

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

До захисту допустити
Зав. кафедри _____ доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**
« _____ » _____ 2025 р.

**АНАЛІЗ ГЕОГРАФІЧНИХ ФАКТОРІВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО
РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

Виконав: студент 4-го курсу д.ф.н,
групи ГФ- 41
спеціальність: 106 Географія
освітня програма: Фізична географія,
моніторинг і кадастр природних ресурсів
Даніїл Андрійович ДАВИДЕНКО
Науковий керівник:
доцент, к.геогр.н. Олена АГАПОВА

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою

Голова ЕК **Валентина РЕДІНА**

Секретар ЕК **Тетяна БУЛГАКОВА**
« _____ » _____ 2025

р.

Харків – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	5
1.1. Поняття та принцип дії сонячних електростанцій. Їх класифікації	5
1.2. Переваги та недоліки основних типів СЕС та їх роль у географічному плануванні	12
1.3. Зарубіжний та вітчизняний досвід планування та розміщення СЕС	15
РОЗДІЛ 2. ГЕОГРАФІЧНІ ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	21
2.1. Кліматичні умови (інсоляція, температура, хмарність)	21
2.2. Рельєф і геоморфологічні особливості території	27
2.3. Структура землекористування та покрив сільськогосподарських угідь	29
2.4. Транспортна доступність та близькість до інфраструктури	31
2.5. Обмеження природоохоронного та правового характеру	33
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	36
3.1. Кліматичні умови та інсоляція	36
3.2. Рельєф і землекористування	39
3.3. Інфраструктурні й екологічні обмеження	42
3.4. Військові ризики	44
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48

ВСТУП

У сучасному світі енергетична безпека та екологічна стійкість набувають пріоритетного значення, особливо на тлі глобальних кліматичних змін, вичерпності традиційних енергоресурсів і потреби у децентралізації енергетичної інфраструктури. Одним із ключових напрямів переходу до відновлюваних джерел енергії є розвиток сонячної енергетики, яка характеризується високим потенціалом генерації, екологічною безпечністю та широкими можливостями інтеграції у локальні й національні енергосистеми.

Україна має значний природний потенціал для розвитку сонячної енергетики, що зумовлено сприятливими кліматичними умовами, великою площею відкритих територій та географічним положенням у зоні помірної інсоляції. Однак ефективне розміщення сонячних електростанцій (СЕС) вимагає урахування комплексу географічних факторів, серед яких особливе значення мають кліматичні параметри, рельєф, землекористування, інфраструктурна забезпеченість та екологічні обмеження. Крім того, у контексті сучасної геополітичної ситуації в Україні важливим чинником виступають військові ризики, які істотно змінюють просторову придатність територій для реалізації енергетичних проєктів.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю науково обґрунтованого підходу до планування розміщення СЕС, що дасть змогу забезпечити енергетичну стійкість, мінімізувати вплив на довкілля та підвищити ефективність використання природно-ресурсного потенціалу територій. Географічний аналіз у даному контексті є ключовим інструментом просторового планування та прийняття рішень.

Метою дипломної роботи є аналіз географічних факторів, що впливають на оптимальне розміщення сонячних електростанцій, з урахуванням сучасних викликів та потенціалу територій України.

Завданнями дослідження є:

1. Розкрити теоретичні засади функціонування та класифікації сонячних електростанцій;
2. Проаналізувати зарубіжний та вітчизняний досвід розміщення СЕС;
3. Дослідити основні географічні чинники (інсоляцію, рельєф, землекористування, інфраструктуру), що впливають на ефективність функціонування СЕС;
4. Оцінити території України щодо їх придатності для розміщення сонячних електростанцій;
5. Визначити обмеження – інфраструктурні, екологічні, правові та військові – що впливають на можливість реалізації проєктів СЕС.

Об'єктом дослідження є природні та антропогенні фактори, що визначають територіальну придатність для розміщення сонячних електростанцій. Предметом дослідження виступає географічна оцінка просторових умов та обмежень, які формують оптимальну модель розміщення СЕС в Україні.

Методи дослідження: у роботі використано картографічний аналіз, методи геоінформаційного моделювання, статистичне узагальнення, порівняльний аналіз, системний підхід до оцінки природно-ресурсного потенціалу та ризиків.

Практичне значення дипломної роботи полягає у можливості використання результатів дослідження для формування рекомендацій щодо просторового планування, інвестиційного аналізу територій та розробки стратегій розвитку сонячної енергетики в Україні з урахуванням регіональної специфіки.

Робота складається з трьох розділів.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОГРАФІЧНИХ ФАКТОРІВ ПРИ РОЗМІЩЕННІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1. Поняття та принцип дії сонячних електростанцій. Їх класифікації

Сонячна електростанція (СЕС) є одним із провідних типів об'єктів відновлюваної енергетики, що функціонують на основі перетворення сонячної енергії на електричну. У сучасному розумінні СЕС – це складна інженерно-технологічна система, яка дозволяє здійснювати безпосереднє захоплення сонячного випромінювання, його конверсію в електроенергію, регулювання параметрів подачі струму, облік енергетичних потоків та, за потреби, накопичення енергії для подальшого використання. Це явище є відображенням загальносвітової тенденції переходу від викопних до відновлюваних джерел енергії як відповідь на глобальні виклики – енергетичну кризу, зміну клімату, деградацію довкілля та політичну нестабільність на енергоринках [8].

СЕС належать до категорії електростанцій, що використовують сонячну радіацію – потік енергії від Сонця у формі електромагнітного випромінювання. Основною перевагою цього типу енергетики є її відновлюваний характер, екологічна безпечність, відсутність шкідливих викидів під час експлуатації та універсальність застосування в різних природно-кліматичних умовах. На відміну від традиційних теплоелектростанцій, сонячні станції не спалюють паливо і не створюють продуктів згоряння, що особливо важливо з позицій захисту атмосферного повітря, ґрунтів і вод [8].

У технічному аспекті сонячна електростанція функціонує завдяки використанню фотоелектричного ефекту – фізичного явища, при якому в напівпровідниковому матеріалі виникає електричний струм під дією світла. Найчастіше як матеріал для фотоелементів використовується монокристалічний або полікристалічний кремній, який має високу ефективність перетворення світла в електричну енергію. Фотоелементи об'єднуються в модулі, а ті, у свою чергу, формують сонячні панелі, які є базовим компонентом кожної СЕС [8].

Коли сонячне світло потрапляє на поверхню панелі, у її напівпровідниковому шарі утворюються носії заряду – електрони, які починають рухатись у визначеному напрямку, утворюючи електричний струм. Цей струм є постійним, тому його необхідно перетворити в змінний для використання у стандартних електричних мережах. Для цього використовуються інвертори – спеціальні пристрої, що забезпечують трансформацію струму і стабілізують напругу. Після інвертора струм подається до кінцевого споживача або в централізовану енергомережу. У випадку автономних систем надлишок енергії може накопичуватись в акумуляторних батареях для подальшого використання в умовах недостатнього освітлення, наприклад уночі або під час хмарної погоди [9].

Окрім сонячних панелей та інвертора, до складу СЕС входять допоміжні компоненти: системи кріплення, які фіксують панелі під оптимальним кутом до Сонця; контролери заряду – для регуляції процесу заряджання акумуляторів; захисні автомати й системи моніторингу, що запобігають перенапрузі, коротким замиканням та іншим аваріям. Станції можуть бути обладнані системами віддаленого управління, що дає змогу контролювати параметри роботи в реальному часі.

Поняття сонячної електростанції охоплює також її функціональне призначення та масштаби застосування. СЕС можуть використовуватись для індивідуального, локального або промислового енергопостачання. Побутові установки здебільшого мають невелику потужність (до 10 кВт) і забезпечують енергоспоживання окремих домогосподарств, тоді як промислові електростанції, що мають потужність у десятки або сотні мегават, здатні покривати потреби цілих населених пунктів або передавати електроенергію на продаж до енергоринку [18].

Крім того, за формою інтеграції у систему енергопостачання СЕС бувають автономними, мережевими або гібридними. Автономні станції працюють незалежно від загальної електромережі та є актуальними для віддалених або сільських районів, де централізоване постачання електроенергії відсутнє або

нестабільне. Мережеві СЕС безпосередньо підключені до загальної електромережі та дозволяють здавати надлишкову електроенергію за схемою «зелений тариф». Гібридні системи поєднують функціонування СЕС з іншими джерелами енергії (вітровими, дизельними генераторами, батареями), що дозволяє підвищити надійність енергопостачання.

Існує також типологізація СЕС за способом їхнього розміщення. Найбільш поширеними є наземні електростанції, які займають великі площі на відкритій місцевості, орієнтовані на масове виробництво енергії. У містах та промислових зонах дедалі частіше використовуються дахові СЕС, встановлені на покрівлях будівель. Інноваційним напрямом є плаваючі сонячні станції, що розміщуються на поверхні водойм і дають змогу ефективно використовувати обмежений простір.

Таким чином, поняття сонячної електростанції охоплює не лише технічну установку, а й комплекс взаємопов'язаних елементів, що мають природну, технологічну, економічну та просторову специфіку. Ефективне функціонування СЕС залежить від багатьох чинників – від кліматичних умов і географічного положення до якості обладнання, державної політики та локальних умов землекористування. Саме тому вивчення поняття сонячної електростанції потребує міждисциплінарного підходу, що поєднує енергетичні, географічні, економічні та екологічні аспекти.

Принцип дії сонячної електростанції ґрунтується на процесі перетворення сонячного випромінювання в електричну або теплову енергію за допомогою спеціальних пристроїв і технологій. У переважній більшості сучасних сонячних електростанцій використовується фотоелектричний ефект – фізичне явище, при якому електрони вивільняються з напівпровідникового матеріалу під впливом фотонів світла, створюючи електричний струм. Цей ефект був виявлений наприкінці ХІХ століття, а з середини ХХ століття отримав практичне застосування в енергетиці [12].

У найзагальнішому вигляді процес роботи СЕС поділяється на кілька основних етапів. Перший етап – захоплення сонячної енергії. Сонячне випромінювання у вигляді світла та тепла надходить до поверхні спеціальних

панелей – сонячних модулів, що складаються з великої кількості фотоелементів. Найчастіше для цього використовують кристалічний кремній – хімічний елемент із високими напівпровідниковими властивостями. Коли фотони світла потрапляють на кремнієву пластину, вони передають свою енергію електронам, які звільняються з атомної решітки та починають рухатися. У результаті цього руху в електричному колі виникає постійний електричний струм.

Наступний етап – перетворення електроенергії. Оскільки фотоелементи генерують постійний струм, а більшість побутових і промислових електроприладів працюють на змінному струмі, виникає потреба у використанні інвертора – електронного пристрою, який змінює характер струму з постійного на змінний із напругою, що відповідає стандартам електромережі. Інвертор також виконує функції моніторингу, безпеки та стабілізації параметрів енергопотоків, забезпечуючи коректну роботу всієї системи.

Третій етап – подача електроенергії до споживача або до енергосистеми. Змінний струм після інвертора спрямовується або безпосередньо на потреби споживача (промислового чи побутового), або до централізованої електромережі. У багатьох країнах передбачено механізми продажу надлишкової електроенергії в мережу за фіксованими тарифами (наприклад, «зелений тариф»), що стимулює встановлення СЕС приватними особами та підприємствами [11].

У разі, якщо система не підключена до загальної мережі (тобто є автономною), надлишкова електроенергія, яка не використовується в момент її виробництва, накопичується в акумуляторних батареях. Це дозволяє використовувати її вночі, у похмуру погоду або в умовах зниження генерації. Наявність акумуляторів особливо важлива в районах із нестабільним електропостачанням або в ізольованих територіях.

Для забезпечення максимальної ефективності роботи СЕС також застосовуються моніторингові системи, які відстежують продуктивність кожного окремого модуля, виявляють несправності, регулюють навантаження та здійснюють облік виробленої енергії. Додатково використовуються системи

захисту, які забезпечують станцію від перенапруги, коротких замикань, перегріву та інших аварійних ситуацій.

У деяких випадках, замість фотоелектричних, використовуються сонячно-теплові установки (так звані геліотермальні електростанції). Вони працюють за принципом концентрації сонячного випромінювання за допомогою дзеркал або лінз, які фокусують сонячне світло на трубках із теплоносієм. Рідина нагрівається до високих температур, перетворюється на пару, яка обертає турбіну, а та, у свою чергу, виробляє електроенергію, як на класичній ТЕС. Хоча цей тип СЕС менш поширений, він особливо ефективний у регіонах із високим рівнем прямої сонячної радіації, наприклад, у пустельних зонах.

