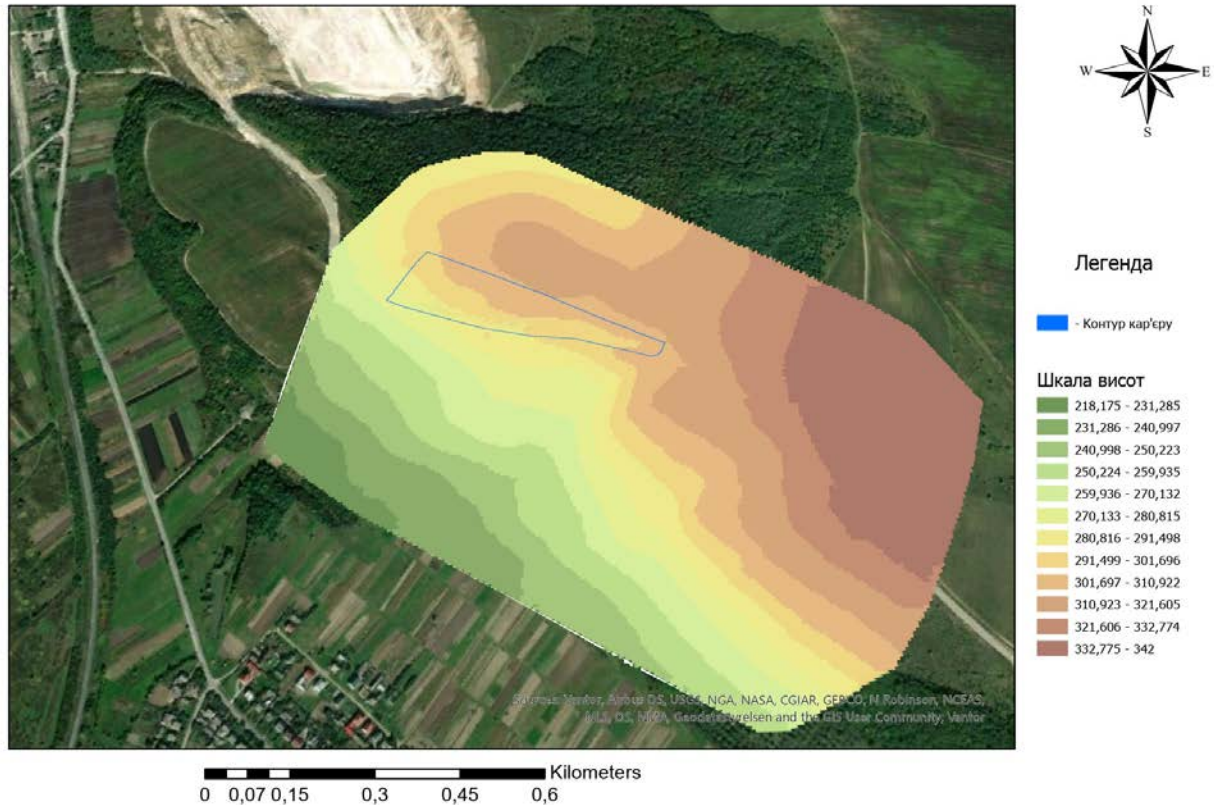


Рисунок 4.8 - Цифрова модель рельєфу фактичного стану кар'єру
Водники

Як свідчить просторовий розподіл висот на цифровій моделі рельєфу (фактичний стан), територія дослідження лежить у висотному діапазоні від 218,17 до 342 метрів. Контур кар'єру окреслює видовжену ділянку, яка просторово накладається на загальний макросхил. Фактичний стан об'єкта в межах контуру репрезентує собою перехідну схилу зону, яка ще не має чітко вираженого техногенного терасування, притаманного завершеним гірничим об'єктам.

На основі ЦМР фактичного стану було згенеровано карту сумарної річної (глобальної) сонячної радіації(рис. 4.9).

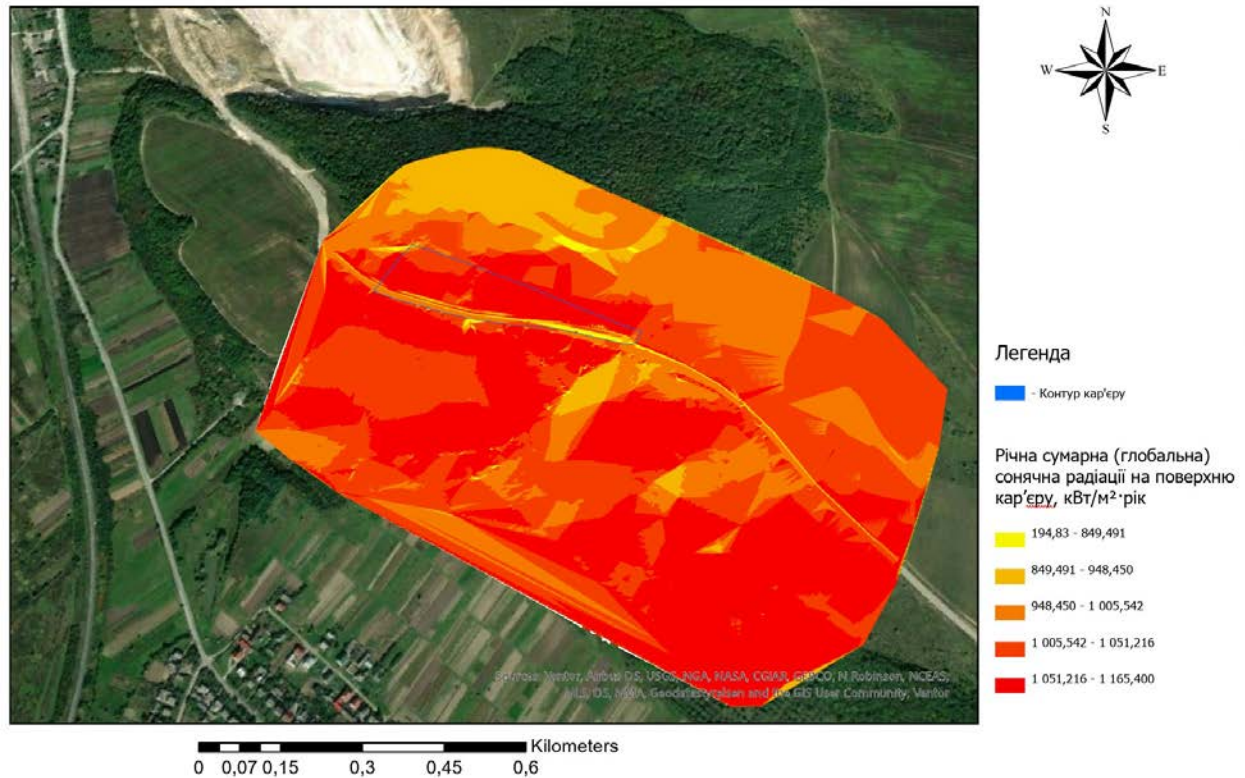


Рисунок 4.9 - Цифрова модель сумарної річної (глобальної) сонячної радіації кар'єру Водники.

Загальний діапазон інсоляції на досліджуваній території становить від 194,83 до 1 165,40 кВт·год/м²·рік. Розподіл сонячного ресурсу всередині контуру кар'єру в його поточному стані демонструє високу мозаїчність:

Отже, у своєму поточному стані морфологія кар'єру не є оптимальною для розгортання масштабних СЕС, оскільки мозаїчність інсоляції та схиловий характер поверхні обмежують формування великих однорідних генераційних майданчиків.

4.4.2 Аналіз проєктного стану (на кінець виробітку) та оптимізація інсоляційного ресурсу

Ключовим аспектом ревіталізації гірничих об'єктів є можливість цілеспрямованого профілювання рельєфу на завершальних стадіях розробки. Моделювання проєктного стану кар'єру «Водники» наочно демонструє, як

геометрія гірничих робіт здатна трансформувати складний схил у високопритатний енергетичний об'єкт.

Цифрова модель рельєфу на кінець виробітку (рис. 4.10) демонструє збереження загального діапазону висот (218,00-342 м), проте просторова структура поверхні кардинально змінюється. Замість суцільного похилого масиву в межах контуру формується чітка система штучних терас.

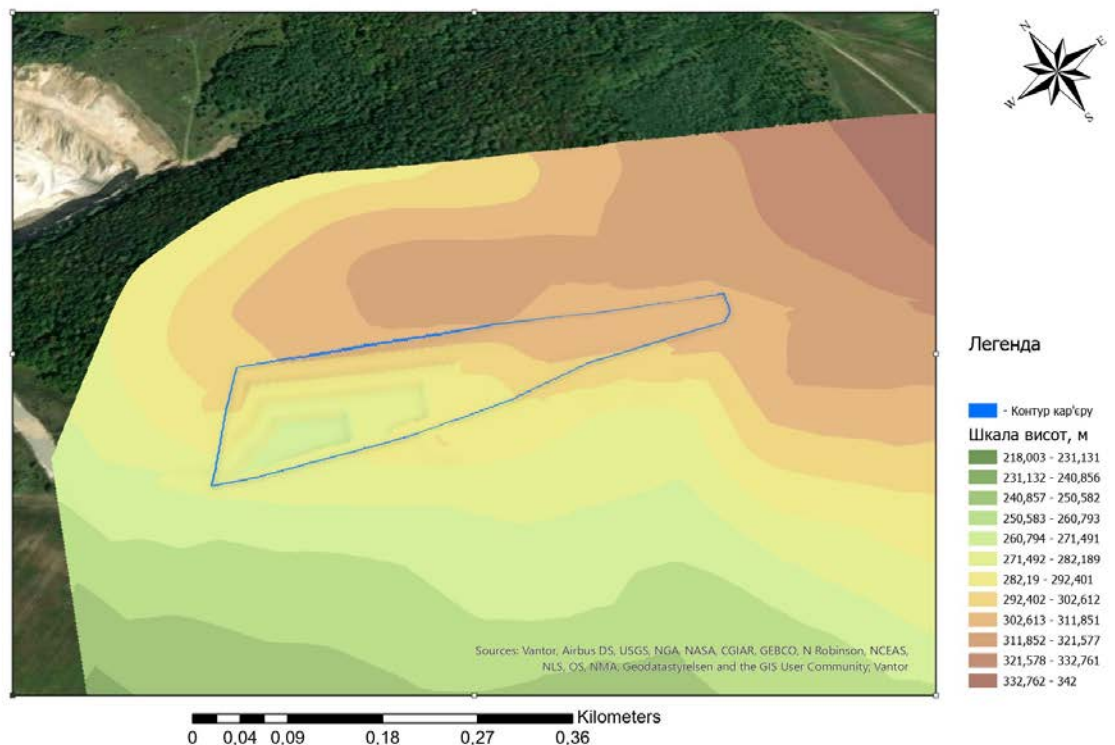


Рисунок 4.10 - Цифрова модель рельєфу проєктного стану кар'єру
Водники на кінець виробітку

Ця структурна зміна найвиразніше підтверджується картою проєктних ухилів (рис. 4.11). Вона фіксує жорстку диференціацію поверхні:

- Тераси (майданчики): Утворюють широкі світлі зони з мінімальними ухилами (від $0,001^\circ$ до $7,14^\circ$). Вони виступають ідеальними горизонтальними або субгоризонтальними платформами («несучими площами») для монтажу ФЕМ.

- Борти та уступи: Формують вузькі темні смуги з екстремальними ухилами (від $21,24^\circ$ до $78,8^\circ$), що слугують структурними розділювачами терас.



Рисунок 4.11 - Цифрова модель ухилів кар'єру Водники

Цифрова модель експозиції схилів деталізує просторову орієнтацію цих елементів. Попри загальне північно-західне падіння макросхилу, проєктні тераси здебільшого належать до класу «рівнина». Водночас круті борти-уступи, врізані в гірський масив, закономірно орієнтовані на північ, північний схід та північний захід (світло-зелені та блакитні класи)(рис. 4.12).

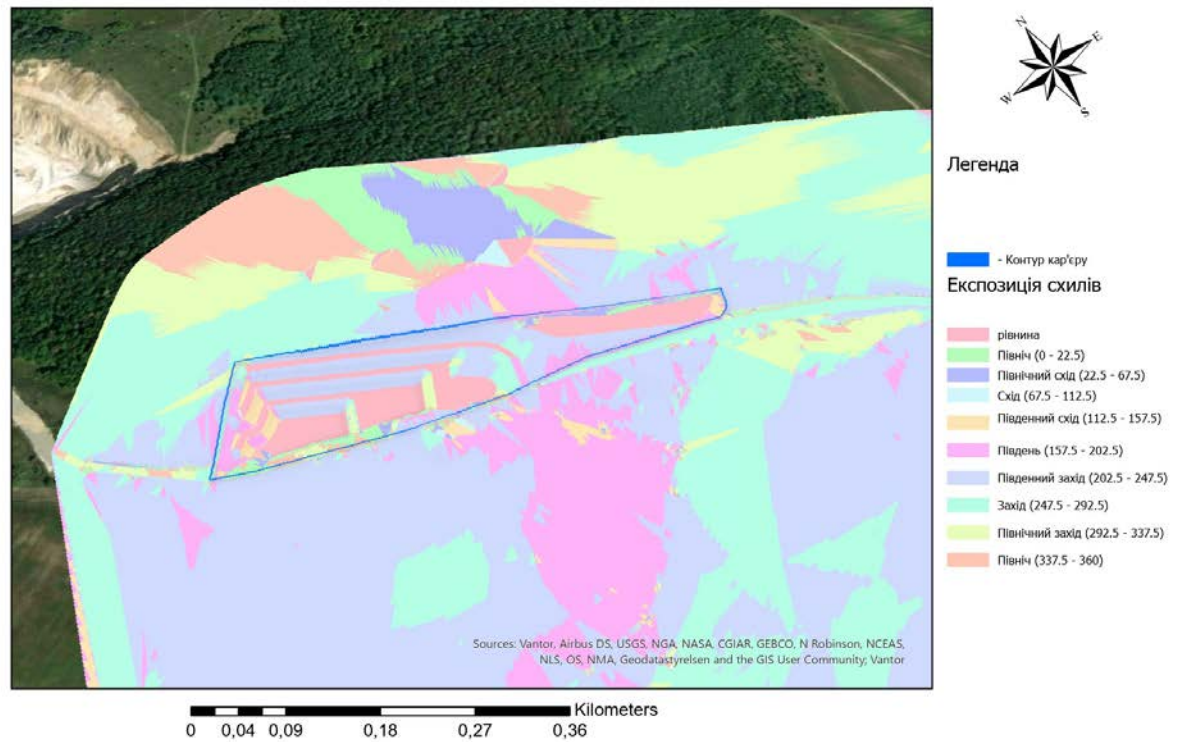


Рисунок 4.12 - Цифрова модель експозиції схилів кар'єру Водники

Інтегральним підтвердженням ефективності такого профілювання є карта глобальної сонячної радіації на етап завершення виробітку (рис. 4.13).

