

**Байдала Вікторія Володимирівна**,  
доктор економічних наук, професор,  
завідувач кафедри економіки,  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України

**Нагорний Віталій Володимирович**,  
кандидат економічних наук, доцент, доцент  
кафедри економіки, Національний  
університет біоресурсів і  
природокористування України

**Baidala Viktoriia**,  
Doctor of Economic Sciences, Professor,  
National University of Life  
and Environmental Sciences,  
<https://orcid.org/0000-0002-1532-2913>

**Nahornyi Vitalii**,  
PhD in Economics, Associate Professor,  
National University of Life  
and Environmental Sciences,  
<https://orcid.org/0000-0001-5551-4779>

**ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ:  
АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ  
ECONOMIC EFFICIENCY OF SOLAR ENERGY DEVELOPMENT:  
ANALYSIS OF WORLD EXPERIENCE**

Байдала В. В., Нагорний В. В. Економічна  
ефективність розвитку сонячної енергетики:  
аналіз світового досвіду. *Український журнал  
прикладної економіки та техніки*.  
2023. Том 8. № 4. С. 30 – 37.

Baidala V., Nahornyi V. Economic efficiency of  
solar energy development: analysis of world  
experience. *Ukrainian Journal of Applied  
Economics and Technology*.  
2023. Volume 8. № 4, pp. 30 – 37.

*Метою статті є визначення основних факторів, що детермінують розвиток сонячної енергетики, на основі аналізу досвіду країн-лідерів. Визначено, що країнами-лідерами за обсягами генерації електроенергії з СЕС є Китай, Індія, Японія; США; Німеччина, Іспанія; а також Австралія. Гіпотеза про потенційно можливий вплив таких факторів, як попит на електроенергію, а також рівень економічного розвитку того чи іншого регіону, знайшла своє підтвердження. Кореляційний аналіз показав наявність позитивного лінійного взаємозв'язку між обсягом генерації електроенергії з СЕС і вказаними факторами. Розрахована в середовищі Rstudio панельна регресія показала, що збільшення ВВП на одну особу населення на 1 дол. США призводить до збільшення генерації електроенергії з СЕС на 0,00155 ТВт\*год; збільшення попиту на електроенергію на 1 ТВт\*год – на 0,04188 ТВт\*год. Виявлено, що попит на електроенергію є значно впливовішою детермінантою розвитку сонячної енергетики, аніж рівень економічного розвитку країни.*

**Ключові слова:** альтернативне енергозабезпечення, відновлювана енергія, сонячна енергетика, фактори розвитку сонячної енергетики, економічна ефективність альтернативної енергетики.

*The paper reveals the relevance of solar energy development in the modern world. Attention is focused on the fact that solar energy increases its potential yearly. It was determined that China, India, Japan, the USA, Germany, Spain, and Australia play the primary role in increasing the volume of electricity generation from SPPs worldwide. The prominent leaders in the development of solar energy in the world are two countries: China and the USA. The hypothesis about the potential impact of such factors as the demand for electricity and the level of economic development of a particular region, expressed by the gross domestic product per capita, has been confirmed. Correlation analysis showed a positive linear relationship between the volume of electricity generation from SPPs and indicators such as GDP per capita and electricity demand. A panel regression calculated in the Rstudio environment of the dependence of the development of solar energy on the demand for electricity and the level of economic development among the TOP 7 countries - the leaders of the development of solar energy in the world showed that an increase in GDP per capita by 1 USD. USA leads to an increase in electricity generation from SPPs by 0.00155 TWh\*h; an increase in demand for electricity by 1 TWh leads to an increase in electricity generation from SPPs by 0.04188 TWh. The obtained result suggests that each additional unit of electricity demand is satisfied on average by only 4.19% due to solar energy. A comparison of the marginal coefficients of the two explanatory factors shows that electricity demand is a much more influential determinant of solar energy development than the country's economic development level. It is highlighted that solar energy development will be determined in the future by increasing solar panels' efficiency and service life, making solar energy more attractive for the civilian population and low-power military autonomous systems.*

**Keywords:** alternative energy supply, renewable energy, solar energy, solar energy development factors, economic efficiency of alternative energy.

**Вступ**

Сьогодні світовий енергетичний сектор перебуває в активній фазі свого розвитку, яку можна порівняти з періодом початку застосування ядерної енергії з метою генерації електроенергії як періоду впровадження інновацій. На відміну від часів глобального впровадження ядерної енергетики, сьогодення демонструє нарощування потенціалу відновлюваної енергетики, основним видом якої є сонячна енергетика. Саме розвиток сонячної енергетики є одним з

© Байдала Вікторія Володимирівна, Нагорний Віталій Володимирович, 2023

ISSN 2415-8453. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2023 рік. Том 8. № 3.

---

ефективних інструментів сталого розвитку людства, який відповідає потребам сьогодення, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби [1].