З технічного погляду СЕС можуть бути як стаціонарними, із фіксованим кутом нахилу панелей, так і динамічними – обладнаними трекерами, які автоматично орієнтують модулі за рухом Сонця протягом дня. Це дозволяє збільшити обсяг зібраної енергії на 15–25%, хоча й потребує складнішого обслуговування та додаткових витрат.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що принцип дії сонячних електростанцій базується на фундаментальних фізичних явищах, інтегрованих у високотехнологічні енергетичні системи. Ефективність роботи СЕС залежить від низки факторів: рівня сонячної радіації, температурного режиму, характеристик обладнання, правильності проектування системи, кута нахилу панелей, наявності тіней, стану електромережі, а також погодних і сезонних умов. Розуміння принципів роботи таких установок є важливою умовою для подальшого аналізу придатності територій до їх розміщення, що й становить одне з ключових завдань цього дослідження.

Сонячні електростанції, як складні технічні об'єкти, можуть класифікуватися за різними критеріями, що відображають їх конструктивні, функціональні та експлуатаційні особливості. У науковій та технічній літературі класифікація СЕС зазвичай здійснюється за такими основними ознаками.

Сонячні електростанції (СЕС) є важливим компонентом сучасної енергетичної інфраструктури та можуть мати різні характеристики залежно від

технічної конструкції, способу встановлення, масштабу, взаємодії з енергосистемою та функціонального призначення. Відповідно до цього у науково-практичній літературі виділяють кілька класифікацій СЕС, які допомагають систематизувати різноманітні типи таких установок та адаптувати їх до конкретних умов розміщення й експлуатації.

Насамперед, сонячні електростанції поділяються за принципом перетворення енергії. Найбільш поширеними є фотоелектричні СЕС, які функціонують на основі фотоелектричного ефекту – безпосереднього перетворення сонячного світла в електричний струм за допомогою напівпровідникових матеріалів. Альтернативним типом є сонячно-теплові або геліотермальні установки, де сонячне випромінювання концентрується за допомогою дзеркал або лінз і використовується для нагрівання робочої рідини, яка далі обертає турбіну, генеруючи електроенергію. Фотоелектричні системи домінують у світовому масштабі завдяки відносній простоті, надійності та зниженню вартості обладнання, тоді як теплові системи ефективні в регіонах із високою прямою інсоляцією та значною площею для встановлення дзеркальних полів [14].

Другою важливою класифікаційною ознакою є масштаб і потужність СЕС. Побутові сонячні електростанції, як правило, мають потужність до 10 кВт і використовуються для забезпечення електроенергією окремих домогосподарств. Комерційні СЕС мають ширший діапазон – від 10 до 500 кВт – і встановлюються на об'єктах малого та середнього бізнесу, освітніх закладах, агрофірмах. Промислові, або великомасштабні, сонячні електростанції характеризуються потужністю понад 500 кВт (іноді досягаючи сотень мегават) і використовуються переважно для подачі електроенергії до централізованої енергосистеми.

Ключовим є також поділ СЕС за способом взаємодії з електромережею. Мережеві сонячні станції (on-grid) підключаються до загальної енергосистеми та можуть продавати надлишкову електроенергію, що генерується вдень, назад до мережі. Автономні (off-grid) установки працюють незалежно від зовнішніх джерел живлення і зазвичай обладнані акумуляторними батареями для

зберігання енергії на випадок нестачі сонячного випромінювання. Гібридні системи поєднують сонячну генерацію з іншими джерелами енергії (вітровими, дизельними або гідроустановками) і забезпечують більшу гнучкість у постачанні електроенергії за умов нестабільного навантаження або обмеженого сонячного ресурсу.

Окремої уваги заслуговує класифікація за способом розміщення. Наземні СЕС встановлюються на відкритих ділянках із добрим рівнем інсоляції, зазвичай на рівнинах або схилах із південною орієнтацією. Вони потребують значної площі, але є найефективнішими у великих масштабах. Дахові СЕС інтегруються у покрівельні конструкції житлових, громадських або промислових будівель і не займають додаткових земельних ресурсів. Фасадні СЕС розміщуються вертикально на стінах будівель і використовуються як елемент архітектурної інтеграції. Плавучі сонячні станції монтується на водних об'єктах – озерах, водосховищах або штучних ставках – і дозволяють економити площу суходолу, водночас знижуючи випаровування води. Мобільні та переносні СЕС мають невеликі розміри, легко транспортуються й використовуються в умовах обмеженого доступу до мережі, зокрема в польових умовах, під час воєнних дій, природних катастроф чи експедицій [15].

Ще одним критерієм класифікації є тип використовуваних фотоелектричних модулів. Найефективнішими з точки зору коефіцієнта корисної дії є монокристалічні кремнієві панелі, які забезпечують до 20–22% ефективності, мають довгий термін служби та стійкість до високих температур. Полікристалічні модулі мають трохи нижчу ефективність, але й меншу вартість, що робить їх привабливими для побутового сегменту. Тонкоплівкові панелі вирізняються гнучкістю, меншою вагою, можливістю встановлення на складних поверхнях, але поступаються за ККД. Біфасіальні панелі здатні вловлювати світло з обох сторін і забезпечують додаткову генерацію за рахунок відбитого світла від поверхні землі або води.

З технічного погляду СЕС також класифікуються за типом кріплення панелей. Стаціонарні установки мають фіксований кут нахилу та орієнтацію на

південь і є найпростішими в експлуатації. Натомість системи з трекерами (одновісними або двовісними) автоматично змінюють положення панелей протягом дня, орієнтуючи їх за рухом Сонця, що дозволяє збільшити виробіток електроенергії на 15–25%, але водночас підвищує вартість обслуговування.

Нарешті, сонячні електростанції можна класифікувати за функціональним призначенням. Житлові СЕС забезпечують індивідуальне або колективне енергоспоживання домогосподарств, сприяючи енергетичній незалежності населення. Комерційні СЕС використовуються для потреб офісів, магазинів, готелів тощо. Агропромислові СЕС забезпечують функціонування фермерських господарств, теплиць і систем зрошення. Інфраструктурні СЕС інтегруються у школи, лікарні, адміністративні будівлі для зменшення витрат на електроенергію. Державні або муніципальні станції реалізуються за бюджетні кошти як частина політики децентралізації та переходу до сталої енергетики. Окрему групу складають мобільні або військові СЕС спеціального призначення.



Рис.1.1. Класифікація СЕС за різними ознаками (укладено за даними [12])

1.2. Переваги та недоліки основних типів СЕС та їх роль у географічному плануванні

Сонячні електростанції, як ключовий компонент відновлюваної енергетики, мають різноманітні технічні характеристики, функціональні можливості та просторові обмеження, що визначають доцільність їх застосування у тій чи іншій місцевості. Основні типи СЕС – фотоелектричні та сонячно-теплові, автономні та мережеві, дахові, наземні або плавучі – мають свої переваги й недоліки, які безпосередньо впливають на вибір місця розміщення, параметри проектування та загальну ефективність функціонування. Розуміння цих аспектів є необхідною умовою для прийняття раціональних рішень у сфері географічного планування.

Фотоелектричні сонячні електростанції (PV-системи) мають низку переваг, серед яких – відносна простота конструкції, доступність технологій, швидкий монтаж, широкий спектр застосування (від приватного сектору до промислових об'єктів), а також здатність працювати в умовах розсіяного світла. До їхніх недоліків належать залежність від погодних умов, зниження ефективності при високій температурі, необхідність акумуляції енергії в автономних системах, а також поступове зменшення продуктивності панелей протягом тривалого часу. Однак завдяки зниженню вартості обладнання та державній підтримці у багатьох країнах, саме цей тип СЕС є найпоширенішим і найперспективнішим з погляду просторової інтеграції у різні типи ландшафтів [8].

Сонячно-теплові електростанції (геліотермальні системи) мають перевагу у вигляді високої ефективності у великих масштабах, можливості акумуляції тепла на кілька годин (а отже – стабільної генерації впродовж вечора), а також менше зниження ККД при високих температурах. Однак вони потребують великих площ для дзеркальних полів, строгої орієнтації на пряме сонячне випромінювання, значних інвестицій та складного технічного обслуговування. Через це вони обмежені у географічному плануванні – придатні лише для

регіонів із високим рівнем сонячної інсоляції (наприклад, пустельних або напівпустельних зон) і практично не застосовуються в середніх широтах.

Мережеві СЕС вирізняються стабільною економічною доцільністю, оскільки дозволяють здавати надлишкову електроенергію в централізовану мережу, знижуючи витрати споживача та підвищуючи загальну енергоефективність регіону. Їхня роль у просторовому плануванні полягає в інтеграції у структуру наявної енергетичної інфраструктури, зокрема біля трансформаторних підстанцій, ліній електропередач та технопарків. Натомість автономні системи мають перевагу в ізольованих районах – у сільській місцевості, на гірських плато, в місцях тимчасового або сезонного проживання, де відсутній доступ до енергомереж. Їх недоліком є обмежений обсяг генерації, висока вартість накопичувачів та більша залежність від кліматичних коливань. Переваги і недоліки різних СЕС узагальнені у таблиці (табл. 1.1.).

Таблиця 1.1.

Переваги та недоліки основних типів сонячних електростанцій та їх роль у географічному плануванні

(укладено за матеріалами [28])

Тип СЕС	Переваги	Недоліки
Фотоелектричні (PV)	Простота конструкції, надійність, низькі експлуатаційні витрати, широкий спектр застосування	Залежність від погоди, перегрівання панелей, поступове зменшення ефективності
Сонячно-теплові (CSP)	Висока ефективність у великих масштабах, можливість акумулювання тепла	Висока вартість, потреба у великій площі, складне обслуговування

Тип СЕС	Переваги	Недоліки
Мережеві	Можливість продажу надлишкової енергії, стабільна генерація	Залежність від наявності мережі, складне погодження підключення
Автономні	Незалежність від централізованої системи, придатність для ізольованих районів	Висока вартість акумуляції, обмежена потужність
Наземні	Висока продуктивність, легкий доступ до обладнання	Необхідність великої площі, потенційний конфлікт землекористування
Дахові	Економія простору, інтеграція в міське середовище	Обмеження за навантаженням та орієнтацією покрівель
Плаваючі	Охолодження панелей, зменшення випаровування води, економія суші	Висока вартість, технічна складність, екологічні обмеження

Що стосується просторових типів розміщення, то наземні СЕС, незважаючи на потребу у великих площах, дозволяють масштабувати виробництво та забезпечують легкий доступ до обладнання для обслуговування. Їх доцільно розміщувати у степових, напівпустельних або деградованих агроландшафтах, де інші форми використання території економічно не вигідні. Дахові та фасадні СЕС ідеально підходять для міських і субурбанізованих територій, де обмежені земельні ресурси, але велика концентрація споживачів. Вони сприяють децентралізації енергетичної системи, зниженню втрат на передачу та формуванню енергоефективних архітектурних рішень.

Плаваючі СЕС є інноваційним напрямом, що набирає популярності у країнах з дефіцитом вільних земельних ділянок. Вони встановлюються на поверхні водойм (штучних озер, ставків, водосховищ) та одночасно вирішують проблему

охолодження панелей, зменшення випаровування води й екологічного навантаження на сушу. Однак їх реалізація потребує спеціального технічного обладнання та обережного екологічного супроводу, особливо в умовах водно-болотних угідь або біосферних резерватів [19].

У загальному контексті географічного планування, вибір типу СЕС залежить від поєднання багатьох факторів: кліматичних (рівень інсоляції, тривалість сонячного сяйва, температура), геоморфологічних (рельєф, ґрунтові умови), соціально-економічних (щільність населення, структура енергоспоживання, доступ до інфраструктури) та екологічних (природоохоронний статус територій, ступінь трансформації ландшафту). Відтак, ефективне географічне планування СЕС передбачає не лише аналіз енергетичних потреб, а й врахування локальних просторових обмежень, конфліктів землекористування, а також довгострокових сценаріїв розвитку територій.

Таким чином, переваги та недоліки різних типів сонячних електростанцій мають бути комплексно враховані в системі стратегічного просторового планування. Лише за умови збалансованого підходу до вибору типу, масштабу, місця розміщення та технології СЕС можна досягти сталого, екологічно безпечного та енергетично ефективного розвитку територій.

1.3. Зарубіжний та вітчизняний досвід планування та розміщення СЕС

Досвід впровадження сонячної енергетики у світі є вкрай різноманітним і залежить від природно-кліматичних умов, рівня економічного розвитку, наявності інфраструктури та державної енергетичної політики. У більшості країн із розвинутою економікою та стабільним законодавчим полем сонячна енергетика розглядається як стратегічний напрям сталого розвитку, що дозволяє знизити залежність від імпортованих енергоносіїв, скоротити викиди парникових газів і стимулювати децентралізацію енергосистем. Водночас в умовах України розвиток сонячної енергетики має свої специфічні риси, які формуються під

впливом воєнно-політичних, інституційних, інвестиційних та просторових факторів.