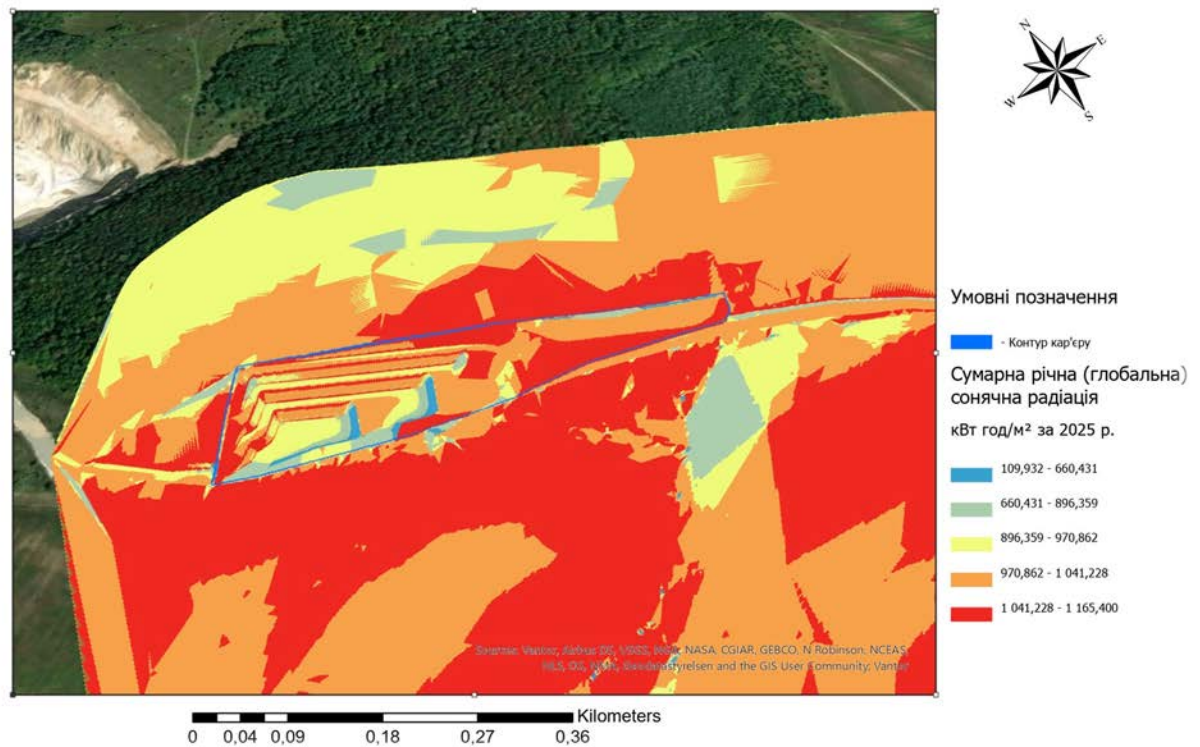


Рисунок 4.13 - цифрова модель глобальної сонячної радіації кар'єру
Водники, за 2025 р.

На ній чітко простежується енергетичне розшарування простору:

1. Зони максимального ресурсу (Ядро генерації): Проектні пологі тераси повністю потрапляють у найвищі класи інсоляції (червоний колір, 1 041,22-1 165,40 кВт·год/м²·рік). Горизонтальне планування цих майданчиків нівелює негативний вплив загального північного макросхилу, повністю відкриваючи поверхню для прямої та розсіяної радіації.
2. Зони обмежень: Знижені показники інсоляції (жовті та світло-зелені класи, 109,93-896,35 кВт·год/м²·рік) локалізовані виключно на вузьких смугах крутих північних бортів.

4.4.3 Висновки щодо кар'єру «Водники»

- Трансформація потенціалу: Фактичний стан об'єкта, розташованого на схилі північно-західної експозиції, демонструє значні втрати сонячного ресурсу через геоморфологічні особливості. Однак, проєктна гірничотехнічна рекультивація доводить можливість ефективної просторової адаптації.
- Просторове зонування: Проєктна гірничотехнічна рекультивація демонструє можливість істотного підвищення придатності об'єкта до розміщення СЕС; водночас найдоцільнішими зонами залишаються пологі тераси, тоді як стрімкі борти мають розглядатися як площі обмеженого використання. Площі терас отримують максимальну річну радіацію (понад 1 040 кВт·год/м²), формуючи суцільні високопродуктивні «енергетичні столи».
- Рекомендації для проєктування СЕС: При компонованні станції в кар'єрі «Водники», фотоелектричні поля мають бути жорстко прив'язані до контурів згенерованих пологих терас ($\leq 7^\circ$), тоді як стрімкі затінені борти ($\geq 21^\circ$) повинні використовуватись як технічні зони відчуження або підлягати фітомеліорації для запобігання ерозії.

4.5. Просторовий аналіз та оцінка сонячного потенціалу кар'єру Олешів для розміщення фотоелектричних модулів

Наступним об'єктом просторового моделювання став кар'єр «Олешів». Його специфіка полягає у формуванні глибокої кар'єрної виїмки закритого типу, що створює відмінні від попередніх об'єктів (Стриганецького та Водників) аеродинамічні та інсоляційні умови [100, 136]. Аналіз об'єкта базується на порівнянні морфометричних та радіаційних параметрів фактичного та проєктного станів [42, 43, 46, 51, 54, 57].

4.5.1. Аналіз фактичного (поточного) стану рельєфу та інсоляційного режиму

Оцінка фактичного стану об'єкта є відправною точкою для розуміння його базового енергетичного потенціалу до моменту фінального техногенного втручання.

Аналіз цифрової моделі рельєфу фактичного стану (Рисунок 4.14) свідчить, що на момент дослідження територія в межах контуру кар'єру характеризується висотними відмітками в діапазоні від 229,21 до 294,21 м. Морфологічно ця ділянка являє собою відносно полого пониження з плавними градієнтами висот, без різких уступів чи глибоких зон екскавації. Відкритість цієї території забезпечує мінімальне взаємне екранування елементів рельєфу.

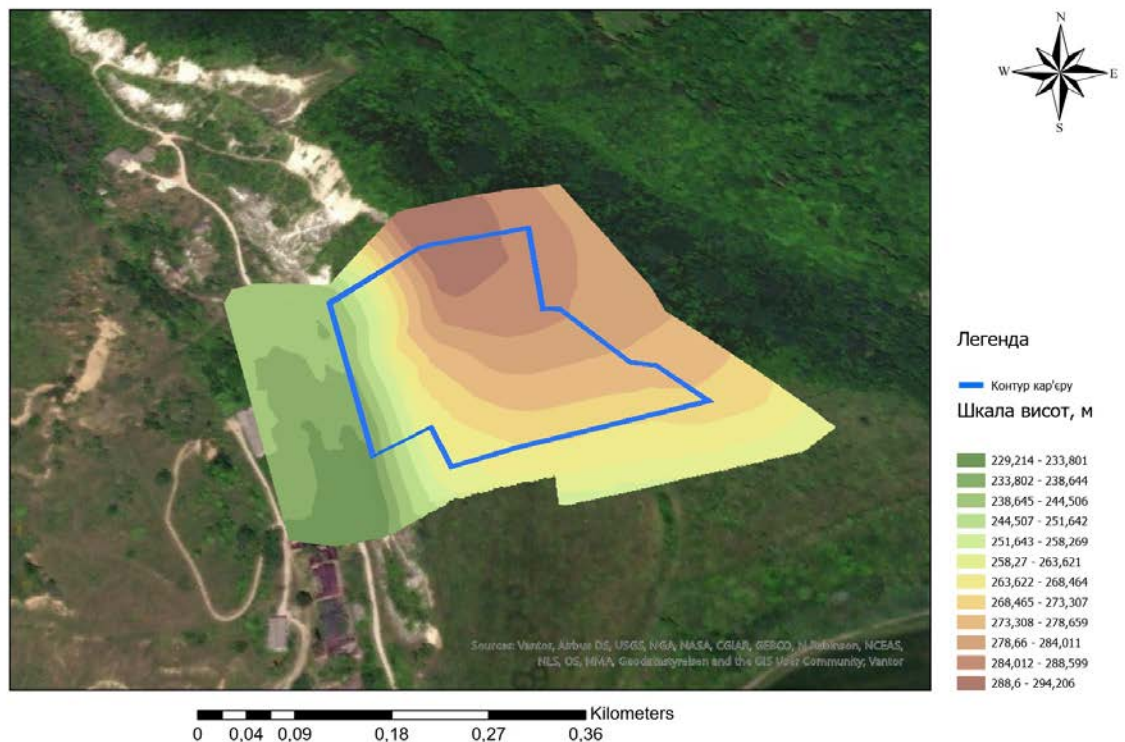


Рисунок 4.14 - Цифрова модель рельєфу фактичного стану кар'єру «Олешів» у висотних відмітках (м)

Висока відкритість рельєфу безпосередньо впливає на розподіл сонячного ресурсу, що підтверджується картою сумарної річної (глобальної) сонячної радіації для поточного стану (Рисунок 4.15). Загальний розмах значень інсоляції становить від 620,13 до 1 192,03 кВт·год/м²·рік. Завдяки відсутності глибоких перепадів висот, переважна більшість площі всередині кар'єрного контуру потрапляє у зони високого та максимального ресурсу (помаранчеві та червоні класи, 992,43-1 192,03 кВт·год/м²·рік). Тобто у своєму допроектному стані територія володіє високим фоновим рівнем сонячної радіації, що є типовим для рівнинних та слабкопересічених відкритих ландшафтів даного регіону.

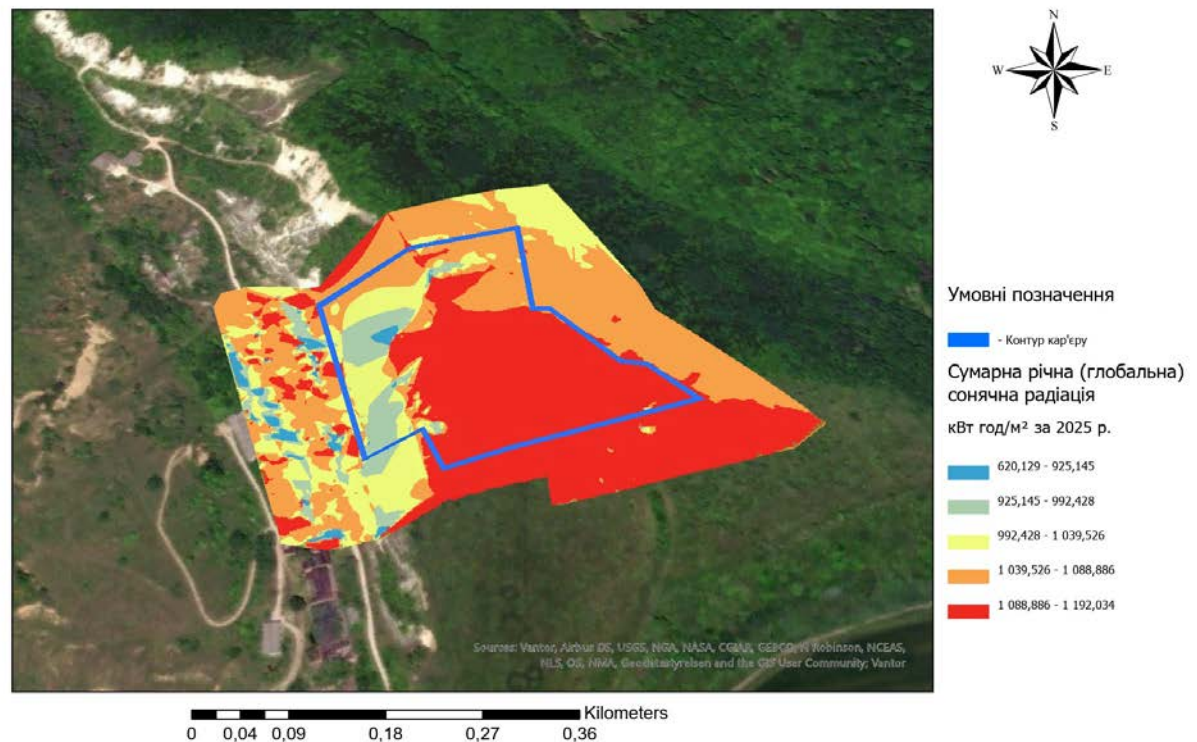


Рисунок 4.15 - Цифрова модель сумарної річної (глобальної) сонячної радіації на фактичний рельєф кар'єру «Олешів» (кВт·год/м²)

4.5.2. Аналіз проєктного стану (на кінець виробітку) та ефект «глибокої виїмки»

Реалізація гірничого проєкту до кінця виробітку кардинально змінює просторову структуру об'єкта. Цифрова модель проєктного рельєфу (Рис. 4.16) фіксує поглиблення кар'єру до відмітки 220,00 м (загальний діапазон об'єкта 220,00-301,95 м) зі створенням класичної чашоподібної виїмки.



Рисунок 4.16 - Цифрова модель рельєфу проєктного стану кар'єру «Олешів» на кінець виробітку (м)

Зміни просторової конфігурації детально простежуються на похідних морфометричних картах. На карті проєктних ухилів (Рис. 4.17) чітко виділяється розлоге, субгоризонтальне днище кар'єру (ухили переважно $\leq 1,72^\circ$ - $\geq 3,43^\circ$). По периметру це днище різко обмежується стрімкими бортами з екстремальними ухилами (від $30,96^\circ$ до майже 90° у зонах уступів).