Попри те, що сонячна енергетика має один значний недолік, а саме відсутність можливості генерації електроенергії протягом темної пори доби, за іншими критеріями сонячна енергетика є значно привабливішою за будь-який інший тип традиційної енергетики: відсутність шкідливих викидів у період генерації електроенергії, нульова ймовірність виникнення будь-яких техногенних катастроф у результаті збою функціонування електростанції, відсутність потреби в паливі, що, відповідно, значно зменшує собівартість виробництва електроенергії [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розвитку сонячної енергетики досліджувала значна кількість зарубіжних науковців. Так, наприклад, Танер Гюней у своїх роботах аналізує зв'язок між сонячною енергетикою та сталим розвитком. Використовуючи статистичні дані з 35 країн за період з 2005 до 2018 рр., він розглядав проблеми потенційної ендегенності в аналізі взаємозв'язку сонячної енергії та сталого розвитку. За проведеними розрахунками було підтверджено існування ендегенності серед змінних, включених до аналізу. Для вирішення проблеми ендегенності перевагу було надано інструментальним змінним і двоетапному узагальненому методу моментів. У результаті, відповідно до отриманих оцінок, визначено, що сонячна енергетика позитивно впливає на сталий розвиток. Додатковий аналіз продемонстрував, що традиційна енергетика спричиняє уповільнення сталого розвитку [9].

Стефані Гальбрюгге та Марк-Фабіан Кернер у своїх наукових роботах також визначають сонячну енергетику як один з основних інструментів досягнення національних енергетичних і кліматичних цілей у всьому світі. Проведені дослідження науковців говорять про те, що багато країн мають величезний, недостатньо використаний потенціал сонячної енергетики, який може значно змінити їхній енергетичний баланс і сприяти досягненню цілей із зменшення викидів вуглецю, що вказуються в межах Паризької угоди 2015 р. Науковці у своїх дослідженнях підкреслюють, що існують переваги розвитку сонячної енергетики з правової та економічної точки зору, які ще недостатньо вивчені. З юридичної точки зору було розглянуто законодавство 72 країн і запровадження ними нормативно-правових актів щодо розвитку сонячної енергетики. Проведений аналіз показав, що в деяких країнах, які розвиваються, новоприйняті закони не були пов'язані зі стимуляцією збільшення частки сонячної енергії в енергетичному балансі країн [8].

Рамалінгам Сентіл у своїх наукових працях також відзначає значний потенціал сонячної енергетики з позиції досягнення цілей сталого розвитку, представлених в ООН. Проведені дослідження відзначають позитивний вплив сонячної енергетики у боротьбі з глобальним потеплінням і покращенням зовнішнього середовища всієї планети. На думку автора, одним з основних чинників стимуляції розвитку сонячної енергетики у світі є підвищення фінансування науково-дослідних проєктів у сфері підвищення ефективності технологій сонячної енергетики, що надалі може призвести до зменшення собівартості відповідних технологій і збільшення їхньої присутності на енергетичному ринку [7].

Питаннями дослідження розвитку сонячної енергетики також займалися і вітчизняні науковці, так, наприклад, Сергій Позігун і Сергій Голушко у своїх дослідженнях продемонстрували важливість сонячної енергетики не тільки в межах цивільного життя країни, а ще й в автономних військових системах з розвитку і зв'язку. Науковці доводять, що сонячні панелі є безшумними джерелами живлення та мають значний віковий ресурс, порівняно з технологіями традиційної енергетики або вітрової енергетики. На думку науковців, висока адаптивність розмірів сонячних електростанцій обумовлює значну привабливість сонячної енергетики. Було здійснено порівняльний аналіз сонячних елементів, які створені на базі різних типів матеріалів. Широкий спектр матеріалів, які використовуються для виготовлення сонячних панелей, дозволяє адаптувати сонячну енергетику як для індивідуальних споживачів (цивільних або військових), так і в цілях промислової генерації. Окремо науковці відзначають високу технологічність сонячної енергетики, яка уже сьогодні починає пропонувати плівкові технології, які можна застосовувати як вікна в приміщеннях. Майбутній вектор розвитку сонячної енергетики базуватиметься на підвищенні ефективності сонячних панелей і збільшенні терміну їхньої експлуатації, що зробить сонячну енергетику більш привабливою не тільки для цивільного населення, але і серед військових автономних систем малої потужності [3].

### **Формулювання цілей статті**

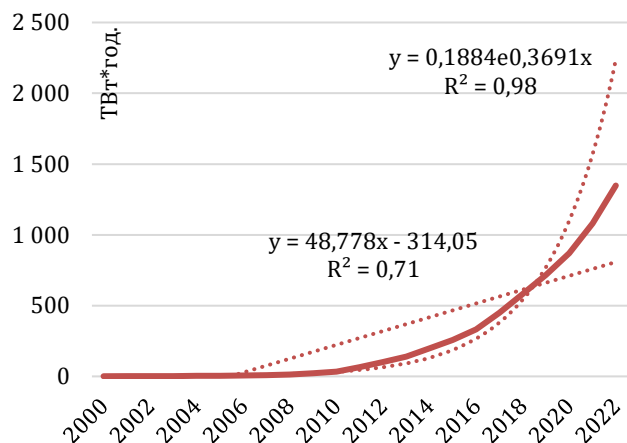
Метою публікації є дослідження факторів, що детермінують економічну ефективність і розвиток сонячної енергетики, аналізуючи досвід країн-лідерів з упровадження цього виду альтернативного енергозабезпечення.

