

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Навчально-науковий інститут інноватики,
природокористування та інфраструктури
Кафедра економічної експертизи та землевпорядкування

БОЙЦУН Максим Юрійович

Оцінка земельних ресурсів для розвитку геотермальної енергетики в Україні / Assessment of land resources for the development of geothermal energy in Ukraine

спеціальність: 193 – Геодезія та землеустрій
освітньо-професійна програма – Експертна оцінка землі та нерухомого майна

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи ГЕО3-42
М. Ю. Бойцун

Науковий керівник:
к.т.н., доцент, О. М. Лопушанський

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

" ____ " _____ 20 ____ р.

Завідувач кафедри

_____ **Б. О. Язлюк**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-ПРАВОВІ ЗАСАДИ РОЗВИТКУ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ	8
1.1 Геотермальна енергетика. Види об'єктів та вимоги до земельних ділянок	8
1.2 Нормативно-правове регулювання. Земельні, водні та надрові аспекти розміщення.....	14
1.3 Обмеження використання територій. Охоронні зони, санітарні вимоги, природоохоронні режими.....	18
Висновки до розділу 1.....	24
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ	25
2.1 Вихідні дані та джерела. Геологія, гідрогеологія, інфраструктура, землекористування, обмеження.....	25
2.2 Критерії придатності. Температурний режим, глибина, доступність, ризики, правові умови.....	30
2.3 ГІС-модель оцінки. Карта придатності, ранжування територій, перевірка результатів.....	36
Висновки до розділу 2.....	43
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ДІЛЯНОК ПІД ГЕОТЕРМАЛЬНІ ПРОЄКТИ.....	44
3.1 Виділення перспективних зон розвитку геотермальної енергетики	44
3.2 Аналіз ключових обмежень і ризиків. Екологічні, технічні, процедурні .	50
3.3 Практичні рекомендації для органів влади та інвесторів щодо планування і реалізації проєктів.....	56
Висновки до розділу 3.....	61
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах трансформації енергетичного сектору України, зростання потреби в енергетичній безпеці, підвищення ефективності використання природних ресурсів та поступового переходу до більш екологічно орієнтованої моделі розвитку особливої уваги набувають відновлювані та місцеві джерела енергії. Геотермальна енергетика належить до напрямів, здатних забезпечувати стабільне виробництво теплової енергії протягом року, оскільки її потенціал не залежить від сонячної активності або вітрових умов, а ресурсна база формується за рахунок тепла земних надр.

Для України геотермальні рішення є перспективними передусім у сфері теплопостачання населених пунктів і промислових об'єктів, тепличного господарства, рекреаційної інфраструктури, а також у вигляді теплових насосів і локальних систем низькопотенційного тепла. Проте реалізація геотермальних проєктів неможлива без належного просторового та земельного забезпечення: вибір земельної ділянки визначає не тільки технічну можливість буріння та будівництва, але й економічну доцільність, рівень екологічних ризиків, строки підготовки документації та успішність проходження дозвільних процедур. У цій роботі виконано інтегральну оцінку придатності земельних ресурсів за критеріями геотермальної придатності, що дозволяє визначити пріоритетні ділянки для реалізації геотермальних проєктів та мінімізувати екологічні, технічні та правові ризики.

Земля у цьому контексті виступає одночасно ресурсом і простором для розміщення об'єктів, а також юридичним об'єктом регулювання, що підпорядковується нормам земельного, водного, надрового, містобудівного та природоохоронного законодавства. Нерівномірність геотермального потенціалу території України, різна щільність інженерної та транспортної інфраструктури, неоднакові режими землекористування і наявність численних обмежень (охоронні зони, санітарні вимоги, особливо цінні землі, території природно-заповідного фонду, водоохоронні зони) ускладнюють

ухвалення рішення щодо оптимальної локації геотермальних установок. Саме тому актуальним є формування методично обґрунтованої системи оцінки земельних ресурсів, яка дозволить визначати території з найвищою придатністю для геотермальних проєктів, мінімізувати ризики на етапі планування та підвищувати інвестиційну привабливість таких ініціатив для громад і бізнесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Геотермальна енергетика як науковий і прикладний напрям розглядається у працях, присвячених відновлюваній енергетиці, геології та гідрогеології, енергетичній економіці, екологічній безпеці, регіональному розвитку та просторовому плануванню. Значна частина досліджень фокусується на природних передумовах використання геотермальних ресурсів, характеристиках температурного режиму надр, умовах залягання термальних вод, технічних параметрах буріння та експлуатації свердловин, а також на техніко-економічних аспектах проєктів. Окремо висвітлюються питання екологічних ризиків, включно з впливом на підземні води, проблемами утилізації мінералізованих розсолів, вимогами до охорони довкілля та запобігання небажаним наслідкам техногенного характеру.

Попри наявність праць, присвячених ресурсному потенціалу геотермальної енергетики, у вітчизняних дослідженнях земельні, правові, інфраструктурні та екологічні аспекти вибору ділянок часто подаються розрізнено. Це обмежує можливість практичного порівняння територій і створює потребу в прикладній методиці, яка поєднує геологічні й гідрогеологічні дані з режимами землекористування, доступністю інфраструктури та просторовими обмеженнями. Саме такий комплексний підхід дає змогу не лише описати потенціал геотермальних ресурсів, а й визначити, які території реально можуть бути підготовлені до реалізації проєктів з урахуванням дозвільних, екологічних та економічних чинників.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування підходів до оцінки земельних ресурсів для розвитку геотермальної енергетики в Україні шляхом

формування системи критеріїв придатності територій, побудови просторової моделі оцінювання та розроблення рекомендацій щодо вибору земельних ділянок для геотермальних проєктів з урахуванням природних, інфраструктурних, економічних і правових чинників.

З огляду на мету визначено такі **завдання**:

- 1) Розкрити сутність геотермальної енергетики та охарактеризувати основні види об'єктів, що використовуються у геотермальних проєктах.
- 2) Визначити типові вимоги до земельних ділянок для їх розміщення і експлуатації та проаналізувати нормативно-правові засади реалізації геотермальних проєктів з урахуванням земельних, водних і надрових аспектів.
- 3) Обґрунтувати критерії придатності територій, що включають температурний режим, глибину залягання ресурсу, інфраструктурну доступність, техногенні та екологічні ризики, а також правові умови користування.
- 4) Розробити просторову ГІС-модель оцінки та сформувати карту придатності з ранжуванням територій, здійснити аналіз перспективних зон розвитку геотермальної енергетики.
- 5) Виявити та описати основні обмеження і ризики впровадження геотермальних проєктів, а також сформувати практичні рекомендації для органів влади та інвесторів щодо планування, вибору ділянок і процедурної підготовки проєктів.

Об'єктом дослідження є земельні ресурси та процеси їх використання і просторового планування, пов'язані з розміщенням і функціонуванням об'єктів геотермальної енергетики в Україні.

Предметом дослідження є методичні підходи та інструменти оцінки придатності земельних ділянок для геотермальних проєктів, а також сукупність критеріїв і обмежень природного, інфраструктурного, екологічного та правового характеру, що визначають можливість і доцільність такого розміщення.

Методи дослідження. Теоретичну та методичну основу роботи становлять загальнонаукові та спеціальні методи. Метод аналізу й синтезу у цій роботі застосовано для систематизації теоретичних підходів до геотермальної енергетики та узагальнення факторів, які впливають на придатність земельних ділянок. Порівняльно-правовий підхід використано для виявлення логіки регулювання землекористування, водокористування та надрокористування та для формування критеріїв правової придатності територій. Економіко-аналітичні методи застосовано для оцінювання впливу інфраструктурної доступності, відстані до споживачів та технічних ризиків на доцільність вибору територій і ранжування їх за економічними показниками. Багатокритеріальний підхід та елементи експертного оцінювання використано для інтеграції різнорідних критеріїв (природних, інфраструктурних, екологічних та правових) в єдину модель придатності територій. Просторовий аналіз реалізовано за допомогою ГІС-інструментарію для обробки шарів даних, накладання буферів, нормалізації показників та картографування результатів у вигляді карти придатності та ранжування територій.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні комплексного підходу до оцінки земельних ресурсів для розвитку геотермальної енергетики, який поєднує природні параметри геотермального потенціалу з інфраструктурними умовами, екологічними ризиками та правовими обмеженнями землекористування. Новизна також проявляється у застосуванні ГІС-моделі придатності територій для ранжування ділянок та в обґрунтуванні практичних рекомендацій щодо вибору локацій і організаційно-процедурної підготовки геотермальних проєктів з метою підвищення ефективності планування і зменшення невизначеності для стейкхолдерів.

Додатковий елемент наукової новизни полягає в тому, що придатність земельних ресурсів розглянуто не як статичну характеристику окремої ділянки, а як результат поєднання ресурсної цінності, просторової

доступності, режимів правового використання та керованості ризиків. У роботі запропоновано логіку попереднього відбору територій, за якою геотермальний потенціал перевіряється через послідовні фільтри: природно-ресурсний, інфраструктурний, екологічний, земельно-правовий і процедурний. Це дозволяє відрізнити теоретично перспективні території від ділянок, придатних для практичної підготовки інвестиційних проєктів.

Практична значущість полягає в можливості застосування запропонованої методики для попереднього відбору територій під геотермальні об'єкти та підготовки управлінських рішень у сфері просторового розвитку. Отримані результати можуть бути корисними органам державної влади та місцевого самоврядування при інтеграції енергетичних ініціатив у документи планування територій, а також потенційним інвесторам та проєктним організаціям під час скринінгу земельних ділянок, зниження регуляторних і екологічних ризиків, підвищення прогнозованості строків реалізації проєкту. Додатково напрацювання можуть бути використані в освітньому процесі як приклад комплексного поєднання економічного аналізу природокористування та просторового моделювання.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів із підрозділами, висновків до кожного розділу, загальних висновків та списку використаних джерел у кількості 44 найменування. Загальний обсяг роботи становить 70 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-ПРАВОВІ ЗАСАДИ РОЗВИТКУ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ

1.1 Геотермальна енергетика. Види об'єктів та вимоги до земельних ділянок

Геотермальна енергетика є напрямом енергетики, що базується на використанні теплової енергії земних надр, яка проявляється у вигляді теплового потоку, підвищених температур гірських порід, термальних вод і пароводяних сумішей. На відміну від багатьох інших відновлюваних джерел, геотермальна енергія відзначається прогнозованістю та відносною сталістю виробітку упродовж року, що робить її особливо цінною для систем теплопостачання та, за відповідних температурних умов, для виробництва електричної енергії [4] [34]. Для України актуальність геотермальної енергетики зумовлена наявністю районів із підвищеним геотермічним градієнтом і перспективними гідрогеологічними умовами, а також можливістю використання низькопотенційного тепла ґрунтів і верхніх шарів земної кори через теплові насоси [1] [2] [6] [21] [22].

З технологічної точки зору геотермальні проекти доцільно розглядати як сукупність інженерних рішень, що поєднують доступ до геотермального ресурсу (свердловини, теплообмінники, контури відбору тепла), перетворення енергії (теплові пункти, теплові насоси, установки генерації електроенергії), транспортування (теплотраси, трубопроводи, колектори) і систему управління ресурсом (реінжекція, контроль тисків, температур і складу флюїду). Саме тому вимоги до земельних ділянок формуються не лише потребою «розмістити обладнання», а необхідністю забезпечити безпечний доступ до надр, створити охоронні та санітарні режими, мінімізувати екологічні ризики та забезпечити інфраструктурну доступність об'єкта [3] [31].

У світовій практиці виділяють два базові підходи до залучення геотермальної енергії: використання природних гідротермальних систем

(водоносні горизонти з підвищеною температурою) та використання тепла гарячих порід із формуванням або інтенсифікацією тріщинуватості (Enhanced Geothermal Systems, EGS), що дозволяє отримувати тепло навіть за відсутності достатніх природних дебітів термальних вод [31]. Для України найбільш практично орієнтованими залишаються проєкти на основі термальних вод (там, де вони доступні) та широке впровадження теплових насосів, що використовують низькопотенційну теплоту ґрунту, верхніх шарів землі або підземних вод [3] [21] [22]. Важливо, що навіть низькотемпературні ресурси можуть бути економічно корисними в системах прямого використання тепла, а також у бінарних енергетичних циклах (Organic Rankine Cycle), де робоче тіло має нижчу температуру кипіння, ніж вода, що робить можливим виробництво електроенергії на середньо- та низькотемпературних родовищах [30] [37] [38].

Для наочного розуміння просторової організації промислового геотермального об'єкта доцільно розглянути приклад геотермальної електростанції, де наземна інфраструктура поєднується зі свердловинними майданчиками, трубопроводами, енергоблоками та під'їзними шляхами (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Приклад промислового геотермального об'єкта з наземною інфраструктурою

Джерело: Wikimedia Commons, автор Sigrg, ліцензія CC BY-SA 4.0.

Для впорядкування підходів до планування та оцінки земель доцільно класифікувати об'єкти геотермальної енергетики за функціональним призначенням і технологією, адже різні типи об'єктів мають різну «земельну конфігурацію»: одні потребують рознесення у просторі елементів (видобувні та нагнітальні свердловини, мережі), інші можуть бути компактними (модульні бінарні установки або теплові пункти), а теплові насоси часто інтегруються в забудову з мінімальним наземним впливом [31] [34] [36].

Кожен із наведених типів формує специфічні вимоги до земельної ділянки. У загальному вигляді ці вимоги доцільно групувати за чотирма блоками: природні передумови, інфраструктурна доступність, екологічна та техногенна безпека, а також юридична придатність земельної ділянки для реалізації проєкту. Основні види об'єктів геотермальної енергетики та їх технологічні варіанти подано на рис. 1.2.

Геоелектростанції • Парова • Флеш-тип • Бінарна (ORC)	Пряме використання тепла • Теплопостачання (термальні води) • Промислові процеси та технологічне тепло • Теплиці та аквакультура • Бальнеологія
Геотермальні теплові насоси • Закритий контур (геозонди/колектори) • Відкритий контур (підземні води)	Комбіновані системи • Когенерація (тепло + електрика) • Каскадне використання тепла

Рис. 1.2. Види об'єктів геотермальної енергетики та їх технологічні варіанти

Природні передумови визначаються геотермічними параметрами території (теплове поле, температурні градієнти, глибини до продуктивних

горизонтів), гідрогеологічними характеристиками (наявність водоносних горизонтів, проникність, дебіти, мінералізація), а також геологічними ризиками (структурні порушення, можливі ускладнення буріння) [2] [3] [6] [28]. Інфраструктурна складова охоплює близькість до споживачів тепла або електромереж, доступність транспортних шляхів для бурових та монтажних робіт, можливість прокладання трубопроводів і комунікацій з урахуванням сервітутів і охоронних зон [31].

Екологічний блок включає питання охорони підземних вод, поводження з мінералізованими розсолами та технологічними рідинами, забезпечення реінжекції (повернення флюїду у підземні горизонти) як способу зниження ризиків виснаження ресурсу і впливу на довкілля, а також дотримання режимів територій із природоохоронними обмеженнями [3] [31]. Юридична придатність полягає у можливості сформувати земельну ділянку з належним режимом використання, забезпечити право користування (оренда/власність/постійне користування залежно від суб'єкта), узгодити цільове призначення та містобудівні умови, а також забезпечити доступ до надр і водних ресурсів у межах законодавчих процедур, що детальніше розглядається в наступних підрозділах [12] [17].