Рисунок 4.17 - Цифрова модель ухилів території проєктного рельєфу кар'єру «Олешів»

Своєю чергою, цифрова модель експозиції схилів (Рис. 4.18) підтверджує наявність великої площі класу «рівнина» на дні виробітку, оточеної бортами внутрішньої орієнтації (північної, південної, західної та східної).



Рисунок 4.18 - Цифрова модель експозиції схилів проектного рельєфу кар'єру «Олешів»

З інженерної точки зору, наявність розлогого плоского днища є ідеальною передумовою для швидкого і дешевого монтажу СЕС. Однак, інсоляційне моделювання виявляє прихований обмежувальний фактор. На карті глобальної сонячної радіації на етап завершення виробітку (Рис.4. 19) фіксується специфічний патерн, характерний для глибоких виїмок.

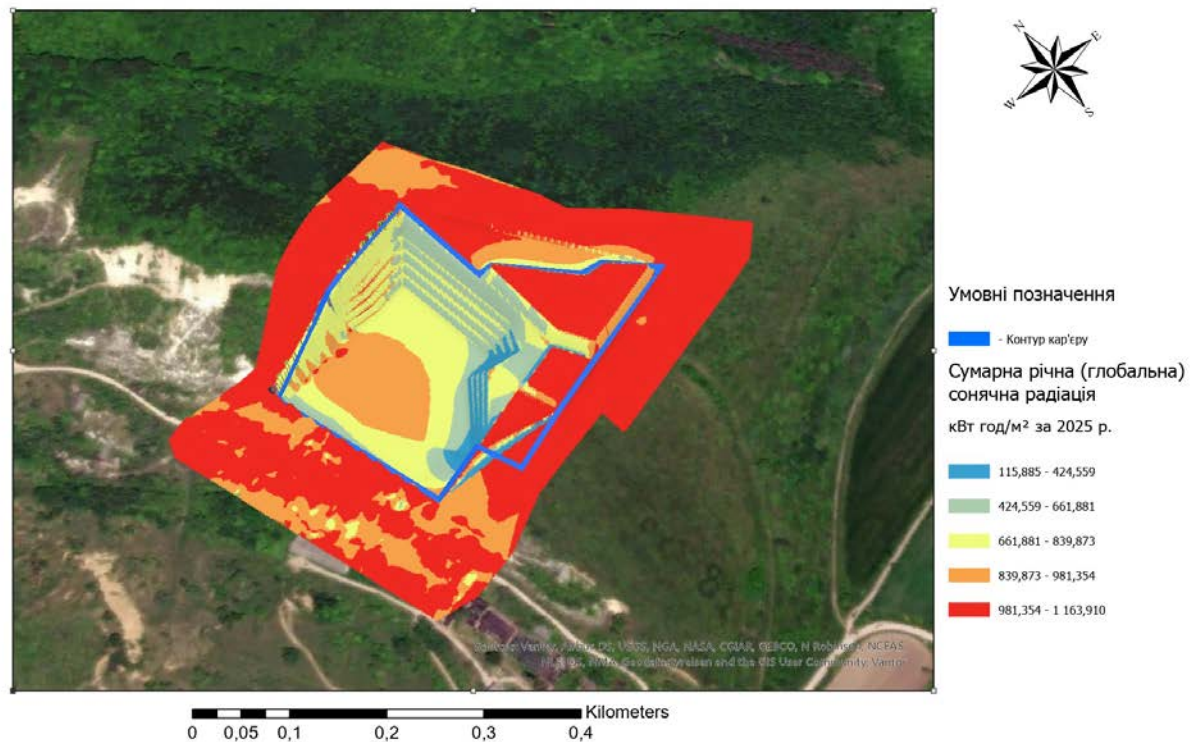


Рисунок 4.19 - Цифрова модель сумарної річної (глобальної) сонячної радіація на проєктний рельєф кар'єру «Олешів» (кВт·год/м²)

Згідно з Рисунком 4.19, загальний діапазон радіації становить 115,88-1 163,91 кВт·год/м²·рік. Можна виділити такі особливості інсоляційного режиму проєктного стану:

1. Зони критичного затінення: Борти кар'єру, що мають північну та північно-східну експозицію, потрапляють у класи мінімальної інсоляції (від 115,88 до 661,88 кВт·год/м²·рік) через постійне екранування сонячних променів власним масивом.
2. Ефект горизонту на днищі: На відміну від фактичного стану, де переважав максимальний (червоний) клас інсоляції, ідеально плоске днище проєктного кар'єру зміщується у середні класи (жовтий та помаранчевий, 661,88-981,35 кВт·год/м²·рік). Це явище зумовлене «ефектом колодязя»: високі стрімкі борти кар'єру фізично перекривають лінію горизонту, відсікаючи значну частину прямої сонячної радіації у

ранкові, вечірні години, а також у зимові місяці при низькому куті стояння сонця.

3. Локальні максимуми: Максимальні показники інсоляції (червоний клас, 981,35-1 163,91 кВт·год/м²·рік) зберігаються переважно на брівках кар'єру, прилеглих територіях та частково на внутрішньому борті південної експозиції.

Висновки до підрозділу 4.5

- Парадокс проєктної геометрії: На прикладі кар'єру «Олешів» доведено, що створення глибокої виїмки генерує подвійний ефект для сонячної енергетики. З одного боку, формується ідеально плоске днище, що має високу геометричну та технологічну придатність. З іншого - виникає значне затінення периметральними бортами, що зрізає пікові показники сумарної інсоляції порівняно з відкритими ділянками до початку глибоких робіт.
- Рекомендації для проєктування СЕС: * Планування сонячної електростанції в даному кар'єрі має зосереджуватися на плоскому днищі. Попри втрату абсолютної інсоляції через затінення бортами, легкість монтажу (без складних опорних конструкцій для компенсації кута) та захищеність від вітрових навантажень роблять цю зону найоптимальнішою.
 - Північні, затінені борти кар'єру (із показниками інсоляції ≤ 660 кВт·год/м²) є зонами жорстких обмежень і повинні виключатися з генерального плану розміщення генераційних потужностей.
 - Верхні яруси південного борту можуть розглядатися як резервні площі високого потенціалу, проте їх використання вимагатиме застосування нестандартних систем кріплення для компенсації стрімкого ухилу.

4.6. Верифікація результатів мікромасштабного моделювання з макрорегіональними даними Global Solar Atlas

Для підтвердження валідності розроблених мікромасштабних ГІС-моделей (описаних у підрозділах 4.1-4.5) та позиціонування досліджуваних об'єктів у загальнорегіональному енергетичному контексті, було проведено порівняльний аналіз із даними глобальної бази "Global Solar Atlas" (на основі розрахунків Світового банку та Solargis) [74].

Дані GSA репрезентують макрорегіональний рівень оцінювання (роздільна здатність сітки близько 250 м), який відображає усереднений сонячний потенціал території на ідеально горизонтальну поверхню без врахування глибокої мікроморфології антропогенного рельєфу.

У Таблиці 4.3 наведено базовий скринінг сонячного потенціалу для ширшої вибірки з 11 порушених гірничими роботами територій регіону, на основі якого визначався композитний індекс сонячної придатності (S_{sol}) та ранг об'єкта.

Використання карт сонячної радіації в межах локального просторового аналізу є методично виправданим, оскільки інсоляційні поверхні можуть застосовуватися як вхідний шар для моделей придатності територій і вибору оптимальних місць розміщення об'єктів [56].

Таблиця 4.3 - Результати макрорегіонального скринінгу сонячного потенціалу кар'єрів регіону (за даними Global Solar Atlas)

ID	Назва кар'єру	GHI, кВт·год/м ²	DNI, кВт·год/м ²	DIF, кВт·год/м ²	PVOUT, кВт·год/кВтп	OPTA, °	Індекс	Ранг
1	Городенківське	1 202,3	1 108,5	583,1	1 189,7	37	100,00	1
2	Стрільченське	1 202,1	1 106,8	583,4	1 181,8	37	99,98	2
3	Петрівське	1 187,8	1 083,1	582,8	1 167,7	37	98,79	3
4	Делівське	1 177,3	1 055,7	579,9	1 150,6	36	97,92	4
5	Межигірсько- Маринопільське	1 170,7	1 052,9	579,1	1 146,6	37	97,37	5
6	Водники	1 169,3	1 056,0	578,7	1 144,0	37	97,25	6
7	Олешівське	1 168,4	1 045,1	576,9	1 154,3	37	97,18	7
8	Дубівецький	1 167,3	1 049,1	577,9	1 147,9	37	97,08	8
9	Межигірсько- Дубовецьке	1 166,4	1 048,2	577,5	1 144,9	37	97,01	9
10	Стриганецький	1 152,5	998,0	572,0	1 144,2	37	95,85	10
11	Москалівське	1 152,2	1 041,4	575,6	1 128,9	37	95,83	11

(Складено автором на основі оброблених вихідних даних GSA).

Як видно з Таблиці 4.3, детально досліджені нами кар'єри (Водники, Олешівське, Стриганецький) займають середні та нижні позиції у загальнорегіональному макрорейтингу, з базовою глобальною горизонтальною інсоляцією (GHI) на рівні 1152-1169 кВт·год/м².

Однак, принциповим науковим результатом дисертаційного дослідження є доведення того факту, що макрорегіональна оцінка (GSA) є недостатньою для проектування рекультивації, оскільки вона не враховує глибоких трансформацій рельєфу, які здійснюють домінуючий вплив на мікроклімат виробітку. Для підтвердження цієї тези зведено порівняльну Таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 - Порівняльний аналіз макрорегіональних (GSA) та локальних мікроморфометричних (ГІС) показників інсоляції об'єктів-представників

Назва об'єкта	Фонова інсоляція GHI (за GSA), кВт·год/м ²	Макс. інсоляція на проєктний рельєф (ГІС), кВт·год/м ²	Відхилення (ефект мікрорельєфу), %	Вплив геометричного профілювання кар'єру (висновки ГІС-моделювання)
Водники	1 169,3	1 165,4	-0,33 %	Позитивний: подолання несприятливої природної північно-західної експозиції схилу завдяки жорсткому горизонтальному терасуванню.
Олешівське	1 168,4	1 163,9	-0,38 %	Негативний (ефект "чаші"): значне затінення стрімкими бортами зрізає пікові показники сумарної інсоляції навіть на ідеально плоскому дніщі виробітку.
Стриганецький	1 152,5	1 162,9	+0,90 %	Максимально позитивний: формування оптимального "ядра інсоляції". Нахил терас та їхня експозиція дозволили локально перевершити макрорегіональний фон.

Наукове обґрунтування результатів порівняння:

1. Глобальні бази даних (GSA) вказують на те, що оптимальний теоретичний кут нахилу (ОПТА) для всього регіону становить 37°. Однак наше локальне моделювання (Таблиця 4.1) показало, що для досліджуваного об'єкта з урахуванням морфології терас і геометрії рельєфу розрахунково оптимальний кут нахилу становить 32-34°.

2. Дані GSA не здатні розпізнати зони катастрофічного падіння генерації. Для прикладу, в кар'єрі «Олешів» тіньові екрани від північних бортів знижують локальну інсоляцію до 115,88 кВт·год/м² (втрата понад 90% ресурсу), що робить ці ділянки абсолютно непридатними, незважаючи на високий базовий рейтинг у 1168,4 кВт·год/м².
3. Феномен Стриганецького кар'єру доводить, що грамотне інженерне планування гірничих робіт на фінальному етапі здатне штучно генерувати поверхні, чий сонячний потенціал локально перевищує фоновий показник цілого макрорегіону.

4.7 Підсумкові висновки до розділу 4

1. Просторова неоднорідність як ключовий фактор: Доведено, що порушені гірничими роботами території володіють надвисокою просторовою мозаїчністю інсоляційного ресурсу. Застосування виключно макрорегіональних баз даних (на кшталт Global Solar Atlas) для планування відновлюваної енергетики в кар'єрах є хибним, оскільки похибка через неврахування внутрішнього затінення та експозиції бортів може сягати 80-90%.
2. Типологія кар'єрних форм та їх енергетичний відгук: За результатами 3D-моделювання виокремлено три типові інсоляційні патерни проєктних станів кар'єрів:
 - Терасований відкритий (Стриганецький): забезпечує найвищу адаптивність, дозволяючи формувати суцільні енергетичні поля з інсоляцією до 1162 кВт·год/м².
 - Терасований схиловий (Водники): потребує жорсткого прив'язування панелей виключно до горизонтальних майданчиків ($\leq 7^\circ$) для нівелювання природного падіння рельєфу.
 - Закрита виїмка / чаша (Олешів): генерує значний ефект екранування горизонту; розміщення генеруючих потужностей має

обмежуватися виключно днищем із відступом від північних бортів.

3. Оптимізація просторового розміщення: Розраховано та обґрунтовано локально оптимальні просторові параметри встановлення ФЕМ для досліджених рекультивованих кар'єрних територій. Встановлено, що в межах виконаного моделювання для максимізації енерговиходу доцільним є кут нахилу панелей $32-34^\circ$ та азимутальна орієнтація в діапазоні $165^\circ-195^\circ$. При цьому зазначені параметри слід розглядати як референтний просторово-інженерний орієнтир для проектного опрацювання, а не як універсальний стандарт для всіх післявидобувних територій регіону.
4. Концепція проектної адаптації: Встановлено, що перехід від фактичного до проектного стану на завершальних стадіях розробки родовищ здатен цілеспрямовано покращити енергетичну придатність об'єкта. Відповідно, паспорти завершення виробітку повинні розроблятися не лише з позиції стабілізації відкосів, а й з урахуванням максимізації пологих поверхонь південної експозиції для майбутньої екологічної ревіталізації.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНА АПРОБАЦІЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ З РЕВІТАЛІЗАЦІЇ КАР'ЄРІВ ОБ'ЄКТАМИ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

5.1 Інженерно-екологічне обґрунтування ревіталізації Стриганецького кар'єру

На основі результатів розділу 4, де для об'єкта встановлено локально оптимальний кут нахилу модулів $\beta = 33^\circ$, у підрозділі 5.1 додатково розглянуто сценарій проєктного профілювання тераси з ухилом $\alpha = 18^\circ$ для перевірки геометрії міжрядного розміщення. Геометрично це означає, що модулі нахилені приблизно на $(\beta - \alpha) \approx 15^\circ$ відносно площини ухилу.