У міжнародній практиці одним із лідерів у впровадженні сонячної енергетики є Китай, який послідовно нарощує обсяги встановлених потужностей, зосереджуючи СЕС у посушливих районах із високою інсоляцією – зокрема в пустелі Гобі, де реалізуються мегапроекти на сотні мегават. Китайський досвід демонструє ефективність масштабного державного інвестування в галузь, централізованого планування, а також підтримку локального виробника обладнання. Водночас Китай успішно впроваджує плаваючі сонячні електростанції на затоплених шахтах, кар’єрах і водосховищах, що свідчить про гнучкий підхід до використання простору [45].

Європейський Союз акцентує увагу на децентралізації генерації та розвитку дахових СЕС. Зокрема, Німеччина, Італія та Іспанія активно реалізують політику «розумних міст» та енергоефективного будівництва, у якому СЕС є обов’язковим елементом інженерних рішень. Німеччина має одну з найбільш досконалих систем підтримки виробників «зеленої» енергії через систему фіксованих тарифів (Feed-in Tariff) і державне субсидування для домогосподарств (рис. 1.1.).

Nettostromerzeugung in Deutschland im Juni 2019

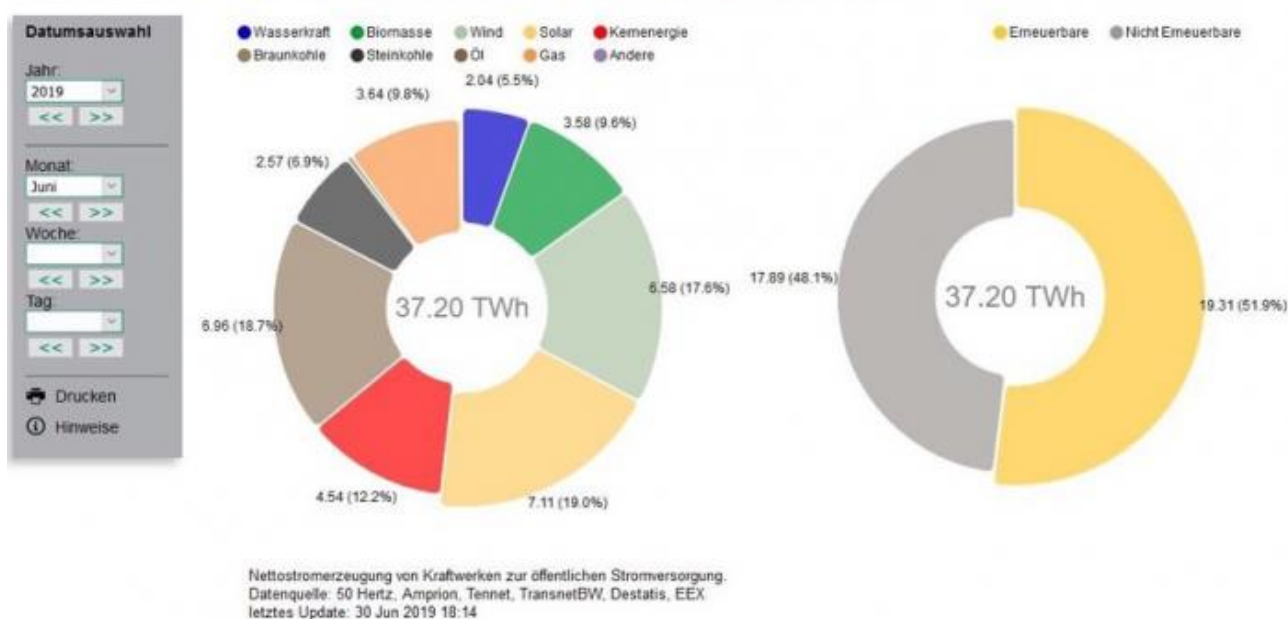


Рис. 1.1. Показники СЕС у Німеччині [39]

У південній Європі, де рівень сонячної радіації є високим, СЕС розміщують переважно на відкритих просторах, але із суворим урахуванням впливу на ландшафт, біорізноманіття та місцеві спільноти. Франція й Нідерланди демонструють цікаві приклади інтеграції сонячних панелей у транспортну інфраструктуру – наприклад, уздовж автомагістралей або на дахах залізничних станцій.

США, як інший світовий лідер у цій сфері, поєднують як великомасштабні сонячні ферми в південних пустельних регіонах (Каліфорнія, Арізона, Техас), так і активну підтримку приватного сектору через податкові пільги, гранти та муніципальні програми. Суттєва частка генерованої енергії надходить саме від малих станцій, встановлених на дахах житлових будинків. При цьому географічне планування враховує не лише потенціал сонячної радіації, а й соціальну вразливість населення, доступ до інфраструктури, екологічні ризики та економічну доцільність (рис. 1.2.).

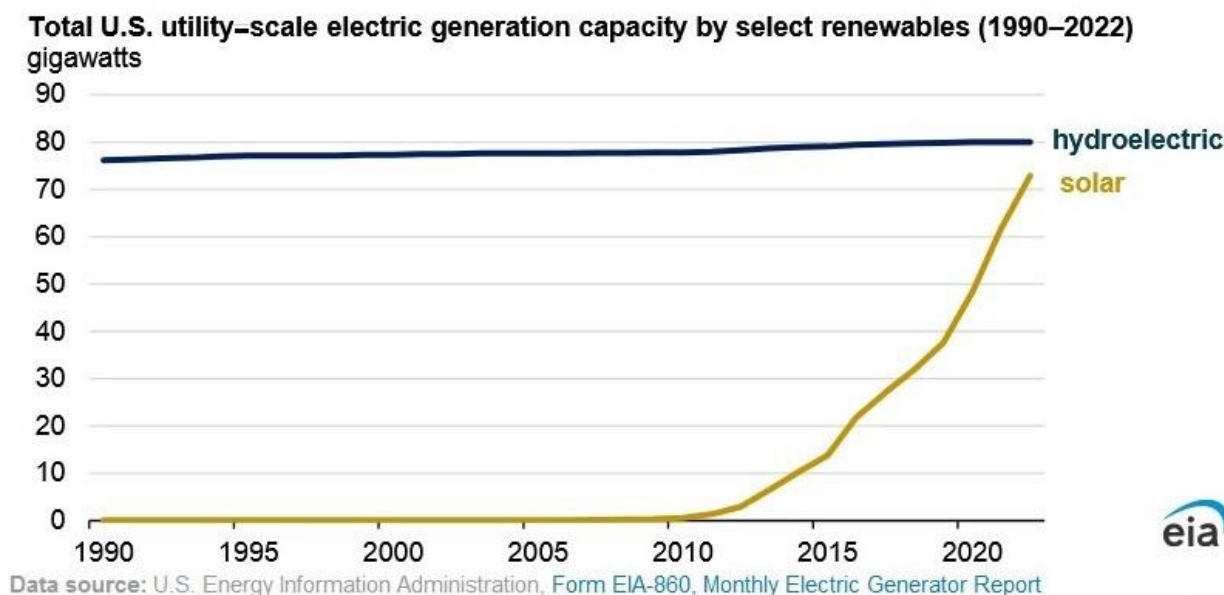


Рис. 1.2. Тенденція зростання видобутку електроенергії за допомогою СЕС в США [43]

У країнах глобального Півдня, зокрема в Індії, Чилі, ПАР та ОАЕ, реалізуються амбітні програми з розвитку сонячної енергетики, спрямовані на

подолання енергетичної бідності, покращення доступу до електроенергії у віддалених районах і заміщення імпортованих енергоносіїв. Особливо показовим є приклад Індії, яка завдяки програмі "National Solar Mission" активно перетворює посушливі та пустельні землі на геліоенергетичні кластери. Також зростає інтерес до сонячно-аграрних систем, що дозволяють поєднувати вирощування культур та вироблення енергії на одній ділянці.

Вітчизняний досвід України в галузі планування й розміщення СЕС почав формуватись інтенсивно з 2010-х років, на тлі запровадження «зеленого тарифу» та активної участі міжнародних інвесторів. Найбільшого розвитку сонячна енергетика досягла у південних та південно-східних областях (Херсонська, Миколаївська, Одеська, Запорізька, Дніпропетровська), де поєднуються висока інсоляція, наявність вільних земель та відповідна інфраструктура. У цих регіонах створювались великі наземні сонячні електростанції потужністю від кількох мегават до десятків мегават.

Водночас в Україні також поширюються дахові СЕС, особливо в західних та центральних регіонах, де активними стали об'єднані територіальні громади, приватні домовласники та фермери. Важливу роль у цьому відіграє підтримка з боку місцевої влади, а також доступ до кредитних і грантових програм (наприклад, від GIZ, USAID, NEFCO тощо). Однак повномасштабна війна, розв'язана Росією у 2022 році, суттєво вплинула на подальший розвиток галузі: зруйновано десятки об'єктів, інші – перебувають у зоні тимчасової окупації або близько до лінії фронту.

У воєнних умовах спостерігається переорієнтація на автономні та мобільні СЕС – як для забезпечення потреб військових, лікарень, гуманітарних місій, так і для відновлення електропостачання у постраждалих регіонах. У перспективі важливим напрямком є відновлення зруйнованих СЕС, розвиток дахової генерації у стійких громадах та інтеграція сонячної енергетики в процеси відбудови, з урахуванням принципів енергонезалежності, безпеки та децентралізації.

Таблиця 1.2.

**Порівняльна таблиця досвіду планування та розміщення СЕС:
Україна та зарубіжні країни (укладено за матеріалами [32, 37, 38, 43])**

Країна	Модель планування	Типові локації СЕС	Підтримка та стимули	Особливості
Україна	Інвестиційно-приватна (до 2022 р.), орієнтація на автономні рішення (після 2022 р.)	Південь (наземні), Захід (дахові), воєнні обмеження на Сході	Зелений тариф (до 2023), муніципальні програми, донорські проекти	Пошкодження СЕС у зоні бойових дій, переорієнтація на малі СЕС
Німеччина	Децентралізоване планування, муніципальне управління	Дахи приватних будинків, шкіл, офісів	Feed-in Tariff, субсидії, податкові пільги	Висока інтеграція в містобудування, енергетичний кооперативний рух
Китай	Централізоване державне планування	Пустельні регіони, шахти, плаваючі платформи	Національні субсидії, цільові програми	Найбільший у світі виробник і споживач сонячної енергії
США	Ринок + податкове регулювання (на рівні штатів)	Пустелі, ферми, дахи	Tax Credit, гранти, Net Metering	Активне домогосподарське впровадження, регіональні особливості
Індія	Національна стратегія розвитку відновлюваної енергетики	Пустелі, аграрні зони, сільська місцевість	Національні схеми субсидій, міжнародна допомога	Розвиток сонячно-аграрних систем, доступність у віддалених регіонах

Порівняльний аналіз міжнародного та українського досвіду впровадження сонячної енергетики дозволяє виявити ключові особливості підходів до розміщення СЕС. Таблиця вище демонструє основні тенденції в окремих країнах.

Таким чином, як зарубіжний, так і український досвід свідчить про те, що ефективне розміщення сонячних електростанцій вимагає не лише технічної обґрунтованості, а й комплексного підходу до планування: із урахуванням соціальних, екологічних, безпекових та економічних чинників. Географічне планування відіграє ключову роль у тому, щоб адаптувати світові практики до конкретних регіональних умов, сприяючи розвитку енергоефективних, стійких і безпечних територій.

РОЗДІЛ 2. ГЕОГРАФІЧНІ ЧИННИКИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

2.1. Кліматичні умови (інсоляція, температура, хмарність)

Кліматичні умови є одним із ключових факторів, що визначають ефективність функціонування сонячних електростанцій. Успішне планування та розміщення СЕС неможливе без урахування таких метеорологічних параметрів, як рівень сонячної інсоляції, температурний режим та хмарність, оскільки саме вони безпосередньо впливають на обсяг генерованої енергії, стабільність роботи обладнання та доцільність інвестицій у відповідному регіоні.

Інсоляція є одним із ключових факторів, що безпосередньо визначає доцільність та ефективність розміщення сонячних електростанцій (СЕС) на певній території. Під інсоляцією розуміють кількість сонячної енергії, що надходить на одиницю горизонтальної поверхні Землі за певний проміжок часу. Найчастіше вона виражається у кіловат-годинах на квадратний метр ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) за день, місяць або рік. Інсоляція може бути поділена на пряму, дифузну та сумарну, кожна з яких має значення для різних типів сонячних технологій [35].

Сумарна інсоляція – це сукупна кількість сонячного випромінювання, що досягає поверхні, включаючи як пряме випромінювання (яке потрапляє безпосередньо з Сонця), так і дифузне (розсіяне в атмосфері). Для фотоелектричних СЕС (PV) важливим є загальний обсяг сумарного випромінювання, тоді як для сонячно-теплових СЕС (CSP) критичне значення має саме пряма інсоляція, яка дозволяє фокусувати сонячні промені за допомогою дзеркал або лінз [24].