У практиці планування геотермальних об'єктів важливо враховувати, що «земельна потреба» є не лише площею під будівлями чи обладнанням. Вона включає ділянки під свердловинні майданчики та їх під'їзні шляхи, санітарні та охоронні зони, лінійні об'єкти (трубопроводи/теплотраси), місця розміщення допоміжної інфраструктури (насосні станції, теплообмінні пункти), а також території можливих обмежень щодо землекористування під час будівництва та експлуатації [31]. Для теплових насосів вимоги до поверхневого використання можуть бути мінімальними у випадку вертикальних геозондів, проте критичним стає дотримання умов безпеки щодо підземних вод, щільності забудови та сумісності з іншими інженерними мережами [21] [22]. Для проєктів на термальних водах ключовою стає можливість організувати видобування та повернення (реінжекцію) флюїду,

щоб уникнути деградації ресурсу та екологічних наслідків, що прямо впливає на вибір земельної ділянки і конфігурацію об'єкта [3] [31].

У табл. 1.1 узагальнено ключові вимоги до земельних ділянок залежно від типу геотермального об'єкта.

Таблиця 1.1

**Вимоги до земельних ділянок для розміщення об'єктів
геотермальної енергетики**

Тип об'єкта	Основні елементи, що потребують земельного забезпечення	Природно-ресурсні вимоги	Інфраструктурні вимоги	Ключові обмеження та ризики для землекористування
1	2	3	4	5
Геотермальна електростанція (бінарний цикл/ORC)	Свердловини (за потреби), наземний енергоблок, теплообмінники, підстанція, комунікації	Достатній температурний рівень ресурсу; стабільність параметрів теплоносія; геологічна придатність для буріння [30] [37] [38]	Доступ до електромереж; транспортна доступність для обладнання; можливість розміщення підстанції та ліній приєднання [31]	Обмеження за режимами територій; необхідність контролю впливу на підземні води; вимоги до поводження з флюїдом і реінжекції [31]
Геотермальна електростанція (парові/флеш)	Свердловини, сепараційні вузли, турбогенератор, системи охолодження, інженерні мережі	Високотемпературний ресурс; відповідні дебїти та тиск; контроль газових домішок [34]	Електромережі, вода /охолодження, під'їзні шляхи	Підвищені вимоги до екологічного контролю; технологічні ризики; ширші охоронні режими навколо технологічних вузлів [31] [34]
Система теплопостачання на термальних водах (пряме використання)	Видобувні та нагнітальні свердловини, тепловий пункт/котельня на термальній воді, тепломережа	Наявність водоносного горизонту з придатною температурою; дебїти та хімічний склад; доцільність реінжекції [2] [3]	Близькість до споживача тепла; можливість прокладання теплотрас; доступ для експлуатації	Обмеження у водоохоронних зонах; ризики забруднення/засолення; необхідність дотримання санітарних вимог і охоронних зон [3] [31]

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5
Каскадне використання тепла (тепло для кількох споживачів)	Свердловини (за потреби), вузли розподілу тепла, мережі, об'єкти споживання (тепліці тощо)	Достатній температурний потенціал для багаторівневого використання [34]	Компоновка мереж і споживачів у радіусі економічної доцільності; логістика	Земельні обмеження для лінійних об'єктів; сумісність із наявною забудовою та планами територій [31]
Тепловий насос із закритим контуром (геозонди/колектори)	Площадка буріння/укладки контуру, тепловий пункт у будівлі, підземні контури	Придатність ґрунтів/порід для теплообміну; урахування температурного режиму верхніх шарів [21] [22] [40]	Доступ для монтажу; сумісність із інженерними мережами; можливість розміщення тепловипуску	Обмеження в щільній забудові; ризики перетину комунікацій; потреба в контролі впливу на підземні води при бурінні [21] [22]
Тепловий насос із відкритим контуром (підземні води)	Водовідбірні та поглинальні свердловини/вузли, теплообмінне обладнання	Достатній дебіт підземних вод; допустимі гідрохімічні параметри; можливість повернення води [22]	Інженерна інтеграція в систему водокористування; доступ до технічного обслуговування	Підвищені вимоги до охорони підземних вод; обмеження у водоохоронних зонах; ризики зміни режиму горизонту [3] [31]

Наведена систематизація демонструє, що придатність земельної ділянки для геотермальної енергетики визначається не одним параметром, а комбінацією умов. Якщо для електрогенерації ключовим стає температурний рівень і можливість технічно надійної експлуатації енергоблоку, то для теплопостачання критичною є близькість до споживача, економіка мереж, а також умови безпечного поводження з геотермальним флюїдом [31] [34]. Для теплових насосів головним є ресурс верхніх шарів Землі та коректне інженерне вписування у міське середовище, що зменшує вимоги до великих площ поверхні, але підвищує значущість локальних обмежень і підземних комунікацій [21] [22]. У вітчизняних умовах додаткового значення набуває врахування просторової неоднорідності теплового поля території України та гідрогеологічних характеристик потенційних зон, оскільки саме вони

визначають пріоритетність регіонів для розвитку гідротермальних проєктів і формують базу для подальшого ГІС-ранжування територій [2] [6] [28].

З погляду економічного обґрунтування землекористування важливо, що неправильний вибір ділянки здатен суттєво підвищити капітальні витрати і строки реалізації проєкту. До найтипівіших чинників здорожчання належать ускладнення доступу до ділянки та бурових робіт, необхідність обходу територій з обмеженим режимом, складність прокладання мереж у щільній забудові, а також високі регуляторні витрати при накладанні кількох правових режимів (земельні, водні, надрові обмеження) [31].

Таким чином, попередній відбір земель на основі чітких критеріїв і вимог не лише забезпечує економічну та технічну доцільність геотермальних проєктів, а й слугує ключовим інструментом мінімізації екологічних і процедурних ризиків, формування надійної інвестиційної бази та підготовки територій до подальшого ГІС-ранжування та планування розміщення об'єктів геотермальної енергетики в Україні.

1.2 Нормативно-правове регулювання. Земельні, водні та надрові аспекти розміщення

Правове забезпечення розміщення об'єктів геотермальної енергетики в Україні формується як міжгалузевий комплекс норм, у якому одночасно діють правила енергетичного регулювання (як складова політики розвитку ВДЕ), земельні вимоги до вибору та використання ділянок, надрові процедури доступу до геотермального ресурсу та водні режими у випадках застосування підземних вод як теплоносія або елемента технології. Загальний вектор державної політики у сфері декарбонізації та розвитку відновлюваної енергетики задається стратегічними та програмними документами, зокрема Енергетичною стратегією України до 2030 року та Концепцією «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року, які визначають необхідність зростання частки ВДЕ й підвищення енергоефективності [9, 17]. Узгодження із європейськими підходами підкріплюється положеннями Директиви

2009/28/ЄС та Європейського кліматичного закону, що формують рамку цілей і принципів заохочення ВДЕ [8, 11], а також міжнародними кліматичними зобов'язаннями за РКЗК ООН [25]. На цьому тлі геотермальна енергетика інституційно включається до загального масиву альтернативної енергетики, а отже, підпорядковується загальним механізмам ринку електроенергії з ВДЕ, стимулюванню та процедурним вимогам [12].

У частині енергетичного регулювання для геотермальних проєктів, що передбачають виробництво електричної енергії, важливими є норми щодо функціонування сегмента ВДЕ, зміни до законодавства, спрямовані на забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел, а також механізми підтвердження «зеленого» походження електроенергії [12]. Практично це означає, що під час планування електрогенерувального геотермального об'єкта мають бути враховані вимоги щодо приєднання до електричних мереж, комерційного обліку, а також можливість отримання гарантій походження відповідно до запровадженого порядку [13]. Для проєктів теплопостачання (пряме використання тепла, теплові насоси) енергетичний блок проявляється передусім через технічне приєднання до локальних мереж теплопостачання/споживача, а також через вимоги енергоефективності обладнання, що є суттєвим у розрахунках ефективності систем з тепловими насосами [18, 21, 22].

Земельні аспекти розміщення геотермальних об'єктів у прикладному вимірі зводяться до трьох груп питань: по-перше, легальне набуття права на земельну ділянку та формування ділянки як об'єкта цивільних прав; по-друге, відповідність цільового призначення/функціонального використання планованій діяльності та узгодження із містобудівною документацією; по-третє, встановлення обмежень (у тому числі сервітутів) для лінійних об'єктів і зон із спеціальним режимом. У реальному проєкті земельна ділянка потрібна не лише під основні споруди (енергоблок, тепловий пункт), а також під свердловинні майданчики, під'їзні шляхи, розміщення допоміжної

інфраструктури й траси трубопроводів/тепломереж. Це означає, що правове оформлення часто потребує не однієї ділянки, а просторово пов'язаного «пакета» ділянок і прав на користування ними, включно з правами проходу/проїзду та прокладання мереж. Практичним джерелом систематизації нормативної бази для ВДЕ, включно з переліками актів і процедурними прив'язками, можуть бути спеціалізовані огляди нормативного поля [24].

Надрові аспекти є визначальними для гідротермальних проєктів (термальні води, пластові теплоносії) та для глибоких систем, де доступ до тепла забезпечується бурінням і експлуатацією свердловин. У правовій логіці такий проєкт неминуче включає стадії, пов'язані з користуванням надрами: від підтвердження ресурсної бази та геологічного обґрунтування до отримання права користування надрами й затвердження технічних параметрів робіт. З практичного погляду ключовою вимогою тут є те, що геотермальний ресурс не може бути легально «використаний» лише на підставі права на землю, оскільки земля дає право на використання поверхні, а надра потребують окремого правового режиму доступу. Ця «подвійність» є типовим джерелом ризику для інвестора: навіть за наявності придатної земельної ділянки проєкт не просунеться без вирішення питання надрокористування. Наукові праці, присвячені геотермальним об'єктам України, підкреслюють, що ефективність і довгостроковість експлуатації напряду залежать від коректного визначення параметрів відбору тепла, режиму експлуатації свердловин та організації реінжекції [2, 3], а отже, відповідні правові та технічні вимоги мають бути враховані на етапі вибору ділянки.

Водні аспекти виникають у двох типових випадках. Перший - коли термальні або підземні води фактично виступають теплоносієм у гідротермальній схемі, тобто здійснюється видобування підземної води, відбір тепла та повернення (або інша форма поводження із водою). Другий - коли застосовуються теплові насоси відкритого контуру, де підземна вода

використовується як джерело/акумулятор тепла. В обох випадках правове регулювання зосереджується на дозволеності та умовах спеціального водокористування, дотриманні режимів охорони підземних вод і недопущенні погіршення їхнього якісного та кількісного стану. Саме тому для геотермальних проєктів у водонасичених горизонтах одним із ключових технічних і водно-правових рішень є реінжекція, яка розглядається як інструмент зниження впливу на гідрогеологічний режим і забезпечення відтворюваності ресурсу [2, 3]. У територіальному вимірі водні вимоги «прив'язуються» до наявності водоохоронних режимів і санітарних зон, які обмежують розміщення свердловин, господарських майданчиків та допоміжної інфраструктури, що має враховуватись у земельному відборі, аби уникнути ситуації, коли ділянка геологічно перспективна, але юридично або екологічно неприйнятна.

Екологічний і природоохоронний блок регулювання реалізується через поєднання вимог щодо запобігання негативному впливу на довкілля, просторових обмежень у межах територій зі спеціальним режимом використання та процедурних механізмів оцінки наслідків діяльності. Для геотермальних проєктів найбільш «чутливими» є питання охорони підземних вод (ризик забруднення, засолення, зміни гідродинаміки), поводження з мінералізованими розсолами, а також техногенні ризики, пов'язані з бурінням і експлуатацією свердловин. Вимоги природоохоронного характеру прямо впливають на земельний вибір, оскільки на практиці обмежують можливість розміщення об'єкта в межах або поблизу територій із підвищеною природоохоронною цінністю чи спеціальними режимами використання. Стратегічний контекст такого підходу узгоджується з цілями «зеленого» переходу та політикою кліматичної нейтральності, що закріплюються у відповідних стратегічних документах [17] та європейських орієнтирах [11].

Узагальнюючи, конкретизація правового регулювання для геотермальних проєктів на етапі вибору ділянки зводиться до перевірки трьох «правових придатностей» території.

Перша - земельна придатність, тобто можливість легально розмістити наземну інфраструктуру, забезпечити доступ і прокладання мереж з урахуванням цільового призначення та обмежень землекористування [24].

Друга - надрова придатність, тобто можливість отримання права користування надрами і реалізації буріння/експлуатації свердловин у визначеній геологічній обстановці [3].

Третя - водна придатність, тобто можливість правомірного використання підземних вод як теплоносія з дотриманням режимів охорони та обґрунтуванням реінжекції як ключового заходу сталості ресурсу [2]. Додатково, для електрогенерувальних проєктів окремим «фільтром» виступає енергетичне регулювання ринку ВДЕ, включно з конкурентними умовами та гарантіями походження [12, 13].

Отже, комплексне врахування земельних, надрових та водних вимог, а також процедурних і екологічних обмежень на етапі просторового відбору ділянок є ключовим чинником забезпечення правомірного, економічно ефективного та безпечного розміщення геотермальних об'єктів в Україні, водночас створюючи основу для планування інвестиційних проєктів, зниження ризиків та інтеграції енергетичних ініціатив у стратегії сталого розвитку регіонів.

1.3 Обмеження використання територій. Охоронні зони, санітарні вимоги, природоохоронні режими

Розміщення об'єктів геотермальної енергетики, окрім наявності ресурсної бази та інфраструктурної доступності, визначається системою просторових обмежень, які встановлюють спеціальні режими використання земель і водних об'єктів. Для геотермальних проєктів така система обмежень має подвійну природу. З одного боку, вона ґрунтується на вимогах охорони

довкілля, санітарної безпеки та захисту населення, а з іншого - на технічних регламентах безпечної експлуатації інженерних мереж і об'єктів, що формують охоронні зони, коридори відведення та сервітутні обмеження. У результаті одна й та сама ділянка може бути перспективною за геотермічними параметрами, але неприйнятною через накладання кількох режимів або надмірні процедурні ризики. Тому у просторовому плануванні доцільно відокремлювати «жорсткі» обмеження (території, де розміщення фактично неможливе або економічно недоцільне) і «м'які» обмеження (території, де розміщення можливе за виконання додаткових умов, погоджень та інженерних заходів) [31].

У практичному сенсі обмеження доцільно групувати за трьома блоками: охоронні зони (переважно інфраструктурного та технологічного походження), санітарні вимоги (санітарно-захисні зони та зони санітарної охорони вод) і природоохоронні режими (території та об'єкти, що мають підвищену екологічну цінність або спеціальний статус). Саме ці блоки найчастіше формують «просторові конфлікти» при розміщенні свердловинних майданчиків, енергоблоків, теплових пунктів, теплотрас, а також допоміжної інфраструктури [3, 31].

Охоронні зони як обмеження просторового розвитку найчастіше пов'язані з існуванням лінійних і точкових об'єктів інженерної інфраструктури. Для геотермальних проєктів це має безпосереднє значення, оскільки проєкт майже завжди включає прокладання мереж, під'їзних шляхів, кабельних ліній, трубопроводів або підключення до існуючих комунікацій. У таких умовах типова задача полягає не лише в тому, щоб «не потрапити в заборонену зону», а й у забезпеченні правового режиму користування землею під лінійними об'єктами: необхідності встановлення земельних сервітутів, узгодження трас, обходу ділянок із критичними обмеженнями та мінімізації перетинів із мережами, що ускладнюють будівництво і підвищують ризики аварій [31]. Для ГІС-оцінки це означає потребу формувати окремі шари буферів навколо мереж і вузлів, визначаючи

«червоні» (виключення) та «жовті» (обмеження/умови) зони для різних типів об'єктів геотермальної інфраструктури.