Для перевірки гіпотези розглянуто два варіанти довжини “столу” (ряду) в поперечному перерізі:

- довгий стіл $L = 10,07$ м (для розміщення на похилій терасі)
- короткий стіл $L = 5,035$ м (для порівняння з розміщенням на горизонтальній поверхні)

Для конструктивної схеми прийнято підняте встановлення: нижній край модулів на висоті $h_{\text{low}} = 0,23$ м. Для $L = 10,07$ м верхній край орієнтовно $h_{\text{up}} \approx 2,96$ м (Рис. 5.4).

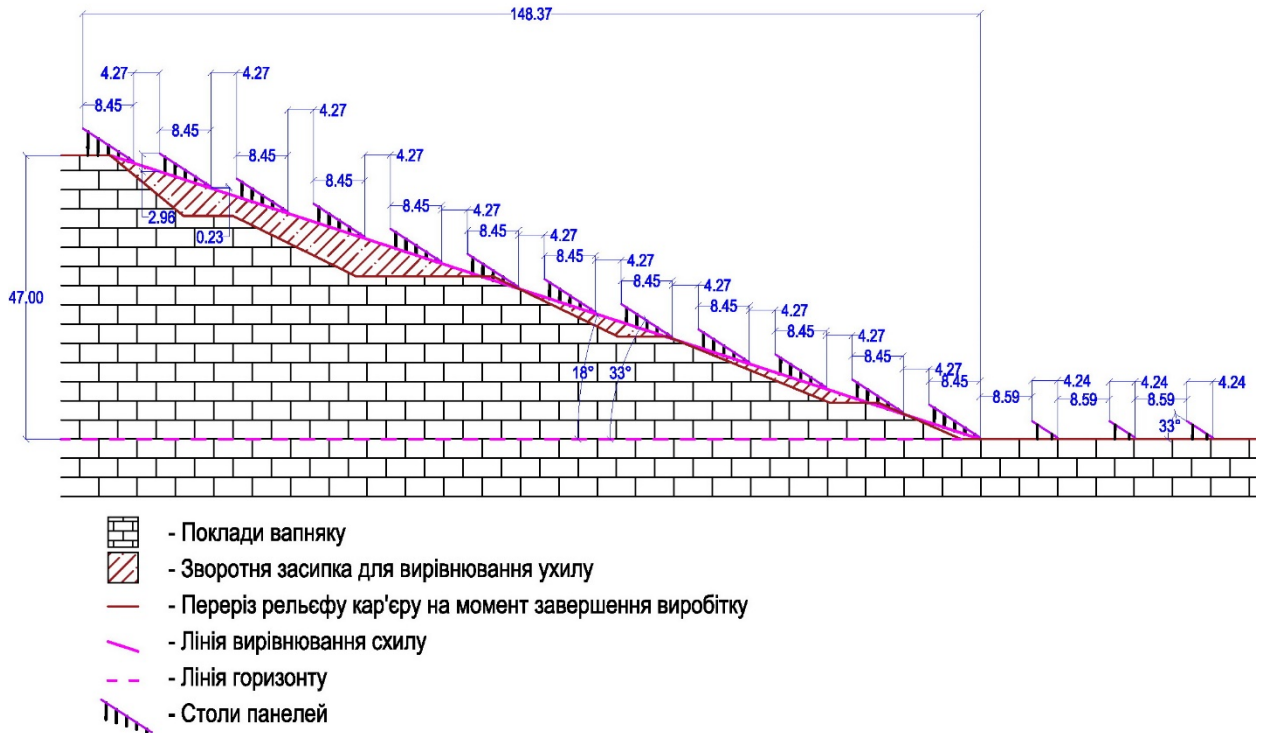


Рисунок 5.4 - Поперечний розріз проектного профілювання тераси та схема розміщення рядів СЕС.

5.1.1 Пояснення прийнятих відстаней між рядами

Для уникнення плутанини в межах апробації фіксуються два різні (але пов'язані) параметри:

- P (pitch) - крок між рядами: відстань від нижньої (передньої) кромки одного ряду до нижньої (передньої) кромки наступного ряду в напрямку, перпендикулярному до осі рядів
- g (clear gap) - чистий проміжок між рядами від закінчення панелі до початку наступної панелі: відстань від верхньої (задньої) кромки попереднього ряду до нижньої (передньої) кромки наступного ряду в тому ж напрямку

Між ними існує проста залежність:

- $g = P - D$
- де D - "слід" панелі по землі (горизонтальна проєкція довжини столу):
- $D = L \cdot \cos\beta$

Pitch P у класичній постановці визначається так, щоб у критичний момент тінь від верхньої кромки попереднього ряду не потрапляла на робочу площину наступного ряду. У літературі для аналітичної перевірки часто застосовують консервативний критерій “без взаємного затінення” для зимового періоду, а також розглядають вплив ухилу поверхні на зменшення тіней на схилах, орієнтованих у бік екватора [110].

5.1.2 Розрахункове порівняння за схемою апробації: похила тераса проти горизонталі

Апробацію виконано в єдиній постановці кута нахилу модулів до горизонту $\beta = 33^\circ$, а критичний момент для порівняння прийнято консервативно для зимового періоду, що відповідає практиці визначення міжрядних відстаней за умов мінімізації взаємного затінення (або обмеження його втрат).

Далі наведено ключові результати, які відображені на схемі (Рис. 5.4).

1. Похила тераса кар'єру ($\alpha = 18^\circ$), довгий стіл $L = 10,07$ м
 - Довжина панелі по горизонталі: $D = L \cdot \cos\beta \approx 10,07 \cdot \cos 33^\circ \approx 8,45$ м
 - крок між рядами (pitch по горизонталі): $P \approx 12,70$ м
 - чистий проміжок між рядами: $g = P - D \approx 12,70 - 8,45 \approx 4,27$ м

Інтерпретація: за наявності ухилу тераси взаємне затінення між рядами зменшується, оскільки похила основа наближає приймальну площину наступного ряду до напрямку падіння променів у зимовий період; у підсумку для забезпечення критерію без взаємного затінення достатньо меншого pitch, ніж на горизонталі. Такий висновок узгоджується з аналітичними порівняннями затінення на горизонтальних і похилих площинах (для схилів, зорієнтованих у бік екватора).

2. Горизонтальна поверхня ($\alpha = 0^\circ$), короткий стіл $L = 5,035$ м
 - Розмір панелі по горизонталі: $D = L \cdot \cos\beta \approx 5,035 \cdot \cos 33^\circ \approx 4,22$ м
 - крок між рядами (pitch по горизонталі): $P \approx 12,82$ м

- чистий проміжок між рядами: $g = P - D \approx 12,82 - 4,22 \approx 8,59$ м

Попри те, що на горизонтальній поверхні застосовано коротший стіл (5,035 м), чистий проміжок між рядами g виходить суттєво більшим ($\approx 8,59$ м), ніж у випадку довгого столу (10,07 м) на похилій терасі кар'єру ($\approx 4,27$ м), це означає, що коротші панельні столи на горизонтальній основі в зимовій геометрії вимагають значно більшого вільного простору між рядами через довгі тіні при низькій висоті Сонця; натомість довші столи на похилій терасі формують меншу зону взаємного затінення завдяки нахиленій основі, і тому допускають суттєво менший міжрядний проміжок при збереженні умови без взаємного затінення.

Практична оцінка наслідку для щільності розміщення (1 га). У спрощеній постановці щільність часто характеризують через GCR (ground cover ratio) як відношення довжини ряду до pitch ($GCR \approx D/P$). Для традиційних наземних СЕС фіксованого нахилу типові діапазони GCR наводяться в емпіричних оглядах землекористування для utility-scale PV [113].

Для порівняння:

- горизонтальна поверхня, $L = 5,035$ м: $GCR \approx 5,035 / 12,82 \approx 0,39$ (еквівалентно $\approx 3\,900$ м² модулів на 1 га)
- похила тераса, $L = 10,07$ м: $GCR \approx 10,07 / 12,70 \approx 0,79$ (еквівалентно $\approx 7\,900$ м² модулів на 1 га)

Отже, запропонована схема розміщення на похилій терасі кар'єру потенційно забезпечує майже двократне підвищення щільності розміщення модулів у межах тієї ж умовної площі порівняно з розміщенням на горизонтальній ділянці за однакового кута нахилу модулів до горизонту.

5.1.3 Висновок апробації для Стриганецького кар'єру

Апробація за поперечним розрізом проєктного профілювання тераси Стриганецького кар'єру демонструє приклад використання ГІС-результатів (розрахованого просторового розподілу сонячної радіації та карт ухилів,

побудованих на основі DEM) для формування проектної пропозиції щодо максимізації виробітку. У межах заданих параметрів ($\alpha = 18^\circ$, $\beta = 33^\circ$, азимут 180°) похила основа тераси забезпечує істотне зменшення взаємного затінення і, як наслідок, зменшує необхідний “чистий проміжок” між рядами г. Найпоказовіше, що довший стіл (10,07 м) на похилій терасі формує меншу міжрядну зону, ніж коротший стіл (5,035 м) на горизонтальній поверхні, оскільки саме геометрія низького зимового Сонця робить горизонтальне компонування більш вимогливим до вільного простору між рядами. Такий результат узгоджується з аналітичними дослідженнями впливу ухилу поверхні на затінення в багаторядних PV-масивах [110].

5.2 Інженерне обґрунтування та просторова оптимізація розміщення фотоелектричної станції (на прикладі кар'єру «Водники»)

У контексті екологічної ревіталізації порушених гірничими роботами земель Івано-Франківської області, логічним та критично необхідним етапом дослідження, що слідує за теоретичним просторовим моделюванням сонячного потенціалу, є практична апробація отриманих результатів на конкретному об'єкті. Базовим об'єктом для такої апробації обрано кар'єр «Водники». Специфіка цього об'єкта полягає у складному морфологічному розташуванні на схилі, що створює як певні інженерні виклики, так і можливості для відпрацювання алгоритмів екологічно безпечного просторового планування генерації з відновлюваних джерел.

Запропоноване конструктивне рішення розроблено з урахуванням специфіки перепадів висот і суворо відповідає умовам максимально щільного розміщення модулів без виникнення ефекту додаткового взаємного затінення рядів. Формування багаторівневої системи горизонтальних терас на етапі завершення виробітку дозволяє створити оптимальні умови для монтажу опорних металоконструкцій, які компенсують локальні мікроградієнти поверхні та забезпечують стабільність масиву панелей.

Керуючись результатами попереднього просторового та математичного моделювання (наведеними у розділі 4), базовим інженерним стандартом для даного проекту встановлено фіксований кут нахилу фотоелектричних панелей відносно абсолютного горизонту на рівні 33° . Такий кут забезпечує максимальну ефективність збору прямої сонячної радіації для географічної широти розташування об'єкта. Для візуалізації просторового планування та інженерної адаптації генеруючих потужностей до складної морфології виробітку було розроблено схему розміщення фотоелектричних модулів, яка зображена на рисунку 5.1.

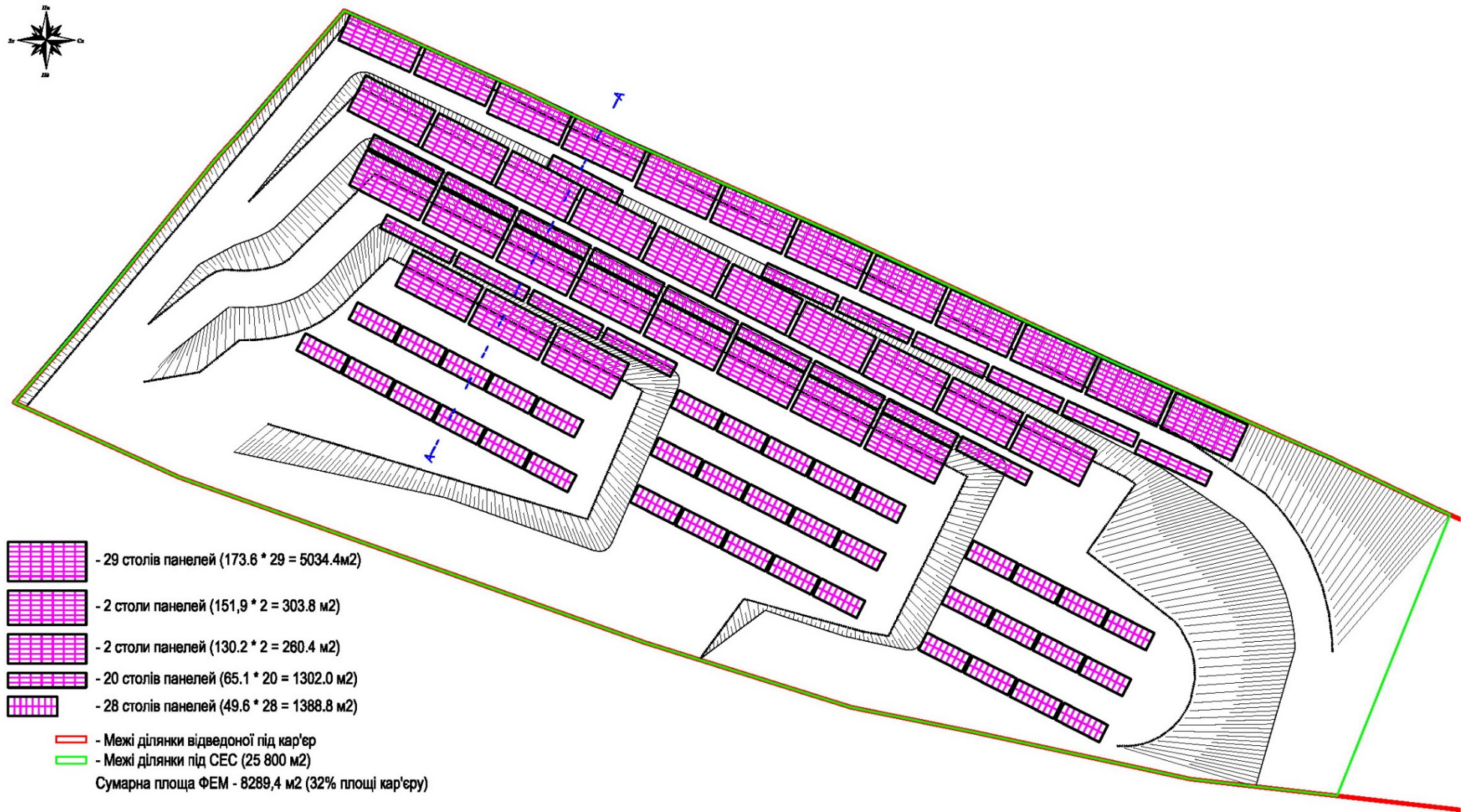


Рисунок 5.1 - Схема розміщення фотоелектричних модулів.