Рівень інсоляції залежить від широти, рельєфу, тривалості дня, прозорості атмосфери та хмарності. Території з високим рівнем інсоляції – понад $1400\text{--}1600 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2/\text{рік}$ – вважаються високопотенційними для встановлення СЕС, особливо наземних промислових масштабів. Наприклад, такі умови характерні

для пустель, степових і напівпустельних регіонів, гірських плато на великих висотах, де атмосфера менш насичена вологою і аерозолями.

На відміну від цього, у зонах помірної або високої хмарності, де сумарна інсоляція становить менше 1000–1200 кВт·год/м²/рік, потенціал СЕС є помірним або низьким. Втім, навіть у таких умовах можливе ефективне використання дахових СЕС із правильним кутом нахилу, сучасними інверторами та накопичувальними системами.

Сезонна мінливість інсоляції – ще один важливий аспект. У країнах із вираженою сезонністю (наприклад, у зоні помірного клімату), кількість сонячної радіації у зимовий період може в 4–6 разів поступатися літній. Це впливає на необхідність додаткових джерел енергії або акумуляції. Оптимальні умови спостерігаються в регіонах із незначними сезонними коливаннями – тропіках і субтропіках [21].

Інсоляція також тісно пов'язана з орієнтацією поверхні. Для максимального виробітку сонячної енергії сонячні панелі орієнтують на південь (у Північній півкулі) з нахилом, що приблизно дорівнює широті місцевості. Рельєф місцевості, наявність тіней від будівель чи дерев також можуть зменшити фактичну інсоляцію навіть за високих показників сонячного сяйва.

З практичної точки зору, інсоляція є основою для складання карт сонячного потенціалу, які широко використовуються у процесах планування. Ці карти створюються на основі метеорологічних спостережень, супутникових даних та моделей радіаційного балансу. Вони дозволяють здійснювати попередню оцінку придатності земельних ділянок для розміщення СЕС, що є критично важливим етапом для прийняття інвестиційних та технічних рішень.

Global horizontal irradiation

Europe

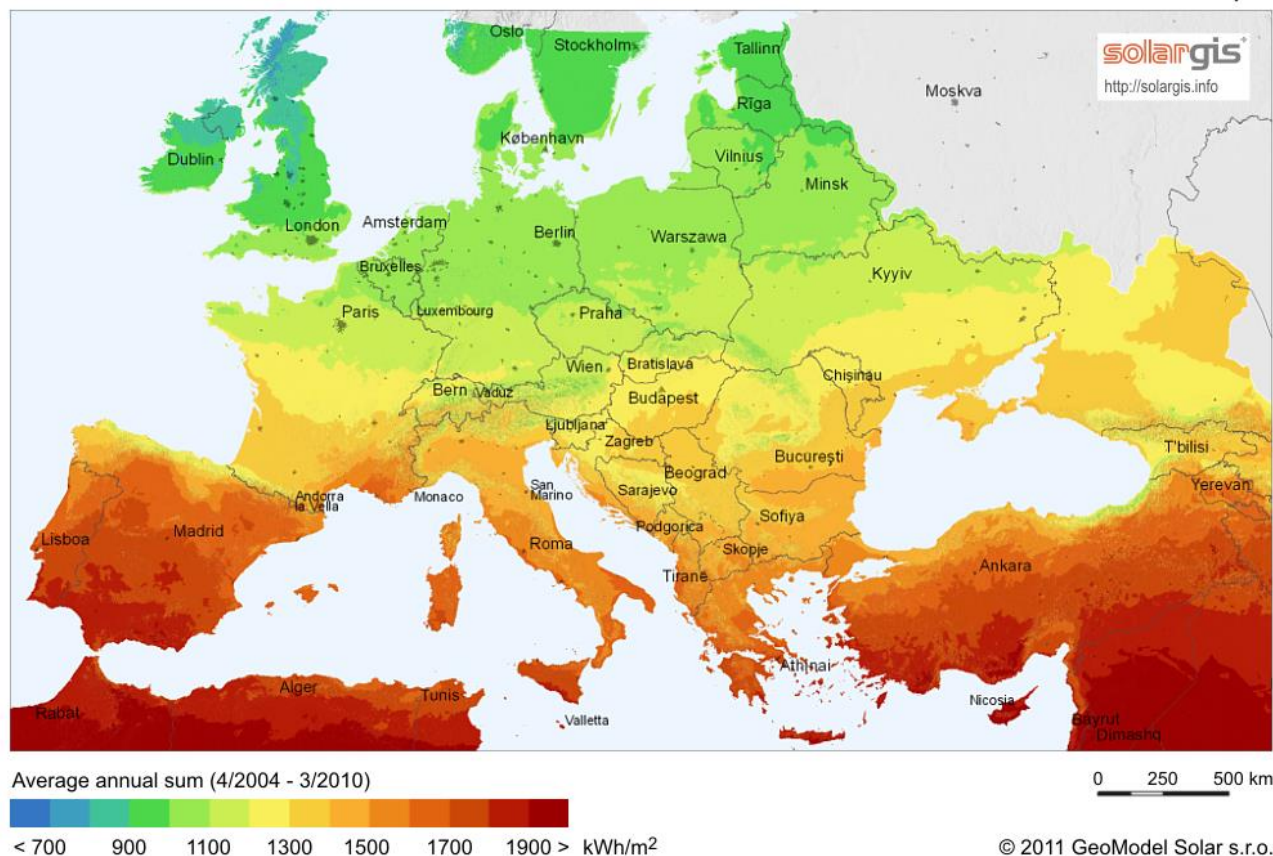


Рис. 2.1. Картосхема інсоляції території Європи [34]

Температурний режим є одним із найважливіших кліматичних параметрів, що впливають на ефективність роботи сонячних електростанцій, особливо фотоелектричних (PV). На відміну від поширеної думки, сонячні панелі не використовують тепло від сонця, а лише світлове випромінювання, проте температура навколишнього середовища безпосередньо впливає на фізичні властивості напівпровідникових матеріалів, з яких виготовлені сонячні модулі.

Зі зростанням температури повітря підвищується температура поверхні панелі, що призводить до зниження напруги на виході кожного фотоелемента. Це зменшує загальну продуктивність системи. Типовий коефіцієнт температурного зниження ефективності для більшості кремнієвих панелей становить приблизно $-0,4...-0,5\%$ на кожен $^{\circ}\text{C}$ понад $+25^{\circ}\text{C}$. Наприклад, якщо температура панелі сягає $+45^{\circ}\text{C}$ (що можливо вже за температури повітря $+30^{\circ}\text{C}$), загальна генерація може знизитися на $8-10\%$ порівняно з номінальним значенням. Таким чином,

високі температури повітря та перегрівання панелей негативно впливають на ККД СЕС, що є особливо актуальним для регіонів із спекотним кліматом, таких як пустельні або субтропічні зони (наприклад, Південна Іспанія, Середній Захід США, Північна Індія, Південний Китай) [42].

Найбільш ефективною робота СЕС є за помірно теплих умов: при середньодобових температурах повітря в діапазоні від $+10$ до $+25$ °C. У таких умовах забезпечується баланс між високим рівнем сонячного випромінювання та відсутністю перегріву панелей. У регіонах із середньорічною температурою нижче $+10$ °C ефективність модулів зростає, але зменшується тривалість сезону генерації через скорочений світловий день та більшу кількість хмарних днів. Цікаво, що в умовах холодного клімату (наприклад, Північна Європа, Канада) фотоелектричні станції часто демонструють вищу ефективність за ясної зимової погоди, навіть при низькій інсоляції. Це пов'язано зі зменшеним внутрішнім опором у матеріалах та меншою деградацією напівпровідників [42].

У регіонах із високими температурами повітря та ґрунту виникає потреба в охолодженні панелей, особливо в великих промислових установках. Використовуються такі рішення:

- Природна вентиляція конструкцій (панелі встановлюють з просвітом під ними).
- Спеціальні термостійкі модулі, наприклад, з тонкоплівкових матеріалів, які мають нижчий температурний коефіцієнт.
- Плавучі СЕС, які розміщуються на водних об'єктах і природно охолоджуються.
- Системи активного охолодження, які застосовують у великих CSP-комплексах.

Також варто враховувати, що в умовах різких добових коливань температури можливі термічні деформації конструкцій, особливо кріплень та рам сонячних модулів. Тому технічні рішення мають враховувати амплітуду коливань температур у відповідному регіоні.

Отже, температурний режим відіграє подвійну роль у проектуванні СЕС: з одного боку, він впливає на ефективність фотоелектричного перетворення, а з іншого – визначає конструктивні й експлуатаційні особливості станції. Помірні температурні умови вважаються найкращими для роботи СЕС, тоді як регіони з екстремально високими температурами вимагають додаткових технічних рішень для збереження ефективності генерації. Комплексний аналіз температурних характеристик території – обов’язковий етап при розробці моделей географічного планування розміщення СЕС.

Хмарність є одним із найважливіших кліматичних параметрів, що істотно впливає на продуктивність сонячних електростанцій. Вона визначає ступінь доступності сонячного випромінювання до земної поверхні, змінюючи співвідношення між прямою та дифузною радіацією, і тим самим – обсяг генерованої електроенергії.

Залежно від щільності, висоти й тривалості хмарного покриву, хмарність може знижувати пряму сонячну радіацію на 50–90 %. Проте фотоелектричні СЕС здатні функціонувати навіть у похмурі дні завдяки дифузному світлу, яке проходить через хмари і розсіюється в атмосфері. Рівень генерації в таких умовах буде меншим, але не нульовим.

- Ясна погода: максимальна генерація; СЕС працюють на повну потужність завдяки прямому випромінюванню.
- Змінна хмарність: генерація флюктує; панелі миттєво реагують на зміни інтенсивності світла.
- Суцільна хмарність або туман: генерація може становити лише 10–30 % від потенційної потужності.
- Дощові або снігові дні: значне зниження або припинення генерації.

Особливо важливо враховувати типи хмар – високі перисті хмари пропускають частину сонячного світла, тоді як купчасто-дощові або шаруваті здатні повністю блокувати радіацію.

У більшості регіонів світу рівень хмарності має чітко виражену сезонну динаміку. Наприклад:

- У помірних широтах (Україна, Центральна Європа) максимальна хмарність спостерігається восени та взимку, коли кількість світлового дня є найменшою. Це призводить до зменшення генерації електроенергії в критичний для споживання період.
- У тропічних регіонах часто спостерігається сезон дощів, коли впродовж кількох місяців рівень хмарності й опадів є високим – що суттєво знижує інсоляцію.
- У пустельних регіонах хмарність спостерігається лише 20–40 днів на рік, що робить їх надзвичайно сприятливими для CSP та PV систем.

Для точного планування розміщення СЕС використовуються:

- Картографічні дані середньорічної та середньомісячної хмарності, створені на основі супутникових спостережень (NASA, Copernicus).
- Кліматичні норми кількості похмурих днів на рік (напр., у Києві – ≈ 120 – 150 , у Лхасі – ≈ 30 – 50).
- Графіки добового розподілу хмарності, що дозволяють враховувати пікові години генерації.

Хмарність є динамічним і просторово-змінним чинником, який необхідно враховувати при моделюванні та плануванні розміщення СЕС. Вона безпосередньо впливає на кількість доступної сонячної енергії, а отже – на економічну ефективність інвестицій. У регіонах зі значною кількістю похмурих днів доцільно орієнтуватися на адаптивні системи з накопиченням енергії та високочутливі панелі з низьким температурним коефіцієнтом.

У таблиці наведено орієнтовну кількість похмурих днів на рік у різних регіонах світу (табл. 2.1.). Ці показники дозволяють оцінити вплив хмарності на потенціал розміщення сонячних електростанцій (СЕС).

Таблиця 2.1.

Середньорічна хмарність у різних регіонах світу

Регіон / Місто	Кількість похмурих днів на рік	Коментар щодо потенціалу СЕС
<i>Лхаса (Тибет, Китай)</i>	≈ 30	Один із найвищих рівнів сонячного сяйва у світі
<i>Фенікс (Аризона, США)</i>	≈ 40	Низька хмарність, ідеально для CSP і PV
<i>Київ (Україна)</i>	≈ 120–150	Помірна хмарність, потреба в сезонному балансуванні
<i>Берлін (Німеччина)</i>	≈ 160–190	Високий рівень хмарності, розвиток дахових СЕС
<i>Лондон (Велика Британія)</i>	≈ 180–220	Складні умови для СЕС, потреба в субсидіях
<i>Карачі (Пакистан)</i>	≈ 60	Сприятливі умови, особливо в літній період
<i>Сан-Паулу (Бразилія)</i>	≈ 120	Сезонна хмарність, потенціал для гібридних систем
<i>Ванкувер (Канада)</i>	≈ 240	Високий рівень хмарності, низький рівень генерації взимку
<i>Каїр (Єгипет)</i>	≈ 20	Надзвичайно сприятливі умови для СЕС

У сукупності ці три параметри – інсоляція, температура та хмарність – формують кліматичний профіль придатності території для розміщення сонячних електростанцій. У сучасних дослідженнях їх значення враховуються при побудові карт потенціалу відновлюваної енергетики, при розробці локальних енергетичних стратегій, а також при створенні ГІС-моделей територіальної оптимізації розміщення СЕС.