Санітарні вимоги є критичними для об'єктів, пов'язаних із бурінням, експлуатацією підземних флюїдів, можливими шумовими та вібраційними впливами, а також для проєктів із відкритими контурами використання підземних вод. Ключовими інструментами тут виступають санітарно-захисні зони промислових майданчиків, які залежать від класу небезпеки об'єкта, та зони санітарної охорони джерел питного водопостачання, де встановлюються режими обмеження діяльності з метою недопущення забруднення підземних вод [15]. У геотермальних проєктах найбільш чутливими є два типи ризиків: ризик впливу на якісний стан підземних вод (через буріння, контакт із мінералізованими розсолами, технологічні розчини) та ризик зміни гідрогеологічного режиму (через відбір/закачування), що напряму пов'язано з доцільністю та технічною необхідністю реінжекції [2, 3]. У просторовому відборі ділянок санітарні вимоги фактично задають мінімальні розриви до житлової забудови і до чутливих водних об'єктів, а також визначають перелік обов'язкових проєктних заходів моніторингу і контролю.

Природоохоронні режими обмежують діяльність у межах і поблизу територій, де пріоритетом є збереження біорізноманіття, ландшафтів, водно-болотних угідь, рідкісних видів або унікальних природних комплексів. У таких зонах інфраструктурні проєкти, пов'язані з бурінням і будівництвом, зазвичай потребують підвищеної доказової бази щодо безпечності, а в багатьох випадках - не розглядаються як прийнятні через конфлікт цілей. Для геотермальних проєктів це особливо важливо в частині вибору трас тепломереж і трубопроводів, розміщення свердловинних майданчиків, тимчасових будівельних майданчиків і під'їзних шляхів. Тому в ГІС-моделі доцільно розглядати території зі спеціальним природоохоронним статусом як зони виключення або як зони з максимально високим «штрафом» у ранжуванні [31]. У стратегічному контексті такі підходи узгоджуються із політикою «зеленого» переходу та кліматичними орієнтирами, що

підкреслюють необхідність одночасного розвитку ВДЕ й збереження природного капіталу [17].

Крім наведених блоків, у просторовому аналізі слід враховувати обмеження, пов'язані із містобудівними умовами, функціональним зонуванням, щільністю забудови, а також геологічними небезпеками, які можуть проявлятися як заборона або суттєве ускладнення будівництва (зсувонебезпечні ділянки, підтоплення, карст). Для геотермальних проєктів ці фактори не є другорядними: наприклад, обмеження доступу важкої техніки до майданчика, необхідність перенесення комунікацій, складність під'їздів або ризики пошкодження існуючих мереж можуть «перекреслити» ресурсні переваги локації та зробити проєкт економічно не вигідним [31]. Саме тому просторові обмеження мають бути інтегровані в методику оцінки територій як окремий блок критеріїв.

У табл. 1.2 узагальнено основні види обмежень, типові кількісні параметри, а також наслідки для вибору земельних ділянок під геотермальні об'єкти та для побудови ГІС-моделі придатності.

Таблиця 1.2

Обмеження використання територій для розміщення об'єктів геотермальної енергетики: зміст, типові параметри та врахування в ГІС

Група обмежень	Вид обмеження / зона	Типові кількісні параметри (числа)	Вплив на розміщення геотермальних об'єктів	Врахування в ГІС-оцінці
1	2	3	4	5
Охоронні зони	Охоронні зони інженерних мереж і лінійних об'єктів (електромережі, трубопроводи, дороги, зв'язок)	Практично застосовуються буфери від 10 до 100 м залежно від типу мережі та категорії об'єкта; для транспортних коридорів часто формуються зони впливу 50–200 м як зона підвищених шумових/вібраційних факторів [31]	Обмеження на буріння та розміщення майданчиків, необхідність обходу або переукладання трас, зростання витрат на погодження; конфлікти при прокладанні тепломереж та кабельних ліній	Буферизація мереж; для частини зон - «виключення», для частини - «штраф» (зниження балу придатності)

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5
Охоронні зони	Охоронні/технологічні зони навколо свердловинних майданчиків і енергоблоків	Для планування майданчиків часто закладають площу 0,3–1,0 га на одну свердловину/вузол (залежно від технології та логістики), а для промислових геотермальних вузлів - від 1 до 5 га загалом [31]	Визначає потребу у земельному відведенні, впливає на можливість розміщення у щільній забудові; формує «слід» проекту на території	Полігон майданчика + буфер безпеки; оцінка конфліктів із землекористуванням
Санітарні вимоги	Санітарно-захисні зони (СЗЗ) промислових майданчиків	Типова градація за класами небезпеки: I клас - 1000 м, II - 500 м, III - 300 м, IV - 100 м, V - 50 м (орієнтир для попереднього планування; точне встановлення - за профільними нормами та проектом) [31]	Обмежує розміщення поблизу житлової забудови, закладів освіти/охорони здоров'я; зумовлює потребу у шумозахисних та організаційних заходах	Буфер від межі майданчика; у разі перетину з житловою забудовою - зниження придатності або виключення
Санітарні вимоги	Зони санітарної охорони джерел водопостачання (підземні води)	Для попереднього аналізу часто застосовують мінімальні радіуси першого поясу 30–50 м для водозаборів; другий/третій пояс - значно більші та визначаються гідрогеологічними розрахунками і режимом горизонту [15]	Впливає на допустимість буріння та розміщення технологічних майданчиків; посилює вимоги до моніторингу та герметизації, обмежує складування реагентів	Шари водозаборів і їх поясів; зона I - виключення, II–III - умовна придатність із високим «штрафом»
Санітарні вимоги	Відкриті контури теплових насосів (підземні води) та ризику впливу на горизонти	Для попереднього зонування беруть мінімальні відстані між видобувною та поглинальною свердловинами 20–100 м (залежно від дебіту/умов), щоб уникнути «короткого замикання» теплового фронту (інженерний орієнтир) [22, 40]	Обмежує вибір ділянок малої площі; посилює вимоги до гідрогеологічних досліджень і дозволів водокористування	Умови площі/геометрії ділянки; перевірка можливості розміщення пари свердловин у межах землевідведення

Продовження табл. 1.2

1	2	3	4	5
Природоохоронні режими	Території та об'єкти природоохоронного фонду і цінні природні комплекси	Для просторового скринінгу часто застосовується правило «нульової толерантності» (0% допустимого перекриття) для ядра територій з охоронним статусом; буфер впливу для лінійних об'єктів на практиці задають 50–500 м залежно від чутливості території [31, 17]	Як правило, формує зону виключення або різко підвищує ризик непогодження; ускладнює прокладання мереж і доступ	Полігони ПЗФ/цінних територій - виключення; буфер - зона жорсткого «штрафу»
Природоохоронні режими	Водоохоронні території, чутливі водні екосистеми, заболочені ділянки	Для попереднього аналізу формують буфери 25–200 м як зона підвищеної природоохоронної чутливості (орієнтир для скринінгу, деталізація - на стадії проекту) [31]	Обмежує можливість буріння, складування матеріалів, облаштування тимчасових доріг; підвищує вимоги до запобігання забрудненню	Буферизація водних об'єктів; зони підвищеного штрафу, а для ключових ділянок - виключення
Комбіновані обмеження	Накладання режимів «земля + вода + надра» (ділянки з високим процедурним ризиком)	Практичний індикатор: якщо на ділянці одночасно діють ≥ 3 режими (охоронні/санітарні/природоохоронні), строк і вартість погоджень зростають кратно; у ГІС це доцільно відображати через штраф 0,2–0,5 до інтегрального балу придатності (методичний орієнтир) [31]	Підвищує невизначеність реалізації, збільшує непрямі витрати і ризик зупинки проекту	«Карта накладань» режимів; штраф за кількість обмежень або зважена сума штрафів

Наведена систематизація демонструє, що для геотермальних проєктів просторові обмеження не зводяться до формального переліку заборон. Вони впливають на економіку проєкту через зміну конфігурації мереж, потребу в додаткових землевідведеннях, ускладнення логістики бурових робіт і зростання витрат на погодження.

У частині гідротермальних проєктів та відкритих контурів теплових насосів ключовим фактором стає охорона підземних вод, що зумовлює необхідність поєднання санітарних режимів із технічними заходами стабілізації ресурсу, зокрема реінжекцією та моніторингом [2, 3].

Таким чином, врахування охоронних зон, санітарних вимог та природоохоронних режимів на етапі просторового відбору земель є критичною передумовою для безпечного, екологічно збалансованого та економічно ефективного розміщення геотермальних об'єктів, а інтеграція цих обмежень у ГІС-модель дозволяє одночасно оцінювати ризики, оптимізувати конфігурацію мереж і забезпечувати прийнятність територій для реалізації проєктів з урахуванням всіх природних, технічних та процедурних факторів.

Висновки до розділу 1

У першому розділі встановлено, що геотермальна енергетика є перспективним напрямом використання місцевих відновлюваних ресурсів, однак її розвиток безпосередньо залежить від правильного вибору земельних ділянок. Земля у цьому контексті розглядається не лише як площа під обладнання, а як просторово-правова основа для розміщення свердловин, енергоблоків, теплових пунктів, мереж і допоміжної інфраструктури.

Проаналізовано, що різні типи геотермальних об'єктів мають неоднакові вимоги до території. Для промислових геотермальних електростанцій визначальними є температурний потенціал, умови буріння, доступ до мереж та екологічна безпека, тоді як для систем прямого теплопостачання і теплових насосів важливішими стають близькість до споживача, сумісність із забудовою, режим підземних вод та можливість прокладання комунікацій.

Нормативно-правовий аналіз показав, що розміщення геотермальних об'єктів потребує одночасного врахування земельних, надрових, водних, містобудівних і природоохоронних вимог. Тому на етапі попереднього відбору територій необхідно оцінювати не лише ресурсний потенціал, а й охоронні зони, санітарні обмеження, природоохоронні режими та процедурні ризики, що можуть вплинути на реальну можливість реалізації проєкту.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

2.1 Вихідні дані та джерела. Геологія, гідрогеологія, інфраструктура, землекористування, обмеження

Оцінка земельних ресурсів для розвитку геотермальної енергетики потребує формування системи вихідних даних, яка забезпечує одночасне врахування природно-ресурсної бази, техніко-інфраструктурних передумов, структури землекористування та просторових обмежень. На практиці це означає створення набору взаємоузгоджених просторових шарів і атрибутивних таблиць, які можуть бути інтегровані в геоінформаційну модель придатності територій. Ключовою вимогою до даних у межах такого дослідження є можливість порівняння територій за єдиними критеріями, а також відтворюваність результатів на основі перевірених джерел та уніфікованих процедур обробки [3]. Для забезпечення порівнянності доцільно встановити робочий просторовий масштаб аналізу на рівні 1:200 000–1:1 000 000 для скринінгу країни/регіонів і 1:25 000–1:100 000 для уточнення пріоритетних зон, а в ГІС застосовувати єдину роздільну здатність растру 250–1000 м для національного рівня та 25–100 м для локальних ділянок (за наявності детальних даних). З огляду на міждисциплінарний характер геотермальних проєктів, вихідні дані доцільно групувати за п'ятьма блоками: геологічні, гідрогеологічні, інфраструктурні, землекористувальні та дані про обмеження/режими.

Геологічні дані є базою для первинного визначення перспективних територій, оскільки геологічна будова та теплові характеристики надр визначають можливість економічно доцільного вилучення тепла. До ключових геологічних показників належать теплове поле території, геотермічний градієнт, глибини залягання порід із підвищеною температурою, тектонічні особливості, поширення осадових басейнів, а також наявність нафтогазоносних структур і глибоких водоносних

комплексів, що можуть бути пов'язані з підвищеним геотермальним потенціалом [6], [28]. Для числового відображення геологічної придатності в ГІС-моделі доцільно використовувати параметри, які піддаються просторовому зіставленню: тепловий потік (мВт/м^2) або індикатори теплового поля; температури на опорних глибинах, наприклад 1000 м, 2000 м, 3000 м; геотермічний градієнт ($^{\circ}\text{C/км}$). Для попереднього скринінгу перспективними можуть вважатися зони з підвищеним градієнтом, умовно понад $30\text{--}35^{\circ}\text{C/км}$, тоді як $20\text{--}25^{\circ}\text{C/км}$ зазвичай відповідає середнім умовам і потребує більших глибин для досягнення технологічно привабливих температур. Важливими є також глибини продуктивних горизонтів: для гідротермальних систем найчастіше розглядаються інтервали 1000–3500 м, а для низькопотенційного тепла верхніх шарів - 0–200 м (зонди/колектори) [21], [22]. Для формування картографічної основи геологічного блоку використовуються узагальнюючі картографічні видання й атласи України [5], результати досліджень теплового поля [6], [28], а також праці з оцінки теплового потенціалу геотермічних пластових покладів і характеристик перспективних геотермальних об'єктів [1], [19] та сучасні узагальнення щодо видобування й використання геотермальних ресурсів України [3].

Гідрогеологічні дані є критично важливими для гідротермальних схем і теплових насосів відкритого контуру, де підземні води виступають теплоносієм. Вони включають інформацію про водоносні горизонти, їхню глибину, потужність, проникність, дебіти, напірні умови, температурний режим підземних вод, мінералізацію та хімічний склад, а також про наявні водозабори й режими охорони вод [15]. Для кількісного опису придатності гідрогеологічного ресурсу в моделі доцільно використовувати показники: температура води ($^{\circ}\text{C}$), дебіт свердловини ($\text{м}^3/\text{год}$), мінералізація (г/л), глибина водоносного горизонту (м), коефіцієнт фільтрації або проникність (м/добу), а також наявність/можливість реінжекції як технологічної умови сталості ресурсу [2], [3]. Для теплопостачання прямого використання тепла часто розглядають температурні інтервали від 40 до 100°C (залежно від

схеми та потреб), тоді як для потенційної електрогенерації на бінарних циклах практично значущими стають ресурси приблизно від 90–120 °С і вище, якщо інші умови сприятливі [34], [38]. Для теплових насосів відкритого контуру важливими є стабільні температури підземних вод 8–15 °С і достатній дебіт, орієнтовно від 5–20 м³/год для локальних об'єктів і вище для більших систем, при цьому ключовою умовою стає недопущення «короткого замикання» теплового фронту, що вимагає рознесення видобувної та поглинальної свердловин у межах 20–100 м залежно від дебіту та гідрогеології [22], [40]. Джерельною базою для гідрогеологічного блоку виступають узагальнюючі праці з гідрогеології України [15], спеціалізовані звіти та регіональні матеріали [16], а також дослідження щодо використання водоносних горизонтів для тепло- і холодопостачання та оцінки ефективності використання тепла доквілля і верхніх шарів Землі [20], [22].

Інфраструктурні дані забезпечують оцінку доступності територій і потенційної вартості підключення об'єкта до мереж та споживачів. Для кількісного аналізу в ГІС доцільно використовувати відстаневі та часові показники: відстань до автомобільних доріг із твердим покриттям (км), відстань до залізниці (км), відстань до підстанцій і ліній електропередач (км), а також відстань до потенційних споживачів тепла (населені пункти, промислові об'єкти) (км). Для попереднього ранжування можуть застосовуватися порогові значення, що відображають різке зростання капітальних витрат при збільшенні відстаней: наприклад, висока придатність для теплопроектів у межах 0–5 км до крупного споживача, середня - 5–15 км, низька - понад 15–20 км через здорожчання тепломереж і зростання втрат; для електрогенерації високою може вважатися доступність до електромереж у межах 0–10 км до точки приєднання, середньою - 10–30 км, низькою - понад 30 км (залежно від потужності та класу напруги). У міжнародних підходах до планування геотермальних електростанцій підкреслюється, що вартість приєднання та доступності є одним із ключових чинників доцільності поряд із ресурсними параметрами [31]. У ГІС-оцінці ці дані

зазвичай перетворюються на карти відстаней або ізохрон (наприклад, 15, 30, 60 хв доступу), а далі нормалізуються у шкалу балів.