Як наочно видно з розробленої карти (рис. 5.1), конфігурація штучно сформованих терас визначає вимушене просторове орієнтування рядів. Середній азимут розміщених фотоелектричних елементів складає 207° , що відповідає південно-західному напрямку. Такий зсув від ідеального півдня є технологічно обґрунтованим компромісом, який дозволяє гармонійно вписати конструкції у вигнуту геометрію кар'єру та супроводжується прийнятними інсоляційними втратами (близько 2,21%) порівняно зі строго південною орієнтацією.

Відповідно до схеми розміщення СЕС (рис. 5.1), загальна площа ділянки яка буде використовуватися під, становить $25\,800\text{ м}^2$. Проектом передбачено розміщення 81 стола панелей, які згруповані у п'ять різних просторових конфігурацій (блоків) для максимального використання корисної площі терас:

- 29 столів панелей (сумарною площею $5\,034,4\text{ м}^2$);
- 2 столи панелей (сумарною площею $303,8\text{ м}^2$);
- 2 столи панелей (сумарною площею $260,4\text{ м}^2$);
- 20 столів панелей (сумарною площею $1\,302,0\text{ м}^2$);
- 28 столів панелей (сумарною площею $1\,388,8\text{ м}^2$).

Інтеграція цих блоків формує загальну корисну (активну) площу генерації у розмірі $8\,289,4\text{ м}^2$. Отже, площа, яку вдалося ефективно закласти фотоелектричними модулями, складає 32% від загальної відведеної площі кар'єру.

Також, для максимальної наглядності та деталізації інженерних рішень щодо просторового розміщення фотоелектричних модулів безпосередньо на різновисотних терасах і стрімких уступах кар'єру, було додатково розроблено схему поперечного перерізу об'єкта (схему закріплення СЕС). Цей графічний документ (Рис. 5.1) наочно демонструє механіку компенсації природного ухилу рельєфу за допомогою металоконструкцій. Завдяки розробленому перерізу підтверджено можливість витримати заданий кут нахилу панелей у 33° та оптимізувати міжрядні дистанції, що унеможливило взаємне затінення

робочих поверхонь навіть у періоди найнижчого стояння сонця.

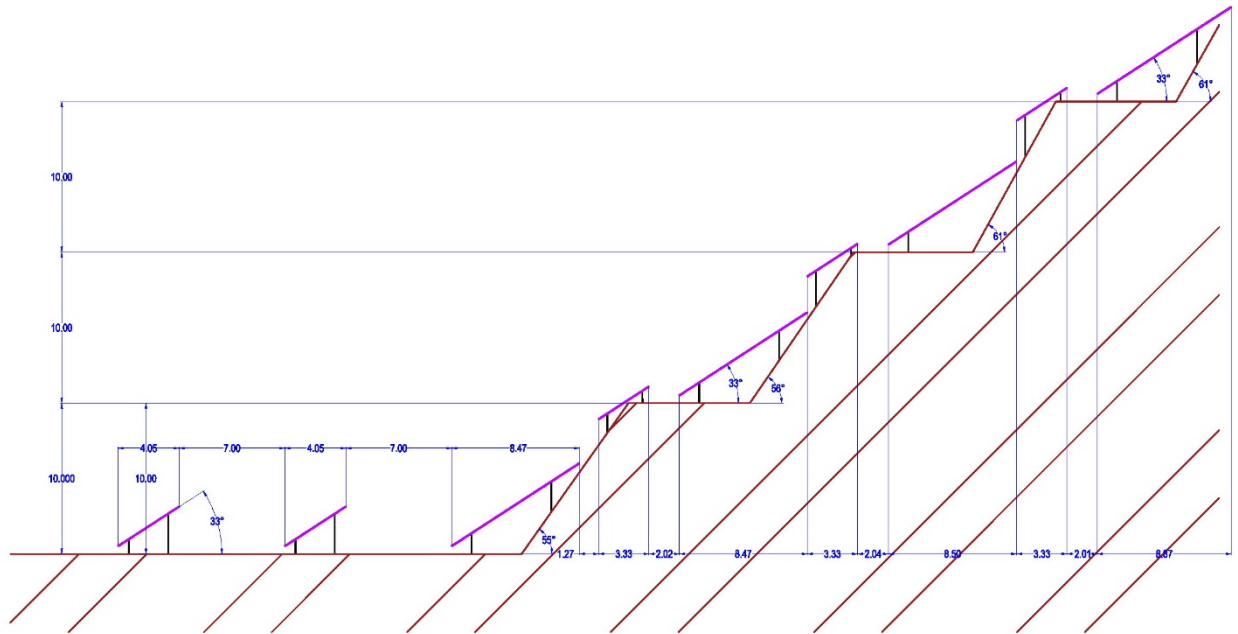


Рисунок 5.2 - Розріз А-А схеми розміщення СЕС.

Аналіз розробленої картосхеми (рис. 5.1) та профілю перерізу (рис. 5.2) також наочно демонструє просторові переваги використання штучних перепадів висот. Зокрема, розміщення СЕС безпосередньо на уступах кар'єру суттєво мінімізує ефект взаємного затінення від суміжних рядів. Це створює інженерну можливість розташовувати панелі значно щільніше одна до одної порівняно з горизонтальними ділянками. Для порівняння, у південній стороні кар'єру, де масив панелей проектується на відносно рівнинній площині, для уникнення затінення дистанцію між рядами довелося встановити на рівні 7 метрів. Таке вимушене розширення міжрядного простору на рівнинних ділянках суттєво зменшує корисну площу генерації, що ще раз підкреслює просторову та енергетичну цінність саме терасованих схилових елементів виробітку[78].

Відносно цих затверджених інженерно-геометричних параметрів проекту (активна площа 8 289,4 м², кут нахилу 33°, південно-західний азимут 207° та локальний рівень інсоляції) було проведено подальші розрахунки

прогнозованого максимального виробітку електроенергії для рекультивованого кар'єру «Водники».

5.2.1 Прогнозування максимального енергетичного виробітку з урахуванням просторових і азимутальних відхилень

Кількісним підтвердженням ефективності ревіталізації є розрахунок прогнозованого виробітку електричної енергії запроєктованою СЕС. Для визначення реалістичного генеруючого потенціалу станції розроблено математичну модель, яка спирається на результати мікромасштабного моделювання інсоляції (Розділ 4) та комплексно враховує локальний азимутальний зсув, фізико-технічні параметри сучасних фотоелектричних систем і системні втрати.

Розрахунок здійснюється за наступною інтегральною формулою:

$$- E_{max} = A_{active} \times \eta \times H_i \times PR \times K_{az} \quad (5.1),$$

- де E_{max} - максимальний прогнозований річний виробіток електроенергії (кВт·год/рік), що характеризує енергетичний потенціал рекультивованої ділянки;
- A_{active} - сумарна активна (робоча) площа СЕС, яка, згідно з генеральним планом, становить 8 289,4 м²;
- - номінальний коефіцієнт корисної дії (ККД) сучасних монокристалічних кремнієвих модулів. З огляду на сучасний стан технологій (наприклад, технології PERC, TOPCon або HJT), середній робочий ККД для масових комерційних панелей приймається на консервативному рівні 21% (або 0,21);
- H_i - максимальна сумарна річна глобальна інсоляція на поверхню проєктного рельєфу кар'єру. Згідно з побудованою картою глобальної радіації для етапу завершення виробітку (Рис. 4.13), площі терас

утворюють «ядро генерації», отримуючи максимальну радіацію. Для розрахунків приймається верхня межа червоного класу інсоляції, що становить $1\,165,40$ кВт·год/м²·рік;

- PR (Performance Ratio) - коефіцієнт продуктивності системи. Цей параметр агрегує всі експлуатаційні втрати станції: втрати в інверторах під час перетворення постійного струму на змінний (близько 2-3%), втрати в кабельних лініях постійного і змінного струму (1-2%), теплові втрати модулів у спекотні місяці (температурна деградація потужності), а також втрати від забруднення поверхні (пилоутворення в кар'єрі). Для об'єктів такого типу PR об'єктивно оцінюється на рівні 80% (або 0,80);
- K_{az} - поправковий коефіцієнт азимутального відхилення. Як було обґрунтовано вище, для експозиції терас у 207° розрахункові інсоляційні втрати становлять 2,21%. Отже, коефіцієнт становить $K_{az} = 1 - 0,02 = 0,98$.

Підставивши обґрунтовані проєктні значення у розрахункову модель, визначаємо загальний річний енергетичний баланс об'єкта:

$$E_{max} = 8289,4 \times 0,21 \times 1165,40 \times 0,80 \times 0,98 \approx 1\,587\,082 \text{ кВт год}$$

Таким чином, максимальний прогнозований річний виробіток електроенергії для проєктованої СЕС у межах рекультивованого кар'єру «Водники», з урахуванням дотримання оптимального кута нахилу панелей (33°) та вимушеної просторової південно-західної орієнтації терас (207°), становитиме близько $1,59$ ГВт·год (або $1\,587$ МВт·год).

Отримане значення свідчить про високу рентабельність прийнятого проєктного рішення. Воно підтверджує гіпотезу про те, що відпрацьовані кар'єрні виробітки, які традиційно розглядаються як екологічно небезпечні деградовані території, за умови правильного геоінформаційного та інженерного планування можуть бути успішно трансформовані в потужні вузли генерації екологічно чистої енергії.

5.3 Інженерно-екологічне обґрунтування ревіталізації глибокого кар'єру чашоподібної форми (на прикладі кар'єру «Олешів»)

Наступним етапом практичної апробації є розробка проектних рішень для гірничих об'єктів зі складнішою морфологією, типовим представником яких у регіоні є кар'єр «Олешів». Відповідно до результатів просторового аналізу, наведених у розділі 4, даний об'єкт класифікується як закрита виїмка (чашоподібна форма). Така специфічна геоморфологія генерує значний ефект екранування горизонту: високі борти створюють суттєве затінення на дні виробітку, а наявні гірничі уступи відзначаються високою стрімкістю та крутизною, що технологічно унеможлиблює класичне монтування сонячних панелей на їхній поверхні.

Традиційний інженерний підхід (горизонтальне розміщення столів на дні або формування стандартних терас) у даному випадку є енергетично неефективним через глибокі тіньові зони та критичну втрату корисної площі, викликану необхідністю широкого дистанціювання рядів. З огляду на це, для кар'єру «Олешів» запропоновано інноваційне проектно рішення, яке полягає у цілеспрямованому гірничотехнічному профілюванні рельєфу виробітку шляхом спрямованого відсипання.

Суть запропонованої концепції зводиться до формування в межах кар'єру суцільного штучного макросхилу із заданим монотонним кутом нахилу на рівні 33° . Цей показник є абсолютно оптимальним для вловлювання прямої сонячної радіації у даній географічній широті. Формування такого підготовленого схилу докорінно змінює технологію монтажу обладнання: фотоелектричні модулі розміщуються компланарно - тобто паралельно до площини самого ухилу.

Такий підхід повністю ліквідує проблему взаємного затінення рядів (тінь від верхніх модулів фізично не може падати на нижні). Це створює можливість суттєво підвищити щільність забудови. Проте, з огляду на вимоги до

експлуатації об'єктів енергетики, суцільне покриття схилу панелями є технологічно неможливим. Для забезпечення життєдіяльності станції проєктом передбачено резервування 40% площі схилу під супутню інфраструктуру: прокладання кабельних ліній постійного та змінного струму, облаштування технологічних під'їзних доріг, а також створення сервісних коридорів для технічного обслуговування (миття, ремонту та заміни ФЕМ). Відповідно, коефіцієнт корисного заповнення території (Ground Coverage Ratio) активними генеруючими елементами прийнято на реалістичному рівні у 60%.

Для візуалізації просторового планування та підтвердження ефективності даного концепту було розроблено 3D-модель проєктного рельєфу кар'єру «Олешів» із заданим кутом схилу, яка наведена на рисунку 5.2.



Рисунок 5.3 Модель проєктного рельєфу кар'єру «Олешів» зі сформованим ухилом 33°

Для визначення реального енергетичного потенціалу цієї оптимізованої поверхні, з урахуванням залишкового екранування від верхніх кромek бортиv кар'єру, було проведено мікромасштабне моделювання надходження сонячної інсоляції, результати якого наведено на картосхемі (рис. 5.4).