Таким чином, кліматичні умови мають прямий і вирішальний вплив на економічну доцільність та технічну ефективність впровадження сонячних електростанцій. Аналіз цих умов на регіональному рівні є першим етапом у процесі планування і вибору території для розміщення об'єктів сонячної генерації.

2.2. Рельєф і геоморфологічні особливості території

Рельєф та геоморфологічні умови мають важливе значення при виборі ділянок для розміщення сонячних електростанцій (СЕС), оскільки вони визначають фізичну придатність території для будівництва, орієнтацію панелей, стабільність основи, ризики ерозійних і геодинамічних процесів, а також рівень потенційного затінення. Найсприятливішими для встановлення СЕС є відносно рівнинні або пологі ділянки з незначним ухилом, які забезпечують технічну зручність монтажу обладнання, ефективну орієнтацію панелей під кутом до джерела сонячної радіації, а також мінімальні витрати на підготовку землі та фундаментів.

Рівнинні та низовинні території, як правило, мають стабільні геологічні умови, відсутність ризиків зсувів або підтоплення, а також забезпечують вільний доступ до інфраструктури. Пологий рельєф сприяє рівномірному розподілу сонячного випромінювання на поверхні й дозволяє використовувати стандартні наземні конструкції без необхідності складних інженерних рішень. Натомість горбисті та хвилясті місцевості можуть мати як переваги (наприклад, природну південну експозицію схилів), так і обмеження – нерівномірність освітлення, ризик часткового затінення, необхідність проведення земляних робіт і вирівнювання рельєфу [16].

Гірські території характеризуються значною складністю умов: великі ухили, нестабільні ґрунти, зсувонебезпечні ділянки, обмежена транспортна доступність, підвищені витрати на геодезичні та геотехнічні дослідження. У таких регіонах можливе розміщення СЕС лише за умови ретельного

ландшафтного аналізу, використання армованих конструкцій, паливних фундаментів і адаптованих схем монтажу. Особливу увагу слід приділяти збереженню природного дренажу території, уникненню концентрації поверхневих вод та ерозійних процесів.

Геоморфологічна будова території впливає також на механічні властивості ґрунтів. Алювіальні, заболочені або торф'яні відклади мають низьку несучу здатність, що може призвести до просідання або деформації фундаментів. Натомість щільні супіски, суглинки чи глини на стабільних терасах і плато забезпечують надійну основу для монтажу обладнання. У регіонах з карстовими формами рельєфу, де можливі підземні пустоти, необхідне проведення глибокого інженерно-геологічного обстеження. У таблиці наведено основні типи рельєфу, їх характеристику та оцінку придатності для розміщення сонячних електростанцій (табл. 2.2.).

Таблиця 2.2. [26]

Придатність рельєфу до розміщення сонячних електростанцій (СЕС)

Тип рельєфу	Характеристика	Придатність для СЕС
<i>Рівнинний</i>	Пологі або плоскі ділянки з невеликим ухилом, стабільні ґрунти	Висока (ідеальні умови для будівництва)
<i>Горбистий (височинний)</i>	Невеликі перепади висот, можлива наявність локальних схилів	Середня (можливе затінення, потреба в вирівнюванні)
<i>Гірський</i>	Схили, зсуви, значний ухил, складні геологічні умови	Низька (потребує спеціальних рішень, висока вартість)
<i>Долинно-річковий</i>	Можливі підтоплення, алювіальні або заболочені ґрунти	Низька (ризик підтоплення, слабка основа)

<i>Зсувонебезпечний</i>	Схили з високим ризиком обвалів або зсувів, нестабільні породи	Дуже низька (вимагає ґрунтового інженерного захисту)
<i>Карстовий</i>	Наявність пустот, нерівномірна основа, ймовірність провалів	Обмежена (необхідні геотехнічні дослідження)

Таким чином, рельєф і геоморфологічні умови є критичними чинниками, що впливають як на технічну можливість встановлення СЕС, так і на економічну ефективність їх функціонування. Доцільне планування розміщення станцій повинне базуватися на комплексному аналізі морфометричних параметрів (висота, ухил, експозиція), геотехнічних властивостей ґрунтів, стабільності схилів та загальної динаміки геологічних процесів. Оптимізація вибору ділянок з урахуванням рельєфу дозволяє знизити витрати, мінімізувати ризики пошкодження об'єктів інфраструктури та забезпечити довгострокову стабільність роботи сонячної енергетики в регіоні.

2.3. Структура землекористування та покрив сільськогосподарських угідь

Структура землекористування є важливим просторовим показником, що безпосередньо впливає на можливість та доцільність розміщення сонячних електростанцій (СЕС). Типи землекористування визначають наявність вільних або частково зайнятих земельних ділянок, правовий режим користування, економічну цінність територій та потенційні екологічні ризики. Особливої уваги заслуговують сільськогосподарські угіддя, які займають значну частину територій у багатьох країнах і часто розглядаються як основний резерв для розміщення СЕС, особливо у форматі агрофотовольтаїки.

Визначальним фактором при оцінці придатності території є ступінь трансформації природного ландшафту. Землі з високим рівнем антропогенного

перетворення – орні землі, пасовища, сади, покинуті поля, деградовані ґрунти – часто є пріоритетними для розміщення СЕС, оскільки їх використання не порушує природоохоронного балансу і дозволяє уникнути конфліктів із збереженням природного середовища. Навпаки, ліси, водно-болотні угіддя, заповідні зони або землі з високою природною цінністю не розглядаються як придатні для встановлення сонячної інфраструктури, з огляду на необхідність дотримання принципів сталого розвитку.

У структурі сільськогосподарських угідь найбільш поширеними є орні землі, які мають високий потенціал для спільного використання – встановлення сонячних панелей над сільськогосподарськими культурами. Такий підхід називається агрофотовольтаїка (agrivoltaics) і дозволяє не лише виробляти електроенергію, а й частково захищати рослини від надмірної інсоляції та посухи. З іншого боку, інтенсивне сільське господарство може ускладнювати встановлення СЕС через регулярні обробітки ґрунту, механізовану техніку і потребу у великій відкритій площі.

Особливо перспективними вважаються території, що:

- не використовуються за прямим призначенням (виведені з обробітку землі поля, деградовані ділянки);
- мають низький агровиробничий потенціал;
- не є цінними з точки зору зрошення, меліорації або збереження родючості;
- розташовані поблизу ліній електропередач та під'їзних шляхів.

У розвинених країнах існує практика використання земель інфраструктурного або промислового призначення, а також покриття дахів господарських будівель сонячними панелями, що дозволяє зменшити навантаження на орні угіддя. У сільській місцевості важливою перевагою є також можливість створення мобільних або демонтованих сонячних установок, які не порушують цілісності земельного фонду та можуть бути переміщені у разі потреби.



Рис. 2.2. Приклади вдалої інтеграції сонячної енергетики зі сільським господарством [37]

Таким чином, аналіз структури землекористування дозволяє сформувати просторову базу для обґрунтування оптимальних територій розміщення СЕС. Пріоритетними виступають землі сільськогосподарського використання низької

якості, деградовані ділянки, покинуті площі, а також території, не придатні для традиційного землеробства. Інтеграція СЕС у просторову структуру сільськогосподарських ландшафтів є перспективним напрямом розвитку відновлюваної енергетики у сільських регіонах.

2.4. Транспортна доступність та близькість до інфраструктури

Одним із ключових географічних факторів при виборі оптимального місця для розміщення сонячних електростанцій (СЕС) є рівень транспортної доступності та наявність інженерної інфраструктури. Ці характеристики суттєво впливають як на етапі будівництва й логістики, так і в подальшій експлуатації об'єкта. Добре розвинена інфраструктурна база дозволяє мінімізувати витрати на транспортування матеріалів, монтаж обладнання, обслуговування станції та підключення до енергомереж.

Перш за все, важливо враховувати наявність автомобільних доріг загального користування, особливо тих, що забезпечують сполучення із районними або обласними центрами. Доступ до ділянки повинен бути забезпечений транспортом, придатним для перевезення великогабаритного обладнання, зокрема сонячних панелей, металоконструкцій, трансформаторних підстанцій. Відсутність доріг або складний рельєф може суттєво ускладнити або навіть унеможливити реалізацію проєкту, особливо в умовах гірської чи заболоченої місцевості [33].

Другим важливим аспектом є відстань до електричних мереж – як розподільчих, так і магістральних. Згідно з техніко-економічними оцінками, оптимальною вважається відстань до існуючої ЛЕП напругою 10–35 кВ не більше ніж 1,5–3 км. Чим ближче СЕС розташована до мережі, тим меншими будуть витрати на прокладання кабелів, трансформаторні підстанції та інші компоненти підключення. У разі віддаленості необхідне будівництво додаткової інфраструктури, що збільшує час і вартість реалізації проєкту.

Також важливою умовою є наявність інженерних мереж – систем водопостачання, дренажу, охоронних систем, інтернет-зв'язку, особливо якщо йдеться про промислові об'єкти великої потужності або агрофотовольтаїчні комплекси. Для забезпечення нагляду, телеметрії та автоматичного регулювання параметрів роботи сучасні СЕС потребують стабільного телекомунікаційного покриття.

Крім того, важливим фактором є наявність доступу до ринку праці, сервісних компаній, технічного обслуговування та потенційних інвесторів, що можливе лише у випадку відносної близькості до населених пунктів середнього та великого розміру. Однак, занадто близьке розташування до житлових зон також може викликати конфлікти через вплив на ландшафт, зміну землекористування або шумові ефекти від інверторного обладнання.

У світовій практиці проектування СЕС транспортна доступність та наближеність до інфраструктури розглядаються як один із основних критеріїв геоінформаційного моделювання придатності територій. Під час такого аналізу використовуються буферні зони навколо ЛЕП, доріг, трансформаторних підстанцій, що дозволяє кількісно оцінити ступінь інфраструктурної готовності конкретної локації (рис. 2.3.).

Таким чином, транспортна доступність та наявність інфраструктури є обов'язковими умовами успішної реалізації проєктів сонячної енергетики. Вибір ділянки для СЕС має ґрунтуватися на комплексній оцінці дорожньої та електромережевої доступності, технічного потенціалу підключення до мережі та можливості інтеграції в існуючий інфраструктурний каркас регіону

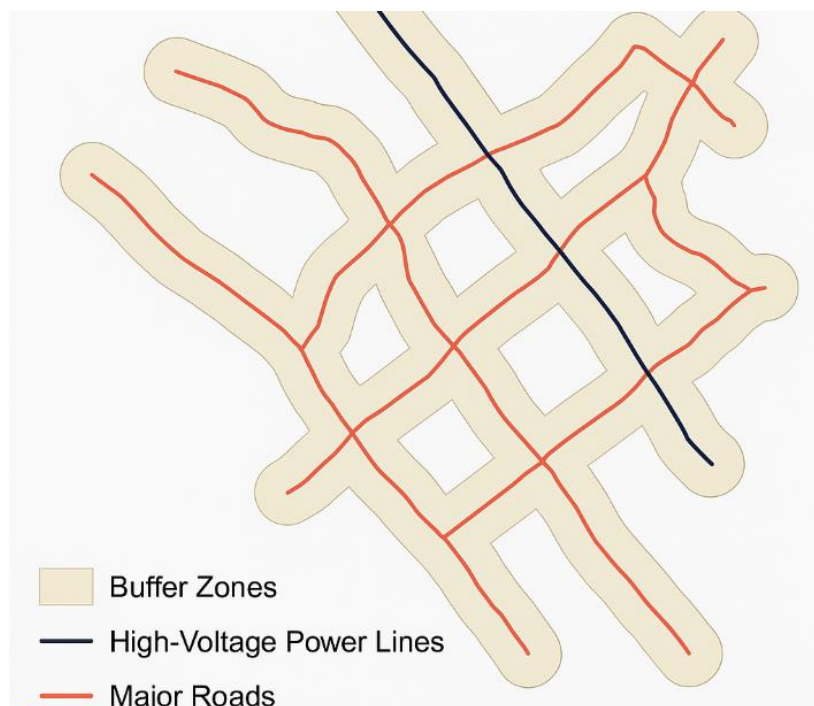


Рис. Приклад візуалізації буферних зон навколо ЛЕП, доріг, трансформаторних підстанцій [35]

2.5. Обмеження природоохоронного та правового характеру

Обмеження природоохоронного та правового характеру є важливим інструментом у сфері регулювання землекористування, охорони навколишнього природного середовища та забезпечення екологічної безпеки населення. Вони мають на меті не лише збереження природних ресурсів, але й гармонізацію інтересів держави, громади та власників земельних ділянок.