## Матеріали і методи дослідження

Для досягнення цілей дослідження було використано такі загальнонаукові методи, як аналіз і синтез, узагальнення й індукція, а також спеціальні методи – економіко-статистичний і економіко-математичний, зокрема кореляційно-регресійний метод, моделювання панельних даних у програмі Rstudio.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Аналізуючи розвиток сонячної енергетики у світі, а саме показники обсягів річної генерації електроенергії з сонячних електростанцій (СЕС), можна побачити, що до кінця 2009 р. сонячна енергетика перебувала у своїй експериментальній стадії. Обсяги річної генерації електроенергії з СЕС були максимально наближені до нуля, відповідно, і частка сонячної енергетики в структурі глобального енергетичного комплексу була на відповідному низькому рівні. Однак розвиток технологій і масштабування виробництва відповідних систем генерації зумовили можливість появи технологій СЕС на глобальному енергетичному ринку в значимій кількості. Як видно з рис. 1, глобальну динаміку генерації електроенергії з СЕС найкраще апроксимує саме експоненційний тренд з коефіцієнтом детермінації на рівні 98% і показником щорічного приросту на рівні 36,91%. Таким чином, кожного року сонячна енергетика збільшує свій потенціал, порівняно з попереднім роком, майже на 37%. Якщо аналізувати наведену на рис. 1 динаміку розвитку сонячної енергетики з позиції номінальних величин, то середній щорічний приріст обсягу генерації електроенергії з СЕС за період 2000-2022 рр. склав 48,8 ТВт\*год. Наведений показник отримано з лінійного тренду, коефіцієнт детермінації якого складає понад 70%. На кінець 2022 р. глобальний показник генерації електроенергії з СЕС склав понад 1300 ТВт\*год.



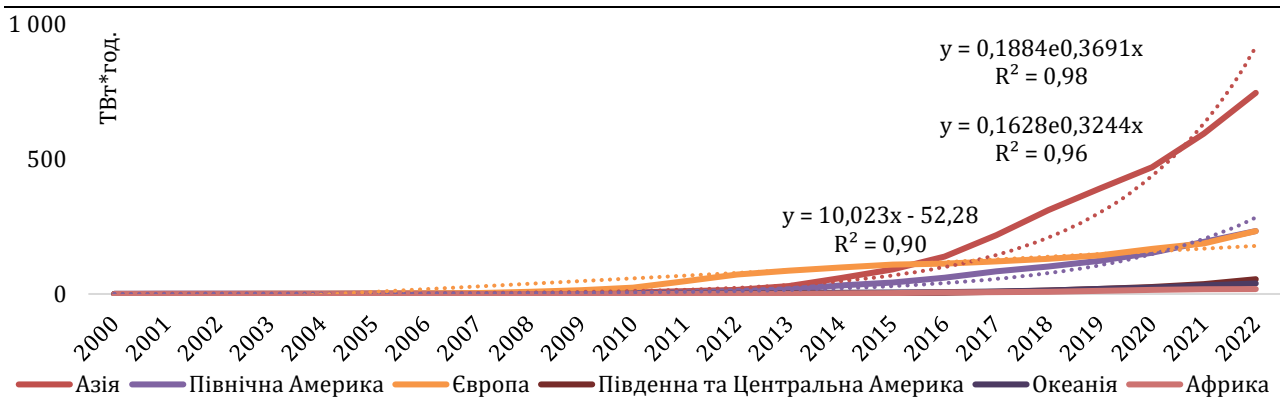
**Рис. 1. Динаміка щорічної генерації електроенергії з СЕС у світі**  
Джерело: [5, власні розрахунки].

Для поглиблення аналізу розвитку сонячної енергетики у світі розглянемо показник обсягу генерації електроенергії з СЕС у розрізі окремих регіонів світу, а саме: Азії, Північної Америки, Європи, Південної та Центральної Америки та Океанії. Як видно з рис. 2, основу глобального розвитку сонячної енергетики, що має експоненційний характер розвитку, було забезпечено за рахунок Азії, яка на кінець 2022 р. складала майже половину всього глобального потенціалу сонячної енергетики. Китай також має експоненційний тренд розвитку сонячної енергетики (коефіцієнт детермінації 98%), а темп щорічного приросту обсягів генерації електроенергії з СЕС ідентичний світовому показнику (36,91%).

Друге та третє місце за рівнем розвитку сонячної енергетики посідають Північна Америка та Європа, при чому на кінець 2022 р. обидва регіони мали ідентичний обсяг генерації електроенергії з СЕС, а саме близько 250 ТВт\*год. Потрібно зазначити, що під час детального аналізу трендів розвитку сонячної енергетики серед Північної Америки та Європи існує певна відмінність. Для Північної Америки найкраще підходить експоненційний тренд (коефіцієнт детермінації якого сягає 96%), тоді як розвиток сонячної енергетики в Європі краще апроксимується звичайним лінійним трендом (коефіцієнт детермінації якого складає 90%). Щорічний приріст сонячної енергетики в Північній Америці складає 32,44%, що на 4,47 процентні пункти менше за аналогічний показник для Азії. Щорічний приріст виробництва електроенергії з СЕС у Європі складає 10 ТВт\*год, що в понад чотири рази менше за світовий показник.

Усі інші регіони світу за своїм номінальним показником рівня розвитку сонячної енергетики мають несуттєвий внесок у загальносвітовий розвиток сонячної енергетики – сумарний обсяг генерованої електроенергії у Південній і Центральній Америці, Океанії та Африці на кінець 2022 р. склав приблизно 100 ТВт\*год, що становить менше 10% від світового обсягу генерації електроенергії з СЕС.