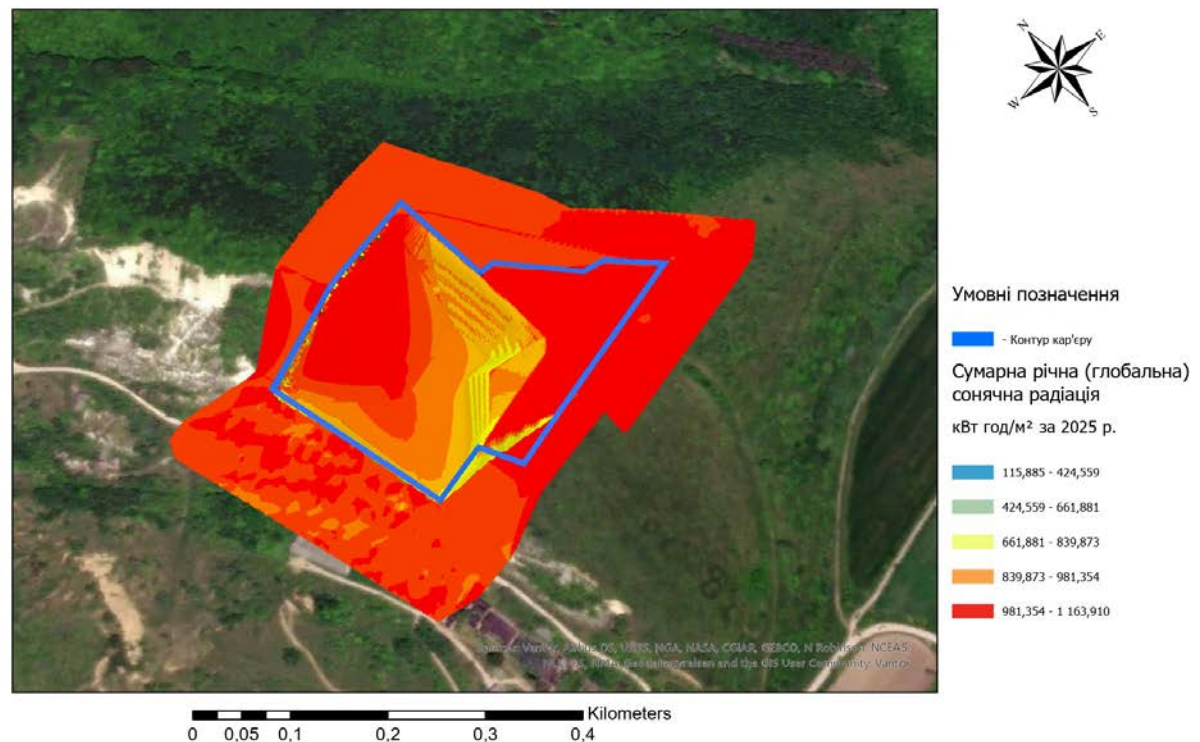


Рисунок 5.4 - Картосхема розподілу сонячної інсоляції на проектному схилі кар'єру «Олешів»

Згідно з результатами просторового моделювання (рис. 5.4), загальна площа сформованого ухилу становить 11 180 м². Оскільки під активну генерацію відведено 60% цієї території, робоча площа СЕС дорівнює:

$$A_{\text{active}} = 11\,180 \times 0,60 = 6\,708 \text{ м}^2$$

При цьому розрахунковий показник сумарної річної сонячної інсоляції на дану похилу поверхню досягає високих значень і становить 1 150,2 кВт·год/м² на рік.

На основі отриманих просторових та радіаційних даних було здійснено розрахунок максимального прогнозованого виробітку електроенергії для

даного об'єкта. Розрахунок проведено за оптимізованою математичною моделлю (5.1):

$$E_{\max} = 6\,708 \times 0,21 \times 1\,150,20 \times 0,80 \approx 1\,296\,211 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$$

Отже, прогнозований річний виробіток електроенергії на спрофільованому схилі кар'єру «Олешів», з урахуванням виділення необхідних площ під інфраструктуру та обслуговування, становитиме близько 1,30 ГВт·год (або 1 296 МВт·год).

Отримані результати переконливо доводять, що застосування методу компланарного монтажу на попередньо спрофільованих гірничих схилах дозволяє знайти ідеальний баланс між високою енергетичною щільністю (генерація 1,3 ГВт·год з ділянки площею 1,1 га) та вимогами до експлуатаційної безпеки і технічного обслуговування об'єкта. Це перетворює навіть найскладніші за формою чашоподібні кар'єри на повноцінні вузли декарбонізованої енергетики регіону.

5.4 Висновок до розділу 5

У розділі 5 здійснено практичну апробацію просторово-інженерних підходів до ревіталізації відпрацьованих кар'єрів шляхом їх потенційного використання для розміщення об'єктів сонячної енергетики. На основі результатів попереднього інтегрального оцінювання та детального ГІС-аналізу пілотних об'єктів обґрунтовано можливість переходу від етапу дистанційного скринінгу й локального просторового аналізу до формування передпроектних рішень щодо адаптації кар'єрного рельєфу під розміщення СЕС. Показано, що результати оцінювання морфометричних характеристик, інсоляційного режиму та конфігурації поверхонь можуть бути використані як підґрунтя для визначення доцільних параметрів профілювання терас, орієнтації модулів і просторового компонування рядів.

На прикладі пілотних кар'єрів встановлено, що морфологія післявидобувної території суттєво впливає на можливість її подальшого

енергетичного використання. Для Стриганецького кар'єру показано, що використання похилих терас у межах прийнятої схеми апробації створює передумови для зменшення взаємного затінення між рядами модулів і підвищення щільності їх розміщення. Для кар'єру «Водники» обґрунтовано можливість адаптації складного терасованого рельєфу до розміщення фотоелектричної станції за рахунок формування багаторівневої системи робочих майданчиків та узгодження просторових параметрів модулів із геометрією ділянки. Для кар'єру «Олешів» підтверджено доцільність диференційованого підходу до оцінювання окремих елементів рельєфу, за якого навіть за наявності локальних обмежень можуть бути виявлені придатні зони для розміщення фотоелектричних систем.

Отримані результати свідчать, що відпрацьовані кар'єри можуть розглядатися як перспективні території для розміщення сонячних електростанцій за умови їх попереднього просторового аналізу та інженерної адаптації. Водночас виконану апробацію слід трактувати як етап передпроектного обґрунтування, який дає змогу визначити принципову придатність території та окреслити можливі напрями її функціональної трансформації. Остаточне впровадження таких рішень потребує подальшого конструктивного, геотехнічного, електротехнічного та техніко-економічного опрацювання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у розробленні, теоретичному обґрунтуванні та практичній апробації ГІС-орієнтованої методики скринінгу, багатокритеріального оцінювання та інтегрального ранжування відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, а також у формуванні просторово-інженерних підходів до адаптації кар'єрного рельєфу під фотоелектричні системи. Сукупність одержаних результатів дозволила перейти від загальної ідеї ревіталізації техногенно порушених територій до формалізованої, відтворюваної та придатної до практичного застосування моделі прийняття рішень.

1. На підставі аналізу наукових джерел, сучасних підходів до GIS-MCDA оцінювання територій та практик використання постмайнінгових ландшафтів встановлено, що відпрацьовані кар'єри становлять перспективний територіальний резерв для розвитку сонячної енергетики, проте їх придатність не може визначатися лише за традиційними критеріями наземного розміщення СЕС. На відміну від стандартних майданчиків, кар'єрні території характеризуються поєднанням жорстких природоохоронних обмежень, складної морфології, неоднорідних геотехнічних умов, специфічної інфраструктурної доступності та локально змінного режиму інсоляції. Це зумовило необхідність розроблення спеціалізованої методики оцінювання, адаптованої саме до постмайнінгових територій.

2. У роботі розроблено цілісну ГІС-орієнтовану модель оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій, побудовану за архітектурою «Gate + WLC». Науково-методична перевага цієї моделі полягає у поєднанні двох різних логік прийняття рішень: некомпенсаційного фільтрування за критичними обмеженнями та компенсаційного інтегрального ранжування допустимих

альтернатив. Такий підхід дозволив, з одного боку, виключити об'єкти, що не відповідають базовим умовам просторової допустимості, а з іншого - забезпечити гнучке порівняння придатних кар'єрів за системою взаємопов'язаних критеріїв.

3. Методично обґрунтовано склад інтегральної моделі, до якої включено часткові індекси S_{sol} , S_{geo} , S_{grid} , S_{eco} та S_{log} , кожен із яких відображає окремий клас факторів, критичних для попереднього вибору кар'єру під СЕС. Для кожного індексу визначено набір вхідних параметрів, шкали оцінювання, правила нормалізації та принцип включення до підсумкового показника S_{core} . Це забезпечило внутрішню узгодженість моделі, уніфікацію вихідних даних та можливість її тиражування на інші вибірки об'єктів.

4. Важливим науковим результатом роботи є формалізація геотехнічного компонента у структурі попереднього ГІС-скринінгу. На відміну від поширених підходів, де геотехнічні умови розглядаються лише на пізніх етапах проєктування, у дисертації запропоновано окремий індекс, що дозволяє вже на стадії попереднього відбору враховувати придатність кар'єру за інженерно-геологічними ознаками. Це підвищує практичну достовірність скринінгу та зменшує ризик відбору об'єктів, які є формально привабливими за сонячним або мережевим потенціалом, але проблемними з точки зору подальшої реалізації.

5. У межах дослідження сформовано репрезентативну вибірку з 11 відпрацьованих кар'єрів Івано-Франківської області, для яких послідовно реалізовано повний цикл оцінювання - від gate-скринінгу до інтегрального ранжування. Установлено, що 9 кар'єрів відповідають базовим просторовим вимогам допустимості, тоді як 2 об'єкти виключаються з подальшого розгляду через наявність критичних обмежень. Отриманий результат підтвердив принципову необхідність використання Gate як обов'язкового первинного етапу моделі, що запобігає помилковому включенню неприйнятних територій до процедури ранжування.

6. За результатами інтегрального оцінювання визначено групу найбільш перспективних кар'єрів для подальшого проєктного опрацювання. Встановлено, що найвищі значення S_{core} отримали Стриганецький, Олешівський, Городенківський, Стрільченський та Дубівецький кар'єри. Одержане ранжування засвідчило, що підсумкова придатність визначається не одним домінантним фактором, а збалансованим поєднанням мережевої доступності, екологічної прийнятності, логістичних умов, геотехнічної придатності та сонячного потенціалу. Тим самим доведено, що розроблена модель адекватно відображає багатокритеріальну природу задачі та забезпечує змістовне, а не формальне ранжування альтернатив.

7. Виконано детальний просторовий аналіз пілотних кар'єрів із використанням цифрових моделей рельєфу, похідних карт ухилу та експозиції, а також результатів моделювання сонячної радіації в середовищі ArcGIS. Установлено, що в межах кар'єрних територій просторовий розподіл сонячної радіації істотно залежить від конфігурації бортів, крутості схилів, терасування, мікрорельєфу та локального екранування горизонту. Цей результат має принципове значення, оскільки доводить, що регіональний скринінг за усередненими даними не може повністю замінити локальний просторовий аналіз на рівні конкретного об'єкта.

8. На основі аналізу пілотних кар'єрів доведено, що кероване профілювання рельєфу є дієвим інструментом підвищення придатності відпрацьованих кар'єрів до енергетичного використання. Встановлено, що формування робочих терас і похилих поверхонь із параметрами, наближеними до енергетично доцільних, дозволяє поліпшити умови інсоляції, зменшити втрати від несприятливої експозиції та створити більш впорядковану просторову основу для розміщення фотоелектричних модулів. Отже, у роботі обґрунтовано перехід від пасивної оцінки наявного стану кар'єру до активної моделі його адаптації під нову функцію.

9. Обґрунтовано інженерні параметри розміщення фотоелектричних модулів на похилих кар'єрних поверхнях і терасах. Показано, що використання

похилої основи за відповідного співвідношення кута нахилу тераси та кута встановлення модулів дає змогу зменшити взаємне затінення між рядами, збільшити коефіцієнт покриття території модулями та підвищити щільність їх компонування в межах обмеженої площі. Таким чином, у роботі доведено, що морфологія кар'єру може розглядатися не лише як фактор обмеження, а і як ресурс інженерної оптимізації.

10. Практичну цінність результатів підтверджено на прикладі пілотних об'єктів, для яких виконано розрахунки просторових параметрів, оцінку сонячної радіації на поточному та проєктному рельєфі, а також прогнозування енергетичної ефективності запропонованих рішень. Апробація показала, що навіть за складної морфології кар'єрні території можуть бути адаптовані до ефективного розміщення фотоелектричних систем за умови поєднання ГІС-моделювання, інженерного профілювання та раціонального компонування рядів модулів. Це підтверджує прикладну реалізованість запропонованого підходу.

11. Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблена методика може бути використана як інструмент попереднього скринінгу відпрацьованих кар'єрів для швидкого виявлення найбільш перспективних об'єктів, як основа для передпроектного аналізу під час планування сонячних електростанцій, а також як допоміжний інструмент формування рекомендацій щодо рекультивації, ревіталізації та повторного функціонального використання техногенно порушених земель. Її застосування дозволяє суттєво звузити коло потенційних майданчиків ще до стадії дорогих детальних вишукувань і тим самим підвищити ефективність прийняття інженерних та інвестиційних рішень.

12. Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні спеціалізованої ГІС-орієнтованої моделі інтегрального оцінювання придатності відпрацьованих кар'єрів для розміщення сонячних електростанцій; у поєднанні некомпенсаційного gate-фільтра з компенсаційною багатокритеріальною агрегацією; у введенні геотехнічного

індексу до структури попереднього ГІС-скрінінгу; у формалізації системи часткових індексів та процедур їх нормалізації; а також у встановленні просторово-інженерних закономірностей адаптації кар'єрного рельєфу до вимог фотоелектричних систем.