До обмежень природоохоронного характеру належать усі ті, що встановлюються для охорони довкілля, запобігання його деградації, збереження природних екосистем, унікальних ландшафтів, а також водних ресурсів. Зокрема, законодавством України передбачено створення прибережних захисних смуг уздовж водних об'єктів – річок, озер, морів. Ширина таких смуг варіюється залежно від розміру водойми і становить від 25 до 100 метрів для річок і озер, а для морського узбережжя – до 200 метрів. У межах цих смуг забороняється

будівництво капітальних споруд, ведення інтенсивного сільського господарства, використання добрив, випас худоби тощо. Аналогічно, для забезпечення санітарного захисту джерел водопостачання встановлюються зони санітарної охорони, що включають кілька поясів: суворого режиму, обмежень і спостереження. У межах цих зон регулюється будь-яка діяльність, яка може вплинути на якість води, зокрема обмежується розміщення промислових об'єктів, каналізаційних споруд, складів отрутохімкатів [18].

Особливу категорію становлять території природно-заповідного фонду, до яких належать державні природні заповідники, національні природні парки, заказники, пам'ятки природи тощо. На цих територіях запроваджується спеціальний режим охорони, який передбачає обмеження або повну заборону будь-якої господарської діяльності, що може зашкодити природним комплексам, біорізноманіттю чи естетичній цінності ландшафту.

Обмеження правового характеру, своєю чергою, стосуються регулювання правових відносин у сфері використання та розпорядження земельними ділянками. До таких обмежень належать, передусім, обмеження права власності або користування земельною ділянкою, які можуть встановлюватися як у формі законодавчої заборони, так і внаслідок адміністративного рішення органів державної влади чи місцевого самоврядування. Наприклад, власник не має права змінити цільове призначення ділянки або здійснювати забудову без відповідного дозволу, якщо ділянка потрапляє до зони обмеженої забудови або має особливий статус відповідно до містобудівної документації [27].

Крім того, важливим елементом правових обмежень є встановлення земельних сервітутів, що надають право обмеженого використання чужої земельної ділянки (наприклад, право проходу, проїзду, прокладення комунікацій).

Правові обмеження також охоплюють встановлення охоронних зон навколо об'єктів інфраструктури – ліній електропередач, газопроводів, трубопроводів тощо, у межах яких заборонено будь-яке будівництво або інші види діяльності, які можуть створити небезпеку або завадити експлуатації таких об'єктів. Усі ці обмеження спрямовані на забезпечення балансу між розвитком

територій і потребами екологічної безпеки, правової визначеності та сталого використання природних ресурсів.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

3.1. Кліматичні умови та інсоляція

Аналіз просторової придатності територій для розміщення сонячних електростанцій (СЕС) в Україні базується на поєднанні кліматичних, геоморфологічних, інфраструктурних та соціально-політичних факторів. Територія України вирізняється значною регіональною неоднорідністю, що зумовлює необхідність комплексної оцінки умов ефективного функціонування СЕС на національному рівні. У цьому розділі розглянуто ключові географічні чинники, які впливають на вибір локацій для реалізації проєктів сонячної енергетики.

Кліматичні умови, зокрема кількість сонячного випромінювання, є базовими природними детермінантами для оцінки територій, придатних для розміщення сонячних електростанцій (СЕС). На території України основним критерієм є сумарна річна сонячна радіація, яка вимірюється в кіловат-годинах на квадратний метр ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$) та загальна кількість годин сонячного сяйва протягом року. Ці показники прямо впливають на обсяг потенційної генерації електроенергії та економічну ефективність роботи сонячної станції.

Україна розташована у помірному кліматичному поясі, з переважанням помірно-континентального типу клімату. Характерними є значна сезонність, різкий контраст між холодною зимою та теплою весною й літом, а також нерівномірне розподілення опадів упродовж року. З точки зору сонячної генерації, найважливішим чинником є тривалість сонячного сяйва та інтенсивність сонячного випромінювання. Територія України отримує від 1100 до $1450 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ річної сумарної інсоляції, що є достатнім показником для економічно доцільного використання фотоелектричних СЕС [21].

Ось детальна карта сонячного потенціалу України – середньорічна глобальна горизонтальна інсоляція (GHI), подана в $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2/\text{рік}$. Згідно з нею,

існують чіткі просторові відмінності в придатності територій для розміщення СЕС (рис. 3.1.).

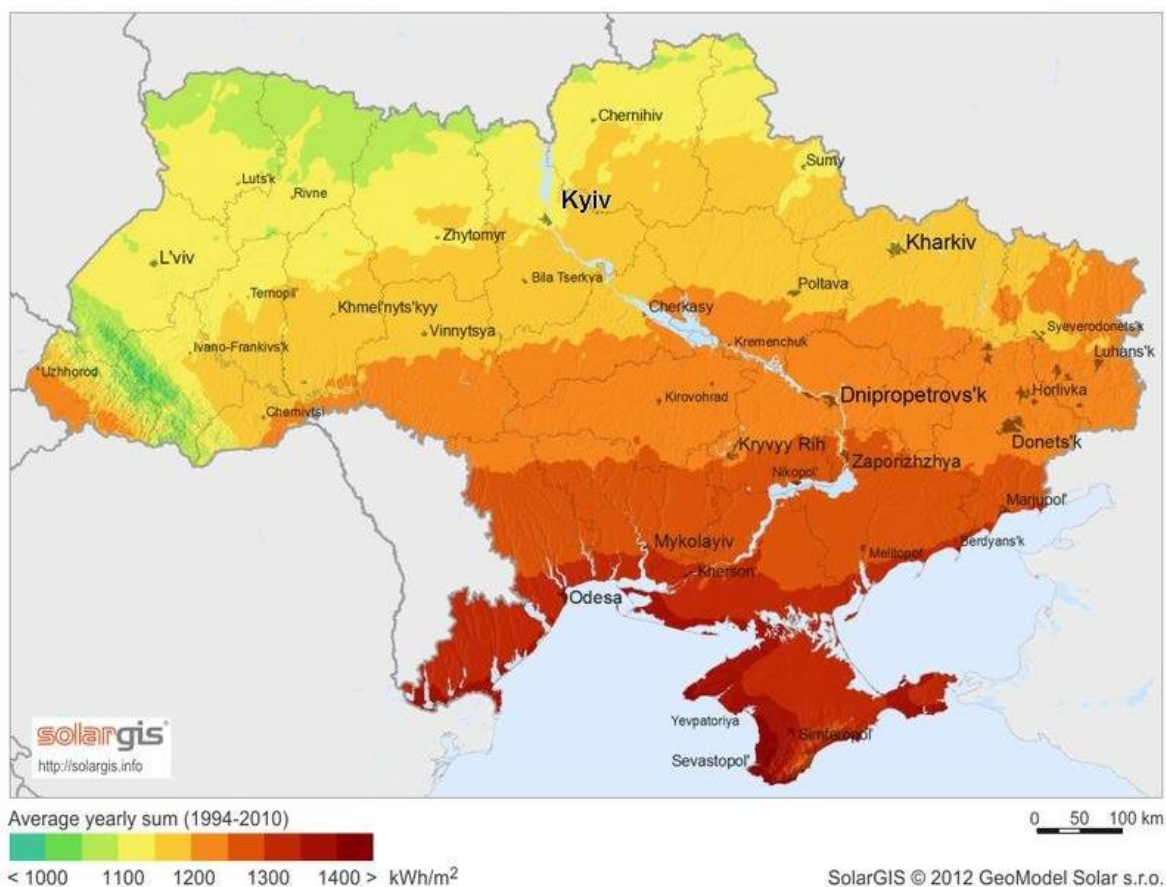


Рис. 3.1. Рівень інсоляції території України

Графік, що ілюструє потенційну річну генерацію електроенергії для 1 кВт сонячної електростанції в різних регіонах України (рис. 3.3.).

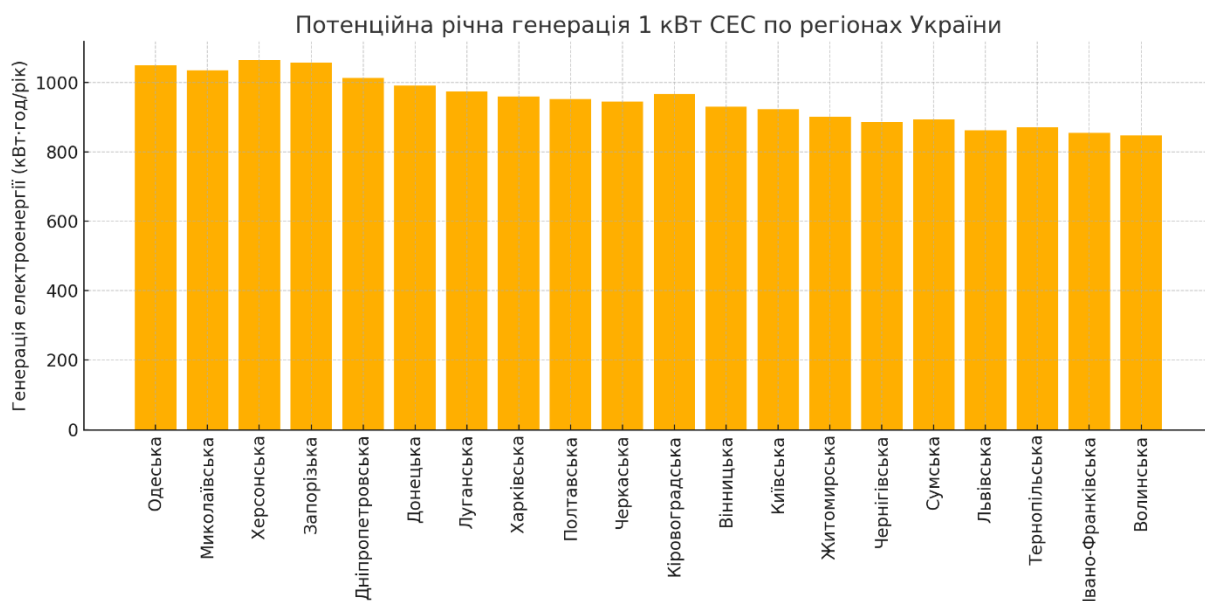


Рис.3.2. Графік потенційної річної генерації електроенергії для 1 кВт

Південні області України, зокрема Одеська, Миколаївська, Херсонська та Запорізька, вирізняються найвищим рівнем сонячного потенціалу на території держави. Тут сумарна інсоляція перевищує 1350–1450 кВт·год/м², а тривалість сонячного саява становить понад 2100–2200 годин на рік. Наприклад, у Херсонській області середня тривалість сонячного дня у весняно-літній період становить 8,5–10 годин. Сукупність цих показників робить зазначені регіони особливо перспективними для будівництва великих наземних сонячних електростанцій промислового типу.

Південно-східні та східні області, такі як Дніпропетровська, Донецька, Луганська й Харківська, мають річну тривалість сонячного саява у межах 1900–2100 годин, а сумарну інсоляцію – 1250–1350 кВт·год/м². Ці показники, у поєднанні з рівнинним рельєфом та наявністю значних площ сільськогосподарських угідь, формують потужний потенціал для розміщення СЕС. Проте, внаслідок воєнних дій та пов'язаних із ними ризиків, частина цих територій наразі є обмежено придатною для реалізації енергетичних проєктів.

Центральні області України – Кіровоградська, Полтавська, Черкаська та Вінницька – характеризуються помірним сонячним потенціалом. Інсоляція тут становить 1200–1300 кВт·год/м², а тривалість сонячного саява – близько 1850–2000 годин на рік. Рівнинний ландшафт, наявність незадіяних територій, зручне розташування в межах центральної енергетичної мережі та відсутність воєнних загроз роблять ці регіони стратегічно вигідними для розвитку дахових фотоелектричних систем, агрофотовольтаїки та локальних сонячних станцій.

Західні області, до яких належать Львівська, Тернопільська, Волинська та Івано-Франківська, мають нижчі показники сонячної інсоляції – у межах 1100–1200 кВт·год/м², а кількість сонячного саява становить приблизно 1600–1800 годин на рік. Через підвищений рівень хмарності та опадів, умови для розвитку СЕС є менш сприятливими порівняно з південними регіонами. Втім, тут активно розвиваються малі дахові сонячні установки, особливо в сільській місцевості, де наявна потреба у децентралізованому енергозабезпеченні.