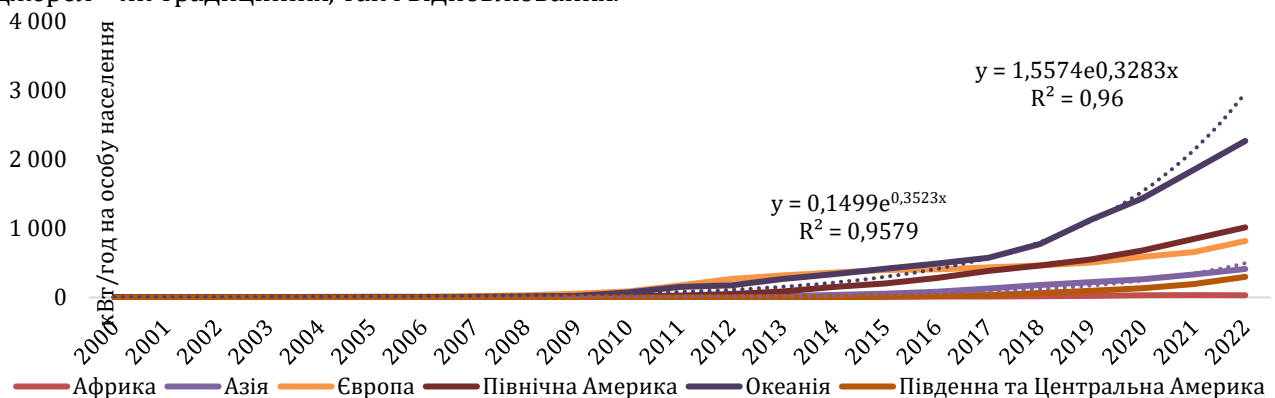
Аналіз розвитку сонячної енергетики окремого регіону з позиції динаміки показника сумарної генерації електроенергії з СЕС не вповні відображає ефективність розвитку сонячної енергетики регіону.



**Рис. 2. Динаміка розвитку сонячної енергетики серед різних регіонів світу**

*Джерело: [5, власні розрахунки].*

Для цього необхідно розглянути показник генерації електроенергії з СЕС у розрахунку на одну особу населення відповідного регіону (рис. 3). Попри те, що Азія є абсолютним лідером з розвитку сонячної енергетики у світі (генерує половину всього світового обсягу електроенергії з СЕС), за показником генерації електроенергії з СЕС на одну особу населення вона займає лише четверте місце у світі. 2022 р. на одного мешканця Азії припадало лише 450 кВт\*год виробленої електроенергії з СЕС. Аналогічно до номінального показника розвитку сонячної енергетики присутній експоненційний тренд росту генерації електроенергії з СЕС на одну особу (коефіцієнт детермінації 98%) з темпом приросту у 32,84%. Цікаво відзначити, що за обсягом генерації на одну особу населення Азія максимально наближена до Африки. Друге та третє місце посідають Північна Америка та Європа, відповідно, водночас на різних часових діапазонах їх лідерство змінювалось: з 2009 до 2017 рр. лідерство належало Європі, а з 2018 р. ініціативу перехопила Північна Америка. Абсолютним лідером за обсягом генерації електроенергії з СЕС є Океанія (2022 р. на одну особу припадало понад 2000 кВт\*год виробленої електроенергії), прослідковується чіткий експоненційний тренд розвитку цього показника з коефіцієнтом детермінації 96% і щорічним темпом росту 32,83%. Таке широке використання сонячних електростанцій серед населення Океанії можна пояснити географічним розміщенням регіону, що максимально сприяє розвитку сонячної енергетики, а також обмеженим доступом до електроенергії з традиційних джерел (типу ядерних електростанцій або теплоелектростанцій). Водночас можна пояснити лідерство Азії за номінальними обсягами генерації електроенергії з СЕС значною чисельністю населення, енергетичні потреби якого з кожним роком збільшуються, у результаті чого відбувається процес нарощування споживання електроенергії з усіх можливих джерел – як традиційних, так і відновлюваних.



**Рис. 3. Динаміка генерації електроенергії з СЕС на одну особу серед різних регіонів світу**

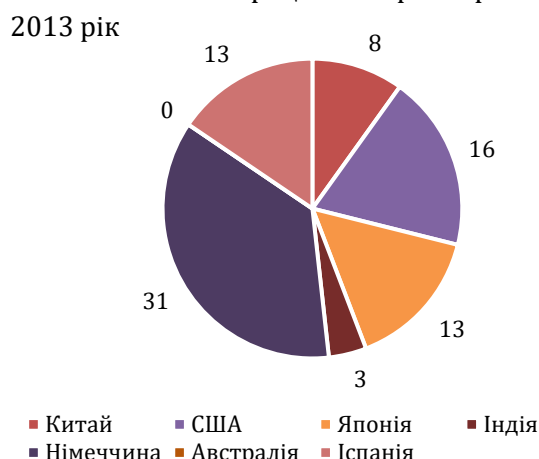
*Джерело: [6, власні розрахунки].*

Аналіз розвитку сонячної енергетики в різних країнах показує, що основна частка всієї світової генерації електроенергії з СЕС припадає на 7 країн, перелік яких не змінювався з 2013 р.: Китай, Індія, Японія (Азія), США (Північна Америка), Німеччина, Іспанія (Європа) та Австралія (Океанія). 2013 р. на зазначені 7 країн-лідерів припадало 63,4% усієї світової генерації, тоді як 2022 р. на ці самі країни припадало уже 74,6% усієї світової генерації, що дає підстави стверджувати, що розвиток сонячної енергетики у світі забезпечується невеликою кількістю країн.