13. Отримані результати розширюють наукові уявлення про можливості повторного використання кар'єрних територій і доводять, що відпрацьовані кар'єри доцільно розглядати не лише як об'єкти екологічного відновлення, а як перспективний просторовий ресурс для розвитку відновлюваної енергетики, декарбонізації та функціональної трансформації порушених земель. Запропонована методика має потенціал масштабування на інші регіони України та може бути адаптована до інших типів поствидобувних і техногенно трансформованих територій за умови коригування вхідних критеріїв відповідно до місцевих природних, інженерних та інфраструктурних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барабан, К. І., Приходько, М. М., & Архипова, Л. М. (2023). Оцінка перспективних екосистемних послуг планованої рекультивації териконів Львівсько-Волинського вугільного басейну. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 1(27), 23–32. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1\(27\)-23-32](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1(27)-23-32)
2. Верховна Рада України. (1992). Про природно-заповідний фонд України: Закон України від 16.06.1992 № 2456-ХІІ. База даних «Законодавство України».
3. Верховна Рада України. (1994). Кодекс України про надра. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/132/94-%D0%B2%D1%80>
4. Верховна Рада України. (1995). Водний кодекс України: Кодекс України; Закон від 06.06.1995 № 213/95-ВР. База даних «Законодавство України».
5. Верховна Рада України. (2001). Земельний кодекс України. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2768-14>
6. Верховна Рада України. (2003). Про охорону земель: Закон України. База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/962-15>
7. Верховна Рада України. (2017). Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII. База даних «Законодавство України».
8. Давибіда, Л. І. (2024). Використання платформи Google Earth Engine для систематизації даних геоекологічних досліджень на прикладі території Карпатського регіону. Екологічні науки, 4(55), 79–83. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.12>

9. Давибіда, Л. І., & Карпінський, Б. В. (2024). Можливості використання даних дистанційного зондування Землі для дослідження впливу нафтогазового комплексу на стан довкілля (на прикладі Карпатського регіону). *Екологічні науки*, 1(52), ч. 1, 36–41. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eso.1-52.1.5>
10. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. (n.d.). Офіційний електронний портал Держгеокадастру.
11. Кабінет Міністрів України. (1996). Про затвердження Порядку визначення розмірів і меж водоохоронних зон та режиму ведення господарської діяльності в них: Постанова Кабінету Міністрів України від 08.05.1996 № 486. База даних «Законодавство України».
12. Кабінет Міністрів України. (2024, August 13). Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання (Розпорядження № 761-р). Законодавство України.
13. Кабінет Міністрів України. (2024, June 25). Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року (Розпорядження № 587-р). Законодавство України.
14. Мандрик, О. М., Охарєв, В. О., Триснюк, Т. В., & Михайлюк, Р. Й. (2022). Моніторинг забруднення водозбору Дністра внаслідок повеней та інших екологічних катастроф. *Екологічна безпека та природні ресурси*, 43(3), 35–42.
15. Мандрик, О., Тирлич, Б., & Барабан, К. (2025). Кореляційно-регресійний аналіз впливу факторів довкілля на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності техногенних ландшафтів. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія Агрономія*, (29), 22–29.
16. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. (2018). Про затвердження Кодексу систем розподілу: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. База даних «Законодавство України».

17. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. (2018). Про затвердження Кодексу системи передачі: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 309. База даних «Законодавство України».

18. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. (2018). Про затвердження Методики (порядку) формування плати за приєднання до системи передачі та системи розподілу: Постанова НКРЕКП від 18.12.2018 № 1965. База даних «Законодавство України».

19. Петрук, В. Г., Гавадза, С. В., Єрмаков, В. М., Петрук, Р. В., & Лубенська, Н. В. (2024). Аналіз перспектив постмайнінгу гірничорудних об'єктів та декарбонізації і екологізації мінерально-сировинних ресурсів Вінниччини. У М. С. Мальований (Ред.), Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування (с. 420–447). Київ: Яроченко Я. В.

20. Природно-заповідний фонд України. (n.d.). Атлас об'єктів природно-заповідного фонду України.

21. Смик, І. Є., & Архипова, Л. М. (2023). Аналіз впливу метеорологічних умов на ефективність роботи сонячних панелей в Івано-Франківській області. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 1(27), 99–107. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1\(27\)-99-107](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2023-1(27)-99-107)

22. Триснюк, В. М., & Марущак, В. М. (2024). Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. Телекомунікаційні та інформаційні технології, 4(85), 113–118. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.044726>

23. Триснюк, В. М., & Шумейко, В. О. (2023). Інформаційні технології моделювання балкових конструкцій з використанням багатоспектральних матеріалів космічних апаратів. Екологічна безпека та природні ресурси, 47(3), 144–153.

24. Триснюк, В., & Єгоров, В. (2025). Математична модель розподілу ресурсів радіомоніторингу для спостереження за каналами супутникового зв'язку з використанням нейронних мереж. *Екологічна безпека та природні ресурси*, 53(1), 132–138.
25. Adelaja, A., Shaw, J., Beyea, W., & McKeown, J. C. (2010). Renewable energy potential on brownfield sites: A case study of Michigan. *Energy Policy*, 38(11), 7021–7030. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.021>
26. Amirkhani, A., Vakilifard, N., Naseri, A., & Zarandian, A. (2018). Spatial site selection for solar power plants using a GIS-based Boolean-Fuzzy logic model: A case study of Markazi Province, Iran. *Energies*, 11(7), 1648. <https://doi.org/10.3390/en11071648>
27. ASTM International. (2016). ASTM D4644-16: Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks. West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI: 10.1520/D4644-16.
28. Australian Renewable Energy Agency. (2020). Guide to Access Road Construction – Nyngan Solar Plant. URL: <https://arena.gov.au/assets/2020/03/guide-to-access-road-construction-at-nyngan-solar-plant.pdf>
29. Balta-Ozkan, N., Yildirim, J., & Connor, P. M. (2015). Regional distribution of photovoltaic deployment in the UK and its determinants: A spatial econometric approach. *Energy Economics*, 51, 417–429. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.003>
30. Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189–236. DOI: 10.1007/BF01239496.
31. Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0471601721.
32. Çelik, Y. E., Özgür, M. A., & Yıldız, H. K. (2023). GIS-based multicriteria decision analysis for spatial planning of solar photovoltaic power plants

in Çanakkale province, Turkey. *Renewable Energy*, 212, 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.075>

33. Chen, X., Wang, Y., Xu, J., Huang, X., & Liu, D. (2018). General method to obtain recommended tilt and azimuth angles for photovoltaic systems worldwide. *Solar Energy*, 172, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.045>

34. Choi, Y., & Song, J. (2017). Review of photovoltaic and wind power systems utilized in the mining industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1386–1391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.127>

35. Codemo, A., Ghislanzoni, M., Prados, M.-J., & Albatici, R. (2025). Landscape-based spatial energy planning: Minimization of renewables footprint in the energy transition. *Journal of Environmental Planning and Management*, 68(6), 1421–1448. <https://doi.org/10.1080/09640568.2023.2287978>

36. Davybida, L., Wyczałek, I., & Plichta, A. (2022). Using GIS and SDSS tools in the design of a photovoltaic system for a built-up roof. *Geomatics and Environmental Engineering*, 16(4), 31–58. <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.4.31>

37. de Araújo, M. R., de Souza, R. C., Branco, D. A. C., & Guerrero, J. M. (2021). Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110853>

38. Devine-Wright, P. (2013). Explaining “NIMBY” objections to a power line: The role of personal, place attachment and project-related factors. *Environment and Behavior*, 45(6), 761–781. <https://doi.org/10.1177/0013916512440435>

39. Dhimish, M., & Silvestre, S. (2019). Estimating the impact of azimuth-angle variations on photovoltaic annual energy production. *Clean Energy*, 3(1), 47–58. <https://doi.org/10.1093/ce/zky022>

40. Energy Community Secretariat. (2025). Project: Cross-Border Sustainable Renewable Energy Acceleration in Ukraine — Mapping Synergy Renewable Energy Acceleration Areas between Ukraine, EU Member States, and

Moldova: Criteria: Environmental Criteria and Constraints, Renewable Energy Criteria and Infrastructure Readiness. Energy Community Secretariat.

41. Esri. (n.d.). An overview of the Proximity toolset—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/an-overview-of-the-proximity-toolset.htm>

42. Esri. (n.d.). Area Solar Radiation (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/area-solar-radiation.htm>

43. Esri. (n.d.). Aspect (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/aspect.htm>

44. Esri. (n.d.). Buffer (Analysis)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/buffer.htm>

45. Esri. (n.d.). Generate Near Table (Analysis)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/generate-near-table.htm>

46. Esri. (n.d.). Hillshade (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/hillshade.htm>

47. Esri. (n.d.). How Buffer analysis works—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/how-buffer-analysis-works.htm>

48. Esri. (n.d.). How proximity tools calculate distance—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/how-near-analysis-works.htm>

49. Esri. (n.d.). How Surface Parameters works—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-surface-parameters-works.htm>

50. Esri. (n.d.). How Weighted Overlay works—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-weighted-overlay-works.htm>

51. Esri. (n.d.). Modeling solar radiation—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/modeling-solar-radiation.htm>

52. Esri. (n.d.). Near (Analysis)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/analysis/near.htm>

53. Esri. (n.d.). Overlay analysis approaches—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/spatial-analyst/mapalgebra/overlay-analysis-approaches.htm>

54. Esri. (n.d.). Raster Solar Radiation (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/raster-solar-radiation.htm>

55. Esri. (n.d.). Reclassify (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/reclassify.htm>

56. Esri. (n.d.). Sample applications for solar radiation analysis—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/sample-applications-for-solar-radiation-analysis.htm>

57. Esri. (n.d.). Slope (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/slope.htm>

58. Esri. (n.d.). Surface Parameters (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/surface-parameters.htm>

59. Esri. (n.d.). Weighted Overlay (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/weighted-overlay.htm>

60. Esri. (n.d.). Weighted Sum (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/weighted-sum.htm>
61. Esri. (n.d.). Zonal Statistics as Table (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro Documentation. Esri. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/zonal-statistics-as-table.htm>
62. European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). PVGIS background information. PVGIS. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/pvgis-background-information_en
63. European Commission, Joint Research Centre. (n.d.). PVGIS data sources and calculation methods. PVGIS. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-data-sources-calculation-methods_en
64. European Committee for Standardization. (2024). Eurocode 7: Geotechnical design — Part 1: General rules (EN 1997-1:2024). Brussels: CEN.
65. Fedaa, J. (1988). Collapse of loess upon wetting. *Engineering Geology*, 25(2–4), 263–269. DOI: 10.1016/0013-7952(88)90031-2.
66. Federal Highway Administration. (2002). Geotechnical Engineering Circular No. 5: Evaluation of Soil and Rock Properties (FHWA-IF-02-034). Washington, DC: U.S. Department of Transportation.
67. Federal Highway Administration. (2002). Geotechnical Engineering Circular No. 6: Shallow Foundations (FHWA-IF-02-054). Washington, DC: U.S. Department of Transportation.
68. Franklin, J. A., & Chandra, R. (1972). The slake-durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(3), 325–328. DOI: 10.1016/0148-9062(72)90001-0.
69. Froese, R., & Schilling, J. (2019). The nexus of climate change, land use, and conflicts. *Current Climate Change Reports*, 5, 24–35.

70. Gaeta, M., Nsangwe Businge, C., & Gelmini, A. (2022). Achieving net zero emissions in Italy by 2050: Challenges and opportunities. *Energies*, 15, 46.
71. GBIF. (2025). Guide for publishing biological survey and monitoring data. GBIF Documentation. URL: <https://docs.gbif.org/guide-publishing-survey-data/en/>
72. GBIF. (n.d.). Citation guidelines. Global Biodiversity Information Facility. URL: <https://www.gbif.org/citation-guidelines>
73. GBIF. (n.d.). What is GBIF? Global Biodiversity Information Facility. URL: <https://www.gbif.org/what-is-gbif>
74. Global Solar Atlas. (n.d.). Global Solar Atlas. World Bank Group / ESMAP; Solargis. Retrieved March 9, 2026, from Global Solar Atlas.
75. Google. (n.d.). Google Earth.
76. Grodsky, S. M., & Hernandez, R. R. (2020). Reduced ecosystem services of desert plants from ground-mounted solar energy development. *Nature Sustainability*, 3, 1036–1043.
77. Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, 61–88. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.08.002.
78. Haklay, M. (2010). How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(4), 682–703. <https://doi.org/10.1068/b35097>
79. Han, C., et al. (2025). Research on multiscale OpenStreetMap data quality in China. *Geo-spatial Information Science*.
80. Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., Barrows, C. W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S., & Allen, M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766–779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>

81. Hernandez, R. R., Hoffacker, M. K., Murphy-Mariscal, M. L., Wu, G. C., & Allen, M. F. (2015). Solar energy development impacts on land cover change and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(44), 13579–13584. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517656112>
82. Hisoğlu, S., Çömert, R., Antila, M., Aman, R., & Huovila, A. (2025). Towards solar-energy-assisted electric vehicle charging stations: A literature review on site selection with GIS and MCDM methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 75, 104193. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104193>
83. International Energy Agency. (2016). *Large-Scale Electricity Interconnection: Technology and Prospects for Cross-Regional Power Networks*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/large-scale-electricity-interconnection>
84. International Energy Agency. (2019). *Introduction to System Integration of Renewables*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/introduction-to-system-integration-of-renewables>
85. International Energy Agency. (2023). *Electricity Grids and Secure Energy Transitions*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>
86. International Energy Agency. (2023). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*. IEA, Paris.
87. International Energy Agency. (2024). *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
88. International Energy Agency. (2025). *Building the Future Transmission Grid*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/building-the-future-transmission-grid>
89. International Energy Agency. (2025). *Land-Use Competition between Biodiversity and Net Zero Goals*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/land-use-competition-between-biodiversity-and-net-zero-goals>
90. International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable Power Generation Costs in 2023*. IRENA. URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>

91. International Renewable Energy Agency. (2024). World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
92. IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
93. IRENA, CREEI, & IUCN. (2026). Local environmental effects and benefits of large-scale solar PV plants. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Publications/2026/Jan/Local-environmental-effects-and-benefits-of-large-scale-solar-PV-plant>
94. Islam, M. R., Aziz, M. T., Alauddin, M., Kader, Z. & Islam, M. R. (2024). Site suitability assessment for solar power plants in Bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach. *Renewable Energy*, 220, 119595. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119595>
95. Johnson, K. S. (2005). Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States. *Environmental Geology*, 48(3), 395–409. DOI: 10.1007/s00254-005-1283-5.
96. Lal, A. (2019). Research of the collapsibility of the European loess — review. *Budownictwo i Architektura*, 18(1). DOI: 10.24358/Bud-Arch_19_181_01.
97. Lipiński, S. (2026). Spatial Bias in Open Biodiversity Data: How GBIF Record Quality Shapes Conservation Analyses. *Conservation*, 6(2), 40. <https://doi.org/10.3390/conservation6020040>
98. Maus, V., & Werner, T. T. (2024). Impacts for half of the world’s mining areas are undocumented. *Nature*, 625, 26–29.
99. Maus, V., et al. (2022). An update on global mining land use. *Scientific Data*, 9, 433.