Дані про землекористування та земний покрив необхідні для оцінки сумісності території з розміщенням об'єкта та прогнозу конфліктів із іншими видами використання земель. У кількісному вимірі важливими є частка землекористувань певного типу в межах осередку аналізу (наприклад, 1×1 км або 5×5 км), щільність забудови (умовно частка забудованих земель, %), а також відстань до меж житлової забудови (м/км) як проксі для соціальної чутливості та санітарних вимог. Для геотермальних майданчиків доцільно враховувати мінімальні потреби в площі: для свердловинного майданчика орієнтовно 0,3–1,0 га (на етапі скринінгу), для вузла прямого теплопостачання чи компактного енергоблоку - від 1 до 5 га залежно від конфігурації й допоміжної інфраструктури [31]. Для систем теплових насосів із вертикальними зондами земельна потреба може бути меншою у поверхневому вимірі, проте визначальними стають обмеження щільної забудови та інженерних мереж, а також можливість розмістити контур у межах ділянки без конфліктів із підземними комунікаціями [21], [22]. Додатково для України важливими можуть бути дані про інфраструктуру нафтогазового комплексу (райони родовищ, свердловин, промислових майданчиків), оскільки вона може частково знижувати витрати на освоєння та забезпечувати інформаційну базу щодо глибинних структур [14], [16].

Дані про обмеження та спеціальні режими використання територій формують «маску допустимості» або систему штрафів у моделі придатності. Для кількісного врахування обмежень у ГІС використовуються буфери (м) навколо об'єктів або полігони режимних територій із бінарним підходом (0/1) чи штрафними коефіцієнтами. Для санітарно-захисних зон промислових майданчиків у попередньому плануванні застосовують орієнтовні нормативні розміри: 50 м (V клас), 100 м (IV клас), 300 м (III клас), 500 м (II клас), 1000 м (I клас) як порогові значення для перевірки сумісності з житловою забудовою та соціально чутливими об'єктами [31]. Для зон санітарної охорони

водозаборів у скринінгових моделях часто задають мінімальні радіуси першого поясу 30–50 м як «жорстке виключення», тоді як другий і третій пояси визначаються гідрогеологічними розрахунками і можуть охоплювати значно більші площі [15]. Для природоохоронних територій у модель часто закладається принцип повного виключення (0% перекриття) для полігонів територій із охоронним статусом, а також буфер впливу 50–500 м для оцінки ризиків при прокладанні лінійних об'єктів (теплотрас, трубопроводів, доріг) [31], [17]. Для інженерних мереж і лінійних об'єктів у скринінгу доцільно задавати буфери 10–100 м залежно від типу мережі, щоб мінімізувати ризики конфліктів і витрати на перенесення або погодження [31]. Усі ці числові параметри слугують базою для первинного фільтрування й ранжування територій і надалі уточнюються на стадії детального проектування.

У процесі підготовки вихідних даних важливими є питання масштабу, точності та узгодженості. Різні джерела мають різну деталізацію, тому необхідно привести їх до спільної роздільної здатності та єдиної системи координат, забезпечити коректну геоприв'язку та контроль топології для векторних шарів. Атрибутивні дані мають бути приведені до уніфікованих шкал, зокрема для нормалізації критеріїв у багатокритеріальній моделі. Для забезпечення відтворюваності слід фіксувати метадані для кожного шару: джерело, рік/період актуальності, масштаб, метод отримання, обмеження використання [3], [31]. Така організація даних дозволяє не лише отримати карту придатності, але й прозоро обґрунтувати результати ранжування, пояснюючи, які саме числові параметри та порогові значення стали підставою для виділення перспективних зон або відсіву територій.

Отже, вихідні дані для оцінки земельних ресурсів під геотермальні проєкти в Україні мають формувати інтегрований інформаційний масив, який забезпечує комплексну оцінку придатності територій на основі числових показників геологічних і гідрогеологічних характеристик, інфраструктурної доступності, структури землекористування та просторових обмежень, створюючи надійну основу для ГІС-аналізу, ранжування

перспективних зон, мінімізації ризиків та прийняття обґрунтованих інвестиційних і планувальних рішень.

2.2 Критерії придатності. Температурний режим, глибина, доступність, ризики, правові умови

Оцінка придатності земельних ресурсів для розвитку геотермальної енергетики має ґрунтуватися на багатокритеріальному підході, оскільки жоден окремий показник не визначає успішність проєкту сам по собі. Перспективність території формується як результат поєднання ресурсних параметрів (температурний режим і глибина залягання), техніко-економічних передумов (доступність інфраструктури та споживача), ризикових факторів (геологічні, гідрогеологічні, екологічні та техногенні ризики) і правових умов (обмеження землекористування, режим доступу до надр і вод, процедурна складність реалізації). Така логіка узгоджується з підходами планування та фінансування геотермальних проєктів, де наголошується на необхідності інтеграції ресурсних, інфраструктурних і регуляторних факторів у єдину модель прийняття рішень [31]. У вітчизняних дослідженнях також підкреслюється, що оцінка потенціалу геотермальних об'єктів і обґрунтування методики визначення теплового потенціалу мають супроводжуватись аналізом умов доступу до ресурсу та стабільності його експлуатації, зокрема через коректний режим відбору і реінжекції [2], [3], [19].

Критерії придатності доцільно структурувати за принципом «від ресурсу до реалізації». На першому рівні визначається наявність і якість геотермального ресурсу, тобто температурний режим у надрах або підземних водах, а також його просторове розташування і доступність на певних глибинах. На другому рівні оцінюється інфраструктурна та логістична досяжність, адже навіть якісний ресурс може бути економічно недоцільним за умов значних відстаней до мереж чи споживачів. На третьому рівні враховуються ризики, що можуть знизити прогнозованість роботи системи

або підвищити витрати на будівництво й експлуатацію. На четвертому рівні аналізуються правові умови, оскільки процедурна неможливість або високий регуляторний ризик фактично може «обнулити» ресурсні та інфраструктурні переваги ділянки [31].

Температурний режим як критерій є базовим, оскільки визначає, чи може ресурс забезпечити потрібний рівень тепла для конкретного типу застосування. Для прямого теплопостачання або каскадного використання тепла важливими є ресурси з температурою орієнтовно 40–100 °С, що дозволяє організовувати теплопостачання з різними схемами підігріву та резервування, а для електрогенерації на бінарних циклах доцільними стають ресурси приблизно від 90–120 °С і вище, за умови достатніх дебітів та прийнятних характеристик теплоносія [34], [38]. Для теплових насосів, що використовують низькопотенційне тепло ґрунту або підземних вод, вирішальним стає стабільний температурний фон верхніх шарів Землі або водоносних горизонтів, який зазвичай знаходиться в межах 8–15 °С, а ефективність системи визначається сезонним коефіцієнтом корисної дії та параметрами теплового фронту [18], [21], [22], [40]. У рамках ГІС-оцінки температурний критерій доцільно задавати у вигляді класів придатності або нормалізованої шкали, використовуючи карти теплового поля території України та результати оцінок по геотермальних об'єктах [2], [6], [28].

Глибина залягання ресурсу є другим ключовим критерієм, оскільки вона визначає складність і вартість буріння, а отже - капітальні витрати і ризик проєкту. Для гідротермальних систем у практиці найчастіше розглядаються горизонти приблизно 1000–3500 м, тоді як більші глибини суттєво підвищують витрати й доцільні лише за високих температур або особливих умов проєкту [3]. Для теплових насосів із вертикальними зондами робочі глибини зазвичай становлять 50–200 м, а для горизонтальних колекторів - перші 1–2 м ґрунтового профілю, що означає зовсім інший характер земельних вимог: менший «буровий» ризик, але значно більша роль локального землекористування і щільності забудови [21], [22]. У моделі

придатності глибина може враховуватись як «штрафний» фактор, що зменшує загальний бал території при зростанні глибини до температурно придатного горизонту.

Доступність як критерій включає транспортну, мережеву та споживчу складові. Транспортна доступність визначається можливістю доставити бурову техніку та обладнання, забезпечити під'їзди і логістику будівництва, тому у ГІС-моделі часто використовується відстань до доріг із твердим покриттям та до залізничних вузлів (за потреби). Мережева доступність охоплює відстань до підстанцій і ліній електропередач для електрогенерувальних проєктів та до теплових мереж або потенційних великих споживачів для теплових проєктів. Споживча доступність для теплопостачання є критичною через зростання капітальних витрат на тепломережі й втрати при транспортуванні тепла, тому найвищу придатність мають території в межах 0–5 км до значного споживача, середню - 5–15 км, нижчу - понад 15–20 км. Для електрогенерації умовно сприятливими є ділянки в межах 0–10 км до точки приєднання, середні - 10–30 км, низькі - понад 30 км [31]. У міжнародних підходах до планування геотермальних станцій інфраструктурна складова розглядається як один із ключових детермінантів інвестиційної доцільності поряд із ресурсом [31].

Ризики як критерій доцільно поділяти на геологічні, гідрогеологічні, екологічні та техногенні. Геологічні ризики включають ускладнення буріння, тектонічні порушення, геодинамічні небезпеки, а також невизначеність параметрів пласта. Гідрогеологічні ризики проявляються у нестабільності дебітів, високій мінералізації або корозійній активності теплоносія, ризиках кольматації, а також у можливості негативного впливу на водоносні горизонти. Екологічні ризики пов'язані з охороною підземних вод і необхідністю безпечного поводження з мінералізованими розсолами, що вимагає технічних рішень реінжекції, моніторингу і контролю [2], [3]. Техногенні ризики включають конфлікти з інженерними мережами, обмеження доступу до майданчика, ризик аварій при перетині зон охоронних

режимів, а також соціальні ризики, пов'язані з близькістю до житлової забудови та вимогами санітарно-захисних зон [31]. У багатокритеріальній моделі ризики зазвичай відображаються як «негативні» фактори (штрафи), які знижують інтегральний бал придатності території.

Правові умови як критерій є інтегральним показником процедурної реалізованості проєкту. Він включає відповідність цільового призначення земельної ділянки планованому використанню, наявність/відсутність спеціальних режимів (природоохоронні території, водоохоронні зони, зони санітарної охорони), можливість формування земельних сервітутів для лінійних об'єктів, а також доступність процедур отримання права користування надрами і дозволів на спеціальне водокористування у випадках, коли це потрібно. Для електрогенерувальних проєктів додатковим процедурним фактором виступає інтеграція в механізми ринку ВДЕ та підтвердження походження електроенергії [12], [13]. У межах скринінгової оцінки правові умови доцільно відображати через «маски виключення» (території, де розміщення практично неприпустиме) та «маски умовної придатності» (де реалізація можлива за додаткових погоджень і обмежень) [31].

З огляду на наведене, у табл. 2.1 доцільно представити критерії придатності у структурованому вигляді з параметрами, які можуть бути використані в ГІС та багатокритеріальній оцінці, із зазначенням рекомендованих порогових значень для первинного ранжування територій.

Таблиця 2.1

**Критерії придатності земельних ресурсів для геотермальних
проектів та показники для ГІС-оцінки**

Критерій	Показник (одиниці)	Орієнтовні пороги/класи для скринінгу (числа)	Інтерпретація для моделі придатності
1	2	3	4
Температурний режим (глибокі ресурси)	Температура на горизонті (°C), теплове поле/градієнт (°C/км)	Для прямого тепла: 40–100 °C (вища придатність); для ORC-електрогенерації: ≥90–120 °C (вища придатність); геотермічний градієнт: >30–35 °C/км (вища придатність), 20–30 °C/км (середня)	Позитивний фактор: вищі значення → вищий бал
Температурний режим (низькопотенційні системи)	Температура ґрунту/підземних вод (°C), сезонний COP/SCOP	Температура підземних вод 8–15 °C як стабільна база; мінімальні допустимі вимоги до сезонної ефективності обладнання - відповідно до норм енергоефективності (використовується як фільтр відповідності) [18]	Позитивний фактор; відповідність SCOP - умова придатності
Глибина	Глибина до температурно придатного горизонту (м)	Гідротермальні горизонти: 1000–3500 м (оптимальні для скринінгу); >3500 м - зниження придатності через зростання витрат; теплові насоси: 50–200 м (вертикальні зонди), 1–2 м (горизонтальні колектори)	Негативний фактор (штраф): більша глибина → нижчий бал
Доступність до споживача/мереж	Відстань до споживача тепла (км), до підстанції/ЛЕП (км), до дороги (км)	Тепло: 0–5 км (висока), 5–15 км (середня), >15–20 км (низька); Електрика: 0–10 км (висока), 10–30 км (середня), >30 км (низька); Дорога: 0–2 км (висока), 2–5 км (середня), >5 км (низька)	Позитивний фактор: менша відстань → вищий бал

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4
Ризики гідрогеологічні	Дебіт (м³/год), мінералізація (г/л), корозійність/схильність до колюматції	Для відкритого контуру: дебіт $\geq 5-20$ м³/год (орієнтир для локальних систем); мінералізація/хімсклад - обмежувальний фактор (чим вище ризики корозії/відкладень, тим нижчий бал) [2], [3]	Негативний фактор (штраф) або маска умовної придатності
Ризики екологічні	Наявність зон охорони, чутливих водних об'єктів, природоохоронних територій	ПЗФ: 0% перекриття (виключення); буфер впливу 50–500 м (штраф); санітарні зони водозаборів: I пояс 30–50 м (виключення) [15], [31]	Маски виключення + штрафні зони
Ризики техногенні/соціальні	Відстань до житлової забудови (м), накладання охоронних зон мереж	Санітарно-захисні зони: 50/100/300/500/1000 м (V–I клас) як скринінгові пороги; перетин охоронних зон мереж - зниження придатності [31]	Штраф або виключення залежно від ступеня
Правові умови	Кількість режимів/обмежень, потреба у зміні цільового призначення, потреба у дозволах (надра/вода)	≥ 3 накладені режими/обмеження - високий процедурний ризик; природоохоронні території - виключення; водоохоронні/санітарні - умовна придатність із підвищеним штрафом [31]	Штрафні коефіцієнти + маски допустимості
Енергетичні процедури (для електрогенерації)	Можливість приєднання, гарантії походження	Наявність точки приєднання в межах 0–10 км підвищує бал; можливість оформлення гарантій походження - фактор інвестпривабливості [12], [13], [31]	Позитивний фактор при наявності умов

Таким чином, запропонована система критеріїв придатності забезпечує комплексну основу для кількісної оцінки земельних ресурсів під геотермальні проєкти, інтегруючи ресурсні параметри, інфраструктурну

доступність, ризики та правові умови, що дозволяє створювати ГІС-моделі для ранжування територій, оптимізації розміщення об'єктів, мінімізації ризиків та прийняття обґрунтованих інвестиційних і планувальних рішень.

2.3 ГІС-модель оцінки. Карта придатності, ранжування територій, перевірка результатів

Побудова ГІС-моделі оцінки придатності земельних ресурсів для геотермальної енергетики є центральним етапом методики, оскільки дозволяє інтегрувати різноманітні дані (геологічні, гідрогеологічні, інфраструктурні, землекористувальні та режимні) в єдиний аналітичний простір і отримати просторово зіставні результати у вигляді карти придатності та ранжування територій. Такий підхід відповідає практиці планування геотермальних проєктів, де підкреслюється необхідність об'єднання ресурсних параметрів із критеріями доступності та регуляторними обмеженнями для мінімізації інвестиційних ризиків [31]. Для України науковою основою формування ресурсного ядра моделі слугують узагальнення щодо геотермальних об'єктів, теплового потенціалу та теплового поля території [1, 2, 3, 6, 28], а також міжнародні методичні підходи до оцінювання та проєктування геотермальних систем [31, 34, 38].