Північні області – Чернігівська, Сумська, Житомирська та Київська – мають інсоляційний потенціал у межах 1150–1250 кВт·год/м² при загальній кількості сонячного сяйва 1700–1900 годин на рік. Ці регіони вирізняються високим рівнем урбанізації та щільною забудовою, що створює сприятливі передумови для розвитку міської сонячної енергетики – зокрема, дахових СЕС на житлових, промислових та адміністративних будівлях.

Карпатський регіон та північно-західна частина України характеризуються складним гірським рельєфом, високим рівнем хмарності та нестабільними погодними умовами, що знижує ефективність використання СЕС. Водночас окремі ділянки з південною експозицією схилів можуть бути придатними для встановлення фотоелектричних систем за умови наявності відповідного інженерного та геоморфологічного обґрунтування.

Для порівняння, середньорічна інсоляція у Німеччині становить 1000–1200 кВт·год/м², у Польщі – 1100–1250 кВт·год/м², а у Франції – 1300–1600 кВт·год/м². Таким чином, південна половина України має сонячний потенціал, який не поступається провідним європейським державам у сфері сонячної енергетики, а в окремих випадках – навіть перевищує їх показники, що відкриває широкі перспективи для подальшого розвитку галузі.

3.2. Рельєф і землекористування

Рельєф та структура землекористування відіграють важливу роль у визначенні територіальної придатності земельних ділянок для встановлення сонячних електростанцій (СЕС). В Україні, де переважають рівнинні форми рельєфу, природні умови в цілому є сприятливими для монтажу наземних фотоелектричних установок. Проте специфіка кожного регіону зумовлює певні просторові обмеження, які мають бути враховані під час просторового планування [29].

Найбільш придатними для розміщення СЕС є рівнинні ділянки з незначним ухилом (до 5°), орієнтовані на південь, південний схід або південний захід. Такі

умови забезпечують максимальну ефективність уловлювання сонячної радіації та зменшення втрат електроенергії через тіньові ефекти чи нерівномірне освітлення. Значні ухили, карстові процеси, підтоплення та заболочення територій ускладнюють або унеможливають реалізацію проєктів СЕС, оскільки потребують додаткових інженерних рішень і фінансових витрат.

У контексті землекористування ключовим чинником є доступність відкритих, незабудованих ділянок з невисокою економічною цінністю. Оптимальними для сонячної енергетики є деградовані землі, малопродуктивні пасовища, піщані або солонцюваті ґрунти, а також землі, вилучені з інтенсивного сільськогосподарського обігу (наприклад, після рекультивації кар'єрів або закриття промислових об'єктів). Це дозволяє уникати конкуренції за родючі сільськогосподарські угіддя та мінімізувати соціально-економічні конфлікти.

В умовах України такі придатні території виявлені у степовій та лісостеповій зонах, де є значні площі необроблених або малопродуктивних земель. У південних і східних регіонах (Одеська, Херсонська, Запорізька, Дніпропетровська області) зафіксовані найбільші площі деградованих або осушених земель, які потенційно можуть бути використані під СЕС. Водночас у Карпатському регіоні через складний рельєф, високу щільність лісового покриву та обмежену площу рівнинних ділянок можливості для будівництва СЕС суттєво обмежені. У процесі планування розміщення сонячних електростанцій важливу роль відіграють рельєф та структура землекористування, оскільки вони безпосередньо впливають на технічну доцільність, економічну ефективність і просторову доступність територій. На основі комплексного аналізу цих чинників було створено картографічну модель придатності території України для розміщення СЕС, яка інтегрує дані щодо інсоляції, рельєфу, земного покриву, а також доступу до енергетичної та транспортної інфраструктури. (рис. 3.3.).

Додатково слід враховувати юридичні аспекти землекористування – наприклад, землі державної чи комунальної власності можуть мати обмеження щодо цільового призначення, що вимагає процедур зміни цільового використання. Натомість приватні ділянки потребують ретельного аналізу

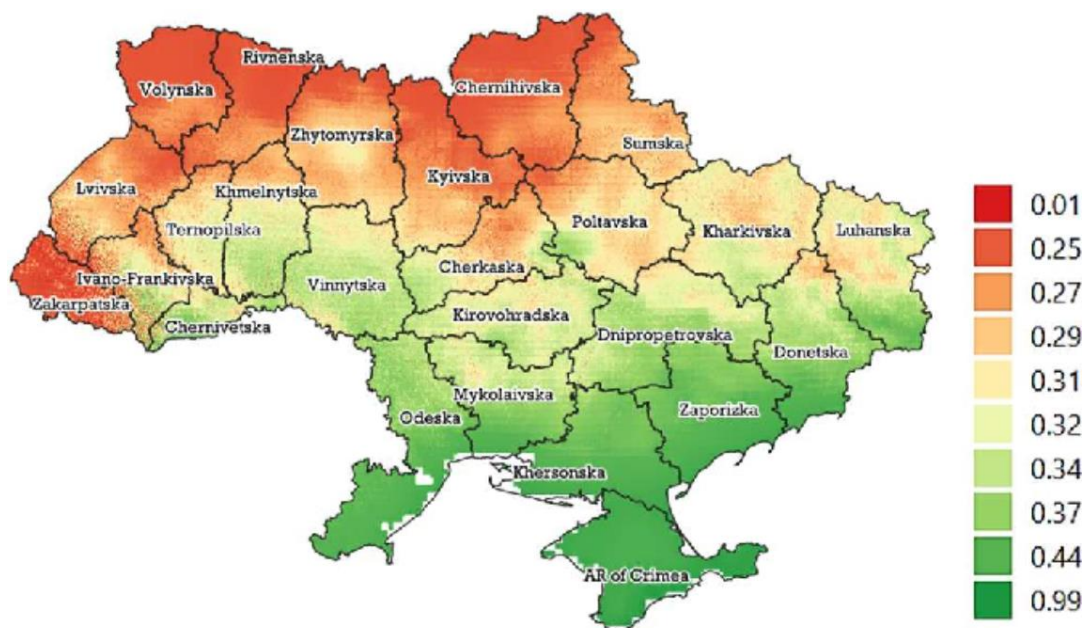


Рис. 3.3. Просторова придатність території України для розміщення сонячних електростанцій на основі аналізу рельєфу

правовстановлюючої документації, наявності обтяжень та доступу до енергетичної інфраструктури.

Найвищу придатність до розміщення сонячних електростанцій мають південні області України – зокрема Одеська, Миколаївська, Херсонська та Запорізька. Ці території характеризуються рівнинним рельєфом, великою кількістю відкритих земель, що часто мають деградований або малопродуктивний характер, а також високим рівнем сонячної інсоляції (понад 1400 кВт·год/м²/рік). Крім того, близькість до високовольтних ліній електропередач і транспортних артерій сприяє зменшенню витрат на підключення об'єктів до мережі. Саме ці чинники визначають високу техніко-економічну доцільність реалізації масштабних промислових СЕС у даному регіоні

Регіони із середньо-високою придатністю, такі як Дніпропетровська, Кіровоградська, Полтавська, Донецька та Харківська області, також мають значний потенціал. Поєднання рівнинного рельєфу, сільськогосподарських ландшафтів і помірної щільності населених пунктів робить ці території придатними для реалізації проєктів середнього масштабу – як наземних, так і

гібридних агрофотовольтаїчних систем. Інсоляція у цих областях коливається в межах 1300–1400 кВт·год/м²/рік, що є цілком достатнім для стабільної генерації електроенергії.

Зони з помірною придатністю включають північні та західні області – Київську, Житомирську, Львівську, Волинську. Хоча інсоляційний потенціал у цих регіонах дещо нижчий (1200–1300 кВт·год/м²/рік), а землі мають високу цінність і часто використовуються в інтенсивному сільському господарстві або забудовані, тут є значний потенціал для розвитку дахових СЕС та невеликих локальних установок. Щільна урбанізована забудова створює можливості для використання покрівель житлових і промислових будівель як платформ для генерації енергії.

У свою чергу, найменш придатними для розміщення СЕС є території з ускладненим рельєфом – зокрема гірські райони Карпатського регіону та Криму. Тут характерні круті схили, щільний лісовий покрив і обмежена кількість відкритих земель. Такі ділянки потребують складних інженерних рішень для монтажу СЕС, що значно підвищує вартість проєкту. Проте окремі локації з південною експозицією схилів можуть бути технічно придатними для встановлення сонячних панелей за умов проведення детального геоморфологічного аналізу та інженерного моделювання.

Таким чином, поєднання сприятливого рельєфу та раціональної структури землекористування створює основу для ефективного просторового планування розміщення сонячних електростанцій. У майбутньому доцільним є створення кадастрів придатних земель для СЕС на основі геоінформаційного аналізу рельєфу, землекористування, відстані до ЛЕП, екологічних та правових обмежень.

3.3. Інфраструктурні й екологічні обмеження

У процесі розміщення сонячних електростанцій (СЕС) особливу увагу слід приділяти інфраструктурним та екологічним чинникам, які істотно впливають на технічну реалізацію проєктів, їхню економічну доцільність, а також відповідність екологічному та земельному законодавству. Ці обмеження відіграють важливу роль на етапі попереднього аналізу території та визначення її придатності для розміщення об'єктів відновлюваної енергетики.

З інфраструктурного погляду критичним чинником є відстань до об'єктів енергетичної інфраструктури, зокрема до ліній електропередач (ЛЕП) високої та середньої напруги. Чим ближче СЕС розташована до ЛЕП, тим нижчими є витрати на будівництво підстанцій, прокладання кабельних трас і технічне підключення до мережі. Згідно з практикою розміщення СЕС в Україні, оптимальною вважається відстань до 5 км від точки підключення. Крім того, важливо враховувати наявність автодоріг і транспортних магістралей, які забезпечують логістику обладнання та обслуговування СЕС. У багатьох випадках проєкти у віддалених районах, навіть із високим сонячним потенціалом, виявляються економічно не вигідними через високі витрати на інфраструктуру.

Екологічні обмеження також суттєво впливають на вибір ділянок для будівництва СЕС. Передусім це стосується розташування в межах об'єктів природно-заповідного фонду, лісів, водоохоронних зон, прибережних захисних смуг, торфовищ, заболочених ділянок або територій із нестабільним геоморфологічним режимом (зсуви, підтоплення). Відповідно до чинного законодавства, зокрема Земельного та Водного кодексів України, такі території мають спеціальний режим використання, який або повністю виключає розміщення промислових об'єктів, або передбачає додаткові обмеження й процедури екологічної експертизи. Заборона або обмеження господарської діяльності в таких зонах зумовлена необхідністю збереження біорізноманіття, ґрунтового покриву та водних ресурсів.

Окрему увагу слід звернути на землі, що підпадають під дію охоронних зон інженерних комунікацій та об'єктів критичної інфраструктури (газопроводи, нафтові магістралі, об'єкти оборонного призначення), де також існують правові обмеження щодо зміни цільового призначення або здійснення будівельної діяльності.

У зв'язку з війною в Україні, додатковим обмеженням для розвитку нових об'єктів СЕС є ризики, пов'язані з мінною небезпекою, руйнуванням інфраструктури, тимчасовою окупацією територій та загрозами безпеки. Зокрема, значна частина південно-східних та східних регіонів, які мають високий сонячний потенціал, перебувають у зоні бойових дій або мають обмежений доступ, що унеможлиблює реалізацію нових інвестиційних проєктів. У післявоєнний період важливим стане оновлення кадастрів безпечних територій та включення компоненту безпеки в просторове планування СЕС [23].

Таким чином, врахування інфраструктурних та екологічних обмежень є необхідною умовою для обґрунтованого вибору місця встановлення СЕС. Лише комплексний аналіз доступності до енергетичних мереж, стану транспортної інфраструктури, правового статусу земель і екологічних ризиків дозволяє досягти сталості у плануванні, мінімізувати негативний вплив на довкілля та забезпечити довгострокову ефективність проєкту.

3.4. Військові ризики

Станом на теперішній час територія України зазнає серйозних трансформацій у зв'язку з повномасштабною військовою агресією Російської Федерації. Ця обставина безпосередньо впливає на географічне планування проєктів у галузі відновлюваної енергетики, зокрема розміщення сонячних електростанцій (СЕС). Військові ризики, пов'язані з активними бойовими діями, наявністю вибухонебезпечних предметів, руйнуванням інфраструктури та нестабільною безпековою ситуацією, створюють суттєві обмеження для

реалізації інвестицій у галузі сонячної енергетики на значних територіях країни [28].

Насамперед, підвищеною зоною ризику є східні та південно-східні області, такі як Луганська, Донецька, частково Харківська, Запорізька та Херсонська. Незважаючи на високий сонячний потенціал цих регіонів, вони частково або повністю охоплені воєнними діями, мають зруйновану інфраструктуру або залишаються тимчасово окупованими. Відповідно, будь-які будівельні роботи, а тим паче інвестиції у масштабні промислові об'єкти, є тут неможливими або економічно недоцільними.