100. McCorkle, D., DePue, K., & Withers, M. (2025). A brief review of solar panel installations on former mine lands: Technical challenges and uncertainties for tracking and foundation systems. *Solar Energy*, 300, 113858. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113858>
101. Moomen, A. (2017). Strategies for managing large-scale mining sector land use conflicts in the global south. *Resources Policy*, 51, 85–93.
102. National Renewable Energy Laboratory. (2013). Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/52615.pdf>
103. National Renewable Energy Laboratory. (2016). Facility-Scale Solar Photovoltaic Guidebook. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/67122.pdf>
104. National Renewable Energy Laboratory. (2018). Grids to Integrate Increasing Solar PV Penetrations. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71861.pdf>
105. National Renewable Energy Laboratory. (2019). New Approaches to Distributed PV Interconnection. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72038.pdf>
106. National Renewable Energy Laboratory. (2022). PV Hosting Capacity Estimation. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81851.pdf>
107. National Renewable Energy Laboratory. (2025). Solar Integration Cost. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/grid/solar-integration-cost.html>
108. National Renewable Energy Laboratory. (2026). Advanced Hosting Capacity Analysis. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/advanced-hosting-capacity-analysis.html>
109. Nfah, E. M., Njoya Motapon, S., Tchuen, G., Razmjooy, N., Eke, J., & Essiane, S. N. (2025). An MCDM-GIS based site suitability analysis for solar power plant integration in Cameroon: Solar hybridization to optimize green electricity and hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 101, 498–522. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.272>

110. Niblick, B., & Landis, A. E. (2016). Assessing renewable energy potential on United States marginal and contaminated sites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 489–497. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.045>
111. OpenStreetMap contributors. (n.d.). OpenStreetMap copyright and license.
112. OpenStreetMap Wiki. (n.d.). Key:surface. OpenStreetMap Wiki. URL: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:surface>
113. Osorio-Aravena, J. C., Frolova, M., Terrados-Cepeda, J., & Muñoz-Cerón, E. (2020). Spatial energy planning: A review. *Energies*, 13(20), 5379. <https://doi.org/10.3390/en13205379>
114. Petruk, V., Polyvianchuk, A., Petruk, G., Hura, K., & Faichuk, V. (2024). Decarbonization and ecomodernization of the economy as a resource-energy-efficient way of post-war reconstruction of Ukraine. *Environmental Problems*, 9(2), 73–77. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.073>
115. Petruk, V., Polyvianchuk, A., Petruk, R., Polyvyanchuk, N., & Honcharuk, V. (2024). Innovative thin-film heliotechnologies of decarbonization and ecologization of municipal energy of Ukraine. *Environmental Problems*, 9(4), 199–203. <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.199>
116. Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
117. Public-Private Infrastructure Advisory Facility. (2015). *Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants: A Project Developer's Guide*. World Bank Group.
118. Pukish, A., Mandryk, O., Arkhypova, L., Syrovets, S., & Hryniuk, D. (2024). Mathematical modeling of pollution of underground aquifers due to mining of minerals. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 94–103. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.094>

119. Qiao, X., et al. (2026). Multi-dimensional ecological impacts of utility-scale solar energy development: A review. *Journal of Environmental Management*.
120. Ramasamy, V., Feldman, D., Desai, J., & Margolis, R. (2021). U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks: Q1 2021. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1829460>
121. Ramirez Camargo, L., & Stoeglehner, G. (2018). Spatiotemporal modelling for integrated spatial and energy planning. *Energy, Sustainability and Society*, 8, Article 32. <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0174-z>
122. Rand, J., Manderlink, N., Zhang, S., Talley, C., Gorman, W., Wisner, R. H., Seel, J., Mulvaney Kemp, J., Jeong, S., & Kahrl, F. (2025). Queued Up: 2025 Edition, Characteristics of Power Plants Seeking Transmission Interconnection as of the End of 2024. Lawrence Berkeley National Laboratory.
123. Sahabuddin, M., et al. (2021). Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101380. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101380>
124. Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2016). Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms: Case study in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 127, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.005>
125. Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renewable Energy*, 157, 377–403. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.137>
126. Shorabeh, S. N., et al. (2021). Potential assessment of multi-renewable energy farms establishment using spatial multi-criteria decision analysis: A case study and mapping in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126318>
127. SolarPower Europe. (2022). Global Market Outlook for Solar Power 2022–2026. SolarPower Europe.

<https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2022-2026>

128. Spiess, T., & De Sousa, C. (2016). Barriers to renewable energy development on brownfields. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 18(4), 507–534. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2016.1146986>

129. Spyridonidou, S., Sismani, G., Loukogeorgaki, E., Vagiona, D. G., Ulanovsky, H., & Madar, D. (2021). Sustainable spatial energy planning of large-scale wind and PV farms in Israel: A collaborative and participatory planning approach. *Energies*, 14(3), 551. <https://doi.org/10.3390/en14030551>

130. Støa, B., Halvorsen, R., Mazzoni, S., & Gusarov, V. I. (2018). Sampling bias in presence-only data used for species distribution modelling: Theory and methods for detecting sample bias and its effects on models. *Sommerfeltia*, 38(1), 1–53. <https://doi.org/10.2478/som-2018-0001>

131. Sun, Y., Zhu, D., Li, Y., Wang, R., & Ma, R. (2023). Spatial modelling the location choice of large-scale solar photovoltaic power plants: Application of interpretable machine learning techniques and the national inventory. *Energy Conversion and Management*, 289, 117198.

132. Thormeyer, C., Sasse, J.-P., & Trutnevyte, E. (2020). Spatially-explicit models should consider real-world diffusion of renewable electricity: Solar PV example in Switzerland. *Renewable Energy*, 145, 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.062>

133. U.S. Army Corps of Engineers. (2001). *Geotechnical Investigations (EM 1110-1-1804)*. Washington, DC: Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.

134. U.S. Environmental Protection Agency. (2009). *Siting Renewable Energy on Potentially Contaminated Land and Mine Sites*. U.S. EPA. URL: <https://www.epa.gov/re-powering/siting-renewable-energy-potentially-contaminated-land-and-mine-sites>

135. Uyan, M. (2017). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.042>
136. Wang, K., Zhou, J., Yang, R., Xu, S., Hu, Z., & Xiao, W. (2025). Deploying photovoltaic systems in global open-pit mines for a clean energy transition. *Nature Sustainability*, 8, 1037–1047. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01594-w>
137. Watson, J. J. W., Hudson, M. D., & Hudson, I. D. (2020). A high-resolution suitability index for solar farm location in complex landscapes. *Renewable Energy*, 158, 520–533. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.121>
138. Weselek, A., et al. (2019). Agrivoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 35.
139. Więckowski, J., et al. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Applied Soft Computing*.
140. Więckowski, J., et al. (2024). PySensMCDA: A novel tool for sensitivity analysis in multi-criteria problems. *SoftwareX*, 27, 101746. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101746>
141. World Bank. (2022). A Sure Path to Sustainable Solar, Wind and Geothermal. World Bank. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099053024203034064/p174202109ad5c077194dc19a7249bbc5ab>
142. Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35(5), 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>
143. Yuan, B., et al. (2026). Review of the cumulative ecological effects of utility-scale photovoltaic generation. *Ecologies*, 6(1), 9.

144. Zainol Abidin, M. A., Mahyuddin, M. N., & Mohd Zainuri, M. A. A. (2021). Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic systems: A review. *Sustainability*, 13, 7846.
145. Zhang, N., Duan, H., Shan, Y., Miller, T. R., Yang, J., & Bai, X. (2023). Booming solar energy is encroaching on cropland. *Nature Geoscience*, 16, 932–934. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01304-1>
146. Zhang, X., Xu, M., Wang, S., Huang, Y., & Xie, Z. (2022). Mapping photovoltaic power plants in China using Landsat, random forest, and Google Earth Engine. *Earth System Science Data*, 14, 3743–3755.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Редько А. І. Екологічні обмеження використання сонячної енергії у Карпатському регіоні / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. - 2024. - Вип. 106. - С. 65-71. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.65> (Фахове наукове видання України категорії Б).

2. Редько А. І. Рекультивация відпрацьованих кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Науковий вісник НЛТУ України*. - 2025. - Т. 35, № 4. - С. 79-85. <https://doi.org/10.36930/40350409> (Фахове наукове видання України категорії Б).

3. Редько А. І. Сонячні електростанції як інструмент екологічної ревіталізації відпрацьованих кар'єрів / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. - 2025. - № 8. - С. 80-89. <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-011> (Фахове наукове видання України категорії Б).

4. Редько А. І. Екоенергетичний потенціал відпрацьованих кар'єрів і ризику його використання / А. І. Редько // *Екологічна безпека та природокористування*. - 2025. - Вип. 4 (56). - С. 69-81. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.69-81> (Фахове наукове видання України категорії Б).

Тези наукових конференцій

5. Редько А. І. Перспективи використання сонячної енергії / А. І. Редько // *Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування : матеріали I Всеукраїнської (з міжнародною участю) наукової конференції студентів, магістрантів,*

аспірантів та молодих вчених (Харків, 29 листопада - 1 грудня 2012 р.). - Харків : Вид-во ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. - С. 90-91.

6. Редько А. Аналіз методів рекультивації відкритих гірських виробок // Вплив виробництва, передачі, розподілу та використання електроенергії на навколишнє середовище [Електронне видання] : збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції (Івано-Франківськ, 24-25 листопада 2022 р.) / за заг. ред. проф. Я. О. Адаменка.- Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022.- укр., англ. та румун. мовами. С. 60-62. URL: <https://crimige.cunbm.utcluj.ro/wp-content/uploads/2022/12/Abstracts22.pdf>

7. Редько А. І. Впровадження альтернативних джерел енергії для приватних садиб на території Івано-Франківської ТГ / А. І. Редько // *Сталий розвиток - стан та перспективи : збірник матеріалів IV Міжнародного наукового симпозиуму в рамках Еразмус+ Модуль Жан Моне «Концепція екосистемних послуг: Європейський досвід» («EE4CES»)* (Львів - Славське, 13-16 лютого 2024 р.). - Київ : Яроченко Я. В., 2024. - С. 139-141. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2023/32247/importantdoc/ivs_yposiumstalyu-rozvytok-stan-ta-perspektyvy20242_1.pdf

8. Редько А. І. Оцінка придатності відпрацьованих кар'єрів для встановлення сонячних електростанцій на основі геометричного та інсоляційного аналізу / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Молодіжний екогеофорум - 2025 : збірник матеріалів Регіональної конференції (Івано-Франківськ, 19-20 листопада 2025 р.). - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. - С. 63-64. URL: https://nung.edu.ua/sites/default/files/2026-01/%D0%B7%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%BC_2025.pdf*

9. Редько А. І. Ревіталізація кар'єрів під розміщення сонячних електростанцій // The 6th International scientific and practical conference "International experience in scientific research" (January 23-25, 2026) BoScience Publisher, Chicago, USA. 2026. - pp. 156-160. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp->

content/uploads/2026/01/INTERNATIONAL-EXPERIENCE-IN-SCIENTIFIC-RESEARCH-23-25.01.2026.pdf

10. Редько А. І. Використання відпрацьованих кар'єрів як просторового ресурсу для розміщення сонячних електростанцій (на прикладі долини річки Дністер) / А. І. Редько // *Innovative Research in Science and Economy : Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (Brussels, Belgium, January 28-30, 2026)*. - Brussels, Belgium : International Scientific Unity, 2026. - Pp. 76-79. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/INNOVATION-AND-DEVELOPMENT-IN-WORLD-SCIENCE-2-4.03.26.pdf> (Закордонне видання).

11. Редько А. І. Екологічні та інженерні аспекти рекультивації кар'єрів під сонячні електростанції / А. І. Редько, Я. О. Адаменко // *Innovation and development in world science : Proceedings of V International Scientific and Practical Conference (Zurich, Switzerland, 2-4 March 2026)*. - Zurich, Switzerland : MDPC Publishing, 2026. - Pp. 142-145. URL: <https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2026/01/Brussels> (Закордонне видання).

ДОДАТОК Б
КОПІЇ

АКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ



Бурка В.В.

02 2026 р.

АКТ**про впровадження результатів дисертаційних досліджень**

Даним актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи «Екологічно безпечне використання сонячної енергії у Карпатському регіоні» аспіранта спеціальності 101 – Екологія Редька Андрія Ігоровича впроваджені на об'єктах ТОВ «ЗПУЄ Україна», зокрема запропонована у дисертаційній роботі методика може бути впроваджена як комплексний виробничий інструмент, що поєднує швидкий попередній скринінг кар'єрів під СЕС та практичні рекомендації щодо цільового профілювання уступів, терас і похилих поверхонь під оптимальний проектний кут встановлення фотоелектричних модулів. Такий підхід дає змогу ще на етапі завершення виробітку сформувати геометрію майданчика під щільне розміщення панелей із мінімізацією взаємного затінення, що забезпечує ефективне використання площі кар'єру та підвищення прогнозного виробітку електроенергії.

Директор

ТОВ «ЗПУЄ Україна»

« 25 » лютого 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу,
д.т.н., професор



Олександр КОНДРАТ
_____ 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження в освітній процес

Даним актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи «Екологічно безпечне використання сонячної енергії у Карпатському регіоні» аспіранта спеціальності 101 – Екологія Редька Андрія Ігоровича, зокрема методики GIS-скринінгу та інтегральне ранжування кар'єрів, а також методи обробки та інтерпретації екологічних даних, впроваджені в освітній процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при викладанні дисциплін: «Оцінка впливів на довкілля» (тема ЗМ 1.5 Оцінка параметрів навколишнього середовища) та «Рекультивация порушених земель» (тема ЗМ 1.6 Використання порід відвалів при засипці ярів та в якості будівельної сировини).

Завідувач кафедри екології,
к.т.н., доцент

Марія ОРФАНОВА

Гарант ОП «Екологія»
доцент кафедри екології,
к.т.н., доцент

Наталя МОСКАЛЬЧУК