ГІС-модель доцільно реалізувати як багатокритеріальну зважену оцінку із застосуванням масок допустимості та штрафних коефіцієнтів. У загальному вигляді інтегральний індекс придатності території формується за принципом зваженої суми нормалізованих критеріїв із подальшим обмеженням (виключенням) зон, де розміщення об'єктів є неприпустимим через природоохоронні чи санітарні режими. Практично це може бути подано формулою:

$$S = M \times (w_1 \cdot T + w_2 \cdot D + w_3 \cdot A + w_4 \cdot R + w_5 \cdot L),$$

де

S - інтегральний індекс придатності (0–1);

M - маска допустимості (0 або 1);

T - температурний критерій;

D - глибина (як штрафний фактор);

A - доступність;

R - ризики (еколого-гідрогеологічні та техногенні);

L - правові умови/обмеження; w_i - вагові коефіцієнти, що сумарно дорівнюють 1.

Методично доцільно початково задати ваги у межах: $w_1 = 0,30$ (температурний режим), $w_2 = 0,20$ (глибина), $w_3 = 0,20$ (доступність), $w_4 = 0,15$ (ризики), $w_5 = 0,15$ (правові умови), а далі перевірити стійкість результатів до зміни ваг (чутливість) [31]. Така структура ваг відображає домінуючу роль ресурсу (температура та глибина), але залишає суттєву частку впливу за доступністю, ризиками та правовими умовами, що є критичним саме для земельної оцінки (рис. 2.1).

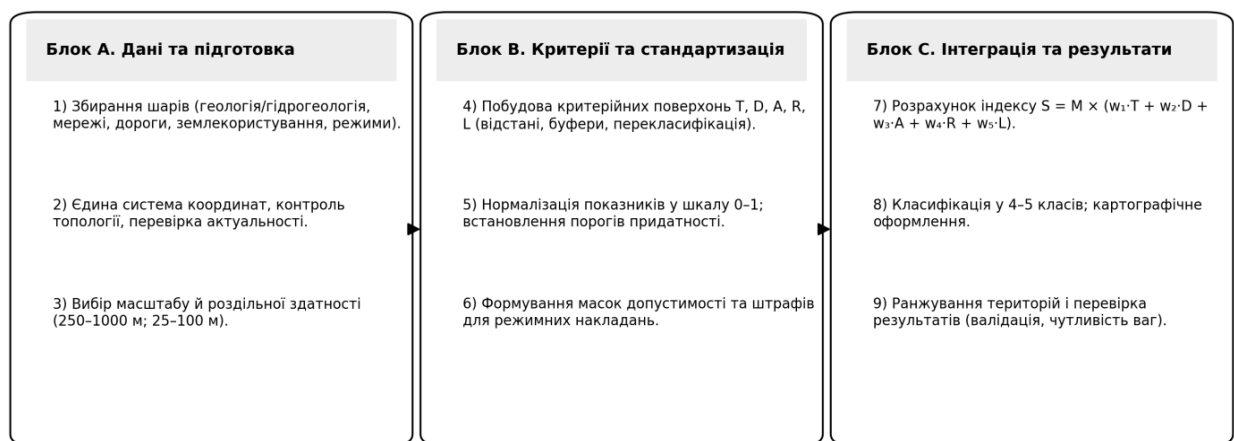


Рис. 2.1. Алгоритм побудови ГІС-моделі оцінки придатності земельних ресурсів для геотермальних проєктів

1. Підготовка даних: збирання шарів (теплове поле/температури на глибинах, гідрогеологія, мережі, дороги, землекористування, режими), приведення до єдиної системи координат, контроль топології, усунення дублювань, перевірка актуальності.

2. Стандартизація просторової бази: перехід до єдиного розміру осередку аналізу (наприклад, растр 250–1000 м для скринінгу національного

рівня або 25–100 м для локального уточнення), узгодження меж досліджуваної території.

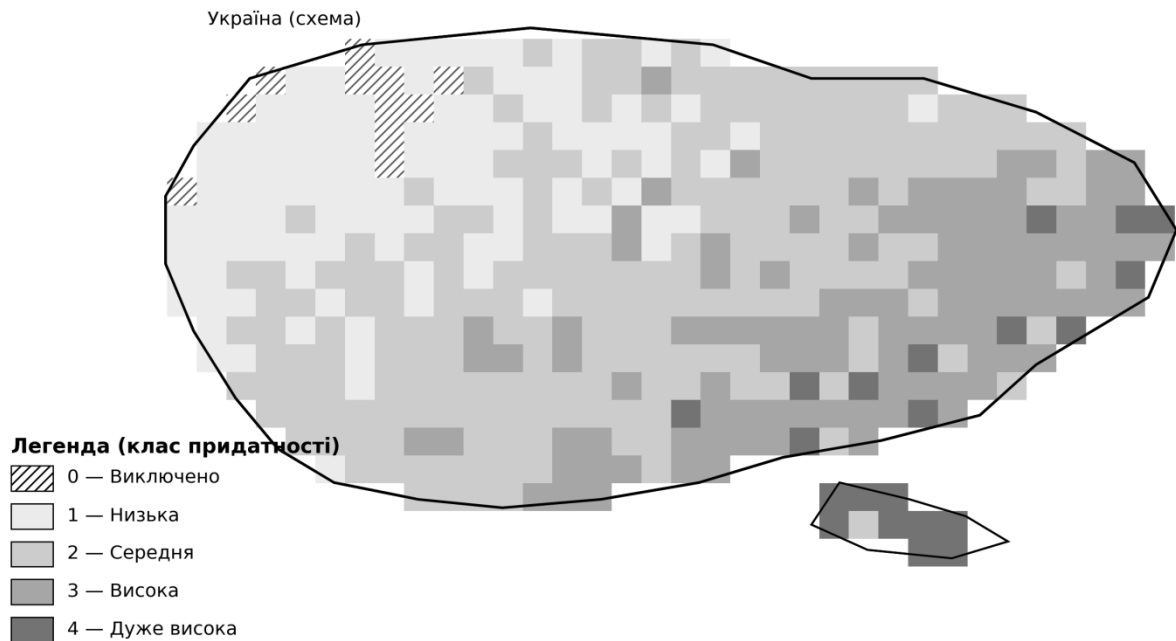
3. Побудова критеріїв: перетворення вихідних шарів у критерійні поверхні (T, D, A, R, L) через інтерполяцію/перерахунок, карти відстаней (Euclidean distance), буферизацію, перекласифікацію.

4. Нормалізація: переведення кожного критерію у шкалу 0–1 за правилом «чим краще - тим більше» (для температури, доступності) або «чим гірше - тим менше» (для глибини, ризиків, правових обмежень), з фіксацією порогів (наприклад, для теплопроектів $T \geq 40-100$ °C як зростаюча придатність; для ORC-електрогенерації $T \geq 90-120$ °C як зона високої придатності) [34, 38].

5. Маски допустимості M: створення шарів виключення (наприклад, природоохоронні території з принципом 0% перекриття; перший пояс санітарної охорони водозаборів; критичні санітарно-захисні розриви) і накладання маски на підсумковий індекс [15, 17, 31].

6. Зважена інтеграція: обчислення S, отримання підсумкової растрової поверхні, перекласифікація у класи придатності, генералізація та картографічне оформлення результатів.

Карта придатності (рис. 2.2) у межах цієї методики є підсумковим продуктом, який відображає просторове розподілення інтегрального індексу S та його класи. Для забезпечення інтерпретованості результатів доцільно застосувати 5-класову шкалу, де окремо виділяється клас «виключено» ($S=0$ через маску $M=0$), а інші класи відповідають градаціям від низької до дуже високої придатності.



Примітка: візуалізація є схемою класів (без прив'язки до фактичних ГІС-розрахунків) і призначена для демонстрації формату результату.

Рис. 2.2. Карта придатності територій для розміщення геотермальних проєктів

Легенда карти придатності:

Клас 0 - Виключено ($S = 0$; природоохоронні/санітарні режими, критичні обмеження).

Клас 1 - Низька придатність ($S = 0,01-0,30$; можливість реалізації низька або економічно сумнівна).

Клас 2 - Середня придатність ($S = 0,31-0,55$; можлива реалізація за виконання додаткових умов).

Клас 3 - Висока придатність ($S = 0,56-0,75$; території пріоритетного розгляду).

Клас 4 - Дуже висока придатність ($S = 0,76-1,00$; території першої черги для передпроектних робіт).

Для практичного планування важливо не лише отримати карту придатності, а й виконати ранжування територій у зрозумілому управлінському форматі. Тому наступним кроком є агрегування результатів за адміністративними одиницями або зонами планування (області, райони,

громади, перспективні кластери). У ГІС це реалізується через зональну статистику: для кожної територіальної одиниці розраховується середнє значення S , частка площі у класах 3–4 (у %), частка виключених зон (у %), а також максимальні значення S як індикатор «точок зростання». На основі цих показників формується табл. 2.2 ранжування, яка може застосовуватись органами влади для пріоритизації територій і для комунікації з інвесторами.

Таблиця 2.2

**Ранжування територій за класами придатності для геотермальних
проектів та управлінська інтерпретація**

Клас придатності	Діапазон індексу S	Якісна характеристика	Типові причини потрапляння в клас (числові орієнтири)	Рекомендовані управлінські дії
1	2	3	4	5
0. Виключено	0	Розміщення неприпустиме	Перекриття з режимними територіями (0% допустимого перекриття), перший пояс санітарної охорони водозаборів 30–50 м, критичні СЗЗ 500–1000 м для чутливої забудови (скринінг) [15, 31]	Вилучення з розгляду; допускається лише транзит лінійних об'єктів за окремими погодженнями (за потреби)
1. Низька	0,01–0,30	Реалізація малоімовірна або надто дорога	Низькі температури для заданого типу проекту; глибина до придатної температури >3500 м; відстань до споживача тепла >15–20 км або до точки приєднання >30 км; накладання ≥ 3 режимів [31, 34, 38]	Не рекомендувати як пріоритет; можливе використання лише для локальних рішень (наприклад, теплові насоси в забудові)

Продовження табл. 2.2

1	2	3	4	5
2. Середня	0,31–0,55	Можливо за умов	Температури у нижній межі придатності (наприклад, 40–60 °С для тепла), глибина 2500–3500 м, відстань до споживача 5–15 км; наявність «м'яких» обмежень (буфери 50–500 м) [31]	Передпроектний скринінг, уточнення даних, локальні ТЕО, перевірка режимів і погоджень
3. Висока	0,56–0,75	Пріоритетні території	Сприятливі температури (наприклад, ≥ 60 –90 °С для тепла або наближення до порогів ORC), глибина 1000–2500(3000) м, відстань до споживача ≤ 5 –10 км; помірний рівень ризиків [3, 31]	Формування портфеля ділянок; старт передпроектних робіт, гідрогеологічні/геологічні дослідження, попередні погодження
4. Дуже висока	0,76–1,00	Території першої черги	Високі температури для цільового застосування (для ORC умовно ≥ 90 –120 °С за наявності інших умов), помірні глибини (до 2500–3000 м), близькість до споживача/мереж (≤ 5 км для тепла; ≤ 10 км для електрики), мінімальні процедурні перешкоди [31, 34, 38]	Детальне ТЕО, вибір конкретних ділянок, підготовка інвестпроектів, запуск процедур дозволів

Перевірка результатів є обов'язковим елементом ГІС-оцінки, оскільки дозволяє відокремити технічно обґрунтовані висновки від картографічних артефактів, спричинених різною якістю даних, масштабами або некоректною

нормалізацією критеріїв. Перевірку доцільно виконувати у трьох взаємодоповнювальних площинах. По-перше, здійснюється логічна валідація моделі через порівняння карти придатності з відомими науковими уявленнями про теплове поле території України та геотермічні закономірності; зони високої придатності мають узгоджуватись із підвищеними значеннями теплового поля та описаними в літературі перспективними районами [6, 28]. По-друге, виконується емпірична верифікація шляхом накладання результатів на локалізації відомих геотермальних об'єктів/оцінених родовищ або зон, які у дослідженнях визначаються як перспективні; очікувано, такі об'єкти мають потрапляти до класів 3–4 або до верхньої частини класу 2 залежно від інфраструктури та правових режимів [1, 2, 3, 35]. По-третє, здійснюється аналіз стійкості результатів через чутливість до ваг: наприклад, зміна $w_1 - w_5$ на $\pm 0,05$ (або $\pm 20\%$ від початкового значення) не повинна радикально «перемальовувати» просторовий каркас зон високої придатності; якщо зміни є різкими, це свідчить про надмірну залежність моделі від одного критерію або про потребу уточнення нормалізації [31].

Додатково доцільно виконувати перевірку «на конфлікти» шляхом перехресного аналізу: для зон класів 3–4 оцінюється частка накладання з обмеженнями (буфери охоронних зон, водоохоронні режими, санітарні пояси), а також перевіряється реалістичність інфраструктурної складової (чи справді відстані до мереж і споживачів відповідають заданим порогам). Практичний критерій якості моделі полягає в тому, що території найвищих класів мають характеризуватися одночасно високими ресурсними параметрами і низьким рівнем режимних конфліктів, інакше результат вказує на методичну помилку у масках допустимості або у ваговій схемі.

Отже, ГІС-модель оцінки придатності територій не лише інтегрує різноманітні природні, технічні та правові дані у єдиний аналітичний простір, а й забезпечує точне ранжування та картографічну візуалізацію пріоритетних зон, що дозволяє приймати обґрунтовані інвестиційні та планувальні

рішення, мінімізувати ризики на ранніх етапах реалізації геотермальних проєктів і підвищувати ефективність використання земельних ресурсів у масштабі регіону та держави.

Висновки до розділу 2

У другому розділі обґрунтовано методику оцінки земельних ресурсів для геотермальної енергетики, яка спирається на інтеграцію п'яти груп вихідних даних: геологічних, гідрогеологічних, інфраструктурних, землекористувальних та режимно-обмежувальних. Такий підхід дозволяє перейти від загального опису ресурсів до практичного порівняння територій за єдиними критеріями придатності.

Сформовано систему критеріїв оцінки, до якої включено температурний режим, глибину залягання ресурсу, транспортну та мережеву доступність, екологічні й технічні ризики, а також правові умови використання земельної ділянки. Встановлено, що жоден із цих критеріїв не може бути достатнім окремо, оскільки реальна придатність території визначається їх поєднанням.

Запропонована ГІС-модель дає змогу виконувати нормалізацію показників, накладати маски виключення, застосовувати штрафні коефіцієнти та формувати інтегральний індекс придатності. Завдяки цьому карта придатності може використовуватися як інструмент попереднього скринінгу територій, ранжування перспективних зон і підготовки подальших передпроектних рішень.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ДІЛЯНОК ПІД ГЕОТЕРМАЛЬНІ ПРОЄКТИ

3.1 Виділення перспективних зон розвитку геотермальної енергетики

Виділення перспективних зон розвитку геотермальної енергетики в Україні доцільно здійснювати як підсумковий етап просторово-економічної оцінки, який переводить результати ГІС-моделювання з формату «карти придатності» у формат управлінсько-інвестиційних пріоритетів. На практиці це означає ідентифікацію територій, де сукупність ресурсних характеристик (температурний режим і глибина залягання), інфраструктурної доступності (мережі, дороги, споживачі) та прийнятності за обмеженнями (санітарні, природоохоронні, охоронні зони) формує найвищу ймовірність успішної реалізації геотермального проєкту у розумні строки та з прогнозованими ризиками. Такий підхід узгоджується з логікою міжнародних рекомендацій щодо планування й фінансування геотермальних станцій, де наголошується, що ресурсні показники самі по собі не гарантують результату без одночасної оцінки доступності та регуляторної здійсненності проєкту [31]. В українських умовах важливо також враховувати просторову неоднорідність теплового поля, гідрогеологічних параметрів та економічної структури споживання тепла, що безпосередньо впливає на те, які технологічні рішення будуть домінувати в різних частинах країни [2], [6], [28].