Розглянемо обсяги генерації електроенергії з СЕС серед 7 країн-лідерів з розвитку сонячної енергетики у світі 2013 р. (рис. 4). Абсолютним лідером була Німеччина, що генерувала

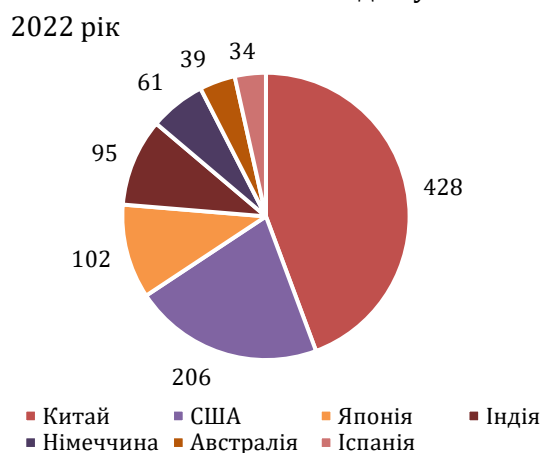
31 ТВт\*год електроенергії, друге місце належало США (16 ТВт\*год генерації електроенергії), третє місце ділили між собою Японія та Іспанія, які генерували по 13 ТВт\*год електроенергії, Китай посідав 4 місце з обсягом генерації 8 ТВт\*год електроенергії.

Протягом дев'яти років структура обсягів генерації електроенергії з СЕС серед 7 країн-лідерів значно трансформувалась (рис. 5). Обсяг генерації в Китаї з 2013 до 2022 рр. збільшився в 53 рази (з 8 до 428 ТВт\*год). Сьогодні саме Китай є найбільшим виробником електроенергії з СЕС. Друге місце досі займають США, де обсяг генерації збільшився в 13 разів, що є також суттєвим приростом (на кінець 2022 р. США щорічно генерували до 206 ТВт\*год електроенергії з СЕС). Третє та четверте місце поділили між собою країни Азії: Японія та Індія відповідно. В Індії обсяг генерації збільшився в 32 рази (з 3 до 95 ТВт\*год), а в Японії обсяг генерації збільшився у 8 разів. Звичайно, такі значні показники приросту обсягів генерації електроенергії з СЕС пов'язані з малою вихідною базою порівняння, оскільки, як уже згадувалось вище, до 2013 р. обсяги світової генерації електроенергії з СЕС були максимально наближені до нуля.



**Рис. 4. Обсяги генерації електроенергії з СЕС (ТВт\*год) серед 7 країн-лідерів розвитку сонячної енергетики у світі 2013 р.**

*Джерело: [5, власні розрахунки].*



**Рис. 5. Обсяги генерації електроенергії з СЕС (ТВт\*год) серед 7 країн-лідерів розвитку сонячної енергетики у світі 2022 р.**

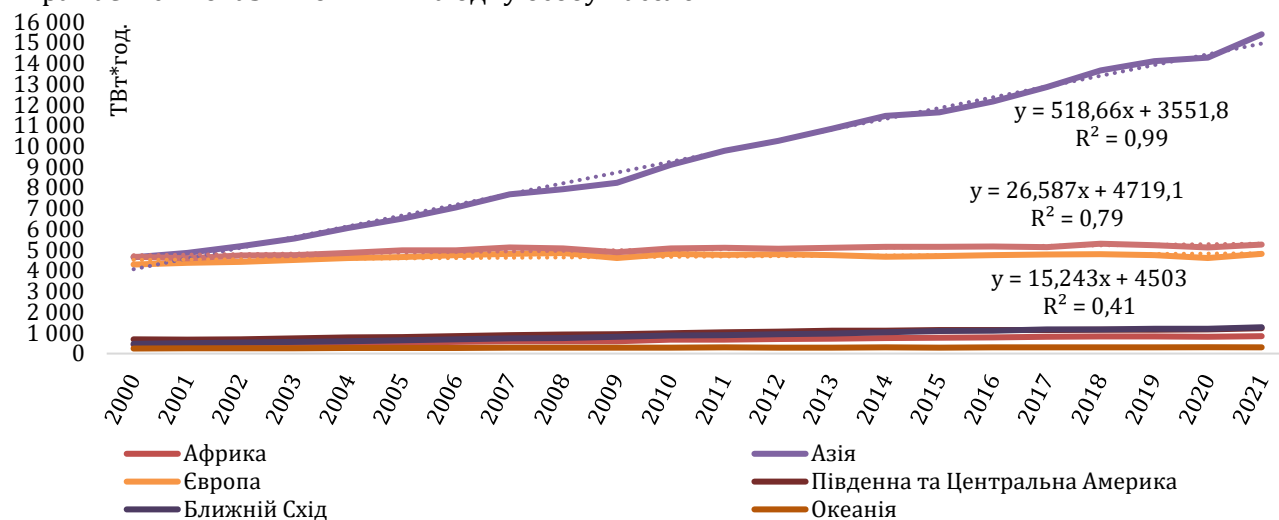
*Джерело: [5, власні розрахунки].*

Як відомо, сьогодні світ перебуває у стадії глобалізації, що характеризується значним рівнем кооперації між країнами та наявністю єдиного глобального ринку для будь-яких технологій чи груп товарів, відтак волатильність цін у різних регіонах світу на той чи інший товар максимально наближена до нуля, а номінальна величина ціни максимально наближена до середньоринкової. Не виключенням є і технології сонячної енергетики, які протягом останніх десятиліть значно еволюціонували за рівнем ефективності, при цьому їхня собівартість значно зменшилась. Таким чином, вважаємо, під час оцінювання факторів впливу на розвиток сонячної енергетики в різних регіонах світу ефективність технологій і їхню собівартість не варто включати до аналізу, оскільки кожний регіон світу має однаковий рівень доступу до відповідних технологій на світовому ринку.