Крім бойових дій, суттєву загрозу становить мінна небезпека. Значна кількість територій на сході, півдні та півночі України є замінованими або потенційно небезпечними у зв'язку з наявністю залишків боєприпасів та нерозірваних мін. Розгортання інфраструктурних проєктів, таких як СЕС, у подібних зонах вимагає попереднього розмінування, що потребує великих витрат і часу.

Також одним із опосередкованих наслідків воєнних дій є погіршення доступу до об'єктів інфраструктури. Зруйновані лінії електропередач, трансформаторні підстанції, автодороги та мости унеможливають приєднання нових генеруючих потужностей до енергетичної мережі або роблять їх експлуатацію економічно неефективною.

На рівні планування важливим стає впровадження просторової стратифікації територій за ступенем воєнної загрози та безпеки. Це дозволяє науково обґрунтувати виключення з аналізу тих територій, де реалізація об'єктів сонячної енергетики не є можливою у найближчій перспективі. З іншого боку, відносно безпечні регіони центральної, західної та частково північної України мають стати пріоритетними для реалізації нових проєктів СЕС, зокрема з урахуванням внутрішнього переміщення населення, змін у структурі енергоспоживання та потреби в децентралізації генерації.

Отже, військові ризики в умовах сучасної України виступають не лише як фактор обмеження, а й як чинник, що формує нову географію енергетичних

інвестицій. Стратегія розвитку СЕС має бути адаптована до реалій воєнного часу й базуватися на принципах безпеки, економічної доцільності та енергетичної резилієнтності.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було здійснено комплексне дослідження географічних факторів, що визначають оптимальне розміщення сонячних електростанцій (СЕС), з метою обґрунтування найбільш доцільних територій для їхнього функціонування на прикладі України.

1. Вивчення теоретичних основ дало змогу з'ясувати, що СЕС – це об'єкти альтернативної енергетики, які перетворюють сонячну радіацію на електроенергію за допомогою фотоелектричних модулів або концентраторів теплової енергії. Вони поділяються на кілька типів за критеріями потужності, місця встановлення, конструктивних особливостей, способу зберігання та споживання енергії. Зокрема, найпоширенішими є наземні, дахові, автономні, гібридні та агрофотовольтаїчні системи, кожен із яких має специфічні переваги та недоліки, що впливають на вибір місця розташування.

2. У роботі також було проаналізовано досвід реалізації сонячної енергетики у світі, зокрема у країнах Європейського Союзу, Китаї та США, де впроваджуються передові підходи до просторового планування та державного регулювання галузі. Українська практика демонструє активне впровадження СЕС, однак стикається з викликами, пов'язаними із нестабільністю правового середовища, складністю приєднання до мережі, а останнім часом – з безпековими загрозами в умовах війни.

3. Окрему увагу в дослідженні приділено вивченню географічних факторів, що впливають на ефективність функціонування СЕС. Визначено, що провідними чинниками є інсоляція, температурний режим, рельєф, структура землекористування, близькість до інфраструктури, транспортна доступність, правові та екологічні обмеження. Найбільш сприятливими для розвитку сонячної енергетики є території з високим рівнем сонячного випромінювання (понад 1300–1400 кВт·год/м² на рік), рівнинним рельєфом, доступними вільними землями (особливо деградованими або непридатними для сільського господарства), а також розвиненою енергетичною інфраструктурою.

4. У результаті регіонального аналізу територій України встановлено, що найбільший потенціал для розміщення СЕС мають південні та південно-східні області – Херсонська, Миколаївська, Запорізька, Одеська. Вони вирізняються високими показниками інсоляції, відкритими площами, зручністю підключення до мереж. Водночас важливим обмеженням є наявність військових ризиків, зокрема мінної небезпеки, зруйнованої інфраструктури та окупації частини територій, що унеможлиблює реалізацію проектів у ряді регіонів. У цьому контексті особливе значення має просторове планування з урахуванням безпекових зон та пріоритетів післявоєнного відновлення.

У підсумку можна констатувати, що ефективне розміщення СЕС є результатом комплексного багатофакторного аналізу, який поєднує природні, соціально-економічні, технічні та правові аспекти. Застосування географічного підходу дає змогу забезпечити науково обґрунтоване планування, підвищити енергоефективність територій та сприяти сталому розвитку енергетичної системи України в умовах сучасних викликів. Отримані результати можуть бути використані при створенні карт придатності, розробці регіональних енергетичних стратегій та прийнятті управлінських рішень у сфері відновлюваної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматика і автоматизація технологічних процесів: підручник / Т. Б. Головка, К. Г. Рего, Ю. О. Скрипник.– К. : Либідь, 1997.– 232 с
2. Адаменко О.М., Височанський В., Лютко В., Михайлів М. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії. Монографія. – Івано-Франківськ: ІМЕ, 2001. – 432с.
3. Бабюк, С.М. Проблеми та переваги інтеграції технологій відновлюваної енергії в енергосистему змінного струму [Електронний ресурс] / С. М. Бабюк, Я. В. Пліс // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей X міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів, Тернопіль, 24–25 листоп. 2021р. / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: Паляниця В. А., 2021. – Т. 2 . – С. 7-8
4. Білан Ю. В. Геоєкологічні аспекти розвитку сонячної енергетики в Україні // Вісник географічного товариства України. – 2021. – № 4. – С. 31–37.
5. Герасименко М. О. Аналіз державної політики стимулювання виробництва електроенергії з відновлюваних джерел в Україні за допомогою механізму «зеленого тарифу» [Електронний ресурс] / Герасименко М. О., Серебренніков Б. С. // Актуальні проблеми економіки та управління : збірник наукових праць молодих вчених. – Електронні текстові дані (1 файл: 435 Кбайт). – 2016. – Вип. 10.
6. Головань М. М. Система автоматичного позиціонування сонячних панелей / М. М. Головань, Н. В. Здолбіцька // Інформаційні технології і автоматизація – 2020: зб. доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 22–23 жовт. 2020 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій, Інститут комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П. М. Платонова. – Одеса, 2020. – С. 284–286 URL: <https://cardfile.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/185425c7-ffd4-4d80-b752-e30f9fb80fbd/content>.

7. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Потенціал відновлюваної енергетики в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/>
8. Економіка енергетики: за ред. д.е.н., проф. Мельника, д.е.н., проф. І.М.Сотник: підручник. Суми: Університетська книга, 2015. 378 с.
9. Енергетика: Сучасна система енергетичного законодавства України та основні напрями її вдосконалення в[Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-4/section-2/2-1>
10. Енергозбереження в Україні [Електронний ресурс]: Монографія / Д. В. Зеркалов. Електрон. дані <http://zerkalov.org/files/ezu-mz.pdf#4>
11. Енергетичні ресурси та потоки /За заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2003. – 468 с.
12. Енергоефективність та відновлювальна енергетика в Україні: проблеми управління : монографія / за заг. ред. д-ра екон. наук, проф. І. М. Сотник. Суми: Університетська книга, 2019. 247 с.
13. Єлісеєва, О. К. Економіко-статистичний аналіз сонячної енергетики регіонів України [Текст] / О. К. Єлісеєва, П. В. Хазан // Статистика України . – 2016 . №4 . – С. 51-58.
14. Закон України "Про електроенергетику" [Прийнятий Верховною радою 16 жовтня 1997 року, зі змінами та доповненнями станом на 10 січня 2011 р.]Відомості Верховної Ради (ВВР), 1998, N 1, ст.1
15. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» : Закон від 20 лют. 2003 р. № 555-IV // Відомості Верховної Ради України. – 2003. – № 24. – Ст. 155.
16. Закон України від 04.06.2015 № 514-19 Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії: Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2015, N 51 33, ст.324. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19> (дата звернення: 18.05.2024).

17. Кириленко О.В. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник/ О.В.Кириленко,М.С.Сегеда, О.Ф.Буткевич. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010.-608 с.
18. Кудря С.О. та ін. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України: НАН України; Ін-т електродинаміки та ін. Київ, 2001. 41 с.
19. Л.В. Дмитренко, С.Л. Барандіч: Оцінка кліматичних ресурсів сонячної енергії в Україні. URL : https://uhmi.org.ua/pub/np/256/9_Dmytrenko_Varand.pdf (дата звернення: 03.06.2020)
20. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія / С. Є. Саух, А. В. Борисенко. — К.: «Три К», 2020. — 340 с.
21. Мішенін Є. В., Чигрин О. Ю., «Зелений» бізнес: сучасні тренди розвитку та шляхи просування: Монографія– Суми : 2019. – 14 с.
22. Орієнтація та кут нахилу сонячних колекторів. URL: <https://solarsoul.net/uk/oriyentaciya-ta-kut-naxilu-sonyachnix-kolektoriv>
23. . Олійник Я.Б. Основи екології: підручник / Я. Б. Олійник, П. Г. Шищенко, О. П. Гавриленко. - К. : Знання, 2012. - 558 с.
24. Панченко Є. В., Соловей І. П. Енергетична стратегія України: стан, виклики, перспективи // Стратегічні пріоритети. – 2021. – № 1. – С. 17–24.
25. Програма фінансування альтернативної енергетики України (USELF). URL: http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/USELF_UA_13_06_2014.pdf (дата звернення: 20.05.2020).
26. Сонячна енергетика [Електронний ресурс]: Режим доступу до ресурсу: https://pidruchniki.com/1579122737970/ekologiya/sonyachna_energetika.
27. Ставицький А. І., Тарасенко Ю. А. Просторове планування у відновлюваній енергетиці: методичні підходи та сучасні практики // Енергетична політика. – 2022. – № 2. – С. 34–42.

28. Тарасюк І. Ю. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія. – 2020. – № 2. – С. 45–50.
29. Томілін Ю.А., Григор'єва Л.І. Формування радіаційного навантаження на людину в умовах півдня України: чинники, прогнозування, контрзаходи. Монографія. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. П. Могили, 2009. 332 с.
30. Федоренко А. М. Потенціал використання відновлюваних джерел енергії в умовах децентралізації // Науковий вісник Херсонського державного університету. – 2021. – № 1. – С. 92–97.
31. Хмель В. І. Інсоляційний потенціал території України: регіональні особливості та перспективи використання // Український географічний журнал. – 2021. – № 3. – С. 40–47.
32. Шульга Т. В. Особливості геопросторового аналізу територій під СЕС з використанням QGIS // Геоінформаційні технології. – 2023. – № 1. – С. 58–65.
33. Юрченко Є.Л. Вибір оптимальних параметрів орієнтації сонячних панелей / Є.Л. Юрченко, О.О. Коваль, В.В. Тимофєєв, Р.О. Однобурцев Український журнал будівництва та архітектури, № 4 (022), 2024, С. 155–160 URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/bitstream/123456789/13852/1/YURCHENKO.pdf>
34. Bilous J. Optimization of the network of general secondary education institutions in the conditions of decentralization: geographical aspect // Human Geography Journal. – 2020. – Vol. 28. – P. 64–70. doi: 10.26565/2076-1333-2020-28-07.
35. Butenko O. S., Zamirets, O. O., The determination of degrees of combinatorial influence of the natural phenomena occurrence's factors [Text] / O. O. Zamirets, O. S. Butenko–Nauka i Studia, Przemysl, Poland. – 2015 – 5 (136)– pp. 81 – 87
36. Capasso Da Silva D., King D. A., Lemar S. Accessibility in practice: 20-minute city as a sustainability planning goal // Sustainability. – 2019. – Vol. 12, № 1. – P. 129. <https://doi.org/10.3390/su12010129>

37. Colclough J. G., Owens E. Mapping pedestrian journey times using a network-based GIS model // Journal of Maps. – 2010. – Vol. 6, № 1. – P. 230–239. doi: 10.4113/jom.2010.1075.
38. Google Project Sunroof. Solar potential map [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.google.com/get/sunroof>
39. Future of solar photovoltaic: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. – Abu Dhabi : IRENA, 2020. – 64 p.
40. Map of solar radiation in Europe: Ukraine / M. Suri, T. Cebecauer, T. Huld, E. D. Dunlop // Materials of JRC European commission. — PVGIS: European communities, 2001—2008. — p. 27.
41. Confmanagement: Розвиток та підвищення енергоефективності підприємств України [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://confmanagement.kpi.ua/proc/article/view/201148/0>
42. Solar energy strategy 2022 [Електронний ресурс] / European Commission. – Режим доступу: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/solar-energy_en
43. SolarPower Europe. Global Market Outlook for Solar Power 2023–2027 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solarpowereurope.org/>
44. UNDP Ukraine. Renewable Energy in Ukraine: Market Overview 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.undp.org/ukraine>
45. Zhuang Z., et al. Optimal siting of solar photovoltaic farms using GIS and multicriteria decision analysis: Case study in China // Renewable Energy. – 2021. – Vol. 172. – P. 109–121.