Методично перспективні зони визначаються як території, що переважно належать до класів 3–4 на карті придатності (висока та дуже висока придатність), або демонструють стійко високі значення інтегрального індексу S за різних варіантів вагових коефіцієнтів у моделі. Для підвищення практичної корисності результатів виділення зон доцільно проводити не як «точковий» вибір осередків з максимальним значенням індексу, а як формування просторових кластерів (ареалів) з площею, достатньою для розміщення інфраструктури, свердловинних майданчиків і мережевих

коридорів. Як орієнтир для попереднього просторового групування можна використовувати поріг площі перспективного кластера від 10–50 км² для регіонального скринінгу (щоб уникнути випадкових «плям» високих значень), а на локальному рівні - відбір конкретних майданчиків площею від 1 до 5 га для основних вузлів (енергоблок, тепловий пункт) і 0,3–1,0 га для свердловинних майданчиків, залежно від типу проєкту та логістики [31]. У межах цього підходу перспективні зони не ототожнюються автоматично з «готовими ділянками під інвестора», а визначаються як території першої черги для подальших передпроєктних робіт: уточнення геології/гідрогеології, попередніх узгоджень і відбору конкретних земельних ділянок.

Ключовою особливістю геотермальної енергетики є те, що перспектива території залежить від запланованого типу використання ресурсу. Тому доцільно виділяти перспективні зони за технологічними напрямками: зони для прямого використання тепла (теплопостачання, теплиці, технологічне тепло), зони для можливого застосування бінарних циклів (ORC) з метою виробництва електроенергії, а також зони пріоритетного впровадження геотермальних теплових насосів (закритий і відкритий контури). У світовій практиці пряме використання тепла є наймасовішим сегментом геотермальної енергетики, що підтверджується оглядовими дослідженнями із використання геотермальної енергії у світі [34], а технологічні рішення для середньо- та низькотемпературних ресурсів через ORC і вибір робочих тіл бінарних установок розглядаються як шлях до розширення географії електрогенерації [37], [38]. Для України ці напрями також є релевантними: з одного боку, наявні дослідження щодо гідрогеологічних і геотермічних характеристик об'єктів [2], а з іншого - підтверджений потенціал застосування низькопотенційної теплоти ґрунту та верхніх шарів Землі для систем теплопостачання/охолодження через теплові насоси [21], [22].

Перспективні зони прямого використання тепла формуються насамперед у прив'язці до джерел попиту на тепло і можливості економічно доцільного транспортування теплової енергії. Це означає, що навіть за

наявності придатного ресурсу зона вважається перспективною лише тоді, коли поруч є концентрація споживачів (населені пункти, промислові підприємства, тепличні комплекси) або можливість створення таких споживачів у рамках територіального розвитку. Для таких зон пріоритетним є поєднання температури ресурсу в інтервалі, достатньому для теплопостачання (орієнтовно 40–100 °С залежно від схеми), прийнятної глибини та мінімальної відстані до споживача, оскільки при зростанні відстані понад 15–20 км різко зростають витрати на тепломережі та тепловтрати [31], [34]. Відтак при виділенні перспективних зон теплопостачання доцільно накладати «ресурсну карту» на карту найбільших потенційних споживачів і транспортно-мережеву доступність, що дозволяє визначити кластери «ресурс + попит». У межах таких кластерів особливо привабливими є сценарії каскадного використання тепла, коли після первинного відбору тепла для централізованого/локального теплопостачання залишкове тепло спрямовується на теплиці, сушіння або інші технологічні процеси, підвищуючи загальну ефективність проєкту і зменшуючи рівень собівартості корисної енергії [34].

Перспективні зони для потенційної електрогенерації (ORC) у межах цієї роботи доцільно трактувати обережніше, оскільки для електрогенерації потрібні вищі температури, достатні дебіти, стабільність параметрів теплоносія і наявність умов приєднання до електромереж. Для попереднього скринінгу такі зони можуть ідентифікуватися там, де температурні параметри є наближеними або вищими за орієнтовні пороги 90–120 °С, а глибини до відповідного горизонту не виходять за межі економічно прийнятного діапазону (умовно до 2500–3000(3500) м) [31], [38]. Водночас навіть за наявності температури ключову роль відіграє доступність електромереж і витрати на приєднання, тому перспективні зони ORC-генерації мають бути узгоджені з мережею підстанцій і ліній електропередач, а також з територіями, де процедурні ризики (обмеження землекористування, природоохоронні режими, санітарні зони) є мінімальними. Технологічні

особливості ORC і вибір робочого тіла також впливають на придатність, оскільки ефективність залежить від температурного рівня і характеристик геотермального флюїду, що підтверджується дослідженнями щодо оптимального дизайну бінарних установок і вибору робочих тіл [30], [37]. У межах українських реалій перспективні зони ORC-генерації можуть розглядатися як «території для поглиблених геологічних і техніко-економічних досліджень», а не як готові до негайного розгортання проекти.

Окремою категорією перспективних зон є зони розвитку геотермальних теплових насосів, які мають найбільший потенціал масштабування у містах і громадах завдяки відносно низьким бар'єрам входу та можливості застосування як у приватному секторі, так і в будівлях соціальної інфраструктури. Для теплових насосів ресурсна логіка відрізняється: вирішальними стають температурний режим верхніх шарів Землі та підземних вод, а також можливість забезпечити ефективність системи на рівні мінімальних вимог до сезонного коефіцієнта корисної дії [18], [21], [22]. Перспективними тут є урбанізовані території та передмістя, де є стабільний попит на тепло й охолодження, а також доступ до земельних ділянок для розміщення контурів (закритий контур - геозонди/колектори) або до підземних вод (відкритий контур). При цьому для відкритого контуру критичним є гідрогеологічний режим і можливість технічно коректно рознести видобувну і поглинальну свердловини (орієнтовно 20–100 м залежно від дебіту), щоб уникнути «короткого замикання» теплового фронту [22], [40]. Для закритих контурів обмежувальними стають щільність забудови та конфлікти з підземними комунікаціями, що робить важливим залучення даних про землекористування і інженерні мережі.

У межах територій масового впровадження геотермальних теплових насосів особливого значення набуває не лише ресурс верхніх шарів Землі, а й можливість розміщення обладнання у вже сформованому середовищі. Приклад такого обладнання подано на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Приклад геотермального теплового насоса як елемента локальної системи тепlopостачання

Джерело: Wikimedia Commons, автор Dr Tzeferis Petros, ліцензія CC BY-SA 4.0.

У підсумку виділення перспективних зон у межах цього дослідження доцільно трактувати як формування трьох «портфелів» територій. Перший портфель - території пріоритетного розвитку теплопроектів на термальних водах і гідротермальних ресурсах із чітким зв'язком із джерелами попиту на тепло. Другий портфель - території потенційних ORC-проектів, які вимагають додаткового підтвердження температурно-дебітних параметрів і мають бути узгоджені з доступністю електромереж. Третій портфель - території масового впровадження теплових насосів, де ключовими є параметри низькопотенційного тепла та умови локального землекористування. Такий поділ дозволяє уникнути методичної помилки, коли всі геотермальні рішення оцінюються «однією шкалою», і водночас дає органам влади та інвесторам зрозумілу рамку: де можна планувати проекти з найменшими ризиками і найвищою прогнозованістю, а де потрібні додаткові

геологічні та процедурні дослідження перед прийняттям інвестиційного рішення [3], [31].

Порівняльне узагальнення технологічних напрямів за практичною пріоритетністю наведено на рис. 3.2. Оцінювання подано за п'ятибальною шкалою з урахуванням ресурсної доступності, інфраструктурної готовності, складності дозволів і керованості ризиків.

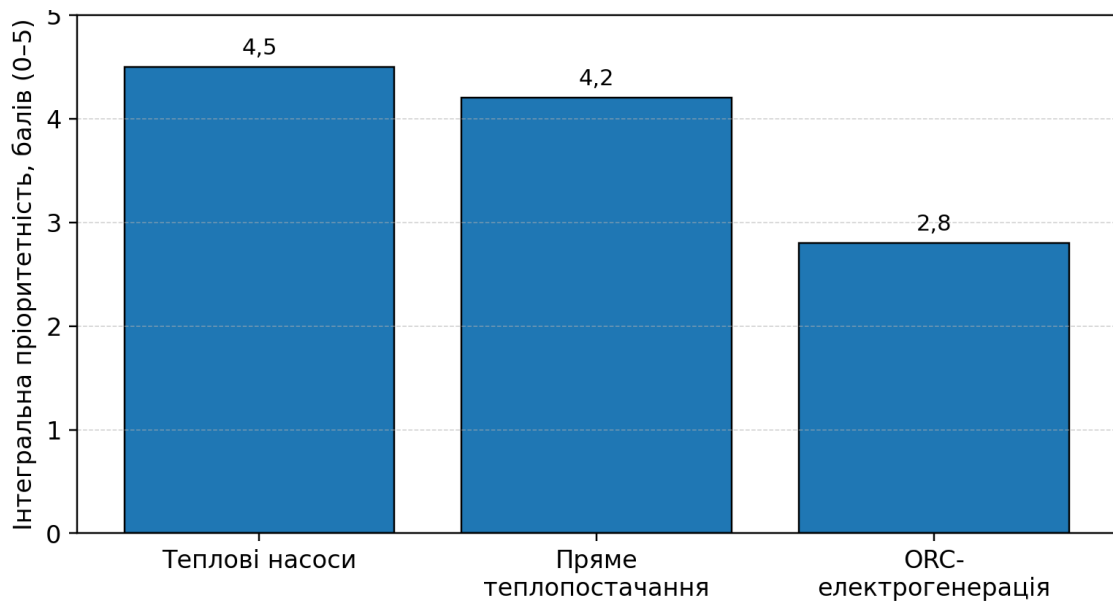


Рис. 3.2. Порівняльна пріоритетність технологічних напрямів геотермальних проєктів в Україні

Дані рис. 3.2 показують, що найвищу практичну готовність мають геотермальні теплові насоси (4,5 бала) та проєкти прямого теплопостачання (4,2 бала). ORC-електрогенерація отримує нижчий бал (2,8), оскільки потребує вищих температур, стабільних дебітів, підтвердженого складу флюїду та доступу до електромереж. Отже, для більшості громад першочерговими є теплові насоси й пряме використання тепла, а електрогенераційні проєкти мають розглядатися після поглибленого геологічного підтвердження.

Таким чином, перспективні зони розвитку геотермальної енергетики формуються на перетині достатнього ресурсного потенціалу, економічно прийнятної доступності та керованого рівня обмежень і ризиків, що

забезпечує чітке визначення пріоритетних територій для планування проєктів, підвищує прогнозованість реалізації, мінімізує інвестиційні та технічні ризики і створює надійну основу для прийняття управлінських та інвестиційних рішень на регіональному та національному рівнях.

3.2 Аналіз ключових обмежень і ризиків. Екологічні, технічні, процедурні

Розвиток геотермальної енергетики в Україні, навіть за наявності перспективних ресурсних зон, суттєво залежить від системи обмежень і ризиків, які впливають на можливість реалізації проєктів, строки підготовки, обсяг капітальних витрат та інвестиційну привабливість. На етапі просторового відбору земельних ділянок ці чинники проявляються як «фільтри здійсненності» та формують різницю між теоретичною придатністю території (за ресурсними параметрами) і практичною реалізовуваністю (за екологічними, технічними й процедурними умовами). Для геотермальних проєктів це особливо характерно через комплексність технології: необхідність буріння, роботу з підземними флюїдами, потенційне використання підземних вод і водночас значну залежність від нормативних режимів землекористування та природоохоронних обмежень [31]. В українських дослідженнях додатково наголошується, що гідрогеологічні та геотермічні характеристики об'єктів мають оцінюватися разом із ризиками експлуатації та потребою в коректному режимі відбору й реінжекції, оскільки саме це визначає довгострокову сталість ресурсу [2], [3].

У межах даного підрозділу ключові ризики доцільно структурувати на три блоки: екологічні, технічні та процедурні. Такий поділ є практично орієнтованим, оскільки відповідає логіці прийняття рішень інвестором та органами влади: екологічні ризики визначають прийнятність проєкту для довкілля і громади, технічні - прогнозованість будівництва й експлуатації, а процедурні - строк і ймовірність проходження дозвільних етапів. Додатково важливо враховувати, що ці ризики взаємопов'язані: технічні параметри

(наприклад, вибір схеми реінжекції) можуть одночасно зменшувати екологічні ризики, а екологічні обмеження (наявність водоохоронних зон) підсилюють процедурний тиск через більшу кількість погоджень і підвищені вимоги до обґрунтування.

Екологічні ризики та обмеження для геотермальних проєктів насамперед пов'язані з охороною підземних вод, поводженням із теплоносієм та впливом на території з підвищеною природоохоронною цінністю. У гідротермальних схемах ключовою екологічною проблемою є можливість негативного впливу на водоносні горизонти: зміна гідродинамічного режиму через відбір, ризик локального виснаження ресурсу або перерозподілу потоків, потенційне засолення або погіршення якості води за порушення герметичності обсадних колон, а також ризики потрапляння технологічних рідин у водоносні горизонти під час буріння. Для систем із відкритим контуром теплових насосів додатковим ризиком є порушення температурного балансу горизонту та «коротке замикання» теплового фронту, що може знижувати ефективність системи та створювати конфлікти з іншими водокористувачами [22]. У роботах, присвячених аналізу гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермальних об'єктів України, підкреслюється, що стійкість експлуатації напряду залежить від правильного вибору режиму відбору, контролю параметрів флюїду та організації реінжекції [2], [3]. Саме тому для екологічного блоку ключовим заходом зниження ризику виступає реінжекція як технологічне і водно-охоронне рішення, що дозволяє підтримувати баланс горизонту, зменшувати ризик виснаження й мінімізувати негативний вплив на довкілля [3].

Окремо слід виділити екологічні обмеження просторового характеру. Території природно-заповідного фонду та інші охоронювані природні території, як правило, є зонами виключення для промислового буріння та будівництва, а їх близькість підвищує ризик непогодження проєкту або необхідність суттєвого коригування трас лінійних об'єктів (теплотрас, трубопроводів, під'їзних шляхів) [31]. Водоохоронні режими, зони санітарної

охорони водозаборів і прибережні захисні смуги ускладнюють розміщення свердловинних майданчиків, складів матеріалів, майданчиків тимчасового будівництва та збільшують вимоги до моніторингу. Таким чином, екологічні ризики для геотермальних проєктів мають дві площини: ризики впливу на підземні води та ризики просторової несумісності з природоохоронними режимами, і обидві площини мають бути враховані вже на стадії вибору земельної ділянки.

Технічні ризики та обмеження охоплюють як «ресурсну невизначеність», так і інженерно-технологічні та інфраструктурні чинники. Найсуттєвішим технічним ризиком для глибоких геотермальних проєктів є невизначеність фактичних параметрів пласта до буріння: температура на потрібній глибині, дебіт, проникність, наявність газових домішок, мінералізація та корозійна активність. Це означає, що навіть при високих оцінках за моделлю існує ризик, що реальні параметри виявляться нижчими за очікувані, а проєкт потребуватиме дорожчих технічних рішень або стане економічно неприйнятним. Другою групою технічних ризиків є ризики буріння та експлуатації свердловин: ускладнення буріння, аварійні ситуації, проблеми цементації, зношування обладнання, утворення відкладень і кольматації, корозія елементів системи. Для ORC-генерації технічний ризик посилюється необхідністю коректного підбору технологічної схеми та робочого тіла, адже ефективність бінарних циклів суттєво залежить від температурного рівня та характеристик теплоносія [30], [37], [38]. З огляду на це, технічна здійсненність перспективної зони має підтверджуватися програмою передпроєктних робіт: аналізом існуючих свердловин, геофізикою, гідрогеологічним моделюванням і, за можливості, пілотним бурінням.