Водночас існують інші фактори, які можуть детермінувати розвиток сонячної енергетики в різних регіонах світу. Одним з таких факторів, що можуть визначити розвиток сонячної енергетики, є попит на електроенергію в кожному з регіонів. Як можна побачити з рис. 6, саме Азія, яка є лідером з розвитку сонячної енергетики, демонструє одне з найбільших зростань попиту на електроенергію, яке можна апроксимувати лінійним трендом з коефіцієнтом детермінації на рівні 99% і маржинальним річним приростом 518 ТВт\*год. Наступні за обсягом попиту на електроенергію є Північна Америка та Європа, сумарний попит на електроенергію яких наближається до рівня Азії. Кожний з цих регіонів також демонструє певний тренд до збільшення попиту, але водночас маржинальний річний приріст цього показника значно менший за рівень Азії: для Північної Америки це 28,6 ТВт\*год, а для Європи це 15,24 ТВт\*год. Усі інші регіони (Африка, Південна та Центральна Америка, Близький Схід та Океанія) мають досить малий попит на електроенергію, чим, власне, і пояснюється низький рівень розвитку сонячної енергетики серед цих регіонів.

Варто зазначити, що технології, які використовуються у сонячній енергетиці, є інноваційними, а їх виробництво ще не демонструє ефекту масштабу, у результаті цього сонячні електростанції великої потужності потребують значних інвестицій, порівняно з технологіями традиційної енергетики. Таким чином, доцільно враховувати як фактор розвитку сонячної

енергетики ще і рівень економічного розвитку того чи іншого регіону, який найкраще виражається показником ВВП на одну особу населення.



**Рис. 6. Динаміка попиту на електроенергію серед різних регіонів світу**

*Джерело: [4, власні розрахунки].*

Розглянемо кореляційну залежність розвитку сонячної енергетики від ВВП на одну особу населення та попиту на електроенергію серед 7 країн-лідерів з розвитку сонячної енергетики у світі. Як видно з табл. 1, для двох країн, що забезпечують основну частку генерації електроенергії з сонячних СЕС (Китай і США), коефіцієнт кореляції між розвитком сонячної енергетики та ВВП на одну особу населення складає 84% та 91% відповідно, на рівні значимості менше за 0,001. Досить значні величини цього коефіцієнта кореляції спостерігаються для Німеччини та Індії (76% та 78% відповідно, на рівні значимості менше за 0,01). Для Австралії та Іспанії також присутній позитивний кореляційний зв'язок між рівнем розвитку сонячної енергетики та рівнем економічного розвитку, але значення показників коливаються в діапазоні від 36% до 46% на рівні значимості менше за 10%. Єдиним виключенням є Японія, для якої відсутній будь-який зв'язок між рівнем розвитку сонячної енергетики та рівнем економічного розвитку (коефіцієнт кореляції наближений до нуля).

Під час аналізу коефіцієнта кореляції між обсягом генерації сонячної енергії та попитом на електроенергію також констатуємо наявність позитивного лінійного зв'язку між вказаними величинами. Для Китаю значення цього коефіцієнта складає 83%, для США 61%, для Індії 83% і для Австралії 68% за рівня значимості менше від 0,01.

**Таблиця 1. Кореляційна залежність розвитку сонячної енергетики від ВВП на одну особу населення та попиту на електроенергію серед 7 країн-лідерів розвитку сонячної енергетики у світі**

Показники	Австра-лія	Китай	Німеч-чина	Індія	Японія	Іспанія	США
Коефіцієнт кореляції між обсягом генерації сонячної енергії та ВВП на одну особу населення	0,46	0,84	0,76	0,78	-0,1	0,36	0,91
Коефіцієнт кореляції між обсягом генерації сонячної енергії та попитом на електроенергію	0,68	0,83	-0,66	0,83	-0,46	0,08	0,61
Рівень значимості коефіцієнта кореляції між обсягом генерації сонячної енергії та ВВП на одну особу населення	0,0264	0,00001	0,00025	0,00012	0,65262	0,08868	0,00000
Рівень значимості коефіцієнта кореляції між обсягом генерації сонячної енергії та попитом на електроенергію	0,0004	0,00001	0,00059	0,00001	0,02763	0,70669	0,00196

*Джерело: власні розрахунки.*

Від'ємне значення коефіцієнта кореляції для Німеччини з високою ймовірністю пояснюється різким скороченням постачання природного газу з росії в Німеччину в 2022 р., що спровокувало утворення дефіциту теплової енергії, який було компенсовано нарощуванням споживання електроенергії, і далі різке підвищення попиту на електроенергію задовольнялось не збільшенням генерації електроенергії з відновлюваних джерел, а за рахунок відновлення роботи зупинених теплоелектростанцій, що працюють на вугіллі.