Важливими є також інфраструктурні технічні обмеження. Геотермальні проєкти потребують під'їздів для важкої техніки, місця для бурових робіт, можливості прокладання теплотрас чи трубопроводів, підключення до електромереж або інтеграції у наявні тепломережі. У щільній міській

забудові навіть високий потенціал для теплових насосів може бути обмежений через дефіцит площі під контури, конфлікти з підземними комунікаціями та підвищену вартість будівельних робіт. Для теплових насосів відкритого контуру технічним обмеженням є наявність достатнього дебіту води та просторові умови для розміщення пар свердловин на безпечній відстані, що прямо пов'язано з розмірами земельної ділянки та конфігурацією забудови [22], [40]. Відтак технічний блок ризиків є критичним для переходу від карти придатності до відбору конкретних ділянок: на цьому етапі стає вирішальною не лише «перспективність території», а можливість інженерно коректно реалізувати проєкт у конкретному місці.

Процедурні ризики та обмеження є третім ключовим блоком, який у практичних умовах часто визначає не менше, ніж ресурс і технологія. Для геотермальних проєктів процедурний ризик формується через необхідність паралельного проходження земельних, надрових і водних процедур, а також через потребу врахування режимів територій і можливих екологічних процедур. Фактично реалізація проєкту залежить від здатності ініціатора сформувати земельну ділянку з відповідним режимом використання, отримати право користування надрами для буріння та експлуатації ресурсу і, у разі використання підземних вод, забезпечити легальність водокористування. На цьому етапі ризики посилюються, якщо на території накладається декілька режимів одночасно: водоохоронні зони, санітарні пояси, охоронні зони мереж, природоохоронні території. У таких випадках зростає кількість погоджень і часові витрати, що може зменшувати інвестиційну привабливість навіть при високих ресурсних параметрах [31]. Додатковим процедурним чинником для електрогенерувальних проєктів є приєднання до електромереж, комерційні процедури та можливість підтвердження походження електроенергії з ВДЕ, що впливає на фінансову модель і ризик окупності [12], [13].

Процедурні ризики також включають ризик «соціального погодження» проєкту, який хоча й не є суто правовою процедурою, але на практиці впливає на строки, конфліктність та необхідність коригування проєктних рішень. Геотермальні проєкти можуть викликати занепокоєння громади через бурові роботи, шум, транспортне навантаження, а також через побоювання щодо підземних вод. Це означає, що навіть формально допустимі ділянки у межах населених пунктів або поблизу житлової забудови потребують підвищеної уваги до комунікації, екологічного моніторингу та прозорості проєкту. Для інвестора це трансформується у додаткові витрати й ризики затримок.

Узагальнюючи, ключові обмеження і ризики геотермальних проєктів у межах перспективних зон мають враховуватись як система взаємопов'язаних бар'єрів. Екологічні ризики концентруються навколо охорони підземних вод, поводження з теплоносієм і просторової сумісності з природоохоронними режимами, а їх мінімізація часто потребує технічних рішень реінжекції та посиленого моніторингу. Технічні ризики визначаються невизначеністю параметрів ресурсу до буріння, складністю бурових робіт, корозійно-експлуатаційними проблемами та інфраструктурними обмеженнями, що вимагає поетапного підтвердження даних і ретельного інженерного проєктування. Процедурні ризики формуються через багатоканальність дозволів і накладання режимів, а також через залежність від приєднання до мереж і регуляторних вимог у сегменті ВДЕ.

Для конкретизації ризикового профілю геотермального проєкту на рис. 3.3 подано порівняльну оцінку основних груп ризиків за п'ятибальною шкалою.

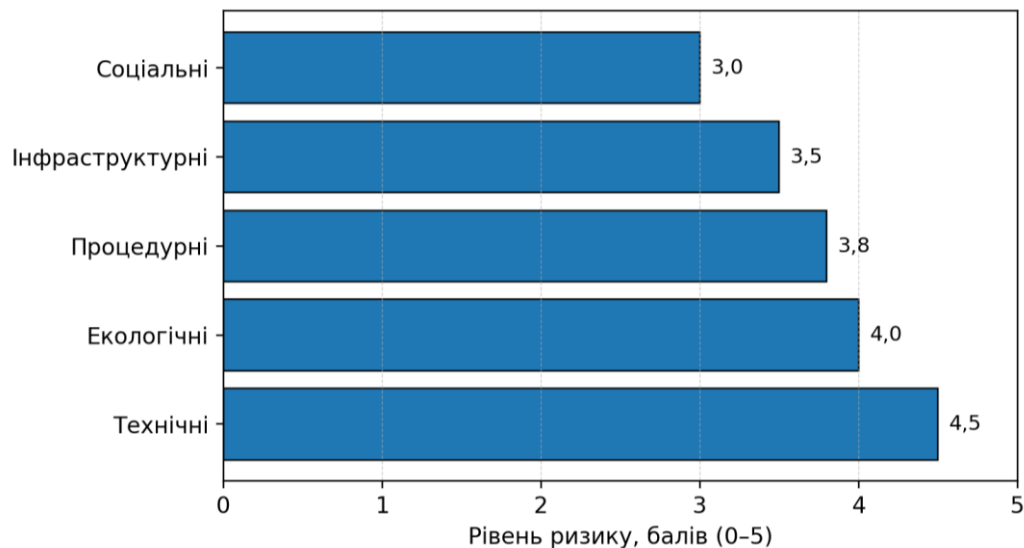


Рис. 3.3. Профіль ключових ризиків реалізації геотермального проєкту

Як видно з рис. 3.3, найбільшу вагу мають технічні ризики (4,5 бала), оскільки до буріння часто неможливо повністю підтвердити температуру, дебіт і хімічний склад теплоносія. Екологічні ризики (4,0 бала) пов'язані передусім із захистом підземних вод, реінжекцією та поводженням із мінералізованими розсолами. Процедурні та інфраструктурні ризики є дещо нижчими, але саме вони можуть збільшити строки реалізації, якщо не провести ранній правовий і мережевий скринінг ділянки.

Таким чином, ключові обмеження і ризики геотермальних проєктів слід розглядати як взаємопов'язану систему, де мінімізація екологічних ризиків через реінжекцію і моніторинг, поетапне підтвердження технічних параметрів, інженерне проєктування та управління процедурними вимогами дозволяють забезпечити ефективну, безпечну та інвестиційно привабливу реалізацію проєктів, а інтеграція цих заходів на ранніх етапах просторового відбору підвищує прогнозованість і стабільність експлуатації геотермальних систем.

3.3 Практичні рекомендації для органів влади та інвесторів щодо планування і реалізації проєктів

Практичні рекомендації щодо планування і реалізації геотермальних проєктів доцільно формувати з урахуванням того, що успішність таких ініціатив визначається не лише ресурсним потенціалом, а й якістю підготовки території, узгодженістю просторового планування, коректністю дозвільної траєкторії та здатністю сторін мінімізувати екологічні, технічні й процедурні ризики. Для України ключовим є перехід від фрагментарного підходу («пошук ділянки під конкретний проєкт») до портфельного підходу («формування набору підготовлених територій і типових рішень»), коли органи влади та інвестори працюють із наперед визначеними кластерами, де підтверджені базові умови: наявність ресурсу, доступність інфраструктури, допустимість землекористування і керованість обмежень. Міжнародна практика планування геотермальних проєктів підкреслює, що саме рання інтеграція ресурсних, мережевих і регуляторних факторів зменшує інвестиційний ризик і підвищує ймовірність реалізації [31]. Для українських умов додаткової ваги набуває коректне врахування гідрогеологічних параметрів і режимів експлуатації, зокрема реінжекції, як основи довгострокової сталості ресурсу [2], [3].

Рекомендації доцільно поділити на два адресні блоки: для органів влади (державних і місцевих), які відповідають за просторове планування, підготовку територій і формування правил гри, та для інвесторів/девелоперів, які приймають рішення про вкладення капіталу, реалізують передпроектні роботи, проходять дозвільні процедури й здійснюють будівництво та експлуатацію. Водночас частина рекомендацій є спільною, оскільки ефективність геотермального проєкту залежить від координації між стейкхолдерами: органи влади забезпечують прозорість і передбачуваність умов, а інвестори - якість технічного рішення, екологічну безпеку й фінансову життєздатність.

Для органів влади першочерговим завданням є впровадження геотермальної компоненти в документи просторового планування та створення «картографічної основи пріоритетів». На рівні області/громади це означає використання результатів ГІС-оцінки як інструменту для визначення зон, де доцільно планувати геотермальні проєкти теплопостачання, розвиток теплових насосів для соціальної інфраструктури, а за наявності високотемпературних ресурсів - підготовку територій для потенційної електрогенерації [31]. Така інтеграція знижує ризик конфліктів землекористування на пізніх стадіях і дозволяє завчасно врахувати коридори мереж, охоронні зони та режимні обмеження. Другим кроком є підготовка «портфеля ділянок» або «банку локацій», який містить опис земельних ділянок та кластерів з попередньою перевіркою ключових бар'єрів: цільове призначення/функціональне зонування, наявність обмежень, доступність під'їздів і мереж, можливість розміщення свердловинних майданчиків і прокладання лінійних об'єктів. Третім завданням є створення стандартів комунікації з інвесторами: публічні вимоги до даних, прозорі критерії відбору, типові шаблони сервітутів/умов доступу до ділянок, узгодженість із комунальними підприємствами теплопостачання, що особливо важливо для міських теплопроєктів.

Для інвесторів ключовим є поетапний підхід до розвитку проєкту, який мінімізує ризик «дорогих помилок» на ранніх стадіях. Практично це означає послідовність: скринінг території за картою придатності → перевірка обмежень і правових режимів → уточнення ресурсних параметрів → розроблення концептуальної технологічної схеми (тепло/ORC/тепловий насос; відкритий/закритий контур) → попереднє техніко-економічне обґрунтування → запуск дозвільних процедур. У гідротермальних проєктах вирішальним є підтвердження дебітів, температури, хімічного складу та можливості реінжекції, оскільки саме це визначає сталість ресурсу та екологічну прийнятність [2], [3]. У проєктах ORC особливого значення набуває підбір технологічної схеми та робочого тіла, адже ефективність

бінарних циклів для середньо- та низькотемпературних ресурсів є чутливою до параметрів теплоносія [37], [38]. У проєктах теплових насосів із відкритим контуром критичним є правильне гідрогеологічне рішення щодо рознесення свердловин і недопущення «короткого замикання» теплового фронту, що прямо впливає на експлуатаційну ефективність [22], [40].

Окремий блок рекомендацій стосується управління ризиками. Для екологічних ризиків ключовими є заходи моніторингу підземних вод, контроль герметичності свердловин, організація реінжекції та план поводження з мінералізованими розсолами, якщо вони утворюються. Для технічних ризиків - поетапна верифікація ресурсної бази, залучення досвіду буріння в аналогічних геологічних умовах, сценарне моделювання витрат і резервування бюджету на ускладнення буріння. Для процедурних ризиків - рання правова експертиза земельної ділянки, перевірка накладань режимів, план-графік отримання дозволів із критичним шляхом і «буфером» часу, а також узгодження приєднання до мереж на ранніх стадіях [31]. Окремо слід підкреслити важливість соціальної прийнятності: попередні консультації з громадою, прозора комунікація про вплив на довкілля, і демонстрація того, що технологічні рішення (реінжекція, моніторинг) мінімізують ризики.

У табл. 3.1 наведено практичні рекомендації у вигляді «матриці дій» для органів влади та інвесторів, а також типову дорожню карту реалізації геотермального проєкту з орієнтовними рішеннями для зниження ризиків.

Таблиця 3.1

Практичні рекомендації для органів влади та інвесторів щодо вибору ділянок і підготовки геотермальних проєктів

Напрямок	Органи влади (що зробити)	Інвестори (що зробити)	Очікуваний ефект
1	2	3	4
Просторове планування та пріоритети	Інтегрувати карту придатності в документи планування; визначити кластери 1-ї черги (класи 3–4)	Використати кластери як “коридор пошуку”; відсікти території з високими режимними конфліктами	Зниження ризику конфліктів землекористування; скорочення часу на підбір ділянки

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
Портфель ділянок (банк локацій)	Сформувати перелік ділянок/кластерів з описом: площа, доступ, мережі, обмеження; визначити відповідальну точку контакту	Обирати ділянки з готовими базовими даними; запитувати підтвердження режимів і сервітутних умов	Підвищення інвестиційної передбачуваності; швидший старт передпроектних робіт
Обмеження та режими	Публічно відобразити режимні зони (ПЗФ, водоохоронні, санітарні, охоронні мереж) у ГІС громади	Провести юридичний скринінг накладань; закласти штраф/буфер у графік і бюджет	Менше відмов у погодженнях; зниження процедурного ризику
Теплопроекти (пряме тепло)	Узгодити з теплокомуненерго можливості інтеграції; визначити ключові об'єкти попиту (соцсфера, промисловість)	Оцінити відстань до споживача та економіку мереж; передбачити каскадне використання	Підвищення ефективності та окупності; стабільний ринок збуту тепла [34]
Проекти ORC (електрогенерація)	Визначити можливі точки приєднання та обмеження мереж; підтримати доступ до даних	Підтвердити температурно-дебітні параметри; оптимізувати цикл і робоче тіло	Менший технологічний ризик; кращі показники ефективності [37], [38]
Теплові насоси (міські рішення)	Пріоритезувати об'єкти соцсфери; сприяти доступу до даних про підземні мережі	Вибрати контур (закритий/відкритий); забезпечити гідрогеологічне обґрунтування	Швидке масштабування; зниження споживання викопного палива [21], [22]
Екологічна безпека	Вимагати моніторинг і план управління ризиками; забезпечити прозорість процедур	Реінжекція, моніторинг вод; план поводження з флюїдом/розсолами	Мінімізація впливу на підземні води; підвищення прийнятності проекту [2], [3]
Комунікація та соціальна згода	Організувати консультації, публічні пояснення, доступ до матеріалів	Пояснити технологію, ризики і заходи безпеки; канали зворотного зв'язку	Зниження конфліктності; зменшення затримок і репутаційних ризиків

**Дорожня карта реалізації геотермального проєкту та контрольні
точки зниження ризиків**

Етап	Основний зміст робіт	Вихідний результат (deliverable)	Ключові ризики	Заходи мінімізації
1. Скринінг території	Аналіз карти придатності; відбір кластерів (класи 3–4)	Перелік 3–10 пріоритетних зон/ділянок	Помилка вибору локації	Перевірка чутливості ваг; звірка з відомими даними [31]
2. Перевірка обмежень	Накладання режимів (ПЗФ, санітарні, водоохоронні, мережі)	Карта конфліктів і список “стоп-факторів”	Непогодження, затримки	Виключення/обхід; резерв часу; ранні консультації
3. Уточнення ресурсу	Аналіз існуючих свердловин/даних; гідрогеологічні/геофізичні роботи	Оцінка температури, дебіту, складу; концепт реінжекції	Недостатні параметри ресурсу	Пілотні дослідження; сценарне моделювання; запас бюджету [2], [3]
4. Концепт технології	Вибір схеми (тепло/ORC/насоси); попередній дизайн	Концептуальна схема і баланс енергії	Низька ефективність	Оптимізація циклу (ORC); каскадність; вибір контуру [34], [37], [38]
5. Попереднє ТЕО	CAPEX/OPEX, LCON/LCOE, ризики, чутливість	Попереднє ТЕО, фінмодель	Перевищення витрат	Контрактні стратегії; резерви; поетапне фінансування [31]
6. Дозволи та узгодження	Земля, надра, вода, екологічні процедури; мережеве приєднання	Пакет дозволів і погоджень	Процедурний зрив	План-графік “критичного шляху”; юридичний супровід
7. Будівництво	Буріння, монтаж, мережі, пусконаладження	Введення в експлуатацію	Аварії/ускладнення	Технагляд; контроль якості; план реагування
8. Експлуатація і моніторинг	Контроль параметрів, моніторинг вод, техобслуговування	Стабільна генерація тепла/електрики	Деградація ресурсу	Реінжекція; регулярний моніторинг; оптимізація режимів [2], [3]

Узагальнюючи, практична реалізація геотермальних проєктів в Україні потребує одночасного «просторового» і «процедурного» планування. Для органів влади пріоритетом є підготовка територій і прозоре відображення режимів та умов, що підвищує інвестиційну передбачуваність і скорочує строки пошуку локацій. Для інвесторів ключовим є поетапне підтвердження ресурсної бази, вибір технологічної схеми з урахуванням температурного рівня й дебітів, а також раннє управління екологічними та процедурними ризиками через реінжекцію, моніторинг і юридичний скринінг [2], [3], [31]. Саме така взаємодія дозволяє перейти від «потенціалу на карті» до реальних проєктів, здатних забезпечити тепlopостачання громад, підвищити енергонезалежність та підтримати стратегічні цілі енергетичного переходу.