Враховуючи той факт, що з 2013 по 2022 рр. склад 7 країн-лідерів розвитку сонячної енергетики не змінювався, а їхня сумарна частка у світовій генерації електроенергії з СЕС складала від 63% до 75%, розглянемо вплив таких факторів, як попит на електроенергію та

**Таблиця 2. Коди нульових членів панельної регресійної залежності розвитку сонячної енергетики від попиту на електроенергію та рівня економічного розвитку серед 7 країн-лідерів з розвитку сонячної енергетики**

Назва країни	Код країни для панельної регресії
Австралія	1
Китай	2
Німеччина	3
Індія	4
Японія	5
Іспанія	6
Китай	7

*Джерело: власні розрахунки.*

Отриманий результат говорить про те, що кожна додаткова одиниця попиту на електроенергію в середньому задовольняється лише на 4,19% завдяки сонячній енергетиці. Порівняння маржинальних коефіцієнтів двох пояснювальних факторів говорить про те, що вплив попиту на електроенергію на розвиток сонячної енергетики в 28 разів сильніший, ніж вплив рівня економічного розвитку країни.

Значення розрахованих нульових регресійних коефіцієнтів для кожної з країн, які брали участь у розрахунку панельної регресії, наведено на рис. 8. Кожний з нульових регресійних коефіцієнтів є також значимим за t-критерієм Стьюдента на рівні значимості менше за 0,001.

#### **Висновки та перспективи подальших розвідок**

Проведене дослідження дало підстави для таких висновків: на часовому горизонті з 2000 по 2022 рр. включно щорічні темпи росту обсягів генерації електроенергії з СЕС у світі склали

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t )
1	-76.0563	18.1388	-4.1930	4.657e-05 ***
2	-131.3223	16.9179	-7.7623	1.138e-12 ***
3	-65.6395	15.9349	-4.1192	6.223e-05 ***
4	-32.2109	8.3111	-3.8757	0.0001577 ***
5	-76.8996	15.4873	-4.9653	1.822e-06 ***
6	-44.3069	12.0780	-3.6684	0.0003370 ***
7	-210.4164	21.8027	-9.6509	< 2.2e-16 ***

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

**Рис. 8. Розраховані нульові члени панельної регресійної залежності розвитку сонячної енергетики від попиту на електроенергію та рівня економічного розвитку серед 7 країн-лідерів з розвитку сонячної енергетики у світі в Rstudio.** *Джерело: власні розрахунки.*

рівень економічного розвитку та обсяг генерації електроенергії з СЕС саме на базі цих країн на часовому горизонті від 2000 до 2022 рр. включно. Для цього використаємо панельну регресію, яка враховує як просторовий, так і часовий компоненти. Коди, якими позначено кожну з країн, наведено в табл. 2.

Залежною змінною у в цій моделі є саме обсяг річної генерації електроенергії з СЕС у ТВт\*год. Пояснювальними змінними  $x_i$  і  $p$ , відповідно, є річний ВВП на одну особу населення (дол. США) та річний попит на електроенергію ТВт\*год.

Розрахунок панельної регресії проводився в середовищі Rstudio (рис. 7). Відповідно до отриманих результатів, маємо модель з коефіцієнтом детермінації в 58%, що говорить про наявність інших додаткових факторів, які визначають розвиток сонячної енергетики у світі. Маржинальні коефіцієнти для незалежних змінних є адекватними відповідно до t-критерію Стьюдента на рівні значимості менше за 0,001. Значення маржинального коефіцієнта для незалежної змінної ВВП на одну особу населення складає 0,00155 ТВт\*год, тобто при збільшенні ВВП на одну особу населення на 1 дол. США кількість виробленої електроенергії з СЕС збільшується на 0,00155 ТВт\*год. Маржинальний коефіцієнт для попиту на електроенергію складає 0,04188 ТВт\*год, тобто при збільшенні попиту на електроенергію на 1 ТВт\*год кількість виробленої електроенергії з СЕС збільшується на 0,04188 ТВт\*год.

```
Call:
plm(formula = y ~ x + p, data = panel_data, effect = "individual",
     model = "within")
```

Balanced Panel: n = 7, T = 23, N = 161

Residuals:

Min.	1st Qu.	Median	3rd Qu.	Max.
-98.133	-18.182	-2.419	12.069	169.826

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t )
x	0.00155382	0.00035335	4.3974	2.049e-05 ***
p	0.04188064	0.00331031	12.6516	< 2.2e-16 ***

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Total Sum of Squares: 472330  
Residual Sum of Squares: 197620  
R-Squared: 0.5816  
Adj. R-Squared: 0.55958  
F-statistic: 105.646 on 2 and 152 DF, p-value: < 2.22e-16

**Рис. 7. Результати розрахунку залежності розвитку сонячної енергетики від попиту на електроенергію та рівня економічного розвитку серед 7 країн-лідерів з розвитку сонячної енергетики у світі за допомогою панельної регресії в Rstudio.** *Джерело: власні розрахунки.*

37%; основну роль у збільшенні обсягів генерації електроенергії з СЕС у світі грали такі регіони, як Азія, Північна Америка та Європа; кожний з регіонів має значну концентрацію генерації електроенергії з СЕС серед країн, зокрема Азія представлена Китаєм, Індією та Японією; Північна Америка представлена США; Європа представлена Німеччиною та Іспанією; Океанія представлена