Таким чином, практичні рекомендації забезпечують інтегроване управління геотермальними проєктами, де прозоре просторове планування, підготовка територій, поетапна верифікація ресурсної бази, технологічне моделювання та раннє управління екологічними і процедурними ризиками дозволяють органам влади та інвесторам приймати обґрунтовані рішення, мінімізувати інвестиційні та технічні ризики, скоротити строки реалізації та забезпечити стабільне і ефективне впровадження геотермальної енергетики для потреб громад і стратегічних цілей енергетичного переходу.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі визначено, що перспективні зони розвитку геотермальної енергетики в Україні доцільно групувати за технологічними напрямками: пряме використання тепла, потенційна ORC-електрогенерація та масове впровадження геотермальних теплових насосів. Такий поділ дозволяє врахувати різні вимоги до температурного режиму, глибини ресурсу, інфраструктури та земельного забезпечення.

Аналіз обмежень і ризиків засвідчив, що найбільш критичними для реалізації геотермальних проєктів є технічна невизначеність ресурсних параметрів, екологічні ризики впливу на підземні води, складність дозвільних процедур та можливі просторові конфлікти із чинним землекористуванням. Їх мінімізація потребує поетапного підтвердження ресурсної бази, організації моніторингу, реінжекції, правової перевірки ділянок і ранньої комунікації зі стейкхолдерами.

Практичні рекомендації для органів влади та інвесторів зведено до необхідності поєднання просторового планування з процедурною підготовкою проєктів. Органам влади доцільно формувати карти придатності, банки земельних ділянок і прозорі режими доступу до інформації, а інвесторам – проводити багаторівневий скринінг, перевіряти обмеження, уточнювати ресурсні параметри та обирати технологічне рішення відповідно до реальних умов території.

ВИСНОВКИ

1. У роботі встановлено, що земельні ресурси для розвитку геотермальної енергетики слід оцінювати не як окрему площу під обладнання, а як комплексну просторову систему. До неї входять майданчики свердловин, енергоблок або тепловий пункт, під'їзні шляхи, коридори тепломереж і трубопроводів, охоронні та санітарні зони. Тому мінімальна оцінка ділянки має включати чотири блоки: природно-ресурсний, інфраструктурний, екологічно-безпековий і правовий.

2. За результатами аналізу видів геотермальних об'єктів конкретизовано, що різні технології мають різну земельну логіку. Для прямого використання тепла вирішальними є близькість до споживача та можливість прокладання тепломереж; для ORC-електрогенерації - підтвердження температури ресурсу, дебіту та доступу до електромереж; для теплових насосів - сумісність із забудовою, підземними комунікаціями та режимами охорони підземних вод.

3. Нормативно-правовий аналіз показав, що геотермальний проєкт не може бути реалізований лише через оформлення земельної ділянки. Для гідротермальних систем додатково потрібна перевірка надрового режиму, а у випадку використання підземних вод - водного режиму та умов охорони водоносних горизонтів. Отже, на ранньому етапі відбору територій необхідно одночасно перевіряти земельну, надрову, водну та екологічну допустимість.

4. У роботі визначено конкретні просторові обмеження, які мають найбільше значення для вибору ділянок: охоронні зони інженерних мереж, санітарно-захисні розриви, зони санітарної охорони водозаборів, водоохоронні території, природоохоронні полігони та ділянки з накладанням кількох режимів. Для ГІС-оцінки їх доцільно відображати як зони виключення або як штрафні коефіцієнти, що знижують інтегральний бал придатності.

5. Методика оцінки земельних ресурсів сформована на основі п'яти груп вихідних даних: геологічних, гідрогеологічних, інфраструктурних, землекористувальних і режимно-обмежувальних. Для попереднього скринінгу територій доцільно використовувати такі орієнтири: геотермічний градієнт понад 30–35 °С/км як ознаку підвищеної перспективності, температуру 40–100 °С для теплопостачання, 90–120 °С і вище для потенційних ORC-схем, а також відстань до споживача тепла до 5 км як найбільш сприятливу для теплопроектів.

6. Запропонована ГІС-модель передбачає послідовне накладання ресурсних шарів, нормалізацію критеріїв, застосування масок виключення, розрахунок інтегрального індексу придатності та поділ територій на класи. Практична цінність моделі полягає в тому, що вона не лише показує, де є ресурс, а й пояснює, чому певна територія є придатною або проблемною з погляду доступу, обмежень і процедурної реалізованості.

7. За результатами оцінки перспективні території доцільно групувати у три портфелі: території для прямого використання геотермального тепла, території для поглибленого вивчення можливості ORC-електрогенерації та території масового впровадження геотермальних теплових насосів. Найреалістичнішою першою чергою для України є теплові насоси та проекти прямого теплопостачання, оскільки вони мають нижчий поріг входу та краще узгоджуються з потребами громад.

8. Аналіз ризиків показав, що найвищу увагу потрібно приділяти технічним та екологічним чинникам. Технічні ризики пов'язані з невизначеністю температури, дебіту, хімічного складу флюїду, корозійністю та складністю буріння. Екологічні ризики концентруються навколо охорони підземних вод, поводження з мінералізованими розсолами та необхідності реінжекції. Процедурні ризики посилюються, якщо на ділянці одночасно діють кілька режимів обмежень.

9. Для органів влади конкретними практичними діями мають бути: внесення геотермальної компоненти до документів просторового планування,

створення банку потенційних локацій, відкриття ГС-шарів із режимними обмеженнями, визначення коридорів мереж і попередня перевірка конфліктів землекористування. Це дозволить не просто декларувати геотермальний потенціал, а підготувати території до реального інвестування.

10. Для інвесторів першочерговим алгоритмом має бути: скринінг карти придатності, юридична перевірка ділянки, уточнення ресурсних параметрів, вибір технологічної схеми, попереднє ТЕО, план дозволів і лише після цього - перехід до будівництва. Така послідовність зменшує ризик помилкового вибору локації, перевитрат на буріння та затримок через непередбачені правові або екологічні обмеження.

11. Підсумково доведено, що оцінка земельних ресурсів для геотермальної енергетики в Україні має виконуватися як прикладний інструмент прийняття рішень. Її результатом має бути не загальна характеристика потенціалу, а конкретний перелік територій першої черги, територій умовної придатності та територій виключення. Саме такий підхід дає змогу перейти від теоретичного потенціалу геотермальної енергетики до підготовки практичних проєктів для громад, бізнесу та державної енергетичної політики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барило А. А., Морозов Ю. П. Оцінка енергетичного потенціалу окремих геотермальних родовищ України. Відновлювана енергетика. 2017. № 1. С. 72–79.
2. Барило А.А. Аналіз гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермальних об'єктів України. Відновлювана енергетика. 2020. № 1. С. 74–84.
3. Видобування і використання геотермальних ресурсів України: монографія. Ю. П. Морозов, А. А. Барило, С. В. Дубовський, Д. М. Чалаєв. Київ: ІВЕ, 2024. 132 с.
4. Відновлювані джерела енергії: видання третє, оновлене. За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2025. 512 с.
5. Галецький Л. С. Атлас геологія і корисні копалини України. К. НАНУ. Мін. екології та природних ресурсів України. 2001. 168 с.
6. Гордієнко В. В., Гордієнко І. В., Завгородня О. В., Усенко О. В. Теплове поле території України. К.: Знання України. 2002. 168 с.
7. Держенергоефективності розроблено проєкт Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/derzhenergoefektivnosti-rozrobleno-proektnacionalnogo-planu-dij-z-rozvitku-vidnovlyuvanoyi-energetiki-na-period-do-2030-roku>
8. Директива Європейського Парламенту та Ради 2009/28/ЄС від 23 квітня 2009 року Про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел тощо. Офіційний вісник європейського союзу 5.6.2009. L140/16-L140/62.
9. Енергетична стратегія України до 2030 року. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>

10. Європейський зелений курс та потенційні наслідки його впровадження сусідніми державами для України. URL: http://prismua.org/green_deal_1/

11. Європейський кліматичний закон (затверджено Регламентом (ЄС) Європейського парламенту та Ради) № 2021/1119. (2021). URL: <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>

12. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії» № 2712-VIII від 25.04.2019. Відомості Верховної Ради України, № 23. 2019. С. 89.

13. Запровадження гарантій походження електроенергії з ВДЕ в Україні. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/227-2024-%D0%BF#Text>

14. Іванюта М. М. Атлас нафтових і газових родовищ України (в 6 т.). Львів: Видво «Центр Європи». 1998. Т. 1–3. 1421 с., Т. 4-5. 707 с., Т. 6. 224 с.

15. Камзіст Ж. С., Шевченко О. Л. Гідрогеологія України. Навчальний посібник. К. Фірма «ІНКОС». 2009. 614 с.

16. Колодій В. В., Паньків Р. П. Гідрогеологія нафтових і газових родовищ Карпатської нафтогазоносною провінції (в межах України). Звіт Західної НГРЕ. 2005. Кн.1–5. Кн. 1. 176 с.

17. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. URL: https://mepr.gov.ua/files/images/news_2020/21012020/pdf

18. Лопушанська М. Р., Лопушанський О. М., Циганюк Л. В., Башинська Ю. І. Доманський А. С. Лук'янченко Ю. О. Геоінформаційний аналіз кліматичних чинників розвитку вітрової енергетики в Тернопільській області. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2024. Том 9. № 4. С. 269 – 273.

19. Мінімальне допустиме значення середнього розрахункового сезонного коефіцієнту корисної дії. Державний комітет статистики України. URL: <http://ukrstat.gov.ua>.

20. Морозов Ю. П., Барило А. А. Обґрунтування методики визначення теплового потенціалу геотермічних пластових покладів. Відроджена енергетика. 2021. № 1 (64). С. 81–86. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1\(64\).81-86](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1(64).81-86)
21. Морозов Ю. П., Барило А. А., Чалаєв Д. М., Добровольський М. П. Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і холодопостачання. Відроджена енергетика. 2019. № 2. С. 70–78. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
22. Морозов Ю. П., Величко В. В. Оцінка енергетичного потенціалу низькопотенційної теплоти ґрунту поверхневих шарів землі на території України. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Відроджена енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Київ, 27–29 вересня 2017 р. С. 598–603.
23. Морозов Ю. П., Чалаєв Д. М., Ніколаєвська Н. В., Добровольський М. П. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу докілья та верхніх шарів Землі України. Відроджена енергетика. 2019. № 4 (63). С. 80–88. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
24. Морозов Ю.П. Сучасні напрями розвитку геотермальної енергетики. Збірник наукових праць УкрДГРІ. 2016. № 2. С. 107–118.
25. Нормативно-правова база. Перелік законів, що регулюють ринок відроджуваних джерел в Україні. URL: <http://banisaenergy.com/uk/normatyvno-pravova-baza>.
26. Основи картографії: Навчальний посібник / За ред. Язлюк Б.О., Перович І.Л., Бутов А.М., Лопушанський О.М., Тартачинська З.Р., Гуменний М.І., Лук'янченко Ю.О., Цюпак В.П. – Тернопіль : Осадца Ю.В., 2025. – 152 с.
27. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату від 09.05.1992. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text
28. Рекорди та тренди в енергетиці 2024. Статистичний огляд Energy Institute, 2024. URL: <https://kpmg.com/ua/uk/home/media/press-releases/2024/07/rekordy-ta-trendy-venerhetytsi-2024.html>

29. Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні. Звіт в рамках проекту «Секретаріат та Експертний хаб з енергоефективності», що впроваджується Програмою розвитку ООН в Україні за підтримки Уряду Республіки Словачія та сприяння Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства в Україні. 2017. 36 с.

30. Теплове поле території України. В. В. Гордієнко, І. В. Гордієнко, О. В. Завгородня, О. В. Усенко. К.: Знання України, 2002. 168 с.

31. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. World Geothermal Congress 2015. (19-25 April 2015, Melbourne, Australia). URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01001.pdf>.

32. Franco, Alessandro & Villani, Marco. (2009). Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields. *Geothermics*. 379– 391.

33. Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation. The World Bank. Technical Report 002/12, 72828. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). URL: <http://documents.worldbank.org/curated/en/396091468330258187/pdf/728280NWP0Box30k0TR0020120Optimized.pdf>.

34. International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2025” - GIS approaches to evaluating renewable energy potential in the Ternopil and Ivano-Frankivsk territorial communities *М. Lopushanska (Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW), L. Arkhypova (Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas), I. Barna (Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University), O. Savchenko (Lviv Polytechnic National University), O. Lopushanskyi (West Ukrainian National University)

35. Lauwerier H. A. The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid. *Applied Scientific Research*. 1955. Sec. A, Vol. 5, № 2. P. 145–150.

36. Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2018/- US Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2018. URL: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf

37. Lopushanska M., Ivanov Ye., Bashynska Yu., Lopushanskyi O. And Tsyganok L. Geoinformation modelling for the selection of wind energy project sites. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024», Oct 2024, Volume 2024. P.1 – 5.

38. Lund J. W., Toth A. N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, Volume 90, February 2021, 101915. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>

39. Morozov Y., Barylo A., Lysak O. Geothermal Energy Country Update. Report from Ukraine. 2020 Proceedings, World Geothermal Congress. 2020, Reykjavik, Iceland. URL: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGASstandard/WGC/2020/01060.pdf>

40. Moses Jeremiah Barasa Kabeyi, Oludolapo Akanni Olanrewaju. Geothermal wellhead technology power plants in grid electricity generation: A review. *Energy Strategy Reviews*. Volume 39. January 2022. 100735. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100735>

41. Saleh, Bahaa & Koglbauer, Gerald & Wendland, Martin & Fischer, Johann. (2007). Working fluids for low-temperature Organic Rankine Cycles. *Energy*. 32. 1210–1221.

42. Tomarov, G.V., Shipkov A.A. Modern geothermal power: Binary cycle geothermal power plants. *Therm. Eng.* 64, 243–250 (2017).

43. World Geothermal Congress 2015. Media Portal. URL: <http://www.geothermalpress.com/>

44. Zurian O. Barilo A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol. 31. No. 3. P. 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>