Австралією; загалом основними лідерами з розвитку сонячної енергетики у світі є дві країни: Китай та США; шляхом кореляційного аналізу було підтверджено наявність позитивного лінійного взаємозв'язку між обсягом генерації електроенергії з СЕС та такими показниками, як ВВП на одну особу населення та попитом на електроенергію; розрахована панельна регресія залежності розвитку сонячної енергетики від попиту на електроенергію та рівня економічного розвитку серед 7 країн-лідерів з розвитку сонячної енергетики у світі підтвердила позитивний вплив пояснювальних змінних на розвиток сонячної енергетики; збільшення ВВП на одну особу населення на 1 дол. США призводить до збільшення генерації електроенергії з СЕС на 0,00155 ТВт\*год; збільшення попиту на електроенергію на 1 ТВт\*год призводить до збільшення генерації електроенергії з СЕС на 0,04188 ТВт\*год; порівняння маржинальних коефіцієнтів двох пояснювальних факторів свідчить про те, що попит на електроенергію є значно впливовішою детермінантою розвитку сонячної енергетики, аніж рівень економічного розвитку країни.

## Література

1. Визначення та цілі сталого розвитку. URL: <https://www.iisd.org/mission-and-goals/sustainable-development>.
2. Переваги сонячної енергетики над іншими типами енергетики. URL: [https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition?gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxAARIsAHkOiu3MKauA04D3QwRvUOXHzf60LMBukuMvV8ZR0WuSY5-05CK6aLr6eokaAk4gEALw\\_wcB](https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition?gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxAARIsAHkOiu3MKauA04D3QwRvUOXHzf60LMBukuMvV8ZR0WuSY5-05CK6aLr6eokaAk4gEALw_wcB).
3. Позігун С., Голушко С., Вахнін О., Павленко І., Іванов В. Перспективи розвитку сонячної енергетики в світі та в Україні: використання пристроїв сонячної енергетики для автономного живлення енергією систем розвідки та зв'язку. *Збірник наукових праць національної академії державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки*. 2020. Том 82 № 1 (2020). URL: [https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military\\_tech/article/view/544](https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military_tech/article/view/544).
4. Electricity demand by country. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-demand>.
5. Annual change in solar energy generation. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-change-solar?tab=table>.
6. Per capita energy consumption from solar. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-solar>.
7. Ramalingam Senthil. Recent innovations in solar energy education and research towards sustainable energy development. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/2142870>.
8. Heffron R., Halbrügge S., Körner M.-F., Obeng-Darko N.A., Sumarno T., Wagner J., Weibelzahl M. Justice in solar energy development. *Solar Energy*. 2021. Vol. 218. P. 68-75. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X21000980>.
9. Güney T. Solar energy and sustainable development: evidence from 35 countries. *International Journal of Sustainable Development World Ecology*. 2021. Vol. 29. Issue 2. P. 187-194. URL: [https://www.researchgate.net/publication/354955667\\_Solar\\_energy\\_and\\_sustainable\\_development\\_evidence\\_from\\_35\\_countries](https://www.researchgate.net/publication/354955667_Solar_energy_and_sustainable_development_evidence_from_35_countries).

## References

1. Vyznachennia ta tsili staloho rozvytku. [Definition and goals of sustainable development]. Available at: <https://www.iisd.org/mission-and-goals/sustainable-development>.
2. Perevahy soniachnoi enerhetyky nad inshymy typaramy enerhetyky. [Advantages of solar energy over other types of energy]. Available at: [https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition?gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxAARIsAHkOiu3MKauA04D3QwRvUOXHzf60LMBukuMvV8ZR0WuSY5-05CK6aLr6eokaAk4gEALw\\_wcB](https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition?gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxAARIsAHkOiu3MKauA04D3QwRvUOXHzf60LMBukuMvV8ZR0WuSY5-05CK6aLr6eokaAk4gEALw_wcB).
3. Pozihun, S., Holushko, S., Vakhnin, O., Pavlenko, I., Ivanov, V. (2020). «Prospects for the development of solar energy in the world and in Ukraine: the use of solar energy devices for autonomous power supply of intelligence and communication systems». *Zbirnyk naukovykh prats' natsional'noi akademii derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Serii: vijs'kovi ta tekhnichni nauky*. Vol. 82 № 1 (2020). Available at: [https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military\\_tech/article/view/544](https://periodica.nadpsu.edu.ua/index.php/military_tech/article/view/544).
4. Electricity demand by country. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-demand>.
5. Annual change in solar energy generation. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/annual-change-solar?tab=table>.
6. Per capita energy consumption from solar. Available at: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-solar>.
7. Ramalingam Senthil. Recent innovations in solar energy education and research towards sustainable energy development. Available at: <https://bibliotekanauki.pl/articles/2142870>.
8. Heffron, R., Halbrügge, S., Körner, M.-F., Obeng-Darko, N.A., Sumarno, T., Wagner, J., Weibelzahl, M. (2021). «Justice in solar energy development». *Solar Energy*. Vol. 218. pp. 68-75. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X21000980>.
9. Güney, T. (2021). «Solar energy and sustainable development: evidence from 35 countries». *International Journal of Sustainable Development World Ecology*. Vol. 29. Issue 2. pp. 187-194. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/354955667\\_Solar\\_energy\\_and\\_sustainable\\_development\\_evidence\\_from\\_35\\_countries](https://www.researchgate.net/publication/354955667_Solar_energy_and_sustainable_development_evidence_from_35_countries).

Стаття надійшла до редакції 05.09.2023